

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кровяков Сергій Олексійович

УДК 691.327.32

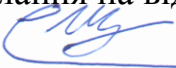
ДИСЕРТАЦІЯ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ
ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Спеціальність 05.23.05 - будівельні матеріали і вироби

Галузь знань – 19, Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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


Кровяков С.О.

Науковий консультант:

Мішутін Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Кривяков С.О. Експериментально-теоретичні основи підвищення довговічності легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці експериментально-теоретичних основ і вдосконаленню практичних методів отримання бетонів на легких заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих.

Легкі бетони на пористих заповнювачах є ефективними для цілого ряду гідротехнічних споруд, зокрема тонкостінних. Для галузі суднобудування бетон на пористих заповнювачах є безальтернативним видом легкого бетону, при цьому Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування. Відповідно задача підвищення якості та довговічності легких бетонів для тонкостінних споруд є актуальною.

Для управління структурою легких бетонів використовують рецептурні методи, які переважно аналогічні відомим методам для важких бетонів: застосування високомарочних цементів і міцних заповнювачів, ефективних модифікаторів, проектування складів з низьким В/Ц тощо, а також технологічні методи, пов'язані з організацією технологічного процесу виготовлення бетону, зокрема з попередньою підготовкою та обробкою заповнювача.

На бетон тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд впливають різні експлуатаційно-кліматичні чинники, які викликають корозійні процеси всіх типів. За рахунок забезпечення високої водонепроникності бетону в його структурі значно уповільнюється дія всіх процесів, пов'язаних з фільтрацією. При одночасній дії заморожування і відтаювання не менш важливою з позиції довговічності є морозостійкість бетону.

Функціональне призначення гідротехнічних споруд обумовлює певні особливості умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях, основні з яких визначаються наявністю трьох відмінних зон впливу експлуатаційного середовища: підводної, надводної, та зони змінного рівня води. Це утворює умови для існування перманентного нерівноважного стану бетону по висоті та перетину конструкції, який передбачає протікання процесу адаптації матеріалу до умов експлуатації. Формування структури легких бетонів відбувається шляхом взаємодії двох капілярно-пористих середовищ – заповнювача і цементно-піщаної матриці. Внаслідок такої взаємодії протікають процеси обміну вологи та пов'язані з ними процеси об'ємних деформацій, величина і кінетика яких визначається капілярною пористістю. Поведений аналіз дозволив сформулювати робочу гіпотезу дисертації. Підвищення фізико-механічних характеристик бетону на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд, що визначають його довговічність, може бути досягнуто шляхом регулювання взаємодії між цементно-піщаною матрицею та заповнювачем в процесі структуроутворення і експлуатації бетону, спрямованого на покращення їх сумісної роботи, зокрема за рахунок зниження вологісних деформацій заповнювача. При цьому має забезпечуватися низька проникність як матриці, так і заповнювача при його роботі в даній матриці. Задача вирішується шляхом створення структури зі зниженою капілярною пористістю цементно-піщаної матриці, зокрема в контактній зоні заповнювача. Ефективний вплив на структуру легких бетонів може бути здійснений за рахунок застосування таких рецептурних методів, як введення модифікаторів різного типу і дисперсного армування, а також технологічних методів обробки поверхні пористого заповнювача, спрямованих на покращення його роботи в цементно-піщаній матриці в вологих умовах експлуатації.

Натурні обстеження тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд показали, що найбільш значні пошкодження бетону в результаті експлуатаційних впливів спостерігаються в зоні змінного рівня води. Також розповсюджені дефекти, пов'язані з фільтрацією води крізь конструкції та дією

заморожування і відтаювання. Тобто довговічність бетонів даних конструкцій в найбільшій мірі обумовлюється стійкістю до впливу вологи при фільтрації, а також до заморожування-відтаювання. Узагальнено вимоги до легкого бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд з врахуванням умов експлуатації. Проаналізовано механізми корозійного пошкодження легких бетонів в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд. Розроблено неруйнуючий спосіб визначення однорідності бетону в конструкціях та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, які ґрунтуються на визначенні зміни технологічної пошкоженості матеріалу. Запропоновано новий метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі води-середовища.

З врахуванням особливостей умов експлуатації тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд запропоновано два технологічних методи підвищення довговічності та механічних властивостей легких бетонів. Перший – обробка пористого заповнювача цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші. Це зміцнює поверхневий шар заповнювача та контактної зони, підвищуючи їх однорідність, сприяє перетворенню пористості заповнювача у замкнуту, покращує однорідність заповнювача. Другий – гідрофобізація поверхні пористого заповнювача. Це знижує поглинання води з цементно-піщаної матриці, за рахунок чого дозволяє знизити В/Ц суміші без погіршення технологічності, а також у 4..5 разів зменшує об'ємні зміни зерен заповнювача в матриці в процесі структуроутворення. Обидва запропонованих методи управління сумісною роботою заповнювача і матриці мають здійснюватися в комплексі з рецептурними рішеннями, спрямованими на підвищення довговічності.

Проаналізовано динаміку проникнення цементної суспензії в зерна керамзиту при обробці. Встановлено, що за рахунок обробки пористого заповнювача суспензією зменшується середній розмір пор керамзитобетону та підвищується однорідність пор за розмірами, а також на 2 МПа і більше зростає його міцність. Встановлені закономірності вологісних деформацій штучного

пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умовах твердіння легкобетонної суміші. Показано, що об'ємні вологісні деформації гідрофобізованого гравію в воді та у цементно-піщаному розчині є в 4..5 разів меншим за деформації необробленого гравію. Встановлено, за рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М міцність керамзитобетону зростає на 2-2,5 МПа при рівноважній вологості та на 3-4 МПа у водонасиченому стані.

Ефективність запропонованих технологічних методів управління сумісною роботою заповнювача і матриці в комплексі з рецептурними методами підвищення довговічності легких бетонів досліджена з використанням методик планування експерименту та експериментально-статистичного моделювання. Проаналізовано вплив модифікаторів, фібри та технологічного прийому обробки гравію цементною суспензією на структуру, властивості та довговічність керамзитобетону. За рахунок обробки гравію та використання мікрокремнезему, суперпластифікатору і дисперсного армування отримано керамзитобетони з міцністю при стиску до 42..44 МПа і міцністю на розтяг при згині до 7 МПа, що задовольняє вимогам для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема вимогам Морського реєстру до суднобудівних керамзитобетонів. Водонепроникність модифікованих легких бетонів складає від W4 до W14, морозостійкість – від F400 до F600. За рахунок використання раціональної кількості модифікаторів водонепроникність керамзитобетонів підвищується на дві марки і більше, а морозостійкість на 100 циклів. За рахунок обробки гравію цементною суспензією зростає водонепроникність і міцність при стиску керамзитобетону. Мікроскопічний аналіз структури легких бетонів на обробленому цементною суспензією керамзиті виявив кольматацію пор і тріщин в зовнішній оболонці заповнювача на глибині до 1,2-1,6 мм, а також зниження пористості контактної зони.

Показана можливість застосування залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей конструкційних керамзитобетонів, які також можуть бути використаними в якості суднобудівних. Встановлено,

що міцність і довговічність декоративних керамзитобетонів майже не відрізняється від даних показників для контрольних бетонів аналогічних складів. За рахунок технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією покращується насиченість кольору декоративних бетонів та зростає їх міцність при стиску та довговічність.

Досліджено структуру та властивості модифікованих кольматуючою і пластифікуючою добавками суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів, зокрема на гідрофобізованому гравії. Застосування легких бетонів дозволяє збільшити вантажопідйомність плавучих споруд, підвищити комфортність перебування на них людей і поліпшити умови роботи технологічного обладнання. До суднобудівних бетонів висуваються найбільш високі вимоги щодо довговічності в жорстких умовах експлуатації, при цьому для конструкцій плавучих споруд важливою вимогою є забезпечення мінімальної можливої вологості бетону «сухого» боку конструкцій.

Встановлено, що гідрофобізація поверхні пористого гравію знижує В/Ц легкобетонної суміші, зменшує вологісні деформації заповнювача, а також перешкоджає його розм'якшенню в вологих умовах. Цементно-піщана матриця в контактній зоні бетону на гідрофобізованому гравії має щільну структуру з низькою кількістю рівномірно розподілених пор. Для обробки пористого гравію раціональною є 0,6-0,8% концентрація кремнійорганічної рідини 136-157М в емульсії. Модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони за рахунок введення добавок Пенетрон А і С-3, а також при використанні гідрофобної обробки поверхні гравію, мають міцність до 45 МПа, водонепроникність від W8 до W12, морозостійкість не нижче F500 і середню густину в водонасиченому стані 1750..1860 кг/м³, що відповідає вимогам галузевих стандартів та забезпечує високу довговічність матеріалу. При застосуванні кольматуючої добавки і гідрофобної обробки гравію вологість керамзитобетону, що експлуатується в контакті з водою, знижується на третину, середня густина на 30..40 кг/м³, а теплопровідність на 0,09-0,10 Вт/(м×К).

Проаналізовані властивості і довговічність бетонів на різних типах пористих заповнювачів. Встановлена можливість підвищення міцності і довговічності бетонів на вапняковому щебені за рахунок застосування суперпластифікатору, мікрокремнезему і обробки заповнювача цементною суспензією. Досягнутий рівень міцності (>50МПа) водонепроникності (W12) і морозостійкості (F400) модифікованого бетону на вапняковому щебені забезпечує підвищену довговічність даного матеріалу і дає змогу його використання у ряді конструкцій гідротехнічних споруд. Показана можливість застосування пористих пісків в легких бетонах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних. Середня густина модифікованих керамзитобетонів на суміші кварцового піску і гранульованого піноскла складає 1400-1440 кг/м³, водонепроникність W10-W12, морозостійкість F450-F550, міцність при стиску до 21 МПа, міцність на розтяг при згині до 5 МПа що дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд за рахунок додаткового зниження ваги конструкції при забезпеченні необхідного рівня міцності та високої довговічності матеріалу.

Проведено впровадження отриманих результатів досліджень. З використанням комплексу експериментально-статистичних моделей та методу Монте-Карло здійснено вибір оптимальних складів керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. Розроблено та затверджено регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків. Розроблено та знаходиться на стадії обговорення і погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий. Результати досліджень впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі.

Ключові слова: легкий бетон, керамзитобетон, заповнювач, модифікатори, обробка, довговічність, водонепроникність, морозостійкість, тонкостінна конструкція.

ABSTRACT

Kroviakov S. O. Experimental and theoretical basis for improving the durability of lightweight concretes for thin-walled hydraulic structures. – Manuscript.

Thesis for Doctor of Technical Sciences degree. Specialty 05.23.05 – Building materials and products – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odesa, 2019.

The doctoral thesis is devoted to the development of experimental and theoretical foundations and the improvement of practical methods for producing of fine aggregate concretes with specified performance properties and increased durability for thin-walled hydraulic structures, especially reinforced concrete floating structures. Lightweight concretes with porous aggregates are effective for hydraulic structures, in particular thin-walled ones. For the shipbuilding branch the concrete with porous aggregates is the only alternative type of lightweight concrete. At the same time, Ukraine is one of the countries in the world that possesses reinforced concrete shipbuilding technology. Accordingly, the task of improving the quality and durability of lightweight concretes for thin-walled structures is relevant.

In order to control the structure of lightweight concretes the prescription methods are used, which are basically similar to the known methods for heavy-weight concretes: using high-quality cement and hard aggregates, the effective modifiers, the design of mixtures with low W/C, etc., as well as technological methods, related to the organization of the technological process of concrete production, specifically with preliminary preparation and aggregate processing.

The concrete of thin-walled hydraulic structures is influenced by various operational and climatic factors that cause corrosion processes of all types. Due to the high watertightness of concrete in its structure, the effect of all processes, associated with filtration is significantly slowed down. With the simultaneous action of freezing and thawing, the frost resistance of concrete is equally important from viewpoint of durability.

The functional purpose of hydraulic structures determines the certain features of the concrete operating conditions in thin-walled structures, the main of which are determined by the presence of three effected zones of the operating environment: underwater, overwater, and variable water level zones. This creates the conditions for the existence of a permanent non-equilibrium state of the concrete along the height of the structure section, which involves the process of adapting the material to the working conditions. The structure formation of the lightweight concrete occurs through the interaction of two capillary-porous medias – the aggregate and the cement-sand matrix. As a result of this interaction, there are the processes of moisture exchange and the related processes of volumetric deformations proceed, the magnitude and kinetics are determined by the capillary porosity. The analysis made it possible to formulate the working hypothesis of the thesis. Improving of the durability and physico-mechanical characteristics of lightweight concrete for thin-walled hydraulic structures can be achieved by regulating of the interaction between the cement-sand matrix and the aggregate, aimed at improving their combined action, by means of reducing humidity deformations. At the same time, low penetrability of matrix and aggregate should be ensured during its operation in the matrix. The effective impact to the structure of lightweight concrete can be achieved through the use of the prescription methods such as the addition of modifiers and fiber reinforcement, as well as the technological processing methods of the porous aggregates surface, aimed at improving its work in the matrix under humid working conditions.

Field tests of thin-walled hydraulic structures showed that the most significant damage of concrete as a result of operational impacts is observed in the zone of variable water level. The common defects are also associated with the water filtration through the structures and the action of freezing and thawing. Thus, the concrete durability of floating hydraulic structures to the greatest extent is determined by moisture resistance during the filtration, as well as to freeze-thaw. The requirements for lightweight concrete thin-walled hydraulic structures, taking into account the operating conditions, are summarized. The mechanisms of corrosion damage of

lightweight concrete thin-walled hydraulic structures are analyzed. The non-destructive method for determining of concrete homogeneity in the structures and the method for accelerated determination of the concrete frost-resistance, based on the determination of the change in technological damage of material, have been developed. The new method for determining the corrosion resistance of concrete under the one-sided exposure of water-environment is proposed.

Taking into account the characteristics of the working conditions of thin-walled hydraulic structures two technological methods are proposed for increasing of the durability and mechanical properties of lightweight concrete. The first one is the treatment of a porous aggregate with a cement suspension in the initial stage of the mixture mixing. This strengthens the surface layer of the aggregate and contact zone, increasing their homogeneity, contributes to the transformation of porosity of the aggregate into the closed structure, improves the aggregate homogeneity. The second method is the hydrophobization of the porous aggregate surface. It reduces the absorption of water from the cement-sand matrix, thereby reducing the W/C of the mixture without the deterioration in the processability, as well as reducing of the volumetric changes in the aggregate grains in the matrix 4..5 times during the structure formation process. Both proposed methods for controlling of combined work of aggregate and matrix should be carried out in the conjunction with the prescription solutions, aimed at increasing durability.

The dynamics of the cement suspension penetration in the grains of expanded clay during the processing are analyzed. It has been established that due to the processing of the porous aggregate with the cement suspension, the average pore size of expanded clay concrete is reduced and the uniformity of pores according to the size is increased. Its strength increases by 2 MPa and more. The mechanism of humidity deformations of artificial porous aggregate under the conditions close to the real hardening ones of lightweight concrete mixture are established. It is shown that the volumetric moisture deformations of hydrophobic gravel in water and cement-sand mortar are 4..5 times less than the deformations of untreated gravel. It was determined that due to the hydrophobic surface the treatment of porous gravel with an emulsion of organosilicon fluid, the strength of expanded clay concrete increases at

the equilibrium moisture content by 2-2.5 MPa and 3-4 MPa in a water-saturated state.

The effectiveness of the proposed technological methods for managing of the combined work of aggregate and matrix along with the prescription methods of improving the durability of lightweight concretes, using the methods of experiment planning and experimental statistical modeling, is investigated. The impact of modifiers, fiber and technique of gravel processing with the cement suspension to the structure, the properties and durability of expanded clay concrete are analyzed. Due to the gravel processing and using of silica fume, superplasticizer and fiber reinforcement, the expanded clay concrete with the compressive strength up to 42.44 MPa and tension bending strength up to 7 MPa was obtained, which meets the requirements of most thin-walled hydraulic structures, in particular, the requirements of the Maritime Register for shipbuilding expanded clay concrete. The water-tightness of modified lightweight concretes is from W4 to W14, the frost resistance is from F400 to F600. Due to the using of a rational number of modifiers, the water-tightness of expanded clay concrete is increased by two grades and more, and the frost resistance is up by 100 cycles. By means of gravel processing with the cement suspension, the water-tightness and compressive strength of expanded clay concrete are increased. The microscopic examination of lightweight concrete structure with expanded clay, treated by cement suspension, fixed the mudding of pores and cracks in the envelop of aggregate at the depth of 1.2-1.6 mm, as well as decreasing porosity of contact zone.

The possibility of using of iron oxide powder pigments to improve the decorative properties of structural expanded clay, which can also be used as shipbuilding, is shown. It was established that the strength and durability of decorative expanded clay concrete does not almost differ from these indicators for the control concretes with the similar mixtures. Due to the processing technique of porous gravel with the cement suspension, the color saturation of decorative concretes is improved and their compressive strength and durability increase.

The structure and properties of modified shipbuilding expanded clay concrete with mudding and water-reducing admixtures and fiber expanded clay concrete, especially with water-repellent gravel are investigated. Using of lightweight concretes allows to increase the carrying capacity of floating structures, the comfort of people, staying on them, and improve the working conditions of process equipment. Shipbuilding concrete has the highest requirements for the durability under severe operating conditions, while for the floating structures the important requirement is to ensure minimum moisture content of concrete on the “dry” side of the structure.

It has been determined that the hydrophobization of porous gravel surface reduces W/C of expanded clay concrete mixtures, moisture deformation of the aggregate, and prevents also its softening under wet conditions. The cement-sand matrix in contact zone of concrete with hydrophobic gravel has a dense structure with a low number of uniformly distributed pores. For the treatment of porous gravel, the rational number is 0.6-0.8% of silicone fluid 136-157M in the emulsion. Modified shipbuilding expanded clay concretes and fiber expanded clay concretes, due to the addition of admixtures Penetron A and S-3, as well as using of hydrophobic gravel surface treatment, have the strengths up to 45 MPa, water tightness from W8 to W12, frost resistance not lower than F500 and average density in water saturated state 1750..1860 kg/m³ that meets the requirements of the industry standards and provides the high durability of the material. Applying mudding admixture and hydrophobic treatment of gravel, the moisture content of expanded clay concrete, contacting with water, decreases by one third, the average density by 30..40 kg/m³, and the thermal conductivity by 0.09..0.10 W/m×K.

The properties and durability of concrete with various types of porous aggregates are analyzed. The possibility of strength and durability increasing of concretes with limestone crushed stone along with using of water-reducing admixture, silica fume and processing aggregate cement suspension is stated. The achieved level of the strength (> 50 MPa) of water-tightness (W12) and frost resistance (F400) of modified concrete with the limestone crushed stone provides the

increased durability of this material and allows to use it at the hydraulic structures. The possibility of using porous sands in lightweight concrete for thin-walled hydraulic structures, in particular floating reinforced concrete, is shown. The average density of modified expanded clay concretes on the mixture of silica sand and granulated foam glass is 1400-1440 kg/m³, water-tightness is W10-W12, frost resistance is F450-F550, compressive strength is up to 21 MPa, tension in bending strength is up to 5 MPa, which allows to increase the load capacity of a floating structure due to the additional weight reduction of the structure while ensuring the required durability of the material.

The introduction of the obtained research results. The choice of optimal mixtures of modified shipbuilding expanded clay concrete on water-repellent gravel has been carried out. The guides on the preparation technology of modified shipbuilding expanded clay concrete and fiber expanded clay concrete for manufacture of thin-walled floating structures and floating docks were developed and approved. A draft State Standard of Ukraine “Concrete shipbuilding. Technical conditions and technology of preparation” is at the stage of discussion and coordination, which consists of two parts: Heavy shipbuilding concrete and Lightweight shipbuilding concrete. The research results are implemented at the objects of hydraulic engineering construction and in the educational process.

Key words: lightweight concrete, expanded clay lightweight concrete, aggregate, modifiers, treatment, durability, water tightness, frost resistance, thin-walled construction.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Кровяков С.О. Наукові та практичні основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №73, С.73-80.

2. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Рецептурно-технологічні методи підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 36. Рівне: Волинські береги, 2018. С.55-63.

3. Kroviakov S.O., Mishutin A.V., Pishev O.V., Kryzhanovskiy V.O. Effect of composition on the strength of modified expanded clay lightweight concrete. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №71, С.107-112.

4. Кровяков С.О., Дудник Л.В. Порівняння властивостей модифікованих керамзитобетонів з різними типами пісків. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 35. Рівне: НУВГП, 2018. С.18-25.

5. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. Наука та будівництво, 2017, №3. С.50-58.

6. Підвищення довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд за рахунок застосування модифікаторів. А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, О.В. Піщев та ін. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №69, С.100-105 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

7. Мішутін А.В. Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією. Вісник Одеської

державної академії будівництва та архітектури, 2017, №67, С.89-95 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

8. Кровяков С.О., Петричко С.М., Дудник Л.В., Ткаченко Г.Г. Декоративний конструкційний керамзитобетон на обробленому цементною суспензією гравії. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №66, С.66-71 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

9. Кровяков С.О. Мишутін А.В. Полторапавлов А.О. Механічні властивості бетону на обробленому цементною суспензією карбонатному щебені. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №64. С.147-152. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

10. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Механічні властивості модифікованих суднобудівних керамзитобетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №63. С.161-166. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

11. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування пористих заповнювачів у бетонах для транспортних споруд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2016, Вип. 98. С.145-155.

12. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Властивості легких бетонів на різних видах пористих заповнювачів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №62, С.119-125. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

13. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Досвід і перспективи застосування бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №61. С.278-284. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

14. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Богуцький В.Л. Оптимізація складу суднобудівного керамзитобетону підвищеної довговічності. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №60. С.160-165.

15. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Богуцький В.Л. Застосування модифікованих бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2015, Випуск 56. С.68-74.

16. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування вапнякового щебеню для бетонів жорстких дорожніх покриттів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №58. С.250- 255.

17. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах заповнювача. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2015, Випуск 31. С.251-257.

18. Мишутин А.В., Богуцкий В.Л., Кровяков С.А. Прочность и средняя плотность судостроительного бетона на керамзитовом гравии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2014, №53. С.245-251.

19. Кровяков С.А., Мишутин Н.В., Заволока Н.В. Опыт применения и перспективы использования бетонов на легких заполнителях в гидротехническом и транспортном строительстве. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2013, №52. С.134-139.

20. Гапоненко Е.А., Кровяков С.А. Обеспечение долговечности бетона водопропускных и водоотводных сооружений на автомобильных дорогах. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 26. Рівне: НУВГП, 2013. С.53-58.

21. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Порівняння ефективності застосування зерен пониженої пружності і дисперсного армування при керуванні властивостями дрібнозернистого бетону. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010, №14. С.163-168.

22. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Вплив дисперсного армування і зерен пониженої пружності на властивості дрібнозернистого бетону. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2010, №38. С.389-394.

23. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов при зафиксированной гранулометрии заполнителей. Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип.72. К.: ДП НДІБК, 2009. С.99-104.

24. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов в сухом и водонасыщенном состоянии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2009, №34. С.116-122.

25. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Долговечные бетоны для тонкостенных сооружений, эксплуатируемых во влажной среде. Дороги і мости, Випуск 7, в 2-х т., т.2.К.: ДерждорНДІ, 2007. С.67-70.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

26. Kroviakov S., Mishutin A., Pishev O. Management of the properties of shipbuilding expanded clay lightweight concrete. International Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol 7, No 3.2, pp.245-249 (*індексуються наукометричною базою Scopus*).

27. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Tehnički glasnik 11, 3 (2017). (Technical Journal, Vol.11 No.3) pp.121-124 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

28. Kroviakov S., Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia, Vol. (1) Issue (4), August 2017. pp.2-10.

29. Кровяков С.А., Мишутин А.В. Обработка поверхности пористых заполнителей как метод повышения долговечности легких бетонов гидротехнических и транспортных сооружений. Проблемы современного бетона и железобетона. Выпуск 9, 2017. С.279-294.

30. Mishutin A., Kroviakov S., Zavaloka M., Bogutsky V, Stanchyk Ie. Increasing the durability of expanded clay lightweight concretes for thin-walled hydraulic engineering structures. Meridian Ingineresc, Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association, 2016, №4, pp.42-45.

Патенти на корисні моделі

31. Патент № 32920, Україна, Модифікована бетонна суміш / Дорофєєв В.С., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Гапоненко К.О. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

32. Патент №38003, Україна, Спосіб визначення однорідності якості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мішутін А.В., Кровяков С.О., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

33. Патент № 20590, Україна. Спосіб прискороного визначення морозостійкості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Романов О.А., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2007 р.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

34. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N., Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability. ICCS16. Madrid, Spain, 2016. pp.741-747 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

35. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Панасюк В.О. Сушицький Е.Б. Набухання і усадка керамзитового гравію в процесі твердіння бетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2018. С.74-78.

36. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Довговічність легких і важких суднобудівних бетонів. Збірник наукових праць за матеріалами I міжнародної азербайджансько-української конференції «Building Innovations – 2018». Баку, ПолтНТУ, 2018. С. 162-164.

37. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Петричко С.М. Стійкість кольорової гама декоративних керамзитобетонів. Збірка тез доповідей другої науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса: ОДАБА, 2018. С.101.

38. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Дудник Л.В. Дослідження легких бетонів з різними типами дрібного заповнювача. Тези доповідей 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса:ОДАБА, 2018. С.269.

39. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В. та ін. Міцність модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», Одеса:ОДАБА, 2018. С.80-83.

40. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Полторапавлов А.О. Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу модифікаторів на міцність бетону на вапняковому щебені. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2017. С.51-53.

41. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини. Тези доповідей II міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд», Одеса:ОДАБА, 2017. С.81-83.

42. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В., Заволока М.В. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса, 2016. С.65-67

43. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Полторапавлов А.О. Застосування місцевого заповнювача в транспортному і гідротехнічному будівництві в одеському регіоні. Збірка тез доповідей науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса:ОДАБА, 2016. С.117.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

44. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Применение модифицированных бетонов для снижения проницаемости конструкций водопропускных и водоотводных сооружений на автодорогах. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2013, Випуск 50. С.92-96.

45. Мішутін А.В., Богуцький В.Л., Кровяков С.О. Модифіковані керамзитобетони для тонкостінних плавучих споруд. Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті, 2014, №2. С.104-110.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| Анотація | 2 |
| Вступ..... | 25 |
| Розділ 1 Бетони на пористих заповнювачах у гідротехнічному будівництві. Склад, структура і властивості. | 34 |
| 1.1 Основні типи конструкційних бетонів на пористих заповнювачах та їх властивості | 34 |
| 1.2 Застосування легких бетонів у гідротехнічному будівництві..... | 44 |
| 1.3 Рецептурно-технологічні прийоми управління властивостями легких бетонів | 52 |
| 1.4 Механізми корозійних пошкоджень бетону конструкцій гідротехнічних споруд..... | 65 |
| 1.5 Забезпечення довговічності бетону в умовах проникнення води крізь конструкцію..... | 72 |
| 1.6. Особливості умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд. Гіпотеза і мета досліджень | 78 |
| Розділ 2 Методичні принципи проведення досліджень | 82 |
| 2.1 Загальна схема проведення досліджень..... | 82 |
| 2.2 Методика і результати натурних обстежень бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд..... | 84 |
| 2.3 Вимоги до бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд з врахуванням умов їх експлуатації та робочих навантажень..... | 92 |
| 2.4 Характеристика вихідних матеріалів, використаних при дослідженнях легких бетонів..... | 98 |
| 2.5 Методичні принципи проведення досліджень структури композитів та властивостей бетонів і сумішей..... | 105 |
| Висновки за 2-м розділом..... | 112 |
| Розділ 3 Технологічні методи забезпечення довговічності бетонів на пористих заповнювачах | 114 |
| 3.1 Визначення корозійної стійкості бетону | |

| | |
|--|-----|
| | 22 |
| при однобічному впливі рідини..... | 114 |
| 3.2 Регулювання сумісної роботи та взаємодії цементно-піщаної матриці і заповнювача для підвищення довговічності легкого бетону..... | 122 |
| 3.3 Вплив обробки пористого заповнювача на властивості легкого бетону | 135 |
| 3.4 Набухання і усадка штучного пористого заповнювача в процесі твердіння бетону..... | 143 |
| Висновки за 3-м розділом..... | 159 |
| Розділ 4 Структура, властивості та довговічність модифікованих керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд..... | 161 |
| 4.1 Плани експериментальних досліджень модифікованих керамзитобетонів для тонкостінних споруд. Властивості легкобетонних сумішей | 161 |
| 4.2 Міцність модифікованих керамзитобетонів..... | 172 |
| 4.3 Водонепроникність і морозостійкість керамзитобетонів | 180 |
| 4.4 Середня густина і вологість модифікованих керамзитобетонів в різних умовах експлуатації | 190 |
| 4.5 Аналіз структури модифікованих керамзитобетонів | 203 |
| 4.6 Механічні властивості, довговічність та кольорова гама декоративних конструкційних керамзитобетонів..... | 212 |
| Висновки за 4-м розділом..... | 220 |
| Розділ 5 Структура і властивості суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів на гідрофобізованому ґравії..... | 224 |
| 5.1 План проведення експериментів і фактори, які варіювалися при дослідженнях | 224 |
| 5.2 Вплив складу на В/Ц керамзитобетонної суміші | 228 |
| 5.3 Міцність досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів..... | 232 |
| 5.3.1 Міцність легких суднобудівних бетонів при стиску..... | 232 |
| 5.3.2 Міцність легких суднобудівних бетонів на розтяг при згині | 236 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.4 | Водонепроникність і морозостійкість | |
| | керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів | 240 |
| 5.4.1 | Водонепроникність легких суднобудівних бетонів | 240 |
| 5.4.2 | Морозостійкість і корозійна стійкість | |
| | легких суднобудівних бетонів | 244 |
| 5.5 | Середня густина суднобудівних фіброкерамзитобетонів | |
| | в різних умовах експлуатації | 249 |
| 5.6 | Експлуатаційна вологість і теплопровідність | |
| | модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів | 258 |
| 5.7 | Структура досліджених | |
| | керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів | 266 |
| | Висновки за 5-м розділом..... | 270 |
| Розділ 6 Властивості і довговічність бетонів на різних типах | | |
| | пористих заповнювачів. Практична реалізація результатів досліджень..... | 273 |
| 6.1 | Порівняння механічних властивостей бетонів | |
| | на гранітному та вапняковому щебені | 273 |
| 6.2 | Властивості і довговічність модифікованих бетонів | |
| | на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією..... | 281 |
| 6.3 | Властивості і довговічність керамзитобетонів | |
| | з різними типами пісків | 294 |
| 6.4 | Властивості дрібнозернистих бетонів і фібробетонів | |
| | на суміші кварцового і керамзитового пісків | 303 |
| 6.5 | Практична реалізація результатів досліджень | 311 |
| 6.5.1 | Вибір оптимальних складів керамзитобетонів | |
| | для тонкостінних гідротехнічних споруд методом Монте-Карло | 311 |
| 6.5.2 | Вибір оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів | |
| | і фіброкерамзитобетонів..... | 313 |
| 6.5.3 | Технологія приготування модифікованих | |
| | суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів | |
| | для плавучих залізобетонних споруд..... | 319 |

| | |
|--|-----|
| | 24 |
| 6.5.4 Впровадження результатів досліджень | 324 |
| Висновки за 6-м розділом..... | 328 |
| Загальні висновки..... | 331 |
| Список використаних джерел | 335 |
| Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації..... | 369 |
| Додаток Б. Титульний лист проекту ДСТУ Б В.2.7-XXX-2:2018. Будівельні матеріали. Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування. Частина 2. Бетон суднобудівний легкий | 379 |
| Додаток В. Титульний лист «Регламенту з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків» | 381 |
| Додаток Г. Акти впровадження | 383 |

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Більшість бетонних і залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд виготовляється з важкого бетону, але як показує світовий досвід, легкі бетони на пористих заповнювачах є ефективними для цілого ряду споруд, зокрема тонкостінних. Основною перевагою легких бетонів є зниження ваги конструкцій при забезпеченні їх високої стійкості до різноспрямованих навантажень. Особливо перспективні легкі бетони та конструкції на їх основі для залізобетонних плавучих споруд. Використання бетонів на пористих заповнювачах дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд та покращити комфортність перебування людей та умови роботи технологічного обладнання в їх приміщеннях. Міжнародною федерацією бетону і залізобетону (*fib*) були сформульовані рекомендації щодо повного переходу на високоміцний легкий бетон при виготовленні конструкцій плавучих залізобетонних платформ. Разом з тим, важкі експлуатаційні умови, в яких знаходяться бетони тонкостінних гідротехнічних споруд, обумовлюють комплекс вимог щодо забезпечення довговічності легких бетонів. Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування, і задача підвищення якості та довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд є актуальною.

Найбільш перспективними методами вирішення даного завдання є застосування раціональних рецептурних і технологічних методів, спрямованих на утворення структури з переважно замкнутою пористістю, зокрема у контактній зоні заповнювача в цементно-піщаній матриці. При цьому необхідно враховувати наявну вітчизняну сировинну базу в'язучих і заповнювачів. Актуальними залишаються завдання підвищення ефективності застосування дисперсної арматури в бетонах на пористих заповнювачах та довговічності легких декоративних бетонів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автомобільних доріг і аеродромів Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках держбюджетних тем «Підвищення довговічності модифікованих бетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд» (№ держреєстрації 0116U003195), «Розробка та впровадження сучасних технологій при будівництві автомобільних доріг, водопропускних споруд та аеродромів» (№ держреєстрації 0111U001249), держбюджетної теми Держагентства з водних ресурсів «Розробка регламенту з обстеження та оцінки технічного стану бетонних та залізобетонних гідротехнічних споруд меліорації» (№ держреєстрації 0108U005468) та в рамках госпдоговірної теми «Розробка сумішей суднобудівних бетонів і ефективних хімдобавок для використання на Херсонському державному заводі «Паллада» під час будівництва композитних та залізобетонних плавучих споруд» (№ держреєстрації 0107U4000808).

Метою роботи є розвиток теоретичних основ і створення практичних методів отримання легких бетонів на пористих заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих, за рахунок управління структурою шляхом застосування модифікаторів і здійснення операцій, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

- провести обстеження стану тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема з бетонів на пористих заповнювачах, проаналізувати механізми корозійного пошкодження бетонів і вплив експлуатаційного середовища на зміну структури і властивостей легких бетонів з врахуванням особливостей умов експлуатації;

- вдосконалити методи управління структурою легких бетонів за рахунок обробки пористого заповнювача для забезпечення необхідного рівня фізико-

механічних властивостей і довговічності матеріалу шляхом покращення сумісної роботи заповнювача і матриці;

- встановити закономірності вологісних деформацій штучного пористого заповнювача, зокрема з гідрофобізованою поверхнею, в умовах твердіння легкобетонної суміші;

- вдосконалити рецептурні методи управління структурою легких бетонів для підвищення їх довговічності при проектуванні складів бетонних сумішей, дослідити вплив модифікаторів, дисперсної арматури та обробки пористого заповнювача цементною суспензією на структуру та властивості бетонів;

- встановити можливість використання залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей легких бетонів при забезпеченні їх довговічності;

- проаналізувати вплив гідрофобної обробки поверхні пористого гравію в комплексі з використанням рецептурних методів управління структурою на довговічність, фізико-механічні та експлуатаційні властивості суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів;

- запропонувати методи підвищення міцності і довговічності бетонів на вапняковому щебені у конструкціях гідротехнічних споруд;

- встановити можливість застосування пористих пісків для зниження середньої густини легких бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд при забезпеченні довговічності даних матеріалів;

- розробити технологію виробництва модифікованих суднобудівних керамзитобетонів с заданою міцністю та підвищеною водонепроникністю, морозостійкістю і корозійною стійкістю, провести промислову реалізацію результатів досліджень та розробити відповідні нормативні документи.

Об'єкт досліджень – структура і властивості модифікованих легких бетонів і фібробетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

Предмет досліджень – закономірності, які описують взаємозв'язок між складом модифікованого бетону і фібробетону на пористих заповнювачах і

параметрами його структури, фізико-механічними властивостями і довговічністю.

Методи дослідження. Дослідження виконані з широким використанням методів оптимального планування експериментів і застосуванням багатофакторного математичного моделювання властивостей модифікованих бетонів. Фізико-механічні характеристики бетонів і бетонних сумішей, а також параметри порової структури бетону визначалися відповідно до діючих нормативних документів на повіреному обладнанні. Застосовано мікроскопічний і рентгенофазовий аналіз структури бетону, аналіз технологічної пошкодженості композитів та цифровий аналіз кольорової гами легких декоративних бетонів. Теплопровідність керамзитобетонів визначалася на спеціальній установці. Використано методи комп'ютерного матеріалознавства для отримання раціональних складів модифікованих бетонів і фібробетонів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розвинуто теоретичні основи підвищення довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд за рахунок введення комплексних модифікаторів, які містять пластифікатор і кольматуючу добавку або мікрокремнезем та знижують проникність розчинної частини бетону, одночасно зі застосуванням технологічних методів, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці;

- розвинуто уявлення про механізм проникнення вологи через бетони на пористих заповнювачах, виявлено загальні закономірності формування та зміни структури даних бетонів у процесі експлуатації в конструкціях тонкостінних гідротехнічних споруд;

- обґрунтовано вибір рецептурних і технологічних методів, спрямованих на отримання структури, що забезпечує підвищення довговічності легких бетонів для конструкцій тонкостінних гідротехнічних споруд, уточнені уявлення про

механізми дії модифікаторів на структуру і властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів;

- доведена можливість покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легкого бетону за рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію, яка знижує вологісні деформації заповнювача при структуроутворенні і експлуатації композиту;

- виявлено вплив концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії, яка використовується для гідрофобної обробки поверхні керамзитового гравію, на фізико-механічні властивості керамзитобетону в різних умовах експлуатації;

- доведено позитивний вплив технологічного прийому обробки пористих заповнювачів цементною суспензією в початковій стадії перемішування суміші на їх роботу в цементно-піщаній матриці легких бетонів;

- виявлено ефективність застосування дисперсного армування для бетонів на різних видах пористих заповнювачів;

- показана можливість зниження середньої густини легких бетонів для тонкостінних споруд без погіршення їх довговічності за рахунок використання гранульованого піноскла в якості дрібного заповнювача;

- встановлена можливість поліпшення декоративних властивостей легких суднобудівних бетонів за рахунок використання залізоокисних порошкових пігментів при забезпеченні необхідної довговічності матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів:

- вдосконалено методику досліджень конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема з бетонів на пористих заповнювачах, розроблено неруйнівний метод визначення однорідності бетону в конструкціях, в основу якого покладено принцип порівняння технологічної та експлуатаційної пошкодженості бетону в різних частинах конструкції (патент України №02897) та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону по зміні його пошкодженості при заморожуванні і відтаюванні (патент України №20590);

- запропоновано новий метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі води-середовища;

- запропоновані оптимальні технологічні методи виготовлення легких бетонів підвищеної довговічності, зокрема з гідрофобною обробкою поверхні керамзитового гравію та з обробкою пористого заповнювача цементною суспензією;

- експериментально підтверджена ефективність запропонованих рецептурних методів управління структурою бетонів на пористих заповнювачах для підвищення довговічності легких бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд;

- з використанням методів експериментально-статистичного моделювання визначені раціональні склади бетонів на пористих заповнювачах для різних типів тонкостінних конструкцій, в тому числі оптимальні склади суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів з підвищеною довговічністю та покращеними фізико-механічними властивостями;

- розроблено склади декоративних легких бетонів підвищеної довговічності для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних;

- розроблено та затверджено технологічний регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків (Херсонський державний завод «Паллада», 2014 р.);

- розроблено та знаходиться на стадії погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий;

- результати роботи впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі в Одеській академії будівництва та архітектури, зокрема при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні робочої гіпотези, мети і постановці завдань досліджень; інтерпретації отриманих експериментальних даних; отриманні комплексу експериментально-

статистичних моделей, що описують вплив складу і технології приготування на структурні параметри і властивості легких бетонів; розробці раціональних складів легких бетонів підвищеної довговічності і ефективних технологічних прийомів їх приготування. Усі основні результати дисертаційної роботи одержані самостійно. Нормативні документи і рекомендації розроблялися у співавторстві з науковим консультантом А.В. Мішутіним. Запропоновані автором методи управління структурою і властивостями бетонів на пористих заповнювачах були використані в дослідженнях, що були проведені сумісно з А.В. Мішутіним, Л.В. Дудник, О.В. Піщевим, В.Л. Богуцьким, А.В. Даніленко, А.О. Полторапавловим та С.М. Петричко.

Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в наступному:

- обґрунтуванні та оцінці ефективності рецептурних і технологічних методів підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд [2,5-7,15,22,26,28-30,44];

- визначенні впливу модифікаторів на структуру, властивості та довговічність бетонів на пористих заповнювачах [3,9,10,18,20,21,27,31,39,40,45];

- аналізі зміни структурних показників, які впливають на довговічність легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд [13,19,25,36,41];

- визначенні впливу пористих заповнювачів на процеси структуроутворення та властивості легких бетонів [4,11,12,16,17,23,24,35,38,43];

- виборі раціональних складів модифікованих бетонів з підвищеною довговічністю [14,34,42];

- аналізі властивостей декоративних легких бетонів [8,37];

- виконанні патентного пошуку, опрацюванні запропонованих методів визначення властивостей бетону на практиці [32,33].

У дисертації не використовувалися матеріали кандидатської дисертації.

Апробація дисертаційної роботи. Основні положення і результати досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, були представлені на наступних міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях та семінарах:

науково-технічних семінарах «Структура, властивості та склад бетону» (м. Рівне, 2013, 2015 роки), міжнародних науково-технічних конференціях «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2015-2018 роки), міжнародних конференціях «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2015, 2017 роки), міжнародних науково-технічних семінарах «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2016-2018 роки), конференціях професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2015-2018 роки), міжнародній науково-практичній конференції «Бетони, цементи і добавки для бетонів в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва і застосування» (м. Київ, 2015 р.), міжнародних конференціях «Структуроутворення, міцність і руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (м. Одеса, 2016, 2018 роки), науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (м. Одеса, 2016, 2018 роки), міжнародній конференції «Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку (м. Київ, 2016 р.), другій міжнародній конференції щодо сталого розвитку бетону ICCS16. Second International Conference on Concrete Sustainability (Іспанія, м. Мадрид, 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (м. Полтава, 2017 р.), міжнародній конференції MATRIB 2017 (materials, tribology, recycling) (Хорватія, м. Вела-Лука, 2017 р.), міжнародній конференції «Building innovations – 2018» (Азербайджан, м. Баку, 2018 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2018 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільні дороги: безпека і надійність» (Білорусь, м. Мінськ, 2018 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 45 наукових працях, з яких 25 статей у фахових виданнях України (7 індексуються наукометричною базою Index Copernicus), 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (2 індексуються наукометричними базами Scopus і Web

of Science), 3 деклараційних патенти України, 10 тез доповідей у збірниках наукових конференцій (1 індексується накометричною базою Web of Science), а також 2 статті, що додатково відображають результати роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 386 сторінках, у тому числі 303 сторінки основної частини, складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел (352 найменування) та додатків на 18 сторінках, містить 79 рисунків і 29 таблиць.

РОЗДІЛ 1
БЕТОНИ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ
У ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ.
СКЛАД, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ

1.1 Основні типи конструкційних бетонів на пористих заповнювачах та їх властивості

Згідно ДСТУ Б В.2.7-18-95 «Бетони легкі. Загальні технічні умови» до конструкційних відносять легкі бетони класів по міцності від В12,5 до В40 з середньою густиною до 2000 кг/м³. Європейський стандарт EN 206-1:2000 і гармонізований з ним ДСТУ Б В.2.7-176:2008 «Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови» поділяє легкі конструкційні бетони на класи від LC 8/9 до LC 80/88 та регламентує їхню середню густину діапазоном від 800 до 2000 кг/м³. Також легкі бетони класифікуються в залежності від виду використовуваних пористих заповнювачів. Для легких суднобудівних бетонів чинний на сьогодні ОСТ5.9880-85 [1] дозволяє використання виключно керамзитобетону, розрізняє лише марки 300, 350 і 400 за міцністю, а також обмежує середню густину даних керамзитобетонів діапазоном від 1600 до 2000 кг/м³. Легкі бетони мають декілька істотних переваг [2-4], які насамперед проявляються в їх наступних властивостях:

- меншій масі конструкцій, що забезпечує зниження навантажень на фундаменти і опори будівель і споруд, для залізобетонного суднобудування це дозволяє підвищити вантажопідйомність [5], а для конструкцій, які працюють на згин – зниження маси від повного навантаження, що дозволяє збільшити довжину прогонів несучих конструкцій;

- вищій стійкості до динамічних навантажень завдяки низькому модулю пружності бетону, підвищеній гнучкості та швидшому загасанню коливань у конструкціях, що є важливим для тонкостінних конструкцій;

- меншій теплопровідності бетону і меншій схильності до утворення конденсату на поверхні, що важливо у вологих умовах експлуатації;
- підвищеній вогнестійкості конструкції за рахунок більш надійного захисту арматури від температурних деформацій при зниженій теплопровідності бетону, що важливо для залізобетонного суднобудування;
- забезпеченні «внутрішнього догляду» бетону завдяки повільній вологовіддачі насичених водою при приготуванні суміші пористих заповнювачів;
- підвищені продуктивності праці завдяки використанню механізмів з меншою вантажопідйомністю при монтажу конструкцій.

Такі властивості легких конструкційних бетонів обумовили їх широке використання для різних цілей, а багаторічний досвід застосування в цивільному, промисловому, гідротехнічному і транспортному будівництві показав ефективність даних матеріалів [4,6,7]. Легкі бетони відрізняє від важких не тільки менша середня густина, а й набагато більші можливості варіювання густиною та відповідно іншими властивостями [2]. Л.Й. Дворкін зазначав, що в порівнянні з ніздрюватими бетонами легкі бетони на пористих заповнювачах мають більшу міцність при рівній густині, меншу усадку і повзучість, що дозволяє виготовляти з них великорозмірні вироби [8,9]. Також бетони на легких заповнювачах адсорбують вологу менше ніздрюватих: середня вологість керамзитобетону для нормальних умов експлуатації дорівнює 5-10%, а для газо- і пінобетону вона становить 8-12% [10].

Більшість фізико-механічних властивостей бетонів на легких заповнювачах так або інакше пов'язані з їх середньою густиною. Але міцність таких бетонів нелінійно пов'язана з їхньою густиною [11], а підвищення міцності легких бетонів заявленої середньої густини в основному базується на підвищенні міцності, щільності та жорсткості цементно-піщаної матриці. А.І. Звездов і В.Р.Фаликман наголошували, що для високоміцних легких бетонів дробильність заповнювача і міцність цементної матриці мають бути близькими [12]. Для важких бетонів значна різниця в величинах коефіцієнтів лінійного температурного розширення і модулів пружності їх компонентів може

приводити до зниження ущільнення структури при навантаженнях. Це викликає утворення тріщин в контактній зоні на границі крупного заповнювача і затверділої розчинної частини бетону. У бетонах на пористих заповнювачах цей негативний фактор впливає в меншій мірі, тому що співвідношення коефіцієнтів лінійного температурного розширення і модулів пружності заповнювача з розчинної частиною бетону, яка знаходиться в його порах, може наближатися до одиниці [13]. Властивості матеріалу обумовлюються його структурою [14-16 та ін.], при цьому модель структури, яка розглядається дослідником, має знаходитися у співвідношенні з конкретним виробом або конструкцією [15]. Для легких бетонів пористість регулюється як на рівні заповнювача, так і на рівні цементно-піщаної матриці. Це дозволяє отримувати матеріали, які мають сприятливу для формування мікроклімату сорбційну вологість. При правильному призначенні складу бетони на пористих заповнювачах забезпечують якісний первинний захист арматури від корозії без додаткових витрат [17].

Бетони на пористих заповнювачах мають деякі особливості, які дають можливість забезпечувати їх довговічність. Наприклад, керамзитобетон, як найбільш розповсюджений тип конструкційного легкого бетону, при правильно запроектованому складі має високу морозостійкість [18]. У роботі [19] показано, що після 300-400 циклів заморожування і відтаювання при насиченні прісною і морською водою зразки з високоміцного керамзитобетону збереглись без видимих руйнувань, а втрата їх міцності не перевищувала 15%. Більше 1000 циклів заморожування і відтаювання витримав конструкційний керамзитобетон в натурних випробуваннях в зоні змінного рівня води у Кольській затоці [20]. Також керамзитобетон має високу стійкість в агресивних сольових розчинах, зокрема в сульфатах. В роботі [21] показано, що керамзитобетон марки 400 здатний витримувати без руйнування тривалі випробування на змінне зволоження і висушування у морській воді. Після 150 циклів такого випробування міцність бетону може навіть зрости, що пов'язано з накопиченням в його порах солей та з гідратацією цементу в вологому

середовищі. Також високу довговічність в агресивних умовах експлуатації можуть мати бетони на інших типах пористих заповнювачів. Так, на основі легкого шлакового гравію були отримані «високопродуктивні» бетони класів до В50 з морозостійкістю до F1500 і водонепроникністю до W20 [22].

ДСТУ Б В.2.7-18-95 «Бетони легкі. Загальні технічні умови» залежно від типу заповнювача розрізняє керамзитобетон, керамзитоперлітобетон, керамзитозолобетон та інші види легких бетонів. При цьому дозволяється використання всіх видів легких заповнювачів, для яких є відповідні стандарти або технічні умови. Заповнювачі складають найбільшу за об'ємом частину легкого бетону, тому їх тип, структура і властивості суттєво впливають на структуру, фізико-механічні показники та довговічність композиту. Легкі заповнювачі для бетонів поділяються на природні та штучні. Природні пористі заповнювачі використовуються у будівництві починаючи з 3-го тисячоріччя до нашої ери [7] та можуть бути вулканічного і осадового походження. Вулканічне походження мають пемзові та туфові заповнювачі, а також вулканічний шлак [23-25]. На території України подібні породи зустрічаються досить рідко. Для виробництва пористих заповнювачів з осадових гірських порід в основному використовуються карбонати: вапняки і черепашники, іноді пористі кремнеземисті породи [2,24,26,27]. Пористість осадових порід досягає 40% а водопоглинання 10%. Для виробництва щебеню переважно використовують породи з пористістю до 15% [28]. Україна володіє багатими покладами пористих вапняків – державним балансом запасів налічується 171 родовище лише вапняків-черепашників [29]. Також пористі вапняки розповсюджені в Молдові, Азербайджані, Туркменії та в інших країнах. В умовах дії на бетон кислих газів та рідини вапняки і доломити показують недостатню корозійну стійкість. Проте в умовах хімічної взаємодії з нейтральним або лужним середовищем бетони на вапнякових заповнювачах показують високу довговічність [17]. Б.Н. Віноградов [30] вказував на реакційну властивість основного мінералу вапняків CaCO_3 , а також доломіту з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та C_3A з утворенням гідрокарбоалюмінатів. Серед кремнеземистих порід осадового

походження обмежене застосування в якості заповнювачів мають опока, спонгіоліт і алевроліт. Але до складу зазначених порід часто входить опал та халцедон, які досить активно взаємодіють з лугами цементу. Тому в цементному бетоні такі заповнювачі застосовують рідко через ризик виникнення корозійних процесів [31].

Властивості легкого бетону багато в чому визначаються структурою і властивостями застосованого пористого заповнювача, відповідно навіть незначні коливання якості заповнювача впливають на властивості бетону в цілому [32]. Наприклад для виробництва високоміцного конструктивного легкого бетону підходять не всі пористі заповнювачі [33] і найчастіше подібні композити виробляються на основі різних типів керамічного гравію і щебеню. В/Ц і вміст цементу у легких бетонах мають дещо менший вплив на міцність, але ці параметри важливі для забезпечення довговічності композиту [34]. Від типу застосованого пористого заповнювача також залежить метод підбору складу бетону, приготування і укладання бетонної суміші та інші технологічні особливості [35]. Властивості природніх заповнювачів навіть одного типу можуть досить істотно відрізнятися залежно від родовища їх походження. Більше того, в межах одного родовища можуть знаходитися породи з різним складом, щільністю і структурою, що впливає на однорідність заповнювача. Також природні пористі заповнювачі в силу особливостей структури і технології їх видобування доволі часто містять відчутний відсоток пилоподібних часток. Тому для даних заповнювачів важливим є процес їх збагачення, який зазвичай включає операції підвищення однорідності по густині та міцності, поліпшення форми зерен і зменшення вмісту домішок [27]. Проте не у всіх випадках необхідно прагнути виділяти з заповнювача всю пилоподібну частину. Відомо, що у деяких типів пористих гірських порід пилоподібна частина хімічно активна по відношенню до цементу. Зокрема, вулканічні туфи і пемзи реагують з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням низькоосновних гідросилікатів [25]. Між карбонатними породами і алюмінатами кальцію цементного клінкеру відбувається реакції з утворенням гідроалюмінатів

кальцію [36,37]. У [36] показано, що у зоні контакту вапнякового заповнювача і цементного каменю між дрібними частками вапняку і мінералами клінкеру, що містять алюміній, утворюється міцний і нерозчинний карбоалюмінат кальцію. Карбонатний мікронаповнювач здатний збільшувати міцність не тільки C_3A і C_4AF , а й інших мінералів цементного клінкеру [36,38]. Підтвердженням цього є те, що композиційний цемент КЦ V/Б згідно ДСТУ Б В.2.7-46-2010 може містити від 20 до 40% вапняку, а фахівці з США і Швейцарії [39] вважають саме вапняк найбільш перспективною сировиною для композиційних в'язучих. Тобто пилоподібні частки вапнякового заповнювача можуть відігравати певну позитивну роль при структуроутворенні цементного каменю. Але на структуроутворення впливає фактичний склад даних часток, зокрема вміст глини та мулу, а також тип застосованого цементу, що має враховуватися при проектуванні складу і оцінці довговічності матеріалу.

Деякі типи штучних пористих заповнювачів виробляються з промислових та інших відходів [24]. Найбільш розповсюдженими є гранульований пористий шлак, шлакова пемза, аглопорит та арболіт [40]. Однією з переваг шлакових заповнювачів є їх активність у лужному середовищі цементного каменю, що може збільшувати щільність контактної зони заповнювача і матриці [17]. Іноді використовують пористі породи, які утворюються в результаті горіння вугілля в териконах, а також інші відходи. Наприклад у Малайзії конструкційні бетони міцністю до 56 МПа виробляють на заповнювачах з лущиння масляничної пальми [41]. Існує навіть технологія виготовлення легкого гравію на основі макулатури [42]. В залежності від форми розрізняють пористі гравії і щебені, при цьому максимальна крупність пористих заповнювачів зазвичай обмежується 40 мм, а для високоміцних бетонів – 20 мм. Для досягнення необхідної якості бетону легкі заповнювачі частіше всього розділяють на фракції [26,35].

Пористі заповнювачі активно взаємодіють з цементною матрицею і за механізмом такої взаємодії Н.М. Толипіною [43] була запропонована їх спеціальна класифікація. I тип – це хімічно-активні заповнювачі, які реагують з

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням гідросилікатів Ca , що супроводжується зрощенням заповнювачів і матриці з майже повною ліквідацією зазорів між ними. До них відносяться заповнювачі з доменного гранульованого і паливного шлаків, пористих вулканічних порід, перліту, порід, що містять нефелін та ін. [25]. Цей тип активних заповнювачів характеризується підвищеною пористістю поверхневих шарів. Завдяки цьому на ранніх стадіях твердіння бетону відбувається проникнення дисперсних фракцій в'язучого в заповнювач з утворенням додаткових зв'язків цементної матриці з поверхнею даного заповнювача. Це зменшує проникність контактного шару і сприяє посиленню зчеплення, збільшенню сили відриву цементного каменю від заповнювача і зростанню довговічності матеріалу. До числа таких заповнювачів відносяться керамзит, пористі вапняки, бетонний лом та ін. Ефективність активних заповнювачів II-го типу менше, ніж I-го, але вони більш доступні.

Одним з найбільш розповсюджених пористих заповнювачів для бетону є керамзит або аналогічний йому керамічний пористий гравій [44]. У керамзиті поєднуються достатня міцність при малій об'ємній масі, що обумовлює його конструктивну ефективність і довговічність при низькій теплопровідності [45]. Тисячорічна практика довела безпеку і екологічність глинистої сировини і виробів з неї. Керамзит екологічний, пожежобезпечний і довговічний матеріал, який забезпечує низьку експлуатаційну вологість, комфортність і безпеку приміщень [46]. Керамзитовий гравій – це матеріал з широкою сферою застосування, що обумовлено можливістю варіювання його властивостей при виробництві та різноманітним виробам, які виготовляються на його основі [47].

Обсяги виробництва і застосування легких заповнювачів завжди були пов'язані зі ступенем розвитку будівельних технологій. У 80-тих роках минулого сторіччя перше місце в світі по виробництву пористих заповнювачів займав СРСР, де діяли 463 відповідних підприємства. У 1986 році вироблялося 47,7 млн. м^3 легких заповнювачів, зокрема 40,4 млн. м^3 штучних, а найбільше було вироблено саме керамзитового гравію, випуск якого на 355 підприємствах склав 33,4 млн. м^3 на рік. У 1989 році був досягнутий максимальний рівень

обсягів випуску керамзиту – 39,4 млн. м³ [48]. При цьому 70-80% керамзиту тоді використовувалося для зовнішніх стінових панелей, але все активніше вирішувалася задача розширення використання пористих заповнювачів для конструкційних бетонів [12]. Сьогодні в Європі виробляється широка номенклатура штучних пористих заповнювачів у вигляді розділеного по фракціям керамічного гравію. У Німеччині це спучені сланці Liapor 3 – Liapor 8 з фракціями 4-8 і 8-16 мм та насипною густиною відповідно від 325 до 800 кг/м³, а також Liapor-sand з крупністю до 4 мм [49]. У Швеції та Норвегії виробляється керамзит різної густини під торговою маркою Leca™ (lightweight expanded clay) [7,50], у Великій Британії виробляють зольний гравій під маркою Lytag® [51]. Також у європейських країнах для виробництва заповнювачів використовують пористі горні породи, наприклад пемзу (Pumice), вулканічний туф та ін. [3,7]. В Україні наприкінці минулого сторіччя відбулося різке скорочення виробництва керамзиту, що було пов'язано як зі зниженням обсягів будівництва, так і з появою на ринку ефективних ніздрюватих бетонів. Але в останні роки намітилася тенденція до зростання попиту на керамзит та виробу з нього, що відповідно дало поштовх до збільшення його виробництва, зокрема, на Одеському, Харківському і Хмельницькому керамзитових заводах [52]. За отриманою нами інформацією, на Одеському керамзитовому заводі виробництво гравію у 2017 році збільшилося в порівнянні з обсягами 2016 року більше, ніж вдвічі.

Для деяких конструкцій ефективними є легкі бетони на склоподібних заповнювачах. До таких заповнювачів з частково або повністю аморфізованою структурою відносяться піноскло, азеріт, діоліт, піноскло-гранулят і баротеліт. Спільною особливістю даних заповнювачів є підвищений вміст склофазу в складі зерен, отриманий від введення в шихту штучного або природного скла [53]. Доволі розповсюджене сьогодні піноскло отримують спіканням подрібненого скла і газоутворювача при температурі 780..900°C [53,54]. В останні роки на ринку з'явилося гранульоване піноскло з гранулами сферичної або гексагональної форми розміром часток до 12 мм [55]. В якості сировини

при його виробництві широко використовуються відходи скляного виробництва, тобто паралельно вирішується питання утилізації скла. Накопичено певний досвід отримання легких бетонів на основі гранульованого піноскла. У роботі [56] показано, що структура заповнювачів з вмістом склофази більше 90% складаються з замкнутих пор, розділених перегородками, які також містять дрібні рівномірно розподілені замкнуті пори. Це забезпечує необхідну міцність і знижену теплопровідність даних заповнювачів і відповідно бетонів на їх основі. Наприклад піносколобетони мають міцність до 15 МПа при середній густині до 1200 кг/м^3 , водопоглинанні 6..13% і низькій сорбційній вологості [56,57]. Також в останні роки в цивільному та промисловому будівництві доволі широко використовується гранульований пінополістирол в якості заповнювача для отримання полістиролбетону [58,59]. Проте даний тип легкого бетону через високу деформативність і низьку міцність не можна застосовувати в якості конструкційного матеріалу.

Тобто тип та якість заповнювача впливають на структуру і відповідно на властивості бетону на його основі. Зокрема, міцність пористого заповнювача є одним з визначальних чинників, який впливає на міцність легкого бетону. В більшій мірі це стосується високоміцних конструкційних бетонів. За даними [60] рекомендована міцність керамзитового гравію складає від 0,1 до 0,16 від міцності керамзитобетону, а завищення цього показника малоефективне і призводить переважно до збільшення середньої густини матеріалу. При використанні для виробництва заповнювачів пористих гірських порід їх межа міцності рекомендується на рівні не менше 50% необхідної межі міцності бетону. ДСТУ Б В.2.7-43-96 «Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови» визначає мінімальну марку щебеню з природнього каменю для бетонів різних класів. Для В15 це 300, для В20 – 400 і так далі. Аналогічні вимоги є в стандарті для гравію. Але для легких бетонів не можна орієнтуватися лише на міцність заповнювача за дробимістю, тобто при стику в циліндрі, тому що робота пористих матеріалів в бетоні може суттєво відрізнятись від роботи простого конгломерату окремих часток (гранул) цього матеріалу. С.М. Іцкович

[27] стверджував, що міцність пористого заповнювача доцільніше визначати безпосереднім випробуванням в бетоні. Наприклад, дійсна міцність аглопориту в бетоні в 25..30 разів перевищує показники міцності при випробуванні в циліндрі. Це пов'язано, по-перше, з тим, що на роботу заповнювача у композиті суттєво впливає його розмір. При подрібненні пористої породи зі збільшенням щільності зерен зростає їх міцність, тобто міцність зерен заповнювача є вищою за міцність вихідної породи. Аналогічний ефект впливу розміру спостерігається і для штучних заповнювачів. Наприклад, збільшення крупності гранул піноскла більше 20 мм призводить до зниження міцності піносклобетону [57]. По-друге, пористі заповнювачі в бетоні активно взаємодіють з цементно-піщаною матрицею, в результаті чого відбуваються міжфазові взаємодії, зокрема суттєво змінюються властивості поверхні заповнювача. Також до фактичного складу зерен заповнювача включаються окремі фази цементної матриці, в результаті чого змінюються їх властивості. Аналогічно, не виключено потрапляння окремих дрібних часток пористого заповнювача у розчинну частину бетону.

Таким чином, конструкційні бетони на легких заповнювачах мають певні переваги перед іншими типами бетонів, що дозволяє ефективно використовувати їх для тонкостінних конструкцій, зокрема у гідротехнічному будівництві. Для різних типів споруд в залежності від вимог, які висуваються до матеріалу конструкції та від умов її експлуатації, можна застосовувати легкі конструкційні бетони на різних типах пористих заповнювачів, як штучних, так і природних. Основним недоліком більшості природних заповнювачів є їхня неоднорідність, яка часто вимагає проведення операцій збагачення (сортування та ін.) для забезпечення якості легкого бетону. Найбільш розповсюдженими штучними легкими заповнювачами є керамічні, для ринку України це керамзитовий гравій. Заповнювач має бути стійким до корозійних впливів середовища експлуатації та забезпечувати довговічність композиційного матеріалу в цілому, зокрема за рахунок сумісної роботи заповнювача і цементної матриці. Вибір заповнювача, як і інших складових бетону, має бути обґрунтований з технічної та економічної точок зору.

1.2 Застосування легких бетонів у гідротехнічному будівництві

Огороджувальні конструкції, на відміну від суто несучих, зазвичай є поліфункціональними, що викликає природні протиріччя при виборі матеріалів для подібних конструкцій. Оскільки у гідротехнічному будівництві значна частина конструкцій виконує одразу декілька функцій і має суттєві відмінності в умовах експлуатації, для них фактично не існує універсального матеріалу [61]. Легкі конструкційні бетони мають набагато більшу пористість в порівнянні з важкими бетонами, проте це не означає, що вони мають більшу проникність [62]. А.І. Іванов зазначав [2], що при забезпеченні достатньо «злітної» структури за рахунок правильно запроектованого складу бетони на легких заповнювачах мають високу водонепроникність. В основі цього ефекту лежить протидія просуванню вологи, породжена стисненням повітрям у замкнутих порах і капілярах заповнювача: чим глибше в товщу зерна проникає вода, тим сильніше протидія повітря. Тобто при певній глибині насичення подальше проникнення води в зерно заповнювача припиняється. Наприклад у роботах [62,63] показано, що введення пористого заповнювача у склад високорухомого легкого бетону знижує капілярний підсос матеріалу і його проникність для рідини, зокрема для іонів хлору, а водонепроникність легкого бетону є рівною з непроникністю важкого бетону з аналогічною кількістю в'язучого.

Бетон на пористих заповнювачах був першим серед відомих людству гідротехнічних бетонів [64]. Ще у 1-му сторіччі Пліній пропонував рецепт, який включав 1 частину вапна, 2 частини пуцолани і 1 частину товченого туфу. Гідротехнічні споруди з легкого бетону будувалися в Римській імперії протягом декількох століть, деякі з цих споруд збереглися до теперішнього часу [65]. При цьому легкий бетон застосували і для підводних частин споруд. До нашого часу зберігся, наприклад, побудований у I-му сторіччі бетонний мол у місті Поццуолі неподалік Неаполю [66]. Легкі гідротехнічні бетони на основі природних пористих заповнювачів, переважно туфу і пемзи, широко

використовувалися на Кавказі. У 30-х роках ХХ-го сторіччя з туфобетону було виконано облицювання Арташатського каналу, з 50-их років більшість гідротехнічних споруд у Вірменії будувалася з бетонів на літоїдній пемзі [67]. З легких бетонів виконувалися акведуки, стінки каналів і тунелів, водонапірні вузли ГЕС та інші елементи. Всього на гідротехнічних спорудах Вірменії було застосовано більше 2 млн. м³ легкого бетону [26]. Для виробництва вібропресованих напірних труб з успіхом використовувався керамзитобетон [68]. Відомчі будівельні норми ВСН 28-65 (1965 р.) регламентували використання керамзитобетону для звичайних і попередньо напружених керамзитобетонних прогонових споруд з прольотами до 30 м і ланок водопропускних труб. Бетони на карбонатних пористих заповнювачах показали високу довговічність в сульфатних середовищах [69]. Це, зокрема, дозволило ефективно використовувати подібні матеріали для конструкції Джанкойської зрошувальної системи, яка тривалий час експлуатувалася в воді-середовищі зі значним вмістом сульфат-іона і бікарбонат-іона. Обстеження показали, що після 12-14 років експлуатації в сульфатагресивному середовищі без захисного покриття ці конструкції не мали ознак руйнування, а міцність бетону зросла в 1,5-2,5 рази в порівнянні з марочною. У роботі [70] на карбонатних породах отриманий бетон класу В45 для напірних труб.

Легкі бетони успішно використовувалися для будівництва мостів в Норвегії, США, Японії, Німеччині, Фінляндії та інших країнах [71,72]. Балки та інші елементи річкового прольоту метро-моста в Лужниках у 1958 р. були виготовлені з високоміцного керамзитобетону. У 1961 році в колишньому СРСР був збудований перший у Європі керамзитобетонний міст через р. Ахтубу [73]. У США для мостових конструкцій зі случених сланців виготовлявся легкий бетон міцністю 48 МПа при середній густині близько 2000 кг/м³ [74]. У 1999 році в Норвегії з легкого бетону класу LC-55 з середньою густиною 1900..1950 кг/м³ був побудований міст «Stolma bridge» консольної конструкції з довжиною основного прольоту 148 м [75]. Для бетону використовувався заповнювач Леса-800, вискомарочний цемент і

мікрокремнезем, а за рахунок застосування пластифікаторів В/Ц суміші було не вище 0,40. Прикладом зведення висотного будинку з несучими конструкціями з легкого бетону може служити побудована у 1992 році 66-поверхова будівля Національного банку в Північній Кароліні. Її монолітні перекриття виконані з бетону міцністю 47 МПа при середній густині 1890 кг/м³. Даний бетон на заповнювачах зі спучених сланців був високорухомим і не розшаровувався, що дало змогу подавати його бетононасосами на висоту до 252 м [76].

Окремо слід виділити застосування легких бетонів у залізобетонному суднобудуванні. Для плавучих споруд зменшення маси конструкцій є дуже важливою задачею, оскільки це дозволяє поліпшити показник, який прийнято називати «структурною ефективністю». Даний показник можна умовно охарактеризувати через співвідношення міцності матеріалу до його ваги [77-79]. Спеціалістами зазначається, що співвідношення міцність/вага для легкого бетону є набагато ефективнішим саме при зануренні конструкції у воду, тобто на плаву. Це показано у наведених нижче розрахунках, в яких середня густина важкого бетону прийнята 2500 кг/м³, бетону на пористому заповнювачі – 1900 кг/м³, відповідно середня густина води – 1000 кг/м³:

$$\text{на повітрі: } \frac{2500}{1900} = 1,32 \quad (1.1)$$

$$\text{при зануренні: } \frac{2500-1000}{1900-1000} = 1,67 \quad (1.2)$$

Тобто навіть без урахування інших особливостей легких бетонів, при рівній з важким бетоном міцності у воді конструкції з таких бетонів мають на 67% кращу «структурну ефективність».

Високу ефективність і довговічність легких суднобудівних бетонів довів багаторічний досвід застосування подібних матеріалів. Першим керамзитобетонним судном вважається побудований у 1919 році танкер «Selma» (рис.1.1.а) з товщиною корпусу 11..13 см при товщині захисного шару приблизно 16 мм [80,81]. У техніко-економічному обґрунтуванні при будівництві судна було вказано, що воно буде практичним, якщо бетон матиме міцність при стиску 34 МПа і середню густину в сухому стані не більше

1760 кг/м³. В результаті у віці 28 діб середня міцність бетону на пористому керамічному заповнювачі становила 38 МПа [82]. Після аварії у 1922 році цей танкер був частково затоплений, проте його корпус задовільно зберігся і досі. Проведені обстеження показали (рис.1.1.б), що за 90 років міцність бетону в окремих його конструкціях зроста майже вдвічі, а основні руйнування конструкцій були пов'язані з пошкодженням захисного шару [81]. При цьому побудована у 1919 році залізобетонна баржа Cretehawser досі тримається на плаву. Всього за час першої світової війни з армованого легкого бетону було збудовано 12 суден загальною водотоннажністю 60000 тон [83]. Найбільш масовим будівництво залізобетонних суден стає у період другої світової війни, за час якої було побудовано 104 подібних судна [7]. Технологія їх будівництва була навіть описана в журналі «Popular science» за 1943 рік [84]. Суттєвою перевагою суден з керамзитобетонів тоді вважалась швидкість будівництва – за шість з половиною тижнів зводився корпус судна з тоннажем до 3500 тонн. Також за рахунок застосування суднобудівних бетонів кардинально знижується металоємність корпусів суден, що вважається суттєвою перевагою даної технології [85,86].

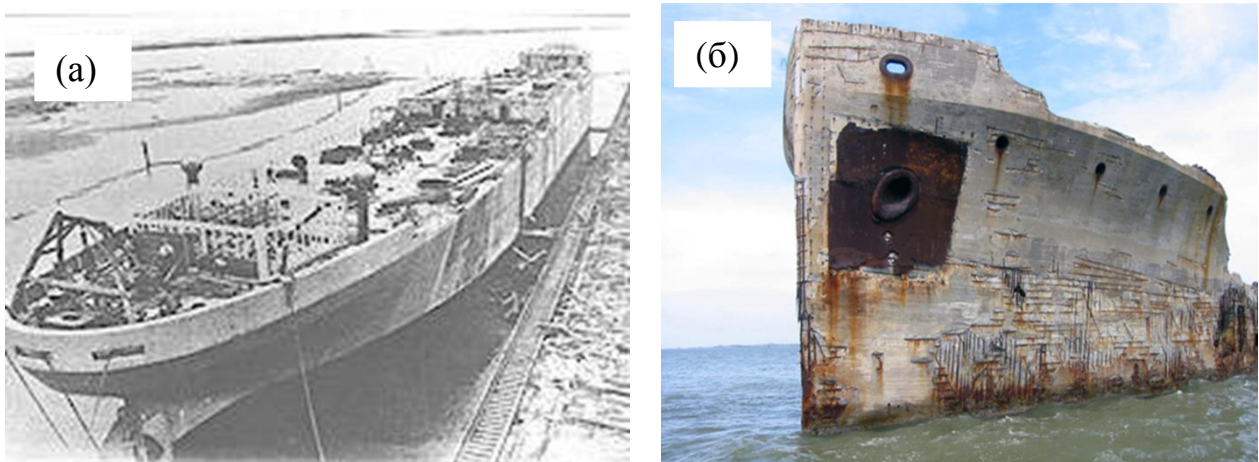


Рис.1.1. Керамзитобетонний танкер «Selma», побудований у 1919 році (а) і сучасний вигляд корпусу цього судна (б)

Спеціалістами з США були проведені обстеження корпусів чотирьох керамзитобетонних суден у віці від 55 до 80 років, які показали високу

довговічність матеріалу більшості конструкцій після експлуатації у агресивному морському середовищі. Легкий бетон мав міцність від 34 до 55 МПа, глибину карбонізації до 5 мм, а більшість дефектів конструкцій була пов'язана з порушенням захисного шару арматури [87]. Фото шліфа, який відображає структуру керамзитобетону корпусу збудованого у 1944 році танкера Armand Concidere, показано на рис.1.2. Крім довговічності спеціалісти вказують на гарну ремонтпридатність конструкцій з керамзитобетону і збереженість сухих вантажів [7]. Останній факт обумовлений набагато меншим ступенем конденсації вологи на корпусі судна з легкого бетону в порівнянні з металевим корпусом або з корпусом з важкого суднобудівного бетону.

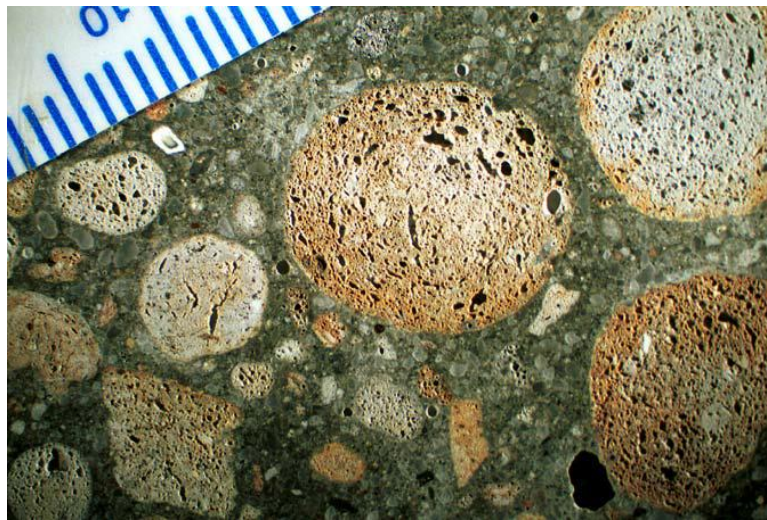


Рис.1.2. Шліф, який відображає структуру керамзитобетону корпусу танкера Armand Concidere, збудованого у 1944 році (за даними [87])

Легкий суднобудівний бетон також є одним з найбільш перспективних матеріалів для створення плавучих споруд великих розмірів і нетрадиційних габаритних споруд, призначених для освоєння ресурсів континентальних шельфів і світового океану в цілому [88-90]. Високоміцний пористий керамічний заповнювач все частіше використовується для бетону при будівництві плавучих нафтових платформ [91,92]. Зокрема, з легкого бетону класу LC60 та марки за середньою густиною D1950 збудована плавуча нафтова платформа Heidun, яка працює в норвезькому секторі Північного моря (рис.1.3) [93]. В якості активної мінеральної добавки для бетону цієї платформи

використовувався мікрокремнезем в кількості 7-9% від маси цементу. Бетони на пористих заповнювачах показали високу довговічність в конструкціях нафто- і газовидобувних платформ в суворих умовах експлуатації у водах з сульфатами і хлоридами, а також при дії заморожування і відтаювання [94,95]. До складу бетону побудованої у 1998 році нафтової платформи Hibernia (Канада) частково входив спучений сланець Stalite: 255 кг/м^3 у суміші з 430 кг/м^3 гранітного щебеню, що складало 50% від об'єму крупного заповнювача. Середня густина такого «напівлегкого» бетону була 2160 кг/м^3 , міцність – більше 70 МПа. Платформа експлуатується на глибині до 80 м а її корпус розраховано на 30 років роботи без ремонту [96].



Рис.1.3. Плавуча нафтова платформа Heidun. Побудована з легкого бетону класу по міцності LC60 та марки за середньою густиною D1950

Першою арктичною плавучою спорудою з бетону на пористих заповнювачах вважається кесонний Tarsiut island для моря Бофорта (Канада), який був збудований у 1982 році для видобування піску та експлуатується по сьогодні [97]. Для попередньо напружених конструкції цієї споруди застосовано бетон середньої густини 2240 кг/м^3 . Легкий бетону класу LC55 на

основі заповнювача Liapor 8 використано для понтонів і головного прогону плавучого мосту Nordhordland Bridge в Норвегії [98]. Завдяки зниженню ваги конструкцій та організації водонепроникних переборок плавучість мосту забезпечується навіть при затопленні двох відсіків понтону. Легкий бетон з міцністю 35 МПа і середньою густиною 2000 кг/м^3 застосовувався для конструкцій плавучих воріт дамби Braddock на річці Мононгієла (США) [99]. Зниження густини бетону дозволило зменшити осадку плавучої споруди, що було важливо для конкретних умов експлуатації. Військово-морські сили США починаючи з 1998 року використовують модульні залізобетонні плавучі пірси з легкого бетону міцністю до 48 МПа. Розрахункова довговічність таких пірсів становить 100 років, що вдвічі більше за термін роботи металевих споруд [100]. Легкі бетони використовуються в якості одного з варіантів виконання плавучих хвильових електростанцій у Великій Британії [101]. Частина конструкцій підводного тунелю Кінсуга в Японії виконана з бетону на пористому гравії при середній густині матеріалу 1900 кг/м^3 і міцності 30 МПа. Таке рішення було прийнято для підвищення тріщиностійкості залізобетонних конструкцій гідротехнічної споруди [102].

Однім з новітніх реалізованих проектів споруд з легкого бетону для експлуатації на морі є спуско-підйомний комплекс MPU Heavy Lifter [90,103]. Він застосовується для демонтажу знятих з експлуатації платформ видобувних свердловин і для монтажу важких фундаментів вітрових установок в Північному морі. Вперше для морської споруди був використаний легкий бетон, який частково включав пористий пісок для досягнення класу LC35/38 при середній густині до 1600 кг/м^3 , що було необхідного для забезпечення плавучості та міцності понтонів. Керамзитовий гравій також використовувався в якості заповнювача для суднобудівного сіркобетону, при цьому розроблений матеріал мав міцність від 30 до 50 МПа і водонепроникність до W20 при середній густині від 1600 до 2000 кг/м^3 [104].

У колишньому СРСР дослідження структури і властивостей легких бетонів для конструкцій залізобетонних суден проводилися у Центральному науково-

дослідному інституті технології суднобудування (Санкт-Петербург), Науково-дослідному інституті бетону та залізобетону (Москва), Горьківському інституті інженерів водного транспорту (Нижній Новгород), Всесоюзному науково-дослідному інституті транспортного будівництва (Москва), Московському автомобільно-дорожньому інституті та Ленінградському інституті водного транспорту [18,105-107]. У 1957 році в Нижегородській області на Городоцькій верфі було збудоване експериментальне керамзитобетонне судно, а у 1959 на Сокольській верфі – два експериментальних дебаркадера довжиною по 20 м. Один дебаркадер з керамзитобетону, а інший – з легкого бетону на літоїдній пемзі [106]. В 1962 році на Городоцькій верфі була побудована перша баржа-майданчик вантажопідйомністю 500 тон з попередньо напруженого керамзитобетону [108]. Аналогічні баржі й дебаркадери будуються на Городоцькій верфі й досі.

Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування. В нашій країні накопичено певний досвід застосування легкого суднобудівного бетону. На Херсонському заводі залізобетонного суднобудування «Паллада» [109] в 60..70-ті роки минулого століття були побудовані кілька керамзитобетонних плавучих доків [77,78]. Також суднобудівний керамзитобетон доволі часто використовувався для конструкцій водонепроникних внутрішніх переборок понтонів композитних плавучих доків. Обстеження даних плавучих споруд показали довговічність конструкцій з керамзитобетону при експлуатації в Баренцевому, Каспійському та інших морях [80], а також гарні захисні властивості бетону по відношенню до арматури [106]. Більшість з даних доків експлуатується і сьогодні [110].

Міжнародна федерація бетону і залізобетону (fib) ще у 1995 році сформулювала рекомендації щодо повного переходу на застосування в конструкціях плавучих нафтових платформ високоміцного легкого бетону, спочатку класів LC40-50, а потім і класів LC60-70 [92, 111]. При цьому для бетону рекомендовано використовувати штучні пористі заповнювачі, зокрема на основі продуктів переробки техногенних утворень металургії, паливної

енергетики та хімічної промисловості, а також природні пористі заповнювачі з вулканічних або осадових гірських порід.

Таким чином проведений аналіз досвіду застосування бетонів на легких заповнювачах у гідротехнічному будівництві показав, що при врахуванні особливостей умов експлуатації споруди при проектуванні складу бетону, зокрема при правильному виборі його складових, подібні матеріали мають високу довговічність та необхідний рівень міцності при забезпеченні зниження ваги конструкцій. Одним з найперспективніших напрямків застосування легких конструкційних бетонів є залізобетонне суднобудування, яке представлено, зокрема, українським виробником.

1.3 Рецептурно-технологічні прийоми управління властивостями легких бетонів

Рецептурні прийоми управління властивостями легких бетонів пов'язані з варіюванням їхнім складом, зокрема за рахунок застосування модифікаторів. На сучасному етапі розвитку будівельної індустрії застосування модифікаторів (різних видів хімічних добавок) при виробництві бетонів стало фактично нормою. У розвинених країнах випуск модифікованого бетону становить майже 100% від загального обсягу виробництва [112]. Сьогодні на практиці лише модифіковані композити дозволяють задовольнити зростаючі фізико-механічні вимоги до будівельних матеріалів при забезпеченні необхідного рівня їх ресурсоефективності [113,114]. В повній мірі це відноситься і до бетонів на легких заповнювачах [115]. Хімічні добавки дозволяють підвищити технологічність суміші, міцність і довговічність бетону, прискорити твердіння і зменшити усадку матеріалу. Модифікований бетон є вигіднішим з технологічної та економічної точок зору, тому що дозволяє не лише скоротити необхідну кількість в'язучого, а і знизити витрати на укладання суміші та довше зберегти її рухомість, за рахунок чого знизити загальну енергоємність виробництва [116].

Для підвищення міцності легких бетонів використовують прийоми, які переважно аналогічні відомим прийомам для важких бетонів. Це застосування високомарочних цементів і максимально міцних пористих заповнювачів, проектування складу бетону з гранично низьким В/Ц, застосування ефективних модифікаторів, ретельне перемішування та ущільнення бетонної суміші зі збереженням її високої однорідності, створення сприятливих умов твердіння бетону [117]. Також в ряді випадків здійснюється попередня підготовка легкого заповнювача, зокрема його гідрофобізація, що описано нижче.

Модифікатори вводяться у склад бетону в десятих частках відсотка від маси цементу, але істотно впливають на хімічні та фізико-хімічні процеси твердіння і формування структури бетону, забезпечуючи при правильному використанні необхідні фізико-механічні характеристики композиту [113,114]. Для бетонів на пористих заповнювачах застосовуються майже всі відомі у технології бетонів хімічні добавки, зокрема всі типи пластифікаторів. В якості пластифікаторів використовуються переважно аніоноактивні органічні речовини колоїдного розміру з великою кількістю полярних груп в ланцюзі [118]. Ефективність пластифікатору підвищується зі зростанням молекулярної маси радикала в ланцюзі олігомерів і з підвищенням ступеня гідрофільності їх функціонально активних груп [119]. За хімічним складом пластифікатори зазвичай поділяють на чотири основних групи: сульфовані меламінформальдегідні смоли, продукти конденсації нафталінсульфо кислоти і формальдегіду, модифіковані лігносульфонати та полікарбоксоксили [120]. Відомі також деякі інші типи пластифікаторів. У модифікованих пластифікатором цементних композитах відбувається первісне уповільнення процесів гідратації, яке в середньому обмежується 2-3 годинами до отримання коагуляційної структури, після чого твердіння прискорюється. Така подвійна дія пояснюється проникністю шару добавки на поверхні зерен в'язучого для води та дефлокуючою дією модифікатору, яка збільшує поверхню контакту цементу і води, що поступово призводить до збільшення швидкості зростання новоутворень [121]. Як і для більшості композитів на основі цементу, для легких бетонів застосування

пластифікаторів є вельми ефективним [112]. Введення суперпластифікатору в легкобетонні суміші сприяє утворенню дрібнопористої та однорідної структури цементної матриці: знижує загальний обсяг відкритих пор, зменшує їх діаметр і підвищує однорідність за розмірами [122,123]. Наприклад, у роботі [122] при використанні добавки С-3 В/Ц керамзитобетонної суміші було знижено при збереженні її рухливості, за рахунок чого на 40% підвищена міцність бетону, або це давало змогу отримати рівномічний легкий бетон при зниженій на 18..20% витраті цементу. У [124] за рахунок застосування полікарбоксилатних пластифікаторів, модифікованих стабілізуючими системами, отримано самоущільнюючийся керамзитобетон класів В20..В35. У дослідженні вітчизняних вчених за рахунок введення полікарбоксилатного пластифікатору отримано керамзитобетон міцністю до 45 МПа при В/Ц=0,35 [125]. Також пластифікатори дозволяють підвищити седиментаційну стабільність легкобетонної суміші при укладанні, що покращує однорідність бетону. Це дуже важливо для тонкостінних конструкцій, які формуються у вертикальному положенні [123,126]. Поєднання пластифікатору з дрібнозернистим наповнювачем або метилцелюлозою дозволяє досягти більшої ефективності у вирішенні завдання підвищення однорідності бетону [113,123,126]. У деяких випадках для поліпшення рухомості та морозостійкості в керамзитобетон в невеликій кількості вводять повітрязалучаючі добавки [127].

Постійно зростаючі вимоги до якості та довговічності цементних композитів, а також до розширення спектру їх функціональних можливостей на сучасному рівні розвитку технологій робить фактично необхідною умовою використання комплексних модифікаторів [112,128]. Дані модифікатори поєднують в собі індивідуальні добавки різного функціонального призначення, тобто є добавками поліфункціональної дії [119,123]. Багатокомпонентність комплексних добавок і бетонної суміші дозволяє ефективно управляти процесами структуроутворення на всіх етапах технології приготування бетону і виготовлення конструкцій, за рахунок чого отримувати композити з необхідними експлуатаційними властивостями. При цьому прийнято розрізняти комплекси,

що складаються з декількох модифікаторів одного класу і комплекси, які об'єднують модифікатори різних класів [129]. Більшість комплексних поліфункціональних модифікаторів поділяються на чотири групи: суміші електролітів, суміші поверхнево активних речовин (ПАР), електролітів та ПАР, суміші хімічних і мінеральних добавок [28]. Тобто більшість комплексних модифікаторів для цементних композитів включають ті або інші пластифікуючі добавки. Наприклад, добавка С-3 гарно показала себе у складі різних комплексних модифікаторів, забезпечуючи не лише зростання міцності бетону. У поєднанні з повітрязалучаючою добавкою вона сприяє підвищенню морозостійкості бетону [112, 113, 130], в тому числі на литих сумішах [131]. Основою дії таких комплексних модифікаторів є створення у цементному камені рівномірно розподілених пор розміром 50-300 мкр при одночасному зниженні кількості води в суміші. У роботі М.З. Сімонова [26] зазначено, що за рахунок комплексної модифікації морозостійкість керамзитобетону можна підвищити в 2-3 рази. У роботах В.Г. Батракова [119,123] показано, що застосування кремнійорганічних сполук гідрофобно-газоутворюючого типу сприяє утворенню дрібнопористої структури бетону і мозаїчно гідрофобізує внутрішню поверхню пор і капілярів цементного каменю, за рахунок чого підвищується морозостійкість і сульфатостійкість композиту. В дослідженнях були отримані бетони з морозостійкістю до F1000. Також кремнійорганічна рідина іноді використовується як добавка в гідроізоляційні покриття. За рахунок поєднання портландцементу, доменного шлаку, цеоліту, солей-електролітів та рідини 136-157М (колишня ГКР-94) були отримані ефективні та довговічні гідроізоляційні розчини [132].

В сучасному будівельному матеріалознавстві та технології бетонів в якості модифікаторів крім хімічних широко використовуються мінеральні добавки – дрібнодисперсні наповнювачі. Вони виробляються з різних мінеральних матеріалів і вводяться у суміш для покращення або надання бетонам спеціальних властивостей [28]. За ознакою наявності гідравлічної активності наповнювачі поділяються на активні та інертні [133], відповідно активні дрібнодисперсні

наповнювачі частіше вважають модифікаторами у більш загальноприйнятому сенсі цього поняття. Наповнювачі дають можливість керувати кінетикою і ступенем гідратації цементних мінералів, поровою структурою бетону, дозволяють знизити усадки композиту, що підвищує його довговічність завдяки зменшенню кількості усадочних тріщин [134,135]. Як показано у роботах В.М. Вирового, наповнювачі також дозволяють знизити витрату клінкерної складової в цементі або витрату в'язучого в бетоні без погіршення якості [15,133,136,137]. Згідно з поліструктурною теорією термодинамічна та топологічна неоднорідність структури бетону є неминучою [16], відповідно для оптимізації структури бетону як гетерогенного матеріалу рекомендується введення у його склад пластифікаторів і наповнювачів [138,139]. С.С. Каприєлова і В.Г. Батраков зазначали, що формування високоміцної і щільної структури бетону досягається саме введенням ультрадисперсних часток, які в основному містять аморфний діоксид кремнію, з одночасним зниженням водопотреби за рахунок використання суперпластифікаторів [140]. Такі рецептурні рішення є ефективними і для бетонів на пористих заповнювачах [141]. Маючи високу питому поверхню, дрібнодисперсні наповнювачі впливають на фізико-хімічні процеси на поверхнях розділу фаз [64,136]. Зерна наповнювача в композиті, який у процесі твердіння прагне до зменшення поверхневої енергії, об'єднуються в кластери різних розмірів і створюють якісно інші включення – псевдофазу. При оптимальному насиченні такий стан системи забезпечує зміцнення структури композиту [14, 15]. Одною з важливих властивостей наповнювачів є їхня здатність знижувати початкові об'ємні зміни цементних композитів при твердінні [137]. Даний вид модифікації дозволяє управляти загальною пористістю матеріалу, розміром і ступенем однорідності пор [133,135]. Доведена можливість зниження капілярної пористості за рахунок введення дрібнодисперсного кварцового наповнювача, що як наслідок знижує проникність бетону [142]. В роботі [143] збільшення водонепроникності при введенні наповнювача пояснюється його позитивним впливом на мікроструктуру контактної зони в'язучого. У роботах К.К. Пушкарьової [144,145]

за рахунок використання комплексної органо-кремнеземістої добавки отримано високоміцний керамзитобетон при рухомості суміші Р4.

В останні десятиріччя в якості високоактивної мінеральної добавки в бетонах широко використовується ультрадисперсний відхід виробництва феросплавів – мікрокремнезем [28]. Він являє собою конденсований аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочищення плавильних металургійних печей. Сьогодні мікрокремнезем є одним з найчастіше використовуваних і перспективних модифікаторів для високоякісних цементних композитів [146]. Ця мінеральна добавка покращує структуру бетону за рахунок хімічної активності пуцоланового типу та ефекту «мікронаповнювача», що сприяє ущільненню і зменшенню кількості мікродефектів. Пуцолани зв'язують $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у гідросилікати, чим підвищують корозійну стійкість та знижують середній розмір пор. Також важливим проявом пуцоланового ефекту є покращення якості контактної зони цементного каменя з заповнювачем. Найчастіше ця зона складається з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який кристалізувався на поверхні заповнювача та у прилеглому цементному камені. За рахунок перетворення гідроксиду кальцію на гідросилікати підвищується міцність і знижується пористість контактної зони [147]. Описані ефекти призводять до підвищення міцності, зниження проникності та збільшення довговічності бетону. З іншого боку, застосування мікрокремнезему вимагає підвищення В/Ц суміші завдяки його значній дисперсності. Тобто ефективне застосування мікрокремнезему можливо лише в комплексі з суперпластифікатором, за рахунок чого практично повністю нівелюється проблема підвищеної водопотреби даного компонента [28,128,148].

Досвід застосування мікрокремнезему в бетонах на пористих заповнювачах також показав ефективність даного модифікатора, при цьому найчастіше його використовують саме в комплексі з пластифікатором. У роботі [149] за рахунок заміни від 5 до 15% цементу мікрокремнеземом міцність легких бетонів зростала на величину до 57%, а модуль пружності – на 14%. Аналогічна заміна цементу золою-винесенням знижувала міцність, проте одночасне застосування мікрокремнезему і 5% золи виявилось досить ефективним. Для виробництва

понтонів мосту Nordhordland на основі високоміцного цементу HS 65 в кількості 410 кг/м^3 був отриманий бетон класу LC55 за рахунок введення до його складу 33 кг/м^3 мікрокремнезему і $10\text{-}12 \text{ кг/м}^3$ пластифікатору [98]. У роботах [62,63] показано, що за рахунок застосування мікрокремнезему у кількості 10% від маси цементу отримано бетони з середньою густиною 1300 кг/м^3 , які мають вищу водонепроникність та стійкість до проникнення іонів хлору, ніж не модифіковані легкі бетони більшої середньої густини та важкі бетони. Мікрокремнезем є основним компонентом таких добавок, як SikaFume®-HR/TU, Aerosil® fumed silica, Elkem Microsilica® Powder та інших. Всі виробники рекомендують використання даних добавок для підвищення водонепроникності, морозостійкості та корозійної стійкості бетонів.

У роботах А.В. Мішутіна [150,151] та інших дослідників [64,112,123,152] показано, що для підвищення довговічності бетону тонкостінних гідротехнічних споруд ефективним є застосування кольматуючих добавок. Хімічні компоненти даних добавок вступають в реакцію з іонними комплексами кальцію і алюмінію, оксидами і солями інших металів. В результаті цих реакцій утворюються нерозчинні кристалогідрати, які заповнюють пори, капіляри та мікротріщини в бетоні. Це знижує проникність гетерогенного матеріалу завдяки дії сил поверхневого натягування рідини, при цьому в бетоні не виникає парового бар'єру [152,153]. Швидкість формування і глибина проникнення подібних кристалів залежить від щільності бетону та типу його пористості, а також від вологості та температури навколишнього середовища. При дефіциті води процес росту кристалів може призупинитися, але при її появі, наприклад, в результаті збільшенні гідростатичного тиску, процес поновлюється, забезпечуючи тим самим подальше підвищення водонепроникності. Іноді саме цей ефект називають «самолікуванням» бетону. Таке «самолікування» забезпечується фізико-хімічними процесами, пов'язаними з набуханням і гідратацією цементного каменю при невисоких швидкостях фільтрації води, а також механічним закупорюванням нерухомих тріщин мікрочастинками з бетону [154].

Таким чином використання модифікаторів різного типу, які оказують спрямований вплив на структуру цементних композитів, як рецептурних прийомів управління властивостями легких бетонів, дозволяє покращити фізико-механічні властивості та підвищити довговічність даних матеріалів. При цьому досягнути більшої ефективності у вирішенні завдання отримання композитів з необхідними експлуатаційними властивостями та довговічністю можливо за рахунок використання комплексних модифікаторів, які включають пластифікатори, кольматуючі добавки та/або мінеральні добавки, що мають пуцоланову активність.

Технологічні прийоми управління властивостями легких бетонів пов'язані з організацією технологічного процесу виготовлення бетону, зокрема з попередньою підготовкою заповнювача. В цілому процес приготування бетонних сумішей з використанням пористих заповнювачів є схожим з процесом приготування сумішей важких бетонів і має з ним спільну задачу – забезпечення однорідності і технологічності суміші та якості матеріалу. Проте використання пористих заповнювачів обумовлює певні технологічні особливості при дозуванні компонентів, перемішуванні, транспортуванні та укладанні суміші. Ці особливості слід враховувати, оскільки вони можуть оказувати значний вплив на структурні і відповідно фізико-механічні характеристики як самого легкого бетону, так і конструкції з нього.

Пористі заповнювачі слід зберігати в критих складах окремо за фракціями в умовах, що виключають зволоження. Суміші фракцій пористих заповнювачів схильні до розшарування, що викликає значні коливання гранулометричного складу заповнювача в бетонній суміші. Дозування пористих заповнювачів краще проводити за об'ємом навіть незважаючи на гіршу точність об'ємних дозаторів у порівнянні з ваговими. Це пов'язано з частою і суттєвою зміною вологості цих заповнювачів при транспортуванні і зберіганні, що відповідно змінює їх насипну густину [4,26,35,155].

Для бетонних сумішей на пористих заповнювачах, на відміну від сумішей важких бетонів, зміна кількості води і відповідно рухомості не завжди

однозначно впливає на міцність матеріалу. Для легких бетонів оптимальна витрата води відповідає найбільшій густині суміші в заданих умовах, тобто найменшому виходу бетону, або вона встановлюється по найбільшій міцності бетону [26]. При цьому в легких бетонах деякий надлишок води менш шкідливий, ніж її нестача. Тобто оптимальною є витрата води, яка відповідає найкращій легкоукладальності, при якій найбільш компактно розташовуються складові бетону. Через низьку густину заповнювачів для перемішування сумішей легких бетонів застосовуються змішувачі переважно примусового типу. Проте слід враховувати здатність змішувачів дробити та стирати заповнювач, змінюючи його зерновий склад. В окремих випадках подрібнення заповнювача при перемішуванні є позитивним, наприклад при прагненні використовувати його в'язучі властивості. При використанні природних заповнювачів їх шорстка поверхня додатково ускладнює перемішування і ущільнення. Особливістю більшості легкобетонних сумішей є більш швидка втрата рухомості при транспортуванні та витримці, що обумовлено поглинанням вологи заповнювачем [2,4,26]. При значній різниці густини заповнювача з густиною розчиною частиною може проявлятися розшарування бетонної суміші при укладанні та ущільненні. В більшій мірі розшарування проявляється при укладанні високорухомих сумішей. При застосуванні попередньо змочених заповнювачів легкобетонні суміші краще зберігають свою рухомість і є досить стабільними, але при цьому значну роль починає грати розподіл вологи по перетину зерен. Знизити розшарування сумішей можна зменшуючи крупність заповнювачів, також досить ефективним є застосування привантажувачів. При цьому завдяки специфіці пористих заповнювачів на властивості легкого бетону безпосередньо у конструкції впливає не лише тривалість, а і амплітуда коливань при ущільненні суміші – при її збільшенні водопоглинання керамзитового гравію в суміші збільшується та підвищується міцність бетону [156]. Але вологість пористого заповнювача при приготуванні суміші впливає не лише на міцність бетону. Наприклад у

[157] показано, що застосування зволоженого керамзиту при виготовленні високоміцного керамзитобетону знижувало його морозостійкість.

В залежності від ступеня водопоглинання і міцності заповнювачів на властивості готового бетону в більшій або меншій мірі також впливає і порядок завантаження компонентів суміші в бетонозмішувач. У [158] рекомендується зволожувати пористий заповнювач безпосередньо перед завантаженням у витратний бункер. У роботі М.С. Хуторянського і Ф.І. Цапкіної [159] досліджувалися властивості керамзитоперлітобетону при трьох режимах завантаження компонентів: при завантаженні всіх матеріалів одночасно; при попередньому перемішуванні керамзитового щебеню з 2/3 води, після чого завантажувалися решта компонентів і води; при попередньому перемішуванні цементу з 50% води, після чого завантажувалися заповнювачі і решта води. Було встановлено, що найбільшу міцність і середню густину мають бетони, приготовані по третьому режиму, тобто з приготуванням цементної суспензії, в якій потім перемішувалися компоненти. Детальніше цей ефект досліджувався М.З. Сімоновим для бетонів як на маломіцних заповнювачах (вулканічний шлак, спучений перліт), так і на міцних пористих заповнювачах (неспучений перліт, литоїдна пемза) [26]. Було встановлено, що завдяки застосуванню двостадійного перемішування суміші, коли на першій стадії перемішується вода з цементом, а на другій стадії цементна суспензія, що утворилася, перемішується з заповнювачами, міцність бетонів зростає в порівнянні з аналогічним, але приготованим при одностадійному перемішуванні, на 10-40% для складів на маломіцних заповнювачах і на 10-20% для складів на міцних пористих заповнювачах. Слід зазначити, що більшого ефекту було досягнуто при застосуванні пористого крупного заповнювача в поєднанні з пористим піском. Інше за типом двостадійне перемішування суміші застосовувалося при виготовленні керамзитобетонів з метою більш раціонального використання добавок-пластифікаторів. Згідно рекомендацій науково-дослідного інституту транспортного будівництва [160] у змішувач спочатку слід подавати заповнювачі, цемент і тонкомолоті добавки з 75-80% води, а за 1,5..2 хвилини

перемішування вже завантажувати решту частину води з пластифікатором. Це дозволяє не витратити добавку на вологу, яка буде адсорбована заповнювачем.

М.З. Сімоновим досліджувався вплив тривалості перемішування на властивості легких бетонів [26]. Для бетонів на маломіцних пористих заповнювачах, які досить легко дробляться, подовження часу перемішування підвищувало середню густину і міцність кінцевого продукту за рахунок зниження його об'єму. Проте для бетонів на міцних заповнювачах обкатаної форми, наприклад для керамзитобетону, при забезпеченні гомогенності суміші час її перемішування майже не впливає на властивості бетону.

Як показано в роботах О.А. Кучеренка і В.М. Вирового одним з ефективних методів підвищення якості керамзитобетону та інших легких бетонів є гідрофобізація поверхні пористих заповнювачів [161,162]. Для модифікації поверхні заповнювача (найчастіше – керамзитового гравію) використовуються кремнійорганічні рідини типу ГКР (ГКЖ), ЦНПС, СНО, та ін. [162,163], є досвід застосування бітумної емульсії [164]. Більшість подібних модифікаторів нерозчинні у воді, тому при обробці гравію і введенні до складу бетону вони застосовуються у вигляді емульсій. Кремнійорганічні полімери складаються з молекул, в яких поєднуються властивості полімерних органічних і неорганічних речовин. Основу кремнійорганічних полімерів становить силосановий скелет – ланцюг атомів кремнію і кисню, які чергуються між собою. Інші зв'язки кремнію компенсовані органічними радикалами або групами атомів. Наявність силосанових зв'язків ріднить ці полімери з кварцом – неорганічним полімером. У кремнійорганічних полімерах атом кремнію пов'язаний тільки з двома атомами кисню, а інші зв'язки заміщені органічними групами, що визначають їх еластичність [165].

У вітчизняному будівельному матеріалознавстві найбільш ретельно досліджена можливість застосування емульсій ГКР-94 (полігідросиліконату), сучасна назва – кремнійорганічна рідина 136-157М. Зараз ця рідина виробляється на Запорізькому державному підприємстві «Кремнійполімер» [166]. Також для гідрофобізації заповнювача використовують водорозчинні кремнійорганічні

сполуки – етил-, метил- і феніл- силіконати лужних металів, зазвичай натрію або калію. Найбільш поширеними після рідини 136-157М є етилсиліконат (ГКР-10), метилсиліконат натрію (ГКР-11Н), метилсиліконат калію (ГКР-11К) і фенілсиліконат (ГКР-12) [64,167]. Водорозчинні сполуки легко вводити до складу бетонів або розчинів з водою замішування [168], також вони більш зручні для обробки поверхонь виробів, тому що не вимагають приготування емульсій [169]. Проте при обробці пористих заповнювачів ефективність водорозчинних з'єднань нижче, ніж маслянистих кремнійорганічних рідин.

Обробка пористого заповнювача (гравію) емульсіями кремнійорганічних гідрофобізаторів знижує його водопоглинання, за рахунок чого досягається можливість зниження кількості води замішування без погіршення властивостей матеріалу. Також застосування даного технологічного прийому підвищує коефіцієнт розм'якшення і стійкість бетону в агресивних середовищах. При цьому міцність гравію, його насипна і питома густина, міжзернова порожність та пористість шматка залишаються практично незмінними. В дослідженнях О.А. Кучеренка було встановлено [170,171], що при обробці керамзиту емульсією ГКР-94 концентрації 5..8 г/л його водопоглинання знижується в 1,6-2,2 рази, а коефіцієнт розм'якшення збільшується на 10..40%. Підвищення концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії до 20 г/л змінювало властивості керамзиту вже несуттєво. На обробку 1 м³ керамзиту в середньому необхідно 240-350 мл 50% емульсії ГКР-94. При цьому в перші дві години, тобто під час максимального масообміну в суміші до початку активного тужавлення бетону, оброблений керамзит вбирає в 2-2,8 рази менше вологи з суміші, а величина його набухання в цементному камені є в 4..6 разів нижчою, ніж у необробленого гравію [170]. У роботі В.М. Вирового [162] показано, що гідрофобізація пористого гравію завдяки зниженню швидкості процесів поглинання покращує рівномірність розподілу вологи в розчинній частині бетону, що знижує структурні напруження і кількість мікродефектів в процесі структуроутворення. Ці властивості гравію і розчинної частини забезпечують

підвищення стійкості легкого бетону при зволоженні та висушуванні, зокрема у морській воді.

У роботах [172,173] досліджена можливість прискорення твердіння керамзитобетону за рахунок використання не повністю остиглого після випалу гравію. Це є альтернативою тепловологої обробки, але організація даної технології можлива виключно на лініях при керамзитових заводах. Застосування такої технології дозволило не лише прискорити темп набору міцності легкого бетону, а і збільшити товщину контактної зони пористого заповнювача з цементним каменем. Під впливом підвищеної температури в цементній матриці в зоні гранул низькотемпературні модифікації мікрокремнезему переходили у високотемпературні аналоги з утворенням α -кристобаліта з товщиною контактної зони до 1 мм, що більше, ніж для керамзитобетону на холодних заповнювачах. Такі зміни структури позитивно позначились на показниках міцності та морозостійкості матеріалу, але час використання сумішей на гарячих заповнювачах був вкрай обмеженим.

Фахівцями міжнародного комітету RILEM запропоновано розрізняти зовнішній і внутрішній догляд за бетоном [174]. Зовнішній догляд включає в себе всі операції, спрямовані на зволоження поверхні конструкції та/або збереження вологи. Внутрішній догляд класифікують на два типи: водний і безводний. Внутрішній водний догляд передбачає введення до складу бетону компонентів, які виконують функцію «водних резервуарів» в структурі цементної системи, що твердіє. Такими компонентами можуть бути або пористі заповнювачі, або полімери з високою адсорбційною здатністю. Внутрішній безводний догляд передбачає використання водорозчинних добавок, що знижують усадку. Як зазначалося вище, однією з переваг застосування пористих заповнювачів є їхня здатність забезпечувати внутрішній (водний) догляд в процесі структуроутворення бетону. Водопоглинання керамзиту безпосередньо в суміші складає від 7 до 14% в залежності від складу бетону і виду гравію [175]. Тобто при дотриманні належної технології приготування суміші пористі заповнювачі є ефективними запобіжниками надмірних

усадкових деформацій та тріщиноутворення при твердінні бетону [176,177]. Крім того, підтримання належної внутрішньої вологості забезпечує більш високу ступень гідrataції в'язучого, що покращує показники водонепроникності та морозостійкості бетону [178]. Це пов'язано з тим, що в процесі структуроутворення композиту пори краще заповнюються продуктами гідrataції цементу, відповідно знижується відкрита пористість і проникність бетону [179]. Але в легких бетонах вміст пористих заповнювачів набагато більше, ніж потрібно для внутрішнього догляду, через що у роботі [180] запропоновано не проводити попереднє замочування заповнювача до стану повного водонасичення, тому що це ускладнює технологічний процес і знижує міцність заповнювача. Цей висновок в цілому не суперечить викладеному вище.

Таким чином, застосування пористих заповнювачів обумовлює певні технологічні особливості приготування бетонних сумішей. Використання таких технологічних прийомів, як зміна режиму і технології перемішування суміші, зокрема порядку завантаження компонентів у змішувач та часу перемішування, зволоження заповнювача, гідрофобізація його поверхні на ін. дозволяє ефективно управляти структурою і властивостями легких бетонів, за рахунок чого вирішувати задачу підвищення довговічності матеріалу. Поглинання вологи пористим заповнювачем активно впливає на процеси структуроутворення композиту, при цьому найбільш активно це відбувається в контактній зоні заповнювача, але дещо спрощує процедуру догляду за бетоном.

1.4 Механізми корозійних пошкоджень бетону конструкцій гідротехнічних споруд

Корозія бетону та інших будівельних матеріалів обумовлені складними гетерогенними хімічними реакціями, компоненти яких знаходяться в різних фазових станах. Згідно загальноприйнятої класифікації В.М. Москвіна [17] по сумі провідних ознак прийнято виділяти три основні види корозії бетону. До першого виду відносять процеси, які виникають при дії рідких середовищ, здатних розчиняти компоненти цементного каменю і виносити їх зі структури.

Ці процеси інтенсивно протікають при фільтрації води крізь бетон, а якщо у воді містяться солі, які не реагують безпосередньо зі складовими цементного каменю, вони можуть підвищити розчинність гідратованих мінералів цементного каменю внаслідок збільшення іонної сили розчину. До другого виду корозії відносять процеси, при яких відбуваються хімічні взаємодії (обмінні реакції) між компонентами цементного каменю і розчину. Продукти реакції, які утворюються при цьому, або легкорозчинні та виносяться зі структури, або відкладаються у вигляді аморфної маси, яка не впливає на подальший руйнівний процес. Такий вид корозії виникає при дії на бетон розчинів кислот і деяких солей. Третій вид корозії включає процеси, при розвитку яких в порах бетону відбуваються накопичення і кристалізація малорозчинних продуктів реакції зі збільшенням об'єму твердої фази. Кристалізація та інші вторинні процеси, що розвиваються в бетоні, створюють внутрішні напруження, які можуть призвести до пошкодження структури композиту. До цього виду корозії відноситься корозія при дії сульфатів, яка є типовою при контакті бетону з морською водою. Руйнування відбувається через зростання кристалів гідросульфід-алюмінату кальцію, кристалізацію солей при наявності поверхні випаровування для конструкцій, частково занурених у розчин солі, та полімеризацію мономера зі збільшенням об'єму. В.Л. Чернявський вказував на деяку неоднозначність у фізичній інтерпретації результатів корозії другого виду, при якій продукти корозії, з одного боку, можуть залишатися в структурі бетону, а з іншого – виділятися з неї. Відповідно таку класифікацію процесів корозії не цілком можна застосовувати по відношенню до рідких і та газоповітряних агресивних середовищ [181].

Для гідротехнічних споруд основним агресивним середовищем є вода [61]. Більш детальна класифікація основних видів корозії бетону під дією природних вод була запропонована В.В. Кіндом [182]. Це класифікація виділяє: корозію вилуговування, яка викликається розчиненням та виносом гідроксиду кальцію, що міститься в цементному камені; кислотну корозію як результат дії кислот при значеннях показника рН менше 7; вуглекислотну корозію, обумовлену дією

на цементний камінь вуглекислоти, яка є окремим випадком кислотної корозії; сульфатну корозію (сульфоалюмінатну при дії на цемент іонів SO_4^{2-} з концентрацією до 1000 мг/л; сульфоалюмінатногіпсову при концентрації іонів SO_4^{2-} більше 1000 мг/л, і гіпсову під дією води, що містить велику кількість Na_2SO_4 або K_2SO_4); магнезіальну корозію, яка включає власне магнезіальну під дією лише катіонів магнію і сульфатно-магнезіальну, яка відбувається в цементному камені при спільній дії на нього іонів Mg^{2+} і SO_4^{2-} .

В.І. Бабушкіним була запропонована більш «загальна» класифікація механізмів корозійних процесів в бетоні, які поділялися на три умовні групи: фізичні, фізико-хімічні та хімічні [183,184]. Хімічна і фізико-хімічна корозія має пошаровий характер, тобто спочатку зачіпає поверхневі шари матеріалу, а з часом фронт корозії просувається вглиб виробу [184-186]. Також важливо враховувати те, що швидкість процесу корозії залежить як від внутрішньої дифузії агресивних компонентів в капілярно-пористій середовищі бетону, так і від інтенсивності підведення агресивного середовища до поверхні конструкції.

В.Л. Чернявський пропонував розрізняти два основних типи корозійних процесів в бетоні на основі мінеральних в'язучих, при цьому розглядав це як розвиток класифікації В.М. Москвіна. Перший тип реалізується за схемою видалення компонентів твердої фази зі структури бетону, другий тип – за схемою накопичення твердих продуктів в структурі бетону. Також відділяється «змішаний» (проміжний) тип корозії, пов'язаний зі спільним протіканням в бетоні корозійних процесів перших двох типів [181]. До першого типу можуть бути віднесені процеси, які викликає фільтрація води і розчинів, дія від'ємних температур, нагрівання, випромінювання, електричного струму, усадки і навантажень, що перевершують розрахункові рівні, а також переміщення абразивних матеріалів. До другого типу відносяться процеси стикання бетону з сульфатними, вуглекислотними, нітратними та іншими водними розчинами і газами, кислотами і лугами, органічними і біогенними речовинами, кристалогідратними сольовими утвореннями із зовнішнього середовища, набухання в'язучого при інтенсивному зволоженні бетону. Перший тип

супроводжується зменшенням об'єму твердої фази бетону, другий – її збільшенням. Частка пустот у вигляді пор, капілярів, тріщин, зон ослаблення структури в бетоні в першому випадку збільшується, а в другому – зменшується.

В реальних умовах рідко зустрічається корозія тільки одного виду. Крім основних видів корозійних процесів існують деякі специфічні види впливів, наприклад, корозія в результаті внутрішніх процесів взаємодії цементного каменю і заповнювачів, зниження міцності бетону при дії адсорбційно-активних середовищ, корозія, зумовлена біологічними процесами і т.д. При накладенні процесів корозії бетону та арматури ситуація додатково ускладнюється. Таким чином, найчастіше корозійне руйнування бетону відбувається по «змішаній схемі», відповідно не завжди вдається виділити який-небудь вид корозії як визначальний.

З врахуванням того, що корозія є процесом перенесення агресивного компонента в порах тіла, що супроводжується розчиненням твердої фази, хімічними реакціями з виділенням новоутворень та інших речовин, глибина та швидкість процесу корозійного пошкодження може бути виражена рівнянням, які враховують концентрації агресивних речовин, пористість, дифузію, температуру та хімічні процеси. У подібних умовах для оцінки довговічності В.Л. Чернявський вважав доцільним використовувати багатопараметричну оцінку функціонального стану, яка відображає захисні (проникність, реакційна здатність) і конструкційні (міцність, деформативність) властивості матеріалу [187]. Відомо декілька основних методик прогнозування ступеня корозійного пошкодження будівельного матеріалу в заданий термін. Наприклад, для прогнозування корозійного пошкодження бетону в агресивному середовищі часто використовується квадратична залежність ступеня корозії від її тривалості [188]. Проте в більшості випадків процес корозії бетону та інших будівельних композитів в залежності від типу агресивного середовища, складу і щільності матеріалу, а також зовнішніх умов, описується різними кінетичними кривими [189]. Наприклад у роботі [190] глибину корозійного пошкодження матеріалу (l) пропонується розраховувати за формулою $l = A\sqrt{\tau}$, де τ – час, A –

коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу і агресивності середовища. В.Б. Ратінов для розрахунку глибини корозійного ураження цементного каменю пропонує формулу [191]:

$$l = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{dD}{k}} \quad (1.3)$$

у якій d – середній діаметр пор; χ – звивистість пор (враховує їх форму); D – коефіцієнт дифузії; k – константа швидкості реакції. Тобто ця формула враховує залежність глибини корозії не тільки від пористості та форми пор, але і від дифузійних процесів.

У роботах С.М. Леоновича [192,193] розрахунок довговічності залізобетонних конструкцій базується на застосуванні коефіцієнта надійності за терміном служби. Розглядаються життєві цикли для основних деградаційних процесів в бетоні і арматурі, періоди ініціювання та поширення корозії. Модель бетону представлена як дворівнева структура: матриця затверділого цементного каменю з включеннями і порожнинами різної форми (тріщинами) як результат зовнішніх впливів, що змінюють напружено-деформований стан. При цьому прогнозування довговічності ведеться з використанням підходів механіки руйнування і спирається на концепцію накопичення дефектів в структурі у вигляді пор, капілярів і тріщин до їх критичної концентрації. Окрема увага приділяється впливу карбонізації і хлоридів на корозію арматури як фактор довговічності залізобетону [194]. Найбільш розвинена математична теорія процесів корозії бетону, в тому числі при частковому водонасиченні та при наявності поверхні випаровування вологи, була розроблена А.С. Файвусовичем [195,196 та ін.]. Однією з основ даної теорії є утворення рухомого фронту хімічних перетворень матеріалу або паралельно поверхні, що змочується, або у поровому просторі композиту з утворенням фронту циліндричної форми.

Проте описані вище методи розрахунків ступеня корозійного пошкодження в більшій мірі відносяться до важкого бетону або цементного каменю з умовно непроникним крупним заповнювачем. Відповідно їх неможна повністю переносити на бетони на пористих заповнювачах через більш складну

і багаторівневу структуру цього композиту. В бетонах на легких заповнювачах капілярно-пористу структуру має не тільки цементний камінь, а й сам заповнювач. На відміну від важких бетонів, значний вплив на подібні композити оказує процес міграції води як в заповнювач, так і з нього. В роботі [197] Л.П. Орендліхер вказує на те, що подібні процеси протікають по закону маятника. Тобто пориста структура заповнювача є причиною доволі складних тепломасообмінних процесів, що проходять у бетонній суміші з моменту її змішування з водою і продовжуються тривалий час при твердінні бетону і експлуатації конструкції. Ці процеси в різній мірі впливають на структуру під час приготування, укладання, ущільнення суміші та при твердінні бетону. Крім того, певна частка води і водних розчинів може мігрувати через пори заповнювача в бетоні.

І.А. Іванов [2] вказував, що при оцінці структури бетону, особливо легкого, необхідно звертати увагу на два її основні критерії: однорідність і злитість. Практично всі дослідники приходять до висновку, що структура високоміцного і довговічного бетону на легких заповнювачах має бути щільною, тобто об'єм розчинної складової бетону повинен бути не менше обсягу міжзернових порожнеч в крупному заповнювачі [2,26,197]. Наприклад, у роботі [198] для керамзитобетону на основі гравію однієї фракції найкращі якісні показники досягалися при об'ємній концентрації заповнювача 0,54-0,6. Н.А. Попов робить висновок [199], що лише злита структура бетону на легких заповнювачах може забезпечити весь комплекс оптимальних властивостей матеріалу, навіть включаючи теплопровідність.

Важливим фактором корозійної стійкості бетону в конкретних умовах експлуатації є безпосередньо стійкість його заповнювача (заповнювачів). Найчастіше недостатню корозійну стійкість, особливо в умовах впливу кислот, мають природні пористі заповнювачі. Але при забезпеченні високої непроникності композиту як капілярно-пористого тіла вплив стійкості заповнювача до агресивного середовища на довговічність бетону знижується.

Для забезпечення довговічності бетону в умовах агресивних впливів також дуже важливішим є правильний вибір цементу, який застосовується для приготування композиту. Доволі багато фундаментальних досліджень було присвячено проблемі стійкості різних видів цементних систем в агресивних середовищах [184,185 та ін.]. При виборі типу цементу для бетону, який експлуатується в агресивному середовищі, необхідно враховувати, що при хімічній взаємодії компонентів цементної матриці з даним середовищем майже завжди утворюються нерозчинні в цьому середовищі сполуки. В результаті ці сполуки відкладаються у порах і капілярах та тій чи іншій мірі кольматують їх. Це призводить до уповільнення (гальмування) дифузії агресивних компонентів зовнішнього середовища вглиб бетону, що знижує швидкість корозії [200,201]. У зв'язку з цим більшість видів хімічної корозії (вилуговування, кислотної, магнезіальною і т.п.) можна умовно віднести до числа самогальмуючих процесів. Відповідно за рахунок правильного підбору цементу можна посилити процеси самогальмування процесів корозії і тим самим підвищити корозійну стійкість бетонів і конструкцій в конкретному середовищі експлуатації.

Для залізобетонних конструкцій довговічність має бути забезпечена комплексно, тобто з врахуванням арматури, примикань, швів тощо. Тривалість захисних властивостей бетону по відношенню до арматури у повітряно-вологих умовах визначається товщиною захисного шару і швидкістю його нейтралізації вуглекислим газом, яка, зокрема, залежить від коефіцієнта дифузії газу в бетоні [202]. Найбільша швидкість карбонізації спостерігається при середній відносній вологості порової структури бетону [203]. Під час експлуатації у воді на перший план виходять інші чинники. Наприклад, у роботі І.М. Грушко [204] показано, що у морській воді захищена «рядовим» не модифікованим бетоном арматура кородує вже через три місяці. Фільтрація води також суттєво впливає на корозійні процеси бетону. Й. Штарк [205] вказував що саме опір бетону проникненню агресивних речовин є запорукою його довговічності.

Таким чином, задача зниження корозійного пошкодження бетону має вирішуватися з врахуванням всього спектру дій корозійного середовища на

його структуру: в капілярах, порах та внутрішніх поверхнях розділу. При цьому окрему увагу слід приділяти контактній зоні заповнювача, а також пористості та стійкості самих заповнювачів. Для бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, для яких основним агресивним середовищем є вода, однією з першочергових задач є зниження проникності матеріалу. Саме показник водонепроникності, безперечно одночасно з товщиною захисного шару бетону, геометричними параметрами самої конструкції та хімічними властивостями компонентів бетону, визначає стійкість від корозії та відповідно довговічність обводнених конструкцій в цілому [206]. В'яжуче, як один з основних компонентів для приготування бетону, також має бути стійким до впливу середовища через можливість виникнення руйнівних процесів, зокрема слабо пов'язаних з фільтрацією. Для більшості гідротехнічних споруд основною властивістю таких в'яжучих, що забезпечує довговічність бетону, є їхня сульфатостійкість [17,64,80,150, 200, 207 та ін.].

1.5 Забезпечення довговічності бетону

в умовах проникнення води крізь конструкцію

Хоч поняття довговічності є доволі сталим, для бетонів та конструкцій дослідники конкретизували його по різному. Й. Штарк під довговічністю розумів, що будівельні елементи з бетону при достатньому догляді протягом передбаченого терміну служби стійкі до всіх впливів [205]. В.І. Бабушкін довговічністю називав властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і контролю [184]. За В.Б. Ратіновим і Г. Добролюбовим довговічність це здатність будівель і споруд служити тривалий час в реальних умовах впливу зовнішнього середовища [208]. А.В. Мішутін довговічність матеріалу характеризував як його здатність зберігати свою основну конструктивну функцію протягом заданого терміну в заданих умовах експлуатації з врахуванням найбільш ймовірних деструктивних впливів середовища [209].

Останнє визначення можна вважати таким, що найбільш точно характеризує поняття довговічності саме для матеріалів в бетонних і залізобетонних тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд.

Як показано в п.1.4, проникнення вологи крізь конструкції є причиною більшості корозійних процесів в бетонах гідротехнічних споруд. При цьому рух крізь товщу бетону може обумовлюватися не тільки тиском води, але і градієнтом вологості на протилежних поверхнях конструкції або осмотичним ефектом [210]. Тобто для розвинення методів забезпечення довговічності бетонів даних конструкцій, зокрема бетонів на пористих заповнювачах, необхідно проаналізувати основні механізми проникнення вологи через структуру бетону.

Бетон є капілярно пористим тілом через те, що його капілярний потенціал, який визначається відношенням потенціальної енергії капілярних сил до одиниці маси рідини, значно більше потенціалу поля тяжіння [211,212]. Існують також інші моделі для уявлення структури бетону, але вони принципово не виключають впливу пор і капілярів на процеси в бетоні як у композиційному матеріалі. Пористість бетону складається з мікро- (капіляри радіусом до 10^{-5} см) і макропористі (капіляри і пори радіусом понад 10^{-5} см) цементного каменю, пористості, яка може утворюватися на поверхні контакту частинок заповнювача і цементного каменю, а також пористості заповнювача [212]. Пори вважаються капілярними, якщо поверхня рідини в них утворює меніск, обумовлений силами поверхневого натягнення і який мало викривлюється силою тяжіння.

Проникнення рідини в бетон конструкцій може відбуватися за механізмом фільтрації, а також носити дифузний характер. При відсутності гідростатичного напору проникнення вологи носить дифузний характер, проте з врахуванням умов експлуатації гідротехнічних споруд більш поширеною і небезпечною з точки зору корозійних пошкоджень бетону є фільтрація [213]. Фільтрація вологи в бетоні проходить згідно загальних законів фільтрації крізь пористі тіла. В.М. Москвін розрізняв в цементному камені пори, що розділені твердою

фазою, та ізольовані пори [17]. Г.І. Горчаков класифікував пори на гелеві, контракційні та капілярні [214]. В роботах Ф.М. Іванова і С.Н. Алексєєва в залежності від властивостей води у порах розрізняються ультрамікропори з діаметром менше 100 \AA , в яких молекули води піддаються дії поверхневих сил твердої фази; мікропори діаметром від 100 до 1000 \AA , в яких властивості води в значній мірі обумовлюються впливом поверхні твердої фази, особливо з урахуванням неоднорідності перетину пор; макропори діаметром понад 1000 \AA , в яких властивості води за виключенням сорбційного шару не відрізняються від властивостей вільної води [215,216]. О.Є. Шейкін вказував, що пори в цементному камені та бетоні являють собою переважно з'єднані тонкі канали капілярів, які на більш пізніх стадіях твердіння бетону роз'єднуються цементним гелем. У гелі теж присутні пори, проте набагато менших розмірів [217,218]. Середній розмір гелієвих пір становить всього $15..30 \times 10^{-8}$ см, проте Т. Powers вважав, що через них може проникати рідина [219,220]. Й. Штарк вказував, що рідина може проникати в бетон крізь капілярні пори в цементному камені, пори в контактній зоні між цементним каменем і заповнювачем, а також крізь мікротріщини [205].

Але за параметрами пористості матеріалу можна лише приблизно судити про можливу ступень його проникності. Для капілярно-пористого матеріалу зі сполученими капілярами змінного перерізу проникність характеризується найменшим діаметром каналів, а не середніми розмірами сполучених пор, тому що великі пори, що визначають величину пористості матеріалу, можуть з'єднуватися мікрокапілярами, які і визначатимуть проникність матеріалу [212]. Наскрізні капіляри в бетоні мають діаметр від 10^{-7} см до 10^{-2} см і така різниця є причиною існування різних механізмів переносу рідини і газу в структурі композиту. Для рідини такими механізмами є в'язка течія (потік), капілярне перенесення і дифузне перенесення. В'язкий потік може існувати у порах і капілярах радіусом більше $10^{-4} - 10^{-3}$ см, капілярний – при радіусі $10^{-5} - 10^{-3}$ см, а при радіусі пор менше 10^{-5} см може існувати лише молекулярна дифузія. Крім того, частина води знаходиться в межах поля сил твердої фази, тобто

адсорбується. Ця вода має велику в'язкість, але досить рухома і теж бере участь у фільтрації [210]. Таким чином проникність цементного каменю і бетону в основному визначається його капілярною пористістю. Наприклад, А.М. Невілл пояснював низьку проникність цементного гелю з пористістю 28% тонкою структурою цементного тіста, що твердіє: «вода проникає через капілярні пори значно легше, ніж через малі пори гелю: цементний камінь у своїй масі в 20-100 разів більш проникний, ніж сам гель» [210].

Як показано вище, водонепроникність є одним з найважливіших показників якості з позиції забезпечення довговічності бетону конструкцій гідротехнічних споруд. Проникність бетону залежить від його структури, яка формується і змінюється протягом тривалого періоду, починаючи з моменту замішування бетонної суміші. Г.П. Вербецький виділяв три стадії у процесі формування структури бетону [206]. Перша стадія це утворення капілярно-пористої системи до тужавлення бетонної суміші. Основними факторами на цій стадії є склад суміші, вид цементу, В/Ц, консистенція і спосіб ущільнення бетонної суміші. Також відмічався великий вплив процесів седиментації. Друга стадія це початкове затвердіння бетону. У цей період істотний вплив на характер утворення структури надають температурно-вологі умови твердіння. Третя стадія це стадія експлуатації бетонної конструкції. Залежно від характеру взаємодії конструкції з водним середовищем, в структурі бетону відбуваються зміни, що ведуть до підвищення або зниження його проникності. В роботах Г.Добролюбова і В.Б. Ратінова показано, що при однаковому загальному обсязі пор проникливість може відрізнятись в десятки разів в залежності від їх розміру [208]. В.М. Москвін і Г.І. Горчаков основною умовою високої непроникності бетону вважали створення тонкопористої структури матеріалу з розміром пор переважно до 1 мікрона [17,214].

О.Л. Дворкін вказував [221], що нормування водонепроникності бетону можливо як маркою за водонепроникністю (W), так і за обмеженням коефіцієнта фільтрації (K_f). Марка за водонепроникністю, як відомо, характеризується найбільшим тиском, при якому не спостерігається

просочування води крізь зразки. Коефіцієнт фільтрації характеризує інтенсивність фільтрації води крізь бетон та вираховується за формулою:

$$K_{\phi} = \eta k_{\Pi} \frac{Q \cdot \delta}{S \cdot \tau \cdot \Delta P} \quad (1.4)$$

де Q – кількість фільтрату, см^3 ; δ – товщина зразка, см ; η – коефіцієнт, що враховує в'язкість води при різній температурі; S – площа зразка, см^2 , τ – час випробування зразка, с ; ΔP – різниця тиску води на вході і виході зразка, МПа ; k_{Π} – коефіцієнт, що залежить від діаметру зразка.

Марка за водонепроникністю та коефіцієнт фільтрації кореляційно пов'язані між собою, хоча перший параметр О.Л. Дворкін і Л.Й. Дворкін [8,221] вважали значно більш грубим. Одночасно з цим для важких бетонів даними дослідники було встановлено степеневу залежність коефіцієнта фільтрації від міцності бетону, яка має вигляд $K_{\phi} = 126 \cdot R_{cn}^{-7,7}$ [221,222].

На нашу думку, хоч з позицій забезпечення довговічності бетону як матеріалу нормування його водонепроникності або коефіцієнту фільтрації і є фактично рівноправним, з позицій довговічності бетону безпосередньо у конструкції між даними показниками існує певна різниця. Коефіцієнт фільтрації можна вважати більш доречним для оцінки якості та довговічності бетону конструкцій споруд, для яких важливою є саме втрата води або іншої рідини крізь конструкції. Наприклад, для стінок резервуарів, каналів, сховищ. Для бетонів плавучих залізобетонних споруд більш справедливо нормувати марку за водонепроникністю, тому що для конструкцій даних споруд критичним є саме проявлення ознак фільтрації на «сухому» боці конструкції.

Відомо, що проникність бетону змінюється в часі. А.М. Невілл показав, що проникність цементного каменю в процесі гідратації зменшується, тому що об'єм гелю включно з порами приблизно в 2,1 рази більше об'єму негідратованого в'язучого і гель заповнює частину пор, які спочатку були заповнені водою [210]. Зменшення В/Ц цементного тіста від 0,7 до 0,3 зніжує коефіцієнт проникності в тисячу разів, аналогічне зниження має місце в цементному камені з В/Ц = 0,7 за період твердіння від 7 діб до 1 року.

Проникність бетону також відповідно знижується при зростанні його віку, хоч і не настільки відчутно. За даними [207] при твердінні у вологих умовах водопроникність активно знижується у віці до 90 діб – приблизно втричі в порівнянні з бетоном у віці одного місяця, а у віці 270 діб проникність стає приблизно у четверо меншою за «початкову» 30 денну. Коефіцієнт фільтрації бетону аналогічним чином знижується у міру зростання віку матеріалу (впливу води) і ця зміна згідно [207] описується експоненціальною фікцією:

$$K_{\phi(\tau)} = K_{\phi 0} e^{-(\tau/T)^b} \quad (1.5)$$

де $K_{\phi(\tau)}$ – коефіцієнт фільтрації через τ діб фільтрації, м/с, $K_{\phi 0}$ – початковий коефіцієнт фільтрації, у першу добу просочення води крізь бетон, м/с, b і T – емпіричні параметри функції самоущільнення, які залежать від складу бетону, гідрокарбонатної лужності води та градієнту напору.

Г.П. Вербецький вказував, що з початку зволоження або фільтрації води крізь бетон найбільш помітним проявом зміни структури є зменшення ефективної пористості цементного каменю. Загальна пористість каменю, визначена на висушених зразках, відрізняється від ефективної пористості, під якою розуміється відношення об'єму пор, визначених шляхами фільтрації, до об'єму зразка [206]. Вона завжди менше загальної пористості цементного каменю і на відміну від останньої змінюється у великих межах залежно від тривалості взаємодії зразків з водою. Тобто в процесі експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій може проходити процес самоущільнення бетону. Проте в умовах агресивного впливу води як середовища, як вказував В.Л. Чернявський [181], одночасно мають місце руйнівні (пов'язані з корозією) і утворюючі (пов'язані з триваючою гідратацією реліктів в'язучого) процеси. На взаємини між даними процесами впливають особливості бетону, вид та інтенсивність експлуатаційних обставин. Результатом дії на бетон корозійно-активного середовища може бути або видалення структурних компонентів бетону, включаючи продукти корозії, або накопичення продуктів корозії та осадків у вигляді компонентів середовища, так само як і продуктів «пізньої» гідратації в структурі бетону. При цьому чим нижче ступінь агресивності

середовища (за інших рівних умов), тим вплив утворюючого фактора буде більш істотним.

Таким чином, проникнення води крізь конструкцію може викликати суттєво відмінні зміни в структурі бетону даної конструкції. При фільтрації рідини проходить корозійне винесення розчинених компонентів цементного каменю, але одночасно активується гідратація реліктів в'язучого. Також в наслідок фільтрації може відбуватися накопичення солей, продуктів корозії цементного каменю та «пізньої» гідратації цементу в структурі композиту – насамперед в капілярах і відкритих порах. Останнє здатне виступати як утворюючим, тобто позитивним, так і руйнуючим чинником. При забезпеченні високої водонепроникності бетону в його структурі значно уповільнюється дія всіх процесів, пов'язаних з фільтрацією води крізь конструкцію. Але в даному випадку уповільнення «утворюючих» процесів, тобто пізньої гідратації та накопичення нерозчинних продуктів у порах і капілярах не можна вважати критичним через вже заздалегідь забезпечену високу непроникність композиту. Тобто досягнуте за рахунок високої непроникності уповільнення описаних вище «руйнуючих» процесів в структурі бетону дозволяє забезпечувати високу довговічність матеріалу в умовах проникнення води крізь конструкцію. При цьому для бетонів на пористих заповнювачах, які активно взаємодіють з цементно-піщаною матрицею і рідиною, що міститься в структурі композиту, непроникність має забезпечуватися з врахуванням впливу заповнювачів на капілярно-порову структуру контактної зони та матеріалу в цілому.

1.6 Особливості умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд. Гіпотеза і мета досліджень

Викладений в попередніх розділах аналіз показав, що бетони на легких заповнювачах є ефективними матеріалами для значної частки тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних. Задача підвищення довговічності таких бетонів залишається актуальною, а для

конструкцій споруд, ремонт, заміна або відновлення яких є складними, забезпечення довговічності бетону стає стратегічною метою. Насамперед це стосується конструкції великогабаритних плавучих залізобетонних споруд, в яких найчастіше застосовується бетон на штучних пористих заповнювачах. Також для вирішення певних економічних і екологічних задач важливим є створення практичних прийомів підвищення довговічності бетонів на природних пористих заповнювачах, що дозволить розширити сферу застосування даних матеріалів у гідротехнічному будівництві. При цьому методи вирішення задачі підвищення довговічності бетонів на різних типах пористих заповнювачів є доволі схожими, хоч і мають певні особливості.

За визначенням С.В. Шестоперова першою стадією проектування довговічного бетону є визначення умов, в яких він буде працювати в споруді, конструкції або її частини [223]. Функціональне призначення гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних, обумовлює певні особливості умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях даних споруд [80,150,151,182]. Ці особливості визначаються наявністю трьох суттєво відмінних зон зовнішнього впливу експлуатаційного середовища: підводної, надводної, та зони змінного рівня води (рис.1.4). Для всіх трьох зон різним є гідростатичний тиск води, вологість і температура середовища експлуатації. Дані зони утворюють умови для існування перманентного нерівноважного стану бетону по висоті та перетину тонкостінної конструкції, а також до існування динамічних впливів на дані конструкцію. Перманентний нерівноважний стан передбачає протікання процесу безперервної адаптації матеріалу до умов експлуатації [187], в першу чергу це стосується бетону в зоні змінного рівня води. Адаптація бетону як композиційного матеріалу реалізується шляхом довільних процесів структурних перебудов на всіх рівнях структурних неодномірностей [15]. Формування структури легких бетонів відбувається шляхом взаємодії двох капілярно-пористих середовищ – заповнювача і цементно-піщаної матриці. Внаслідок такої взаємодії протікають процеси обміну вологи та пов'язані з ними процеси об'ємних деформацій,

величина і кінетика яких визначається капілярною пористістю. Взаємодія пористого заповнювача і матричного матеріалу продовжується та трансформується в процесі експлуатації конструкції, що впливає на функціональний стан матеріалу в конструкції. При цьому дана взаємодія відрізняється в різних зонах зовнішніх впливів.

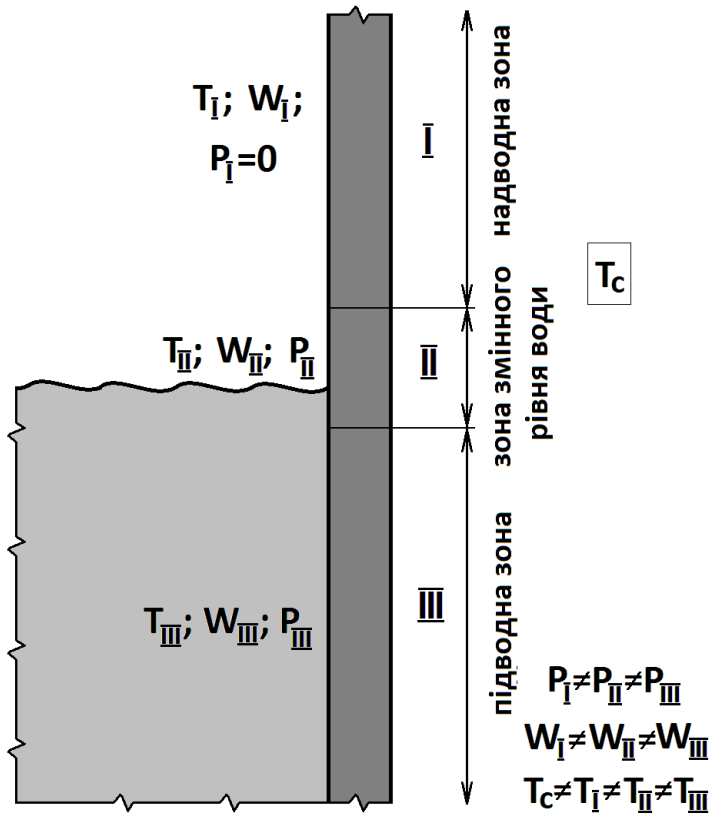


Рис.1.4. Схема умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд:

P – гідростатичний тиск води;

W – вологість середовища експлуатації і бетону;

T – температура середовища експлуатації (T_c – температура «сухого» боку конструкції)

Для зниження несприятливого впливу внутрішнього обміну вологи на процеси структуроутворення та експлуатаційної легкого бетону стоїть задача зменшення масообміну між пористим заповнювачем і цементно-піщаною матрицею як при твердінні, так і при експлуатації матеріалу. Це має знизити величину вологісних деформацій і забезпечити покращення сумісної роботи заповнювача і матриці. Але навіть при мінімальних вологісних деформаціях заповнювача на початкові та експлуатаційні деформації та адаптивні властивості бетону впливає капілярно-порова структура цементно-піщаної матриці. Відповідно важливою задачею є організація такої структури цементно-піщаної матриці, яка здатна забезпечити мінімальне поглинання і проникнення вологи з одночасним зниженням вологісних деформацій. Це дозволить знизити

градієнти температурних і вологісних деформацій по висоті і перетину конструкцій в різних зонах впливів експлуатаційного середовища.

Таким чином, було сформульовано робочу гіпотезу дисертації. Підвищення фізико-механічних характеристик бетону на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд, що визначають його довговічність, може бути досягнуто шляхом регулювання взаємодії між цементно-піщаною матрицею та заповнювачем в процесі структуроутворення і експлуатації бетону, спрямованого на покращення їх сумісної роботи, зокрема за рахунок зниження вологісних деформацій заповнювача. При цьому має забезпечуватися низька проникність як матриці, так і заповнювача при його роботі в даній матриці. Задача вирішується шляхом створення структури зі зниженою капілярною пористістю цементно-піщаної матриці, зокрема в контактній зоні заповнювача. Ефективний вплив на структуру легких бетонів може бути здійснений за рахунок застосування таких рецептурних методів, як введення модифікаторів різного типу і дисперсного армування, а також технологічних методів обробки поверхні пористого заповнювача, спрямованих на покращення його роботи в цементно-піщаній матриці в вологих умовах експлуатації.

Виходячи з робочої гіпотези і спираючись на проведений огляд технічної літератури, була сформульована *мета роботи*: розвиток теоретичних основ і створення практичних методів отримання легких бетонів на пористих заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих, за рахунок управління структурою шляхом застосування модифікаторів і здійснення операцій, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

Для досягнення мети були поставлені завдання дослідження, які наведені у вступі даної роботи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ПРИНЦИПИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна схема проведення досліджень

Як зазначалося вище, проведений аналіз основних властивостей і досвіду застосування бетонів на легких заповнювачах у гідротехнічному будівництві, а також особливостей умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, дозволив сформулювати робочу гіпотезу дисертації, мету і основні завдання роботи. Для досягнення мети і вирішення завдань роботи була розроблена загальна послідовність проведення досліджень, яка складається з декількох пов'язаних етапів. Кожний з етапів спирався на результати попередніх етапів та певних пошукових досліджень, а також в свою чергу слугував базою для наступних етапів роботи.

На першому етапі за результатами проведеного аналізу даних технічної літератури та особливостей умов експлуатації бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, а також власних натурних обстежень стану бетонів даних конструкцій, були встановлені основні причини руйнування бетону з врахуванням зони його розташування відносно рівня води. На основі отриманих даних були обґрунтовані загальні вимоги до бетону тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, які забезпечують необхідний рівень їх довговічності в конкретних умовах експлуатації. Результати даного етапу описані у п.2.3.

На другому етапі був проведений аналіз впливу особливостей структуроутворення бетонів на легких заповнювачах на фізико-механічні властивості та довговічність даних матеріалів. Зокрема був проаналізований вплив вологісних деформацій на сумісну роботу заповнювача і цементно-піщаної матриці. Досліджено набухання і усадка штучного пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умов твердіння легкобетонної суміші. Проаналізовано вплив різних методів обробки керамзитового гравію на

його властивості, зокрема вологісні деформації, а також на фізико-механічні властивості легкого бетону. Обґрунтовано спрямованість змін структури бетонів на легких заповнювачах для підвищення їх довговічності та механічних властивостей. Результати даного етапу описані у третьому розділі роботи.

На третьому етапі досліджувався вплив модифікаторів різного типу (пластифікуючої добавки і мікрокремнезему), кількості в'язучого, дисперсного армування і розсунення пористого заповнювача на структуру, фізико-механічні властивості та довговічність керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. Вплив даних рецептурних прийомів управління структурою і властивостями легких бетонів досліджувався в комплексі зі впливом технологічного прийому обробки пористого заповнювача (керамзиту) цементною суспензією.

На четвертому етапі досліджувалася структура, механічні властивості, довговічність та кольорова гама декоративних легких конструкційних керамзитобетонів, які, зокрема, можуть бути використаними в якості суднобудівних. З метою забезпечення довговічності декоративних бетонів, зокрема було застосовано обробку керамзиту цементною суспензією. Результати третього та четвертого етапів роботи описані у четвертому розділі роботи.

На п'ятому етапі досліджувався вплив комплексної модифікації кольматуючою і пластифікуючою добавками на структуру і властивості суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів. Також вивчалася ефективність застосування технологічного прийому гідрофобізації пористого гравію як операції, спрямованої на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці, у вирішенні завдань підвищення довговічності і покращення експлуатаційних властивостей суднобудівних керамзитобетонів. Результати даного етапу описані у п'ятому розділі роботи.

На шостому етапі досліджувалися властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів, зокрема, гранульованому піносклі і вапняковому щебені. Вивчався вплив модифікаторів (пластифікаторів, мікрокремнезему),

дисперсного армування і попередньої обробки вапнякового щебеню цементною суспензією на структурні показники, механічні властивості та довговічність бетону. Також досліджувалася можливість застосування пористих пісків в легких бетонах тонкостінних конструкцій з метою зниженні середньої густини матеріалу при забезпеченні його довговічності та необхідного рівня фізико-механічних показників. Крім того були проведені дослідження властивостей дрібнозернистих бетонів і фібробетонів з використанням керамзитового і кварцового пісків різних фракцій при зафіксованій гранулометрії заповнювача. Методика даних досліджень дозволила порівняти вплив пористого легкого і кварцового заповнювачів на фізико-механічні властивості матеріалу нівелюючи при цьому зміну фракційного складу суміші. Було досліджено ефективність застосування пористих пісків різних фракцій з метою підвищення довговічності дрібнозернистих бетонів, які можуть використовуватися при ремонті і відновленні тонкостінних конструкцій. Результати даного етапу описані у шостому розділі роботи.

На сьомому етапі було проведено дослідне впровадження отриманих результатів. Проводився вибір оптимальних складів легких бетонів, розроблялися технології їх приготування, нормативні документи на використання легких бетонів у гідротехнічному і транспортному будівництві. Зокрема було розроблено проект Державного стандарту України. Результати даного етапу описані у шостому розділі роботи а також частково представлені у додатках до дисертації.

2.2 Методика і результати натурних обстежень бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд

У рамках даної роботи проводилися натурні обстеження бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема на легких заповнювачах. Було проведено обстеження і оцінка технічного стану бетону доковою частини залізобетонного корпусу плавучої ремонтної бази, яка на

момент обстеження у 2013 році знаходилася у порту «ТІС» в акваторії Малого Аджалицького (Григорівського) лиману. Згідно наданим документам це стоянкове судно було збудоване у 1989 році в Болгарії. Основним матеріалом конструкцій залізобетонного понтону судна є бетон на основі керамічного гравію. Понтон має розміри в плані 13×62 метри, висоту борту 3,7 метри. Залізобетонний корпус плавучої ремонтної бази розділений водонепроникними перегородками на 6 відсіків, для входу в відсіки в палубі передбачено 12 отворів. Зовнішній вигляд плавучої споруди показано на рис.2.1.а.

(a)



(б)



Рис.2.1. Зовнішній вигляд плавучої залізобетонної споруди, яку було обстежено (а), та приклади процесу проведення інструментального обстеження (б)

Обстеження споруди проводилося за описаною нижче методикою. Після знайомства з наявною документацією на плавучу споруду визначалася її умовна ієрархічна структура і проводилася розбивка вимірювальної сітки в межах кожної частини споруди для наступної діагностики та візуальних обстежень. Далі виконувалося візуальне обстеження кожної частини споруди при якому

реєструвалася наявність тріщин, відшарувань, зон фільтрації води та ділянок оголення арматури. Потім виконувалося інструментальне обстеження конструкцій за допомогою неруйнівних методів контролю. При цьому проводилося експрес-визначення міцності бетону ультразвуковим методом та за допомогою склерометру, приладом АГАМА-2 визначалася водонепроникність бетону по рівню його повітропроникності, в окремих ділянках визначалася глибина карбонізації бетону та приладом ІЗС-10 визначалася товщина захисного шару бетону в конструкції. На рис.2.1.б показано приклади процесу проведення інструментального обстеження.

На рис.2.2 показані характерні пошкодження залізобетонних конструкцій обстеженої плавучої споруди.

При обстеженні даної та деяких інших споруд використовувався розроблений автором в рамках даних досліджень у співавторстві з В.С. Дорофєєвим, В.М. Вировим і А.В. Мишутіним неруйнівний спосіб визначення однорідності бетону в конструкціях. Цей спосіб було захищено патентом України на корисну модель № 38003 [224]. В основу способу покладено принцип порівняння технологічної та експлуатаційної пошкодженості бетону в різних частинах конструкції, що дозволяє точніше оцінювати її стан і прогнозувати довговічність матеріалу з врахуванням виявлених неоднорідностей. Для визначення пошкодженості бетону поверхня залізобетонної або бетонної конструкції обробляється розчином тонина, наприклад, запареною дубової кори. Для проявлення технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу в бетоні має пройти карбонізація поверхневого шару. Але при обстеженні конструкцій споруд, які експлуатуються багато років, ця умова завжди витримана і бетон зазвичай має відчутну глибину карбонізації. В результаті обробки розчином тонина проявляється сітка технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу.

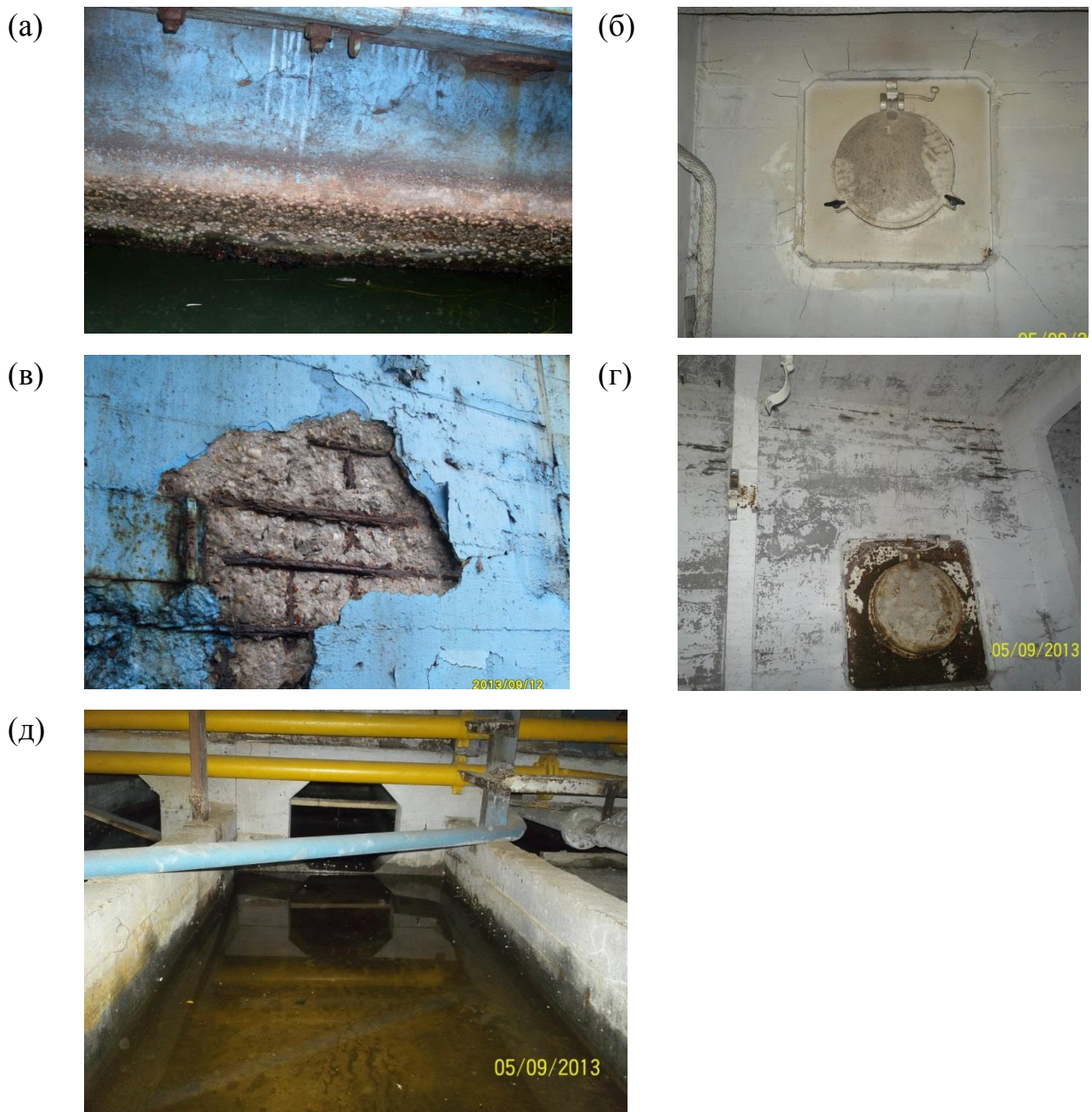


Рис.2.2. Характерні пошкодження залізобетонних конструкцій плавучої споруди: (а) – відшарування бетону у зоні змінного рівня води, (б) – утворення усадкових тріщин в зонах прямокутних отворів під ілюмінатори, (в) – відшарування захисного шару бетону з зовнішнього боку залізобетонних конструкцій, (г) – те саме з внутрішнього боку, (д) – зона фільтрації води

Далі на поверхні конструкції виділяється не менш, ніж три окремих приблизно рівних за площею ділянки на різних висотах (рис.2.3). Рекомендований розмір кожної з ділянок $0,8 \times b$ на $0,2 \times h$ (де b – ширина

конструкції, h – висота конструкції). Для великорозмірних конструкцій розміри ділянок можуть бути меншими за вказані при збереженні необхідної умови приблизно рівної площі. Верхня ділянка (позначається індексом I) має розташовуватися на відстані приблизно $0,1 \times h$ від верхньої грані конструкції, нижня (позначається індексом II) ділянка – на відстані $0,05 \times h$ від нижньої грані конструкції, середня (позначається індексом III) – приблизно на рівній відстані від верхньої і нижньої ділянок. Всі ділянки мають бути на відстані не менш $0,1 \times b$ від горизонтальної грані конструкції. Далі визначається площа ділянок (S) в см^2 і сума довжин виявлених на цих ділянках технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу (ΣL) в см. По відношенню даних величин розраховується коефіцієнт технологічної пошкодженості $K_{\text{П}}$ ($\text{см}/\text{см}^2$) [14,136,137]. Відповідно на ділянці I розраховується $K_{\text{П}}^I$, на ділянці II – $K_{\text{П}}^{II}$, на ділянці III – $K_{\text{П}}^{III}$. За різницею між даними величинами визначається однорідність бетону.

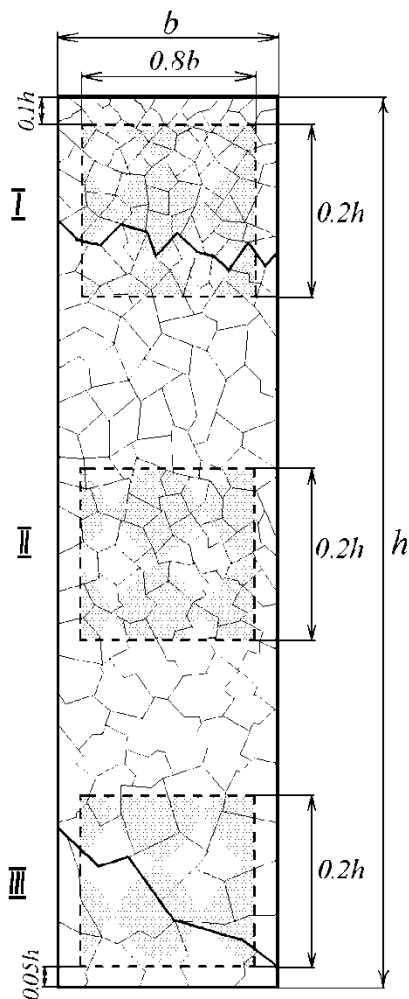


Рис.2.3. Схема розташування ділянок визначення пошкодженості поверхні при визначенні однорідності якості бетону в конструкції

Бетон в конструкції можна визнати однорідним, якщо величина коефіцієнта технологічної пошкодженості між окремими ділянками відрізняється не більше, ніж на 10%. Однорідність можна визнати задовільною (припустимою) при різниці в значеннях K_{II} між окремими ділянками на рівні 10..30%. Бетон є неоднорідним при різниці K_{II} між окремими ділянками більшою 30%. Методика визначення коефіцієнта технологічної пошкодженості K_{II} наведена у п.2.4. Одною з переваг даного методу є можливість визначати однорідність бетону незалежно від вологості матеріалу в різних ділянках однієї конструкції, що важливо при обстеженні гідротехнічних споруд, зокрема плавучих.

Результати обстеження плавучої споруди показали, що у зовнішніх конструкціях понтону найбільш пошкодженою є зона змінного рівня води а також зона, що знаходиться безпосередньо вище рівня води, тобто примикає до зони змінного рівня води. Це зона активного капілярного підсосу вологи, в якій відбуваються різноспрямовані процеси міграції рідини та пару. В даних зонах виявлені найбільш значні дефекти бетону, переважно лушення і відшарування, що підтверджує висловлені у п.1.6 висновки щодо особливостей умов експлуатації тонкостінних гідротехнічних споруд, а саме про вплив вологісних деформацій на довговічність бетону. Також при проведенні обстежень було виявлено локальну зону високої водопроникності бетону у днищі одного з відсіків понтону, що викликало фільтрацію води, тобто просочування вологи (рис.2.2.д). Ця зона фільтрації обумовлена наявним технологічним дефектом, що виник в результаті неякісного укладання суміші. Крім того значна частина пошкоджень конструкцій були пов'язані з відшаровуванням захисного шару бетону і усадкою в районі прямокутних отворів ілюмінаторів.

Міцність бетону на пористому ґравії в конструкціях внутрішніх водонепроникних переборок споруди складала від 35 до 45 МПа, водонепроникність від W6 до W8. В конструкціях бортів плавучої споруди властивості бетону суттєво залежали від його положення відносно рівня води. У зоні змінного рівня води а також у зоні, що знаходиться безпосередньо вище

рівня води міцність бетону складала від 25 до 30 МПа з внутрішнього «сухого» боку конструкції. Дослідити міцність бетону з обводненого боку не виявлялося можливим через те, що споруда знаходилася на плаву. У зони вище рівня води міцність бетону з внутрішнього боку конструкції складала від 35 до 45 МПа, з зовнішнього 30-35 МПа, водонепроникність бетону – від W4 до W8. В зонах, прилеглих до осередків наявної фільтрації, міцність бетону складала від 20 до 30 МПа, водонепроникність встановити не вдалося через зволоження конструкції. Таким чином основним руйнівними факторами, які впливали на стан бетону плавучої споруди, тобто на його довговічність, були напірна дія води, дія заморожування і відтаювання а також зволоження і висушування. Відповідно найбільший вплив ці фактори мали у зоні змінного рівня води.

Також у межах даної роботи були проведені натурні обстеження тонкостінних залізобетонних конструкцій ряду інших гідротехнічних споруд, термін експлуатації яких на момент обстежень складав від 25 до 40 років. Зокрема обстеження монолітної стіни докової частини насосної станції головного Каховського магістрального каналу на рівні –18 м від каналу показало наявність фільтрації води через бетон конструкції. Це викликало поверхневе руйнування бетону на значній площі стіни, що унеможливило подальшу нормальну експлуатацію. Натурні обстеження конструкцій водопропускної споруди під Інгулецьким магістральним каналом показали наявність значних за площею зон зі зруйнованим захисним шаром, переважно в районі змінного рівні води та безпосередньо над нею, що супроводжувалося оголенням і корозією арматури. В окремих частинах даних зон спостерігалось руйнування бетону на глибину до 60 мм. Обстеження конструкцій головного шлюзу дамб обвалування річки Дунай в Одеській області показали аналогічні дефекти бетону в зоні змінного рівні води, але у менших масштабах. Глибина корозійних пошкоджень бетону даної споруди досягала 30 мм. Тобто на всіх спорудах були виявлені чисельні дефекти конструкцій, що були пов'язані з фільтрацією води та з морозним руйнуванням бетону. Інструментальне обстеження бетону вищеназваних гідротехнічних споруд показали, що його

міцність варіюється в широких межах в залежності від умов експлуатації конструкції або її зони. Найменшу міцність мав бетон в зоні змінного рівня води та активного капілярного підсосу вологи. Аналогічні висновки дозволили зробити лабораторні випробування зразків, що представляли характерні елементи конструкції гідротехнічної споруди.

Також в дослідженнях кернів, відібраних з даної споруди та при інших дослідженнях гідротехнічних і транспортних споруд, застосовувався, зокрема, розроблений автором у співавторстві з В.С. Дорофєєвим, В.М. Вировим, А.В. Мишутіним і О.А. Романовим спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, який ґрунтується на визначенні зміни технологічної пошкодженості матеріалу при заморожуванні та відтаюванні [225]. Цей метод дозволяє відносно швидко визначити морозостійкість бетону з достатньою точністю, при цьому можна продовжити випробування зразків, що досліджувалися, до визначення уточненого рівня морозостійкості за стандартною методикою. Тобто після оцінки зміни пошкодженості зразків продовжити виконання циклів заморожування і відтаювання для визначення втрати їх маси і міцності.

Таким чином, проведені натурні обстеження стану тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд показали, що найбільш значні пошкодження бетону в результаті експлуатаційних впливів спостерігаються в зоні змінного рівня води, а також в зоні капілярного підсосу вологи. В цілому це підтверджує висловлену робочу гіпотезу досліджень щодо необхідності зменшення вологісних деформацій заповнювача при забезпеченні низької проникності як матриці, так і заповнювача при його роботі в даній матриці, з метою підвищення довговічності бетону. Зона змінного рівня води характеризується багатократними циклами зволоження і висушування, а також вона піддається впливам заморожування і відтаювання у водонасиченому стані. В зоні капілярного підсосу відбувається постійний перенос вологи і пару, в результаті якого в структурі бетону накопичуються речовини, які були розчинені у воді, що поступала до матеріалу по капілярах та випаровувалася з поверхні конструкції. Крім того, розповсюдженими є дефекти, пов'язані з

фільтрацією води та дією заморожування і відтаювання. Тобто довговічність бетонів конструкцій гідротехнічних споруд в найбільшій мірі обумовлюється їх стійкістю до впливу вологи при її фільтрації і при зволоженні та висушуванні, а також морозостійкістю даних матеріалів.

2.3 Вимоги до бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд з врахуванням умов їх експлуатації та робочих навантажень

Вимогою до матеріалу фактично будь-якої конструкції є його міцність і для залізобетонних конструкцій даний показник регламентується виходячи з її робочих навантажень і функціонального призначення. Традиційно це клас бетону, який призначається відповідно міцності при стиску. Але особливістю роботи більшості тонкостінних конструкцій є досить високі згинаючі навантаження, які діють на бетон в процесі експлуатації. Для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, в першу чергу в плавучих спорудах, згинаючі навантаження оказує тиск води (п.1.6). В більшості випадків при висуненні вимог до бетону його міцність на розтяг приймається як похідна від його міцності при стиску, хоч це не завжди коректно. Міцність на розтяг в значній мірі обумовлює стійкість бетону до утворення тріщин, що, зокрема, важливо з точки зору захисту арматури в тонкостінних конструкціях.

При використанні легкого бетону окремо висуваються вимоги до його середньої густини, частіше всього в сухому стані. Але, наприклад для легких суднобудівних бетонів, навпаки регламентується їхня середня густина у повітряно-вологодому стані, іноді у водонасиченому. Тобто вимоги до міцності і середньої густини бетону обумовлені переважно робочими навантаженнями на конструкцію та типом самої конструкції. При цьому дані вимоги до матеріалу мало залежать від умов експлуатації споруди або конкретної конструкції. Але саме з врахуванням даних умов висувається більшість інших вимог до матеріалу, що мають забезпечити його довговічність.

Практично всі тонкостінні конструкції гідротехнічних споруд в процесі експлуатації природно піддаються впливу вологи. При цьому значна частина з них знаходиться під постійною напірною дією води – тобто під гідростатичним тиском. Величина гідростатичного тиску води залежить від висоти її стовпа, яка залежить від глибини занурення конструкції. Для плавучих та деяких інших споруд постійний водяний тиск на бетон може досягати декількох атмосфер. Просочування води крізь конструкцію, як показано в п.1.4 і 1.5, є причиною корозійних пошкоджень бетону, при цьому найбільш інтенсивно протікає корозія першого виду за класифікацією В.М. Москвіна [17].

Згідно будівельним нормам і правилам 2.06.08-87 «Бетонні і залізобетонні конструкції гідротехнічних споруд» при проектуванні гідротехнічних споруд марку бетону за водонепроникністю призначають в залежності від градієнта напору, що визначається як відношення максимального напору в метрах до товщини конструкції (або відстані від напірної грані до дренажу) в метрах, та від температури води, що контактує зі спорудою, або в залежності від агресивності середовища. Останнє згідно діючої нормативної бази класифікується відповідно до ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Наприклад, при градієнті від 20 до 30 включно марка водонепроникності має бути не менше W8 при температурі води до 10°C, не менше W10 при температурі від 10 до 30°C і не менше W12 при температурі понад 30°C. Для конструкцій з градієнтом напору понад 30 слід призначати марку бетону по водонепроникності W16 і вище.

Тонкостінна конструкція товщиною 16 см вже при глибині занурення 3,2 м досягає градієнту напору 20. Тобто для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд показник водонепроникності бетону є одним з основних, що забезпечує його довговічність і власне конструктивне призначення. Галузевий стандарт ОСТ5.9880-85 [1] регламентує мінімальну водонепроникність легкого суднобудівного бетону в 0,25 МПа при товщині зразку 50 мм, що з врахуванням умов визначення цього показнику згідно галузевого стандарту ОСТ 5.9266-76 досить близько до марки W4 згідно стандартній методиці. Цей рівень вимог приймався з врахуванням

технологічних можливостей 70-х років минулого сторіччя і на сьогодні його можна вважати заниженим. Для плавучих доків, морських платформ, насосних станцій та інших споруд в приміщеннях яких знайдеться технологічне обладнання та/або працюють люди навіть найменші течії є критичними. Відповідно висока водонепроникність матеріалу для конструкцій подібних споруд є обов'язковою вже при відносно незначних градієнтах напору.

Іншим характерним видом впливу вологи на бетон конструкцій гідротехнічних споруд є капілярний підсос. Його причиною є наявність в композиційному матеріалі системи капілярів, які сприяють поглинанню і переносу вологи. Певна кількість вільної вологи міститься в бетоні навіть тих конструкцій, що не перебувають в контакті з водою. Вміст цієї вільної вологи в бетоні у повітряному (газовому) середовищі визначається силами сорбційного зволоження. Проте переважна більшість конструкцій гідротехнічних споруд в більшій або меншій мірі контактують з вологою, відповідно капілярний підсос оказує значний вплив на властивості і довговічність матеріалу. Про це свідчать, зокрема, виявлені під час обстежень тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд дефекти, які виникають у зоні активного капілярного підсосу (п.2.2).

Тобто для тонкостінних конструкцій більшості гідротехнічних споруд висуваються досить жорсткі вимоги щодо водонепроникності бетону для забезпечення їх довговічності і власне конструктивних функцій. Мінімальна марка за водонепроникністю для більшості конструкцій подібних споруд має складати від W4 до W12, але в залежності від умов експлуатації, геометричних розмірів конструкції та градієнту напору вона може регламентуватися рівнем до W16, а в окремих випадках навіть вищим.

Крім впливу вологи залізобетонні конструкції гідротехнічних споруд в типових для України та інших країн з помірним кліматом умовах піддаються дії заморожування і відтаювання. Багатократні переходи через 0°C є однією з основних причин руйнування бетону даних конструкцій [226]. Будівельні норми і правила 2.06.08-87 вказують, що для забезпечення довговічності бетону конструкцій його марку по морозостійкості слід призначати в залежності від

кліматичних умов і числа розрахункових циклів заморожування і відтавання протягом року з урахуванням експлуатаційних особливостей. При числі циклів заморожування і відтавання в рік до 50 морозостійкість має знаходитися в діапазоні від F50 для помірних кліматичних умов до F200 для особливо суворих кліматичних умов. При числі циклів заморожування і відтавання понад 150 в рік морозостійкість має знаходитися в діапазоні від F300 (помірні кліматичні умови) до F600 (суворі кліматичні умови). ОСТ5.9880-85 [1] регламентує мінімальну морозостійкість легкого суднобудівного бетону на рівні від 50 до 300 циклів заморожування при температурі мінус 17 ± 2 °C і відтаювання в штучній морській воді. Вміст солей в даній воді 26,9 г NaCl + 3,4 г MgCl₂ + 2,5 г MgSO₄ + 1,2 г CaSO₄ на 1 літр, що відповідає усередненому вмісту солей в світовому океані. Вплив на бетон заморожування і відтаювання в морській воді доволі важко порівнювати з впливом даного чинника в прісній або в солоній воді лише з солями NaCl. В значній мірі це обумовлено тим, що при експонуванні (заморожуванні і відтаюванні) зразків в морській воді на бетон також впливає сульфатна корозія. Але проведені попередні дослідження показують, що при застосуванні сульфатостійкого цементу при виробництві бетону показник морозостійкості даного матеріалу в штучній морській воді є приблизно вдвічі меншим за морозостійкість, визначену стандартним методом. Тобто наприклад бетон марки F600 має показник морозостійкості в штучній морській воді в 300 циклів заморожування і відтаювання (при умові застосування сульфатостійкого цементу).

Л.М. Добшиц вважав, що бетони гідротехнічних споруд зазнають навіть більше циклів заморожування і відтавання, ніж це передбачено стандартами [227]. Якобсон М.Я. вказував, що після проведення нормативного числа циклів заморожування і відтавання рівень властивостей бетону може знижуватися стрибкоподібно і з врахуванням цього пропонував розділяти бетони негарантованої, достатньою і гарантованої морозостійкості [228].

Стійкість бетону до заморожування і відтаювання обумовлюється переважно його капілярно-поровою структурою. Раніше дослідники вважали,

що місцеві напруження в порах викликає безпосередньо крига, яка кристалізується. Пізніше було показано, що одною з основних причин морозного руйнування є гідравлічний тиск, що виникає у вологому бетоні при замерзанні води [208]. На думку Т. Пауерса дана вода віджимається із зони замерзання [219]. Крім названих вище, серед причин руйнування бетону при заморожуванні і відтаюванні дослідники називають прояві капілярних ефектів, осмосу і різних коефіцієнтів температурного розширення складових бетону [229]. В роботах школи В.М. Вирового показано, що руйнування бетону при заморожуванні і відтаюванні здійснюється переважно через розвиток технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу [14,15 та ін.]. Напруження, що виникають в частково або повністю заповнених водою технологічних тріщинах при замерзанні, викликають геометричні зміни їх форми, зокрема поступове просунення фронту тріщини в композиті. При цьому можуть з'являтися нові експлуатаційні тріщини на берегах початкових тріщин в зоні границь розділу «лід – вода». При виході фронту тріщини на існуючі внутрішні поверхні розділу вона також перетворюється на внутрішню поверхню розділу. Це сприяє поступовій деструкції і відповідно руйнуванню матеріалу.

Таким чином, вимоги щодо морозостійкості бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд в значній мірі залежать від умов їхньої експлуатації. Але в більшості фактичних випадків для забезпечення довговічності бетону ці вимоги є досить високими – F300 і вище. При цьому для конструкцій плавучих залізобетонних споруд важливим показником є морозостійкість бетону у морський воді.

Також конструкції гідротехнічних споруд піддаються хімічним, біологічним, динамічним та іншим видам впливів. В морській воді найбільш небезпечним видом хімічного впливу на бетон вважається сульфатоалюмінатна корозія. Під дією сульфатних вод в цементному камені утворюється етрінгіт і таумасіт, в результаті чого бетон поступово руйнується і переходить в пухкий стан [230]. Підводні частини гідротехнічних споруд також піддаються

біологічним впливам – обростанню водоростями та живими організмами, які живуть в воді, зокрема балянусом. При цьому в бетоні може виникнути біологічна корозія [231]. Її основний механізм базується на деструкції гідросилікатів з наступним розчиненням утвореного аморфного кремнезему, а також з утворенням кальциту.

При наявності сульфатних впливів важливою вимогою до бетону, що забезпечує його довговічність, є сульфатостійкість, яка, в першу чергу, забезпечується застосуванням сульфатостійких цементів. Наявність біологічних впливів, як правило, не вимагає висування до бетону додаткових вимог. Але як при хімічних, так і при біологічних впливах довговічність бетону в фактивному середовищі експлуатації бажано контролювати згідно методик, описаних у ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011 «Захист від корозії у будівництві. Бетони. Загальні вимоги до проведення випробувань».

До динамічних впливів на гідротехнічні споруди можна віднести удари льоду, води, зіткнення з предметами, що плывуть по воді, навали. У роботі Ю.М. Баженова [232] показано, що довговічність конструкцій багато в чому залежить від того, як були враховані особливості поведінки бетону при динамічному навантаженні. Для тонкостінних конструкцій динамічні дії є більш небезпечними, тому що можуть викликати не тільки відколювання частин, а й появу наскрізних тріщин. Також слід зазначити особливу небезпеку ударних впливів для захисного шару арматури. Одним з самих суттєвих впливів на гідротехнічні споруди є вплив льоду, тому що він може суміщати динамічні дії зі стиранням та значними локальними навантаженнями [233]. Стійкість матеріалу до динамічних впливів регламентується не досить чітко і частіше всього виражається у вимогах до його тріщиностійкості або ударостійкості. При цьому тріщиностійкість бетону визначається по рівню його коефіцієнта критичних напружень K_{1C} або K_{2C} [234,235].

Фактично для конструкцій, що піддаються динамічним впливам, при заданих рівнях міцності, середньої густини (для легких бетонів), морозостійкості та/або водонепроникності бетону за рахунок відповідних

рецептурно-технологічних прийомів бажано також регламентувати необхідний рівень ударостійкості та/або тріщиностійкості матеріалу. Конструкції гідротехнічних споруд теж періодично піддаються стираючому впливу льоду та інших предметів у воді, проте за виключенням споруд в арктичній зоні ці навантаження не є для них критичними.

Таким чином вимоги до бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд висуваються в залежності від умов їх експлуатації та робочих навантажень. Через те, що більшість гідротехнічних споруд експлуатуються в досить жорстких умовах, для забезпечення довговічності бетонів їхніх конструкцій слід висувати підвищені вимоги щодо рівнів водонепроникності і морозостійкості матеріалу в врахуванням стійкості до хімічних впливів, в першу чергу – сульфатів. Наприклад, мінімальна водонепроникність бетону для тонкостінних конструкцій, які знаходяться в контакті з водою, має складати W6, а при наявності навіть незначного градієнту напору через невелику товщину даних конструкцій водонепроникність має складати W8 і вище. Також для частини тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, особливо для конструкцій, що експлуатуються в зоні змінного рівня води, важливим показником якості матеріалу є тріщиностійкість та/або стійкість до динамічних навантажень. Ці висновки також підтверджуються результатами натурних обстежень бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, наведеними у попередньому параграфі.

2.4 Характеристика вихідних матеріалів, використаних при дослідженнях легких бетонів

При вивченні структури і властивостей бетонів на легких пористих заповнювачах на різних етапах досліджень були використовувані наведені нижче компоненти. В якості в'язучих використовувалися:

- сульфатостійкий портландцемент (ДСТУ Б В.2.7-85-99) ССПЦ 400-Д0 виробництва Новоамвросіївського цементного заводу ПрАТ

«ХайдельбергЦемент Україна». Хіміко-мінералогічний склад клінкеру цього цементу наведено у табл.2.1. Питома поверхня цього цементу складає 300 м²/кг.

Таблиця 2.1

Хімічний та мінералогічний склад клінкеру сульфатостійкого цементу виробництва Амвросіївського цементного заводу

| Хімічний склад | | Мінералогічний склад | |
|--|-------|----------------------|-------|
| ВПП % | 0,30 | КН | 0,85 |
| SiO ₂ % | 23,89 | п | 2,81 |
| Al ₂ O ₃ % | 4,40 | Р | 1,09 |
| Fe ₂ O ₃ % | 4,03 | C ₃ S | 49,28 |
| CaO % | 65,23 | C ₂ S | 30,61 |
| MgO % | 1,41 | C ₃ A | 4,83 |
| SO ₃ % | 0,13 | C ₄ AF | 12,25 |
| Na ₂ O + K ₂ O % | 0,17 | | |
| Сума | 99,56 | | |
| FeO | 0,04 | | |
| CaO _{CH} | 0,16 | | |
| H ₂ O | 0,16 | | |

- сульфатостійкий портландцемент (ДСТУ Б В.2.7-85-99) ССПЦ 400-Д0 виробництва Івано-Франківського цементного заводу ПАТ «Івано-Франківськцемент». Хіміко-мінералогічний склад клінкеру даного цементу наведено у табл.2.2. Питома поверхня цементу складає 334 м²/кг.

Використання сульфатостійких цементів в більшості досліджень пов'язано з необхідністю забезпечення довговічності бетонів гідротехнічних і транспортних споруд в умовах сульфатної корозії, яка досить сильно проявляється насамперед при контакті з морською водою. Також відповідно до «Правил побудови корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» [236] сульфатостійкій портландцемент є обов'язковим до використання в суднобудівних бетонах, які використовуються для споруд, що експлуатуються в морській воді.

Таблиця 2.2

Хімічний та мінералогічний склад клінкеру сульфатостійкого цементу
виробництва Івано-Франківського цементного заводу

| Хімічний склад | | Мінералогічний склад | |
|----------------------------------|-------|----------------------|-------|
| ВПП % | 0,50 | C ₃ S % | 49,40 |
| SiO ₂ % | 23,58 | C ₃ A % | 4,82 |
| Al ₂ O ₃ % | 4,50 | | |
| Fe ₂ O ₃ % | 4,20 | | |
| CaO % | 64,00 | | |
| MgO % | 0,69 | | |
| SO ₃ % | 1,13 | | |
| K ₂ O % | 1,07 | | |
| Na ₂ O % | 0,11 | | |
| Cl % | 0,01 | | |
| Сума | 99,79 | | |

Важливо зазначити, що до 2014 року включно на Херсонському державному заводі «Паллада» при виробництві суднобудівних бетонів використовувався лише сульфатостійкий портландцемент Новоамвросіївського цементного заводу, який на той час був єдиним виробником такого в'язучого в Україні. Але з 2015 року через неможливість отримання даного цементу в зв'язку з зупинкою Новоамвросіївського цементного заводу на заводі «Паллада» використовується сульфатостійкий портландцемент Івано-Франківського цементного заводу. Цей цементний завод почав з 2015 року виробляти сульфатостійкий бездобавочний портландцемент під замовлення Херсонського державного заводу «Паллада» та інших підприємств. Фактично починаючи з 2015 року єдиним виробником сульфатостійкого портландцементу в Україні став ПАТ «Івано-Франківськцемент». Решта вітчизняних виробників пропонують на ринку лише сульфатостійкий шлакопортландцемент, бетон на основі якого гірше працює в конструкціях, що піддаються заморожуванню і відтаюванню [8,42].

В окремих експериментах використовувався портландцемент ПЦ П/Б-Ш-400 виробництва Одеського цементного заводу (ТОВ «Цемент»). Цей цемент виробляється на основі клінкеру нормованого складу з вмістом C_3A не більше 8% за масою і за даними виробника може використовуватися для бетону дорожніх покриттів, труб, шпал, опор, мостових конструкцій, стояків опор ЛЕП. Мінералогічний склад даного цементу: C_2S – 17,4%, C_3S – 58,8%, C_3A – 6,5%, C_4AF – 12,6%.

У якості заповнювачів для бетонів в проведених дослідженнях використовувалися наступні матеріали.

Кварцовий пісок Микитівського кар'єра (Вознесенський район Миколаївської області) з модулем крупності 2,7. Пісок відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95. Випробування піску здійснювалося згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань». Пісок промивався водою для видалення пилюватих і глинистих часток, після чого просушувався на повітрі. Насипна густина піску 1410 кг/м³. Зерновий склад промитого кварцового піску наведено в таблиці 2.3. Даний вид кварцового піску використовувався на всіх етапах досліджень як наймасовіший і один з найякісніших типів дрібного заповнювача для бетону з усіх наявних пісків на півдні України. Наприклад, аналогічний пісок постачається на Херсонський державний завод «Паллада» для виробництва суднобудівних бетонів.

Керамзитовий гравій виробництва Одеського керамзитового заводу (ВАТ «Кераміт») фракції 5-10 мм, в окремих експериментах також фракції 10-20 мм (ДСТУ Б В.2.7-17-95 «Гравій, щебінь і пісок штучні пористі»). Властивості керамзитового гравію визначалися згідно ДСТУ Б В.2.7-264:2011 «Заповнювачі пористі неорганічні для будівельних робіт. Методи випробувань». Гравій складався переважно із зерен округлої форми, тобто не був отриманим дробленням більш великих фракцій, що, зокрема, відповідає рекомендаціям ОСТ 5.9880-85 «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування».

Таблиця 2.3

Зерновий склад кварцового піску

| | Розмір отворів сит, мм | | | | | Прохід скрізь сито 0,16 |
|------------------|------------------------|------|------|-------|------|-------------------------|
| | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | |
| Остатки на ситах | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | 3,1 |
| частні, % | 13,3 | 10,1 | 29,8 | 33,9 | 9,8 | |
| повні, % | 13,3 | 23,4 | 53,2 | 87,1 | 96,9 | |

Гравій свідомо відбирався з різних партій через що його насипна густина у висушеному до постійної маси стані складала в різних експериментах від 500 до 600 кг/м³ (фракція 5-10 мм). У тексті вказується, якої саме насипної густини використовується гравій в конкретному експерименті. Міцність при стиску в циліндрі гравію при насипній густині 500-580 кг/м³ складала від 2,7 до 3,1 МПа що відповідає марці по міцності П125. Для гравію з насипною густиною 600 кг/м³ міцність при стиску в циліндрі складала 3,6 МПа, що відповідає марці по міцності П150.

Середнє значення водопоглинання за годину керамзитового гравію фракції 5-10 мм за масою складало 13,4%. Середня значення коефіцієнту розм'якшення гравію 0,77. Втрата маси при кип'ятінні – 0,38%.

Для керамзитового гравію фракції 5-10 мм, якій пройшов гідрофобну обробку поверхні емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М з концентрацією 0,8% (дослідження описані в п.3.3, 3.4 і 5-му розділі), середнє значення водопоглинання за годину складало 2,4%, середня значення коефіцієнту розм'якшення - 0,91.

Вапняковий щебінь крупністю 5-20 мм, кар'єр походження с.м.т. Великодолінське, Одеська область. Насипна густина даного вапнякового щебеню 1200 кг/м³, марка за міцністю 600. Результати випробувань властивостей даного вапнякового щебеню наведено у таблиці 2.4. Вапняковий щебінь застосовувався як наймасовіший природній пористий заповнювач, доступний на півдні України.

Також в дослідженнях використовувалися керамзитовий пісок і гранульоване піноскло в якості дрібних заповнювачів, а саме:

Таблиця 2.4

Результати випробувань властивостей вапнякового щебеню

| № з/п | Найменування показників | Одиниці виміру | Вимоги ДСТУ Б.В. 2.7 – 75 – 98 | Фактичні результати | |
|-------|---|-------------------|--------------------------------|---------------------|-------|
| 1 | Зерновий склад: повний залишок на ситах | % | д | від 90 до 100 | 99,75 |
| | | | 0,5 (д+Д) | від 30 до 80 | 22,75 |
| | | | Д | до 10 вкл. | 0,25 |
| | | | 1,25 Д | до 0,5 вкл. | 0 |
| 2 | Вміст зерен пластичної (лещадної) і голчатої форм | % | до 35 | 35 | |
| 3 | Вміст пилоподібних і глинистих частинок | % | 1 | 2,5 | |
| 4 | Вміст глини в грудках | % | 0,25 | - - | |
| 5 | Вміст зерен слабких порід | % | не більше 5 | 4,6 | |
| 6 | Марка щебеню за міцністю | - - | від 200 до 1400 | 600 | |
| 7 | Об'ємна насипна маса | кг/м ³ | - - | 1204 | |

Керамзитовий пісок виробництва Одеського керамзитового заводу, розсіяний по фракціях. Насипна густина піску у фракції 0,16-0,315 мм – 790 кг/м³, у фракції 0,315-0,63 мм – 750 кг/м³, у фракції 1,25-2,5 мм – 700 кг/м³, у фракції 2,5-5 мм – 605 кг/м³.

Гранульоване піноскло виробництва НВП «Технологія», м. Шостка, з розміром часток (піноскляного гравію/піску) від 1 до 8 мм. Піноскло розсіювалося по фракціям. Насипна густина піноскла фракції 1,25-2,5 мм – 270 кг/м³, фракції 2,5-5 мм і 5-8 мм – 230 кг/м³. Фракція гранульованого піноскла 5-8 мм використовувалася лише в окремих пошукових дослідженнях. Діапазон робочих температур піноскла від -260 до + 485 °С, водопоглинання за годину 1,4..1,5% за об'ємом (5,2..6,5% за масою).

В дослідженнях, в яких виконувалося порівняння властивостей бетонів на гранітному та вапняковому щебені, застосовувався гранітний щебінь фракції 5-

20 мм. Насипна густина гранітного щебеню 1360 кг/м³. Зміст пилюватих частинок в щебені 0,4%. Щебінь відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови».

У якості модифікаторів при дослідженні бетонів використовувалися:

- добавка суперпластифікатор С-3 (СП-1), ТУ 5745-001-97474489-2007 (ТУ 5870-005-58042865-05), виробництва ТОВ Поліпласт, м. Новомосковськ;

- добавка суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid 5 (гіперпластифікатор). Виробляється на основі полімерів карбонових кислот і ефірів згідно ТУ У В.2.7-24.6-35365973-001:2008 компанією Coral у м. Запоріжжя. Склад добавки спроектований фахівцями в галузі будівельної хімії України та Німеччини [237].

- кольматуюча добавка Пенетрон Адмікс (Пенетрон А), ТУ 5745-001-77921756-2006, виробництва компанії Penetron International Ltd (філія у м. Єкатеринбург). Пенетрон А – це суха суміш, що складається зі спеціального цементу, що розширюється, наповнювачів і запатентованих активних хімічних добавок. Добавка розроблена і запатентована у США;

- мікрокремнезем Стаханівського заводу феросплавів (м. Алчевськ). Розмір частинок мікрокремнезема менше 1 мкм, питома поверхня приблизно 1500 м²/кг. Насипна густина мікрокремнезема в неущільненому стані від 130 до 350 кг/м³, в ущільненому від 480 до 720 кг/м³, густина суспензії від 1320 до 1440 кг/м³. Хімічний склад мікрокремнезему наведено в табл.2.5.

Таблиця 2.5

Хімічний склад мікрокремнезему

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO+MgO | Na ₂ O+K ₂ O | C | S |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------------------------------------|------|------|
| 88,6% | 1,7% | 3,2% | 2,4% | 1,1% | 2,8% | 0,2% |

Для гідрофобізації пористих заповнювачів використовувалася кремнійорганічна рідина 136-157М, виробництва Запорізького державного підприємства «Кремнійполімер», раніш відома як ГКР-94М (ТУ У 24.6-

23849235-086-2001). Ця рідина є поліметилгідридсілоксаном з високим вмістом груп Si-H. Вміст активного водню у рідині 1,5-1,8%. Реакція середовища (рН водної витяжки) – 6..7. Кінематична в'язкість при температурі 20°C від 10 до 80 сСт. Рідина 136-157М нетоксична, вибухобезпечна, корозійна неактивна, не виділяє шкідливих парів і газів, не чинить подразнень шкіри і слизової оболонки очей, фізіологічно нешкідлива.

Для дисперсного армування досліджених бетонів використовувалася поліпропіленова фібра Ваuson (АТ-15-4252/2006) виробництва Bautech (Польща). Діаметр волокон фібри 18,7 мкм, довжина – 12 мм. Густина волокон 900 кг/м³, міцність при розтягуванні 350 Н/мм², модуль пружності 3500 Н/мм², температура деформації 145°C.

При дослідженнях властивостей декоративних легких бетонів використовувалися неорганічні залізоокисні синтетичні пігменти торгової марки Bayferrox виробництва LanXESS GmbH (Німеччина) [238]:

- червоний пігмент – IOX R03 (Bayferrox 130 B), основна речовина – Fe₂O₃. Процес його виробництва включає стадію високотемпературної кальцинації, за рахунок чого пігмент має високу внутрішню твердість та є стійким до зміни кольору;

- жовтий пігмент – IOX Y02 (Bayferrox 920), основна речовина – FeO(OH).

Для приготування сумішей використовувалася вода, яка відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови».

2.5 Методичні принципи проведення досліджень структури композитів та властивостей бетонів і сумішей

Рухомість бетонних сумішей визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 «Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань».

Рухомість дрібнозернистих сумішей визначалася за глибиною занурення в неї еталонного конуса згідно ДСТУ Б В.2.7-239:2010 «Розчини будівельні. Методи випробувань».

Твердіння бетонних зразків відбувалося в нормальних (стандартних) умовах, тобто при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і 100% вологості.

Міцність бетону при стиску визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-224:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності» на зразках кубах з ребром 10 см або 7,07 см (в залежності від крупності заповнювача). Міцність на розтяг при згині в залежності від крупності заповнювача визначалася на зразках балках розміром $7,07 \times 7,07 \times 28$ см або на зразках балочках розміром $4 \times 4 \times 16$ см.

Визначення водонепроникності бетонів проводилося за методом мокрої плями згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» на зразках-циліндрах діаметром 150 мм і висотою 150 мм. Водонепроникність бетонів додатково контролювалася за повітропроникністю приладом «АГАМА-2» на зразках-кубах з ребром 15 см.

Морозостійкість бетонів визначалася прискореним методом в солоній воді при заморожуванні до -50°C згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні» (третій метод).

Середня густина, пористість і вологість бетонів визначались згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» на зразках кубах.

Стиранність (зносостійкість) бетону визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-212:2010 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стиранності» на зразках-кубах на лабораторному крузі стирання ЛКІ-3.

Показники пористості, середнього розміру пор і однорідності розмірів пор у бетоні визначалися за кінетикою водопоглинання згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» (додаток Г до стандарту).

Визначення корозійної стійкості бетону в штучній морській воді (на 1 л води $26,9 \text{ г NaCl} + 3,4 \text{ г MgCl}_2 + 2,5 \text{ г MgSO}_4 + 1,2 \text{ г CaSO}_4$) проводилося в

лабораторних умовах згідно ОСТ 5.9266-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Методы испытаний бетона».

Визначення об'ємних змін пористого заповнювача при набуханні та усадці в результаті зволоження та висушування (вологісних деформацій керамзиту) проводилося на експериментальній установці, показаній на рис.2.4.

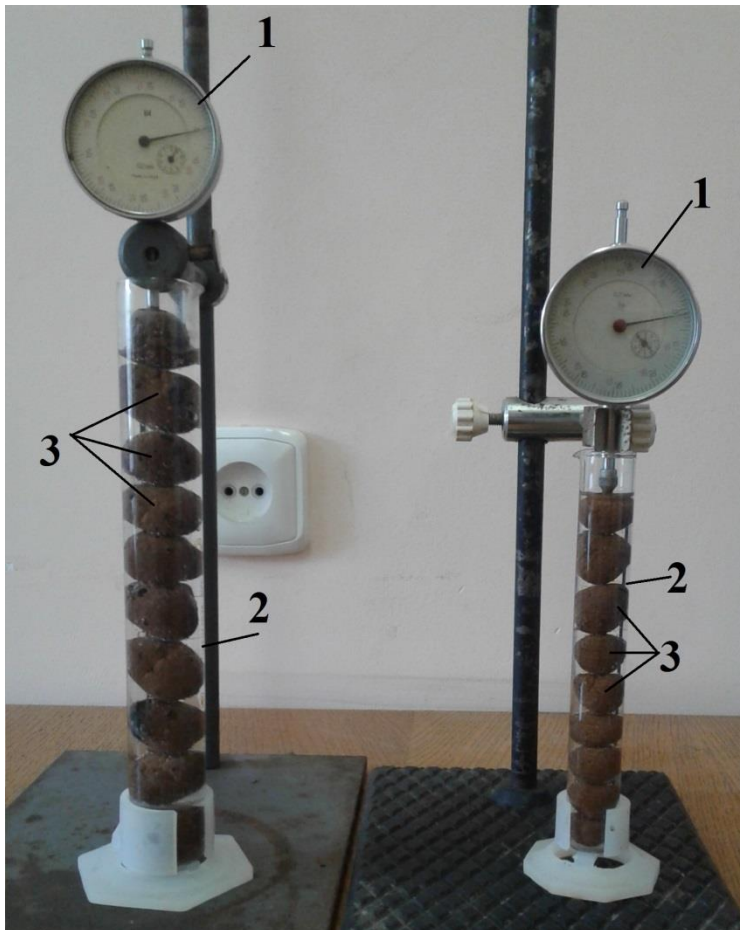


Рис.2.4. Загальний вигляд експериментальної установки для визначення об'ємних змін пористого заповнювача при набуханні та усадці:

- 1 – індикатор часового типу
- 2 – колба
- 3 – гранули заповнювача

Конструкція запропонованої установки дозволяє визначати об'ємні зміни з високою точністю завдяки підсумовуванню геометричних змін одночасно декількох гранул заповнювача, що знаходяться у колбі відповідного діаметру. Зміна лінійного розміру гранул (в одній осі) при набуханні та усадці фіксувалася індикатором годинникового типу з точністю виміру до 0,01 мм.

Теплопровідність керамзитобетонів визначалася на спеціальній установці, розробленій на кафедрі процесів і апаратів в технології будівельних матеріалів ОДАБА (авторська розробка проф. Керша В.Я.). В установці теплопровідність визначається методом вимірювання стаціонарного одновимірного теплового

поток через пластину. Ідея методу впливає з закону Фур'є, який встановлює прямо пропорційну залежність теплового потоку від температурного градієнта. Схема установки, що реалізує метод, наведена на рис.2.5.

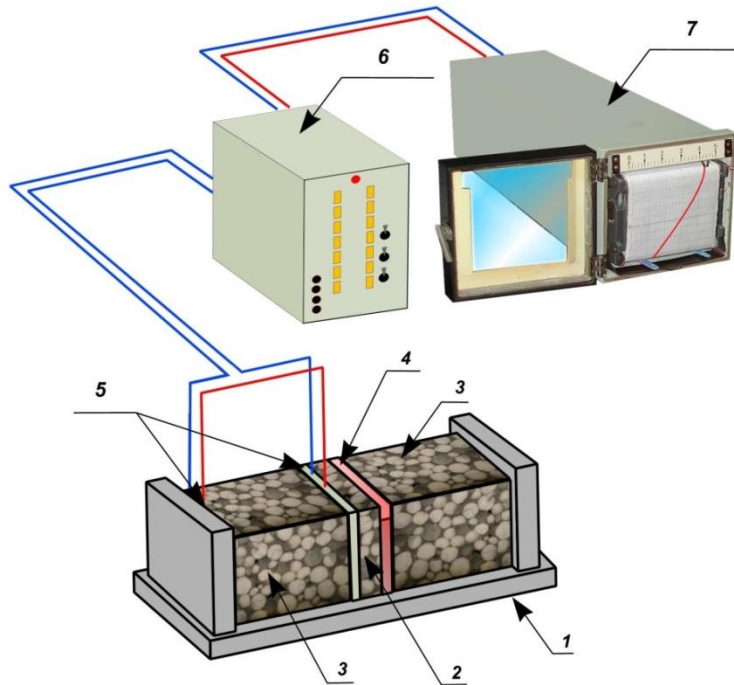


Рис.2.5 Схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності:

1 – вимірювальна касета з притискним механізмом; 2 – зразок, що випробується; 3 – необмежені стрижні з випробуваного матеріалу; 4 – плоский нагрівач; 5 – диференціальна термопара; 6 – підсилювач И-37; 7 – самозаписуючий пристрій

Для визначення показника теплопровідності з зразків випилювалися пластини в формі квадратів розміром $a = b = 40$ мм і товщиною $\delta = 10$ мм для дотримання умови необмеженості $L/a \geq 4$. Основною вимогою до зразків є максимально можлива паралельність великих граней. Вимірювання проводилися за допомогою підсилювача постійного струму вимірювального И-37 в комплекті з самозаписуючим пристроєм Н 3711. Межі посилення коливалися від 0,05 до 50 mV з точністю до 0,0005 mV. Вимірювання температур здійснювалося контактним методом, за яким чутливий елемент вимірювального приладу (ретельно проградуїрована термопара) знаходиться в безпосередньому контакті з досліджуванним середовищем. Для забезпечення

щільного контакту з усією поверхнею зразка датчики затискалися в приладі за допомогою спеціального пристрою. Дані заходи дозволяють виконувати вимірювання з точністю близько $0,005^{\circ}\text{C}$. Плоский нагрівач являє собою каркас з манганінового дроту $0,01$ мм, намотаною з кроком 1 мм, опір нагрівача 420 Ом. Вимірювання проводили в такий спосіб: на нагрівач протягом 60 секунд подавався струм через стабілізоване джерело живлення, потужність імпульсу регулювалася реостатом. Тривалість нагрівання задавалася за допомогою реле часу і контролювалася за записом на діаграмній стрічці самозаписуючого пристрою. Час настання максимального перепаду температур визначалося по запису на діаграмної стрічці та контролювався за секундоміром. Величина перепаду визначалася за показниками приладу і по запису на діаграмній стрічці. При цьому можливі похибки складали при вимірюванні температур 1% , при вимірюванні часу 1 секунда, що становило $0,5-1\%$ в залежності від часу експерименту. Час очікування між окремими експериментами становив не менше 30 хвилин, що дозволяло уникнути впливу попереднього експерименту на наступний.

Коефіцієнт технологічної пошкодженості по площі $K_{\text{П}}$ ($\text{см}/\text{см}^2$) визначався як відношення суми довжин поверхневих тріщин, що проявилися на зразку в межах ділянки (T_0), до площі цієї ділянки (S) [136,137]:

$$K_{n_s} (\text{см} / \text{см}^2) = \frac{\sum T_0}{S} \quad (2.1)$$

Проявлення технологічних тріщин здійснювалося за рахунок експонування зразків у розчині таніну. Для покращення точності вимірювання довжини виявлених поверхневих технологічних тріщин вони замірялися по цифрових фотографіях зі збільшенням в масштабі $5:1$.

Ударна міцність бетону T (ударостійкість) визначалася за результатами випробування зразків-кубів з ребром $7,07$ см на вертикальному динамічному лабораторному копрі [239]. Бойок-гиря масою 2 кг піднімався по металевих напрямних і падав під власною вагою, при цьому його удар по зразку

відбувався через подбабок зі сферичною поверхнею радіусом 1 см. По центру поверхні зразка з висоти 1 см проводиться 1 удар, з висоти 2 см – 2 удару. Далі зі збільшенням висоти пропорційно збільшувалася кількість ударів, які проводилися до руйнування зразка. Ударна міцність характеризувалася загальною роботою, витраченою для руйнування зразка, віднесеної до площі, через яку передавалася навантаження, і обчислювалася за формулою

$$T(\text{Дж}/\text{см}^2) = \left[P \times \sum_1^N h \times N \right] / S \quad (2.2)$$

де P – маса бойка, кг; h – висота падаючого вантажу, м; N – кількість ударів, що передують руйнуванню; S – площа, через яку передавалося навантаження, см^2 .

Мікроскопічний аналіз структури бетонів на пористих заповнювачах проводився за допомогою металографічного оптичного мікроскопа Sigeta MM-700 в режимі кольорового зображення. Фотозйомка проводилася при збільшеннях $\times 50$, $\times 100$ і $\times 500$ спеціальною цифровою камерою.

Також проводився аналіз структури на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И, в режимі вторинних електронів. Для досліджень від кожного з зразків бетону були отримані фрагменти з досліджуваної поверхнею зламу приблизна 1 см^2 . Зразки закріплювалися на двосторонній струмопровідній скош 3т і далі на них наносилося спеціальне напилення, яке являє собою золотий шар завтовшки приблизно 10Нм і яке сприяє стіканню зарядів з непровідних для струму зразків. Дослідження проводилися в режимі вторинних електронів. Напруга прискорення у кВ зазначається на фото, сила струму електронної гармати складала $85..100\text{мА}$, напруження 220В з чотирикратної розгорткою, вакуум всередині камери об'єктів не більше 5×10^{-4} мм рт.ст.

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 в монохроматизованому $\text{Co-K}\alpha$ випромінюванні ($\lambda = 1,7902\text{А}$). Ідентифікація сполук (фаз) проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней (d , А) і відносних інтенсивностей ($I \text{ отн-} I/I_0$) експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN.

Аналіз кольорової гама легких декоративних бетонів проводився по цифровим фотографіям з усередненням кольору, що дозволяло підвищити точність аналізу та уникнути суб'єктивності оцінки.

Також в рамках даної роботи був розроблений метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі рідини, який описано в п.3.1.

При проведенні досліджень широко використовувалися методи планування експерименту, експериментально-статистичне моделювання і окремі методики комп'ютерного матеріалознавства [240,-243].

Обробка результатів експериментів, побудова і статистичний аналіз експериментально-статистичних моделей (ЕС-моделей) виконувався за типовими методиками [242-244] із застосуванням діалогової програми COMPEX, розробленої в Одеській державній академії будівництва та архітектури [245]. При розрахунку ЕС-моделей перехід від натурних перемінних (X_i) до кодованих (x_i , діапазон від -1 до $+1$) виконувався за формулою [242-244]:

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i,max} + X_{i,min}}{2}}{\frac{X_{i,max} - X_{i,min}}{2}} \quad (2.3)$$

де $X_{i,max}$ та $X_{i,min}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення величини натурних перемінних.

Розрахунки ЕС-моделей виконувалися з врахуванням 10% помилки експерименту при двосторонньому ризику, тобто при $\alpha=0,1$. Для даного рівня ризику при розрахунках проводилася перевірка гіпотез значимості коефіцієнтів ЕС-моделей, тобто про відмінність їх оцінок від нуля. Для перевірки гіпотези про рівність розрахованих коефіцієнтів b_i нулю використовувався критерій Гаусовської точності. Коефіцієнти, які за результатами перевірки не відрізнялись від нуля, тобто не були значущими, виключалися з ЕС-моделі, після чого модель розраховувалася повторно. Після проведеного таким чином

послідовно аналізу модель з всіма значущими оцінками коефіцієнтів b_i перевірялася на адекватність за критерієм Фішера F . Якщо критерій Фішера був меншим критичного для заданого ризику з врахуванням отриманого числа ступенів свободи, тобто $F_a < F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_e)$, то модель приймалася для подальшого аналізу. При записи поліномів отриманих адекватних ЕС-моделей скорочені коефіцієнти b_i замінялися нулями для збереження єдиної типової форми відображення [244].

Висновки за 2-м розділом

1. Представлено загальну схему проведення досліджень, які склалися з декількох пов'язаних етапів.

2. Описано методику і результати натурного обстеження бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема на пористих заповнювачах. Обстеження показали, що найбільш значні пошкодження бетону в результаті експлуатаційних впливів спостерігаються в зоні змінного рівня води включно з зоною капілярного підсосу вологи. Крім того, розповсюдженими є дефекти, пов'язані з фільтрацією води крізь конструкції та дією заморозування і відтаювання. Це підтверджує висловлені в робочій гіпотезі положення, що довговічність бетонів тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд в найбільшій мірі обумовлюється їх стійкістю до впливу вологи при фільтрації та при зволоженні та висушуванні, а також морозостійкістю даних матеріалів.

3. Запропоновано і захищено патентами неруйнуючий спосіб визначення однорідності бетону в конструкції по різниці технологічної та експлуатаційної пошкоженості бетону в різних частинах даної конструкції та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, якій ґрунтується на визначенні зміни технологічної пошкоженості матеріалу при заморозуванні і відтаюванні.

4. Проаналізовано вимоги до бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд з врахуванням умов їх експлуатації та робочих навантажень.

5. Описано методичні принципи проведення досліджень структури та властивостей легких бетонів і бетонних сумішей, а також властивостей окремих компонентів бетонних сумішей. Наведено характеристики компонентів, які були використані при дослідженнях бетонів на різних етапах роботи: в'язучих, заповнювачів, модифікаторів, фібри тощо.

6 Наведено основні принципи побудови і статистичного аналізу експериментально-статистичних моделей, що розраховуються за результатами планованих експериментів, та які широко використовувалися у проведених дослідженнях.

7. Прийняті методи досліджень і використані матеріали дають можливість вирішити завдання досліджень, що дозволяє реалізувати мету роботи.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНІВ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

3.1 Визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі рідини

Як показано в п.2.2, для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд доволі розповсюдженими є дефекти бетону, пов'язані з фільтрацією води через конструкцію. Процес фільтрації викликає корозію бетону переважно першого типу, швидкість якої в значній мірі залежить від інтенсивності фільтрації. При забезпеченні належної якості при укладанні та ущільненні бетонної суміші зони активної фільтрації в конструкції можуть не виявлятися доволі тривалий час, за виключенням ситуацій з використанням бетону з суттєво низькою водонепроникністю. Проте навіть без видимої фільтрації на властивості і довговічність бетону в конструкціях гідротехнічних споруд активно впливають процеси, пов'язані з контактом з водою, що, зокрема, показано в п.1.6.

Розглянемо досить характерну для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд ситуацію. При довготривалій дії води або іншої рідини з одного боку конструкції (зразка), тобто під певним гідростатичним тиском, часто виникає деяка «рівноважна» ситуація, при якій волога візуально проникає лише на деяку глибину у бетон, після чого умовний «фронт» вологи візуально зупиняється. Майже аналогічна ситуація виникає при наявності безнапірної фільтрації через конструкцію [246,247]. Наприклад, це є типовим для конструкцій плавучих споруд, які експлуатуються постійно зануреними через що є обводненими з одного боку. Фактично у даній ситуації виникає двофазна течія через бетон: спочатку у вигляді рідини, а потім у вигляді парів рідини [212]. Тобто для однобічно обводнених конструкцій на «сухий» бік проходить капілярне перенесення пару. Механізм даного перенесення додатково ускладнюється тим, що при досягненні рідиною «зворотної» до води поверхні,

капілярні сили фактично змінюють знак напрямку дії. Тобто якщо з «вологого» боку капілярні сили сприяють проникненню рідини, то з «сухого» вони оказують течії супротив, рівний величині капілярного тиску [212].

Проте стандартизовані та інші відомі методи визначення корозійної стійкості бетону, а саме передбачені ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011 «Захист від корозії у будівництві. Бетони. Загальні вимоги до проведення випробувань», ДСТУ Б В.2.6-181:2011 «Захист бетонних і залізобетонних конструкції від корозії. Методи випробувань», ДСТУ Б В.2.7-213:2009 «Будівельні матеріали. Бетони хімічно стійкі. Методи випробувань» і ОСТ 5.9266-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Методы испытания бетона», не враховують данні особливості умов експлуатації однобічно обводнених гідротехнічних споруд. Всі описані в даних стандартах методи визначення корозійної стійкості передбачають контакт агресивного середовища зі зразками з усіх боків. Відбувається або просте витримання зразків у агресивній рідині (ДСТУ Б ГОСТ 27677:2011, ДСТУ Б В.2.6-181:2011 і ДСТУ Б В.2.7-213:2009) або періодичне насичення рідиною при зануренні з послідуочим висиханням зразка (ОСТ 5.9266-76). Це виключає можливість існування двофазної течії, а також уповільнює корозію 1-го виду в порівнянні з її реальним темпом при однобічному тиску води.

Для забезпечення більшої точності визначення корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі води-середовища або іншої агресивної рідини було запропоновано новий метод дослідження цього показника. Його суть полягає в створенні умов, які максимально наближені до реальної дії агресивної рідини. Витримка зразків-кубів здійснюється при однобічній дії даної рідини (води-середовища). Для бетонів гідротехнічних споруд слід використовувати відповідну воду-середовище, наприклад морську. На рис.3.1 показано загальну схему запропонованої установки (ємності) для дослідження корозійної стійкості бетонів на зразках-кубах при однобічному впливі рідини. Зразки приблизно на 1/2 від величини ребра залишаються на повітрі та приблизно на 1/2 знаходяться у воді-середовищі або іншій агресивній рідині, в якій

визначається стійкість бетону. Можливі також інші варіанти співвідношень в залежності від особливостей конструктивів, бетонів та агресивного середовища.

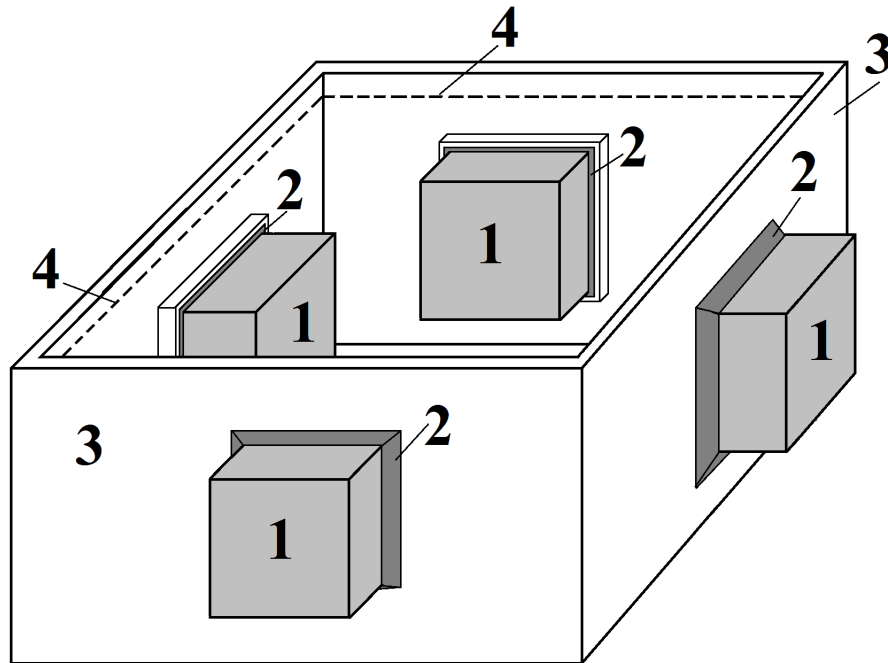


Рис.3.1. Загальна схема установки (ємності) для дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини: 1 – зразки-куби бетону; 2 – ущільнювач; 3 – стінки ємності; 4 – рівень агресивної рідини (води-середовища)

З метою запобігання фільтрації вологи крізь примикання зразка до стінок ємності це примикання ущільнюється за рахунок організації додаткових направляючих для зразку, а простір між зразком і направляючими герметизується бітумною мастикою або силіконом. Також при відповідній зміні конструкції можливо використання зразків-циліндрів. Фото збудованої установки показано на рис.3.2.

Показник корозійної стійкості визначається порівнянням міцності зразків, які знаходилися під впливом води-середовища (агресивної рідини), з проектною міцністю бетону та/або з міцністю бетону контрольної партії, яка зберігалася у прісній воді. Також рекомендується випробувати зразки на сколювання, зокрема з метою визначення глибини корозійних пошкоджень, та контролювати масу зразків.



Рис.3.2. Установка для дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини

В залежності від виду бетону і агресивності рідини (води-середовища), витримка зразків в установці може продовжуватися від одного місяця до декількох років. Для об'єктивності результатів висоту стовпа і концентрацію агресивної рідини у ємності необхідно підтримувати на одному рівні на протязі всього періоду експозиції зразків. Для зниження рівня забруднення рідини в ємності передбачена кришка, але для уникнення суттєвих змін її складу в процесі витримки зразків також необхідно періодично змінювати рідину у ємності. Частота зміни залежить від виду рідини. Наприклад для штучної морської води вона приймалася раз на два місяці. При випробуванні на міцність при стиску зразка, який знаходився під однобічним впливом агресивної рідини, до плит пресу слід повертати грані, одна з яких була відповідно повністю занурена, а інша повністю знаходилася на повітрі. Тобто фронт корозії має розташовуватися паралельно плитам пресу для запобігання руйнуванню шляхом розколювання при випробуванні зразка. При обростанні грані продуктами корозії, солями або органічним шаром перед випробуванням їх слід

зачистити, що, як показано в [248], дозволяє підвищити точність визначення показника корозійної стійкості.

З метою порівняння результатів, отриманих за запропонованим методом визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі агресивної рідини з результатами, отриманими за методом визначення корозійної стійкості, що регламентується згідно ОСТ 5.9266-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Методы испытаний бетона» був проведений описаний нижче експеримент. На зразках кубах з керамзитобетону трьох різних складів, які наведені в табл.3.1, була визначена міцність і середня густина даних матеріалів у водонасиченому стані в віці 28 діб. У тому ж віці була визначена водонепроникність матеріалу. Крім того було визначено показник корозійної стійкості ($P_{КС}$) бетону за методикою ОСТ 5.9266-76, яка передбачає зволоження і висушування зразків, а також за запропонованим методом при однобічному впливі морської води. Проводилося 200 циклів зволоження і висушування в штучній морській воді (на 1 л 26,9 г NaCl + 3,4 г MgCl₂ + 2,5 г MgSO₄ + 1,2 г CaSO₄). Зволоження згідно стандарту проводилося за рахунок експонування у воді зразків протягів 6 годин, висушування проходило при кімнатній температурі протягом 18 годин. Однобічний вплив штучної морської води був реалізований за рахунок витримування зразків у запропонованій установці (рис.3.2). Міцність і середня густина керамзитобетонів після 200 циклів зволоження і висушування у морській воді, а також після 180 діб однобічного впливу морської води наведені у табл.3.1. Показником корозійної стійкості розраховувався як відношення межі міцності при стиску зразків після корозійних випробувань до 28-денної міцності бетону, яка розглядається як «проектна».

Аналіз наведених у табл.3.1 даних показує, що при зволоженні та висушуванні міцність легких бетонів знижується, але для бетонів з більш високою водонепроникністю, а саме для складів №2 і №3, це зниження є фактично невідчутним і відповідно показник їхньої корозійної стійкості складав 0,97 і 0,99. Для бетону складу №1, який мав меншу водонепроникність, $P_{КС}$ після 200 циклів зволоження та висушування склав 0,86.

Таблиця 3.1

Порівняння показників корозійної стійкості керамзитобетонів після 200 циклів зволоження і висушування у морській воді та після 180 діб одностороннього впливу морської води

| № складу, склад бетону | Міцність водонасичених зразків у віці 28 діб, МПа | Середня густина у водонасиченому стані, кг/м ³ | Марка за водонепроникністю | Міцність після 200 циклів зволоження і висушування у морській воді, МПа | Показником корозійної стійкості (200 циклів звол.) | Середня густина після 200 циклів звол. і висушування у морській воді, кг/м ³ | Міцність після 180 діб одностороннього впливу морської води, МПа | Середня густина після 180 діб одностороннього впливу морської води, кг/м ³ | Показником корозійної стійкості (односторонній вплив морської води) |
|---|---|---|----------------------------|---|--|---|--|---|---|
| <u>Склад №1</u> Цемент 450 кг/м ³ Гравій 660 л/м ³ Пісок 791 кг/м ³ Добав. С-3 3,6 кг/м ³ Вода 171 л/м ³ | 25,7 | 1825 | W4 | 22,1 | 0,86 | 1819 | 22,3 | 1834 | 0,87 |
| <u>Склад №2</u> Цемент 500 кг/м ³ Гравій 650 л/м ³ Пісок 745 кг/м ³ Добав. С-3 4 кг/м ³ Вода 182 л/м ³ | 31,8 | 1859 | W8 | 30,8 | 0,97 | 1867 | 32,4 | 1872 | 1,03 |
| <u>Склад №3</u> Цемент 500 кг/м ³ Гравій 650 л/м ³ Пісок 711 кг/м ³ Мікр-зем 30 кг/м ³ Добав. С-3 4 кг/м ³ Вода 189 л/м ³ | 34,4 | 1870 | W10 | 33,9 | 0,99 | 1878 | 36,7 | 1880 | 1,07 |

При односторонньому впливі морської води міцність бетонів з високою водонепроникністю (склади №2 і №3) навіть зростала, відповідно розрахований при цьому показник їхньої корозійної стійкості дорівнював 1,03 і 1,07. Це пояснюється продовженням гідратації цементу за рахунок контакту з водою. В результаті позитивний вплив даного процесу перевищував негативний вплив корозійного середовища. Але для складу №1, який мав відносно низьку водонепроникність, значення $P_{КС}$ при односторонньому впливі води складало 0,87, що приблизно дорівнює значенню даного показника після 200 циклів

зволоження та висушування. Це показує, що запропонований метод дослідження корозійної стійкості бетонів більш об'єктивно відображає зміну властивостей матеріалу в умовах, близьких до реальних умов експлуатації однобічно обводнених конструкцій. Важливо зазначити, що застосування даного методу є доречним лише для матеріалів тонкостінних конструкцій, крізь які відбувається доволі відчутна двохфазна течія вологи – у вигляді рідини, а потім у вигляді парів рідини. Також запропонований метод вимагає додаткового експериментального уточнення на більшому числі типів бетонів, як легких, так і важких, а також на різних типах води-середовища. Проте явною перевагою запропонованого методу є його менша трудомісткість в процесі дослідження корозійної стійкості в порівнянні з методикою ОСТ 5.9266-76, яка вимагає щоденного зволоження – висушування зразків.

Також запропонований метод, так само як і більшість інших відомих методів, дозволяє здійснювати прискорені лабораторні випробування корозійної стійкості бетонів за рахунок штучного збільшення ступеня агресивності рідини, наприклад підвищення концентрації солей у воді-середовищі. Таким чином, запропонований метод дослідження дозволяє більш об'єктивно оцінити корозійну стійкість бетонів при однобічному впливі води-середовища або іншої агресивної рідини.

В розглянутому випадку однобічно обводнених конструкцій рівень водонепроникності матеріалу забезпечує відсутність фільтрації вологи та відповідно запобігання процесам видалення структурних компонентів з бетону. При цьому буде проходити накопичення твердих продуктів в структурі бетону, тобто переважно відбуватися дія «утворюючого» фактора. Таке накопичення сприяє самоущільненню бетону, але при цьому одночасно збільшується об'єм твердої фази. Як показують результати проведеного експерименту, в умовах подібної «рівноважної» ситуації з метою забезпечення довговічності бетону слід застосовувати композити з високою водонепроникністю, що дозволить уникнути видалення структурних компонентів та одночасно уповільнити накопичення твердої фази у порожнинах бетону. Проте повністю припинити

проникнення води як середовища у структуру бетону конструкції фактично неможливо, тому наявність раціональної кількості замкнутих «резервних» пор у структурі сприяє забезпеченню довговічності матеріалу. Зокрема, резервною пористістю може слугувати пористість легкого заповнювача.

Перенесення твердих продуктів, які утворюються в результаті корозійних впливів, відбувається переважно по капілярам та іншим внутрішнім поверхням розділу композиційного матеріалу. В цих порожнинах вони можуть відігравати позитивну роль «самоущільнення» бетону. Проте накопичення надлишку даних продуктів навпаки викликає руйнівні процеси в композиті. Тобто оцінка довговічності бетону в умовах проникнення води може здійснюватися виходячи з його порової структури (не лише загального об'єму пор), а також з рахуванням особливостей фактичних умов експлуатації.

Також важливо відзначити, що пористість бетону впливає не лише на його проникність, і а фактично всі інші показники якості композиту, що забезпечують його механічні властивості та довговічність, зокрема на морозостійкість. А.Е. Шейкін і Л.М. Добшиц вказували, що бетони підвищеної морозостійкості повинні мати умовно-замкнуту пористість, віднесену до одиниці їх об'єму, не менше, ніж можливе приростання об'єму рідкої фази при заморожуванні бетону одиниці об'єму у водонасиченому стані [218]. Відповідно умовно-замкнута пористість має бути не менше 9% від інтегральної (відкритої) пористості [249]. Бетони на пористих заповнювачах переважно мають не нижчий рівень співвідношення інтегральної та умовно-замкнутої пористості, тобто при забезпеченні водонепроникності цементно-піщаної матриці здатні гарантувати високу довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій при комплексних експлуатаційних впливах. Відповідно шляхом підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах є модифікація цементно-піщаної матриці, спрямована на підвищення її непроникності, яка має відбуватися у комплексі з технологічними прийомами, спрямованими на максимальне перетворення пористості заповнювача у замкнуту та покращення сумісної роботи заповнювача і матриці. Безперечно, це не знижує важливості

забезпечення однорідності та максимальної злитності структури бетону, що досягається, насамперед, проектуванням оптимальних складів легких бетонів.

В цілому проведений аналіз показав, що запропонований метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі рідини є менш трудомістким у порівнянні з методикою ОСТ 5.9266-76 та дозволяє більш об'єктивно відображати зміну властивостей матеріалу в умовах, що є близькими до реальних умов експлуатації значної частини тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. При цьому основним показником якості, який забезпечує корозійну стійкість бетону при однобічному впливі води-середовища є його водонепроникність.

3.2 Регулювання сумісної роботи та взаємодії цементно-піщаної матриці і заповнювача для підвищення довговічності легкого бетону

Заповнювачі складають до 80% від загального об'єму складових бетону, тому їх корозійна стійкість та властивості поверхні мають дуже велике значення для корозійної стійкості та довговічності бетону в цілому [17]. Конструкційні легкі бетони для тонкостінних конструкцій мають переважно досить високі вимоги щодо міцності та інших властивостей, відповідно можливості їх компонентів, в першу чергу – крупного заповнювача, використовуються повністю або наближаються до межі. В даній ситуації сумісна робота, взаємний вплив і взаємодія компонентів бетону стають дуже істотними [2,141]. О.Я. Берг стверджував, що з трьох чинників, що визначають міцність бетону: міцність заповнювача, міцність розчинної частини і міцність зчеплення між розчинною частиною і заповнювачем, останній чинник відіграє особливу роль [250]. На нашу думку вплив на властивості бетону оказує не лише міцність зчеплення розчинної частини з заповнювачем, а структура і властивості всієї контактної зони. Т.Ю. Любимова під контактною зоною розуміла мікрооб'єм поблизу поверхні розділу цементний камінь – заповнювач, включно з поверхневим шаром заповнювача, шаром цементного каменю, що

межує з заповнювачем, та границю розділу між ними [251]. С.С. Гордон показав, що контактна зона зазвичай є слабкою ланкою будівельних композитів, у зв'язку з цим надзвичайно важливим напрямом підвищення фізико-механічних властивостей і довговічності бетону є забезпечення якісного зчеплення і стабільності зони контакту в'язучого і заповнювача [252], зокрема з врахуванням об'ємних змін композиційного матеріалу в цілому і його окремих складових. Для легких бетонів найбільш значними є об'ємні зміни пористого заповнювача, які відповідно суттєво впливають на структуру контактної зони.

О.Г. Ольгінський називав заповнювач «рівноправним» елементом контактної зони, мінерали якого здатні впливати на процеси утворення контактів і підпадати під вплив зовнішнього середовища [253]. При цьому характер зчеплення гідратів в'язучого з заповнювачем О.Г. Ольгінський вважав найбільш важливим «показником структурного стану бетону», що визначає його міцність і довговічність [253,254]. Контактна зона між цементною матрицею і заповнювачем є каналом, через який до конструкції проникають гази, іони SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Cl^- та інші агресивні агенти [43]. Насамперед це стосується важких бетонів. У зв'язку з цим одним з ефективних способів підвищення довговічності бетонів є використання активних наповнювачів, в першу чергу – пористих, які взаємодіють із цементною матрицею з застосуванням різних механізмів, що зменшує проникність контактної зони для агресивних компонентів зовнішнього середовища.

Більшість дослідників однією з причин досить щільного прилягання в'язучого до заповнювача і арматури (фізичних сил взаємодії) називають наявність стягуючих сил, обумовлених стягуванням цементного каменю при його усадці. Також фіксується наявність ділянок хімічного зчеплення і донорно-акцепторної взаємодії. Б.М. Гладишев вказував, що для кращої реалізації сил адгезії і тертя необхідно забезпечити щільний контакт поверхонь в'язучого і заповнювача як визначальних міжфазних поверхонь для даного композиційного матеріалу [255]. Проте в легких бетонах також слід враховувати, що сам пористий заповнювач є схильним до набухання і

відповідно послідууючої усадки. У роботі А.І. Булатова і А.Л. Відовського [256] не підтверджено існування обтискаючих заповнювач напружень ні при усадці, ні при дії зовнішнього пресуючого тиску, а також після тверднення бетону впродовж 21 доби. Автори пояснювали це явище наявністю контракції цементного каменю в процесі його тверднення, яка нівелює тиск на заповнювач до кінця процесу формування структури бетону.

У дослідженнях наукової школи В.М. Вирового [14,15 та ін.] показано, що на границі матричного матеріалу з заповнювачем відбуваються структурні процеси різної спрямованості. В залежності від співвідношення величин когезійної і адгезійної міцності в матричному матеріалі при твердінні виникають різноспрямовані деформації різної величини. Це веде до зміни щільності в локальних ділянках матриці та провокує зміну форми внутрішніх поверхонь розділу та виникнення нових поверхонь. За рахунок цього з'являються порожнини у вигляді тріщин з різним напрямками на границі з заповнювачем та у матричному матеріалі. При когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача тріщини та внутрішні поверхні розділу утворюються переважно на границі з заповнювачем. При когезії меншій за адгезію дані структурні елементи утворюються переважно у цементній матриці. Найбільш складними є деформації матриці, яка твердіє при її вибірковій адгезії до заповнювача, що, наприклад, характерно для бетону на гранітному щебені [15]. При застосуванні пористих заповнювачів досягнути вибірковій адгезії матриці можна за рахунок гідрофобної обробки заповнювача. Як показано у роботах О.А. Коробко і В.М. Вирового, при вибірковій адгезії матриці до заповнювача в процесі структуроутворення бетону збільшується різноманіття його структурних елементів, що позитивно відображається на властивостях композиційного матеріалу [15,257].

При подальшій експлуатації у процесі мікроруйнування в структурі бетону найбільша кількість тріщин спостерігається саме в контактній зоні заповнювач – цементна матриця, причому тріщини на межі зчеплення частіше всього є відкритими і безперервними [258]. Тріщини зчеплення з'являються в результаті

водовідділенням і диференціальних об'ємних деформацій, тобто є різновидом технологічних тріщин [14,15,136]. Такі тріщини в цементній матриці проходять через пори та в більшості випадків – по нижній межі зерен крупного заповнювача. Невеликі нерівності зерен не впливають на безперервність тріщин зчеплення. Тонкі тріщини в цементно-піщаній матриці зазвичай поширювалися між сусідніми зернами крупного заповнювача. Відповідно по подібним структурним елементам в бетоні може переноситися рідина та газ. При цьому на загальну проникність композиту буде впливати не лише геометрія цих тріщин та порожнин, а і проникність заповнювача.

Товщина контактної зони в бетонах з пористим заповнювачем коливається від 30 до 60 мкм, в важких бетонах вона становить 25-50 мкм [64]. Зокрема, завдячуючи цьому відношення між призмовою та кубиковою міцністю за даними досліджень І.А. Іванова [155] і О.Б. Пірадова [259] є у середньому рівним 0,9 замість 0,77 для важкого бетону. О.Б. Пірадов також пояснював близькість призмової та кубикової міцності легких бетонів наявністю внутрішніх напружень у заповнювачі та розчинній частині до прикладення навантажень [259].

Важливим показником, який істотно впливає на формування структури і властивостей контактної зони і легкого бетону в цілому, є ступень розсунення зерен пористого заповнювача. У бетоні з заповнювачем обкатаної форми в залежності від способу упаковки зерен на їх стиках утворюються порожнини з цементно-піщаної матриці, які мають трикутну або чотирикутну форму з гострими краями. Через те, що у даних порожнинах власні деформації розтягування і напруження будуть більше, ніж в прошарках між двома зернами заповнювача, в них відбувається зародження і розвиток найбільшої кількості усадочних (технологічних) мікро- і макротріщин. Відповідно однією з причин зниження міцності та погіршення інших показників якості бетону при зменшенні витрат розчинної складової, тобто зниженні товщини цементно-піщаної оболонки навколо частинок крупного заповнювача, є зменшення тріщиностійкості цього кільця через надмірне зростання тангенціальної

складової власних деформацій і напружень при усадці. З наведеного вище Н.М. Толипін [260] робить висновок, що негативний вплив зменшення товщини цементної оболонки на стійкість бетону залежить від усадки цементно-піщаної матриці. При використанні малоусадкового цементу або при твердінні у воді товщину оболонки можна знизити. Також відомо, що товщина цементно-піщаної оболонки впливає на міцність легкого бетону, особливо при значній різниці між міцністю заповнювача і цементного розчину. Наприклад, для бетонів на відносно низькоміцних заповнювачах за рахунок збільшення товщини оболонки з високоміцного розчину, тобто за рахунок зниження об'ємної концентрації пористого заповнювача ϕ , можна підвищити граничну міцність композиту [261].

В структурі бетону, що твердіє у повітряно-вологих умовах, місцем максимальної концентрації власних напружень є гострі кути на зернах заповнювача, а також стики між зернами заповнювача. При щільній кубічній упаковці зерен крупного заповнювача цей елемент структури має чотирикутну форму, а при гексагональній – трикутну. В першому випадку цементно-піщана матриця більш схильна до утворення тріщин. Відомим рецептурним методом покращення фізико-механічних властивостей бетонів, зокрема за рахунок зменшення утворення тріщин у цементно-піщаній матриці в місцях стику частинок заповнювача, є додаткове застосування меншої за розміром фракції заповнювача, що забезпечує більш щільну упаковку з урахуванням наявності на заповнювачі цементно-піщаної оболонки. За розрахунками Й.М. Ахвердова [262] відношення діаметра цієї фракції до більшої має бути приблизно 1 до 7. Відповідно, при використанні крупного заповнювача безперервної гранулометрії, максимальна кількість усадочних тріщин утворюється там, де тангенціальні складові усадочних напружень мають найбільші чисельні значення, тобто навколо найбільших зерен заповнювача, а також в місцях, де товщина оболонки в'язучого навколо частинок заповнювача мінімальна.

Проте значну частину викладеного вище можна переносити на бетони на пористих заповнювачах лише частково. Наприклад, у роботі Ю.В. Зайцева [234]

показано, що в важкому бетоні технологічні дефекти і тріщини характерно розташовуються знизу зерен заповнювача по відношенню до напрямку укладання бетону, у а легкому бетоні на заповнювачі з шлакової пемзи подібні дефекти контактної зони майже відсутні. В дослідженнях В.І. Кондращенко показано, що в бетоні на гранітному щебені основна частина дефектів розташована в «цементно-піщаному камені» і в місці його контакту з щільним заповнювачем. Проте в легкому бетоні з наближенням до поверхні пористого заповнювача спостерігається зменшення пористості матриці, яка в місці контакту в ультрафіолетовому світлі проглядалася у вигляді тонкої смужки, що оточує заповнювач [263]. На думку П.Г. Комохова зерна пористих заповнювачів як матеріалів низької пружності відіграють роль демпфера в процесі розвитку тріщин як найбільш активних структурних елементів в матриці. Фронт тріщини потрапляє на подібне зерно і частково розсіює свою енергію, що дозволяє «пригальмувати» процес тріщиноутворення [142,264].

Тобто одночасно з процесами, які є спільними для різних типів конструкційних бетонів, у бетонах на пористих заповнювачах активно проходять процеси масообміну між розчинною частиною і крупним заповнювачем. Важливим є те, що глибина, інтенсивність і навіть напрям цього масообміну залежать від властивостей як заповнювача, зокрема його поверхні, так і від властивостей цементно-піщаної матриці та бетонної суміші. З одного боку, зерна пористого заповнювача вбирають воду з навколишнього розчину (тобто є сорбентами), що поліпшує зчеплення заповнювача з матрицею, перешкоджає утворенню седиментаційних пустот і сприяє формуванню навколо зерен шару зі зміцненого розчину. Також наявність пористості у заповнювачі усуває небезпеку утворення біля поверхні наповнювачів водних плівок, які заважають зчепленню [24]. Такий процес прийнято називати «самовакуумуванням». Проте протікання цього процесу суттєво залежить від розмірів і пористості заповнювача та від ступеня його попереднього зволоження в процесі приготування бетонної суміші. У дослідженнях І.О. Іванова [2] показано, що пік водонасичення керамзитового зерна з густиною в

шматку $0,72-0,81 \text{ г/см}^3$ при В/Ц суміші 0,4 настає приблизно через 30 хвилин, а при В/Ц=0,8 лише через 120 хвилин. Надалі керамзитовий гравій в суміші вже починає втрачати вологу, проте у воді він продовжує вбирати її до декількох діб. Відповідно в оцінці значущості явища «самовакумування» при структуроутворенні доки немає єдиної думки, що пов'язано зі складністю як самого процесу, так і його наслідків [27].

М.З. Сімонов вказував, що пористий заповнювач в бетоні відсмоктує воду, ущільнюючи тим самим цементне тісто. В результаті підвищується міцність цементного каменю, поліпшується його зчеплення з поверхнею заповнювача, зростає міцність бетону [26]. Це підтверджується окремими експериментальними даними, згідно з якими цементний камінь у контактній зоні легкого бетону є більш міцним і має щільнішу структуру. В.Р Ізраелян це пов'язував з більш швидкою і повною кристалізацією мінералів в'язучого у контактній зоні пористого заповнювача, що підтверджувалось зниженням в ній частки гелеподібної фази [25]. Н.К. Хохрін вважав самавакуумування основною причиною підвищеної хімічної стійкості бетонів на заповнювачах з великим капілярним водопоглинанням [265]. У [25] стверджується, що контактна зона цементного тіста з базальтом є більш вразливою для всіх видів корозії, ніж контактна зона з більш пористими туфом або пемзою.

Але згідно з даних Т.Ю. Любимової [251,266] мікротвердість цементного каменю в зоні контакту з пористими заповнювачами навпаки знижується. Також відзначається, що якщо в зоні контакту з такими заповнювачами цементний камінь є щільнішим, то це може супроводжуватися зниженням його щільності в міжзернових зонах (рис.3.3). Тобто процес «самовакумування» може викликати як умовно «позитивні» з точки зору підвищення довговічності та міцності зміни у структурі бетону на пористому заповнювачі, так і оказувати певний умовно «негативний» вплив. Дані «позитивні» та «негативні» впливи є одночасно присутніми в процесі структуроутворення. Крім того, властивості води залежать від форми її зв'язку з структурними елементами компонентів бетонної суміші, а в результаті міграції вологи в заповнювачі та гідратації

мінералів цементу ці форми частково змінюються [267]. Відповідно за рахунок управління процесами масообміну між цементно-піщаною матрицею і пористим заповнювачем можливо суттєво вплинути на структуру і властивості легкого бетону.

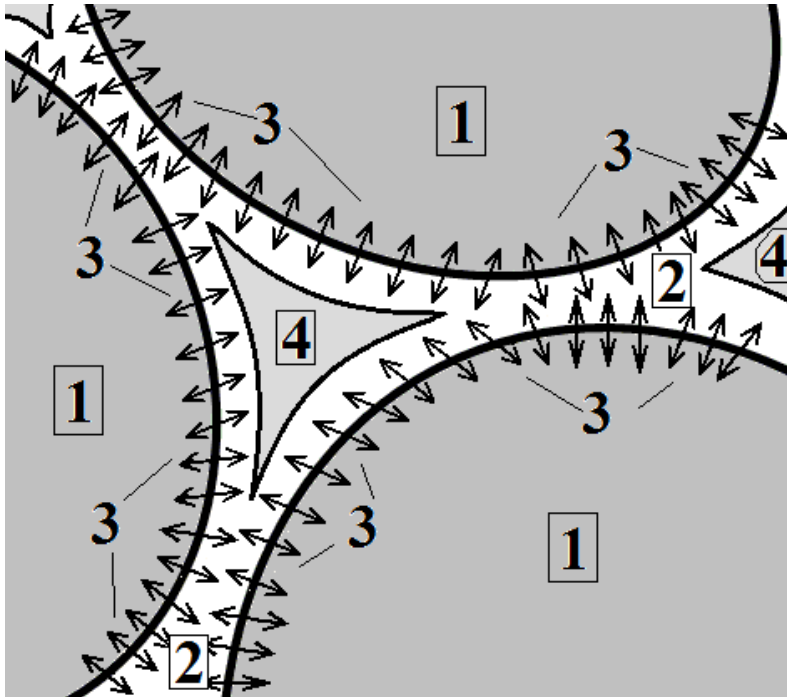


Рис.3.3. Зниження щільності цементно-піщаної матриці у міжзернових зонах бетонів на пористих заповнювачах
 1 – пористий заповнювач
 2 – цементно-піщана матриця
 3 – зона міграції води
 4 – зона меншої щільності цементно-піщаної матриці

Значна частина спеціалістів рекомендує зволожувати пористі заповнювачі заздалегідь або у процесі змішування, що технологічно простіше. Їх аргументом є те, що при достатньому ступені заповнення вологою порожнин заповнювача в процесі його попереднього перемішування з водою в бетонозмішувачі подальше поглинання води заповнювачем з розчину буде мінімальним і обумовленим насамперед повільним поступовим проникненням води вглиб пористого зерна. Тобто при використанні більш крупного заповнювача процес поглинання води буде протікати довше, ніж при використанні більш дрібних фракцій. Далі в процесі структуроутворення бетону, як показано вище, буде проходити зворотній процес міграції води з заповнювача до цементно-піщаної матриці, який серед іншого зменшує усадку останньої і сприяє кращій гідратації цементу. Протікання цього процесу також залежить від капілярно-пористої структури і крупності заповнювача. Проте на думку А.І. Іванова [2] зворотна міграція води з заповнювача в цементний

камінь, що твердіє, може розглядатися двояко. Тобто не лише з позитивних, але і з негативних позицій. Чим більше буде надходити вологи в зерна заповнювача, тим в більшій кількості вона буде мігрувати в зворотному напрямку. Останнє, в свою чергу, призводить до погіршення властивостей контактної зони. Проте окремі дослідження показують, що міцність бетону на попередньо водонасичених пористих заповнювачах, тобто при виключенні фактору самовакуумування, є не меншою за міцність бетону на аналогічних сухих заповнювачах [26].

Також важливо враховувати набухання і усадку самого зерна заповнювача. Тобто у міру зволоження, яке відбувається в процесі приготування і укладання бетонної суміші, переважна частина пористих заповнювачів в більшій чи меншій мірі збільшуються в об'ємі. При втраті вологи проходить зворотній процес – усадка зерен заповнювача. Процеси набухання і усадки пористого заповнювача впливають на структуру і властивості контактної зони і відповідно бетону в цілому. Вплив та кінетика даних процесів проаналізована нижче.

Для бетонів характерні три можливі варіанти руйнування під впливом навантажень: по розчинній частині при незруйнованому заповнювачі; по розчинній частині та по контактній зоні між розчинною частиною і заповнювачем; по заповнювачу і розчинній частині [268]. Для бетонів на пористих заповнювачах важливою особливістю структури є підвищене зчеплення їх цементно-піщаної частини з заповнювачем, яке, наприклад, для керамзитобетонів є в 1,7-2,5 рази вищим в порівнянні зі зчепленням з щільним щебенем [2,155]. Відповідно для подібних матеріалів найбільш характерним є другий і третій варіант руйнування під впливом навантажень.

Модифікатори також впливають на властивості контактної зони. У роботі В.Р Ізраєляна [25] показано, що при введенні у склад бетону поверхнево-активних речовин підвищується міцність зчеплення між цементно-піщаною матрицею і пористим заповнювачем, але товщина контактної зони при цьому дещо знижується. Дослідники пояснювали це покращенням змочувальної здатності цементного клею, в результаті чого підвищувалася фактична площа

дотику поверхонь заповнювача і розчинної частини. Також важливу роль в цьому відіграє шорсткість гідрофільних складових пористих заповнювачів, що покращує змочування. К.К. Пушкарьова [269] покращення зчеплення матриці з заповнювачем при введенні органо-кремнеземистої добавки пояснює формуванням гідратних новоутворень, які проникають в поровий простір заповнювача, внаслідок чого збільшують ширину і мікротвердість контактної зони. Тобто висока сила зчеплення цементно-піщаної матриці з заповнювачем, а також вологісні деформації самого крупного пористого заповнювача є важливими особливостями структури легких бетонів, які зумовлюють переважно іншу схему руйнування або деструкції, ніж у важкого бетону. Відповідно технологічні методи, спрямовані на підвищення міцності, довговічності та покращення інших фізико-механічних показників легких бетонів доволі суттєво відрізняються від аналогічних за спрямованістю технологічних методів для важких бетонів. При цьому рецептурні методи підвищення механічних властивостей і довговічності легких і важких бетонів доволі схожі.

В залежності від адгезійних властивостей поверхні заповнювача також змінюється вплив його крупності на міцність бетону. Як показано у роботі І.М. Грушко [270], при забезпеченні достатньої адгезії заповнювача до цементно-піщаної матриці при підвищенні його крупності міцність бетону зменшується. У випадку незначної адгезії зерен – навпаки зростає при використанні більш крупного заповнювача. Крім того, при підвищенні крупності зерен заповнювача зменшується однорідність бетону по міцності, відношення міцності на згин до міцності при стиску, а також границі мікротріщиноутворення [271].

Таким чином, для підвищення довговічності та механічних властивостей бетонів на пористих заповнювачах, які з одного боку мають досить гарну адгезію до цементної матриці, а з іншого – змінюють свій об'єм через набухання і втрату вологи, корисними є технологічні операції, спрямовані на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці. Це досягається за рахунок зменшенням деформацій у контактній зоні, та/або за

рахунок покращення однорідності контактної зони. Для конструкційних легких бетонів високої міцності також актуальною є задача підвищення міцності заповнювача, зокрема з врахуванням умов експлуатації конструкції, а також однорідності його зерен. Це пов'язано з тим, що для таких матеріалів в значній мірі саме ці показники, а не витрата в'язучого, обмежує їх максимальну міцність. Окреслені вище задачі з врахуванням особливостей умов експлуатації тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд було запропоновано вирішувати двома технологічними методами (прийомами), кожен з яких має свої особливості.

Перший метод – обробка пористого заповнювача цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші. Даний прийом є технологічно досить простим. Такий вид обробки зміцнює поверхневий шар крупного пористого заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону. Тобто обробка суспензією підвищує однорідність контактної зони, за рахунок чого впливає на капілярно-порову структуру композиту та на адгезію заповнювача до матриці. Також така обробка сприяє перетворенню пористості заповнювача на замкнуту. Слід розуміти, що ступень як зміцнення заповнювача, так і зміни його адгезії залежить від структури зерен даного заповнювача. Також важливим ефектом обробки суспензією є те, що вона дозволяє покращити однорідність зерен заповнювача завдяки насиченню його технологічних тріщин, пор та інших порожнин цементним тістом. Справедливо буде зазначити, що пористий заповнювач взаємодіє з цементно-піщаною сумішшю і при звичайному методі її приготування. Наприклад, у дослідженні Є.Є. Калмикової [272] встановлено, що відкриті капілярні пори на поверхні заповнювачів поглинають не чисту воду, а цементно-водну суспензію, а при подальшому обміні виділяють лише воду, тобто працюють як фільтри. Спрямована обробка пористого заповнювача цементною суспензією лише посилює позитивний ефект такого явища.

Другий метод – гідрофобізація поверхні пористого заповнювача. Це дозволяє знизити поглинання води з цементно-піщаної матриці, за рахунок чого

понижити В/Ц суміші без погіршення її технологічності, а також зменшити об'ємні зміни зерен заповнювача та матриці в процесі структуроутворення, що показано нижче. При цьому забезпечується необхідна резервна пористість замкнутого типу в заповнювачі, змінюється ступень адгезії заповнювача до матриці та знижується ефект розм'якшення заповнювача у вологих умовах експлуатації. Як описано в п.1.3, даний метод вперше був запропоновано у роботах О.А. Кучеренко і В.М. Вирового [161-163], зокрема для зниження об'ємних змін заповнювача при зволоженні та висушуванні бетону. Але в наших дослідженнях даний метод вдосконалюється з позиції забезпечення підвищення саме довговічності бетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

Важливість з точки зору забезпечення довговічності легкого бетону зниження об'ємних змін пористого заповнювача, а також регулювання його адгезією проілюстрована на схемі, показаній на рис.3.4. Вона показує, що за рахунок вологістних деформацій заповнювача в цементно-піщаній матриці виникають зони з найбільшою інтенсивністю даних деформацій, в яких наявні технологічні та експлуатаційні тріщини активно зростають за рахунок розкриття їх берегів. При цьому можливі два основних типа механізмів утворення і розвитку технологічних тріщин в матриці легкого бетону при набуханні і усадці пористого заповнювача: при адгезії матричного матеріалу до заповнювача вищій за його когезію (рис.3.4.а), та при когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача (рис.3.4.б). Надалі ці тріщини здатні поєднуватися з утворенням внутрішніх поверхонь розділу [15,257]. Дані тріщини і поверхні розділу з високою вірогідністю можуть розкритися до величин, які дозволяють проникати воді і за рахунок цього інтенсифікувати більшість видів корозійних впливів середовища. Відповідно зниження набухання і усадки заповнювача є важливим механізмом впливу на структуру композиту, спрямованим на підвищення його довговічності. Також одним з механізмів покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці може слугувати регулювання величини адгезії матричного матеріалу до

пористого заповнювача. При цьому слід прагнути до «урівноваження» між величинами адгезії цементно-піщаної матриці до заповнювача та її власної когезії.

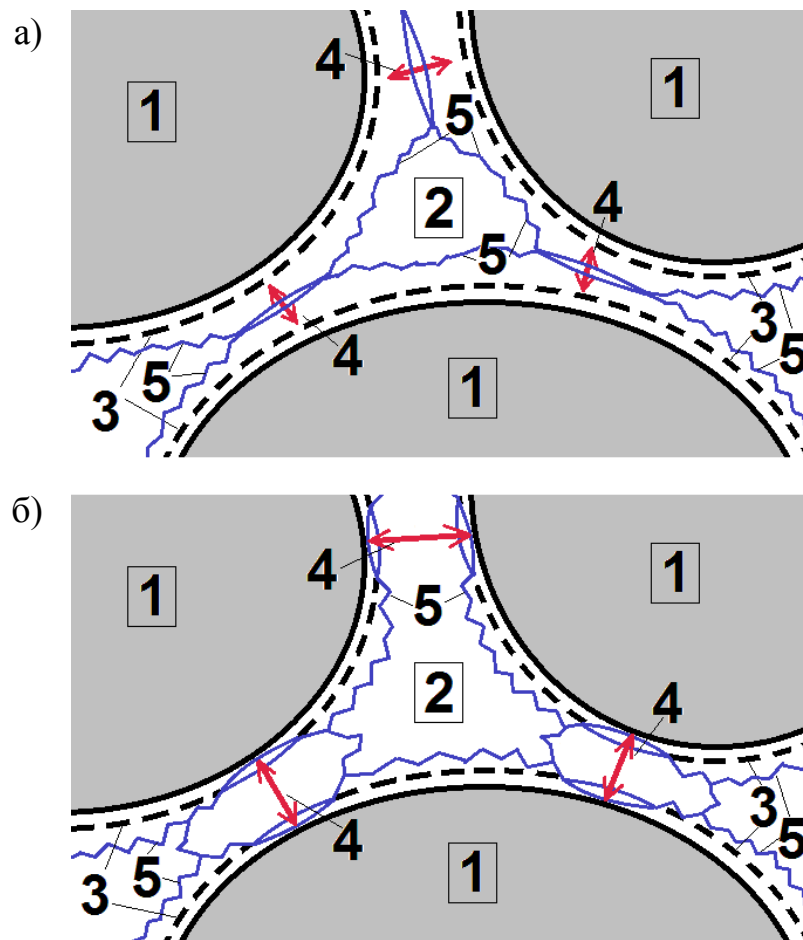


Рис.3.4. Механізми утворення технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу в цементно-піщаній матриці легкого бетону при набуханні і усадці пористого заповнювача:

а) при адгезії матричного матеріалу до заповнювача вищій за його когезію;

б) при когезії матричного матеріалу вищій за адгезію до заповнювача;

1 – пористий заповнювач; 2 – цементно-піщана матриця; 3 – границя вологістних деформацій заповнювача в процесі структуроутворення і експлуатації; 4 – зони з найбільшою інтенсивністю вологістних деформацій; 5 – напрям вірогідного зростання фронту технологічних тріщин

В цілому обидва запропонованих технологічних методи (прийоми) можуть розглядатися як одна з складових в сумі технологічних і рецептурних методів підвищення довговічності та фізико-механічних властивостей бетонів на пористих заповнювачах. Тобто обробка заповнювача має здійснюватися в

комплексі з рецептурними рішеннями – проектуванням раціональних складів бетонів, введенням модифікаторів: ефективних пластифікаторів, кольматуючих добавок і наповнювачів, дисперсним армуванням тощо. Застосування комплексних заходів дозволяє управляти структурою композиту з метою забезпечення покращення сумісної роботи заповнювача матриці при утворенні переважно закритої пористості крупного заповнювача та зниженні капілярної пористості цементно-піщаної матриці.

3.3 Вплив обробки пористого заповнювача на властивості легкого бетону

Як зазначено вище, обробка пористого заповнювача цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші була запропонована як один з технологічних прийомів підвищення довговічності та механічних властивостей легких бетонів. Дещо подібний метод обробки керамзитового гравію пропонувався в роботах В.М. Вирового [162,273], проте він передбачав обробку цементною суспензією, зокрема з розчином рідкого скла, з наступним твердінням покриття (висиханням обробленого гравію), що технологічно досить складно.

З метою вивчення механізму проникнення цементної суспензії у пористий гравій при його обробці проводився наступний експеримент. Було приготовано 6 варіантів цементних суспензій з різною концентрацією в'язучого, від 10% до 100% по масі від кількості води. В даних суспензіях проходив обробку керамзитовий гравій Одеського керамзитового заводу з насипною густиною 500 кг/м^3 , який був відібраний зі складу заводу не пізніше однієї доби після його виробництва і зберігався у повітряно-сухих умовах. Для досягнення максимально рівних умов обробки відбирався гравій відносно однакової форми з діаметром у меншому перетині 9-10 мм і з довжиною у більшій проекції 15-16 мм. Обробка проводилась методом перемішування гравію в суспензії, що імітувало процес приготування легкобетонної суміші. Гранули виймалися з

суспензій відповідно через 1, 3, 5 і 10 хвилин після початку обробки. Далі після 2-3 хвилин експонування на повітрі (висушування), які були необхідні з технологічних причин для закріплення гранул в станинах, оброблені гранули розпилювалися і поверхня розпилу оброблялася розчином фенолфталеїну для виявлення лужності їх внутрішнього середовища. Висушування було не тривалим, що мінімізувало ефект зворотної міграції розчину, яке в реальних умовах твердіння бетону є повільним. Завдяки описаній методиці експерименту прояв лужності на поверхні зрізу можна вважати ознакою проникнення часток цементу в гранулу. Результати експерименту представлені на рис.3.5.

Як можна побачити з фото на рис.3.5, при низьких концентраціях цементу в суспензії лужність зовнішньої оболонки гранул керамзиту змінюється мінімально, що свідчить про незначну кількість в'язучого, яке проникло в пористий заповнювач. При більшій концентрації цементу в суспензії лужність зовнішньої оболонки гравію помітно зростає, що показує зміна окрасу фенолфталеїну. При цьому глибина проникнення суспензії у гранули майже не змінюється після 3-х хвилин обробки і судячи зі зміни кольору фенолфталеїну на зрізі вона складає від 1 до 2..3 мм. Але при наявності в гранулі тріщин, що виходять за її оболонку, в'язуче здатне проникати по даній тріщині і на більшу глибину, що сприяє покращенню однорідності гранул в бетоні. Справедливо зазначити, що глибина і швидкість проникнення суспензії в пористий заповнювач буде в значній мірі залежати від виду заповнювача, його початкової вологості, а для штучних заповнювачів також від якості оболонки. Проте виявлений загальний характер проникнення в'язучого в заповнювач показує, що цілком можливо досягнути модифікації поверхневого шару пористого заповнювача та покращення його однорідності за рахунок організації раціонального процесу завантаження компонентів бетонної суміші та її перемішування.

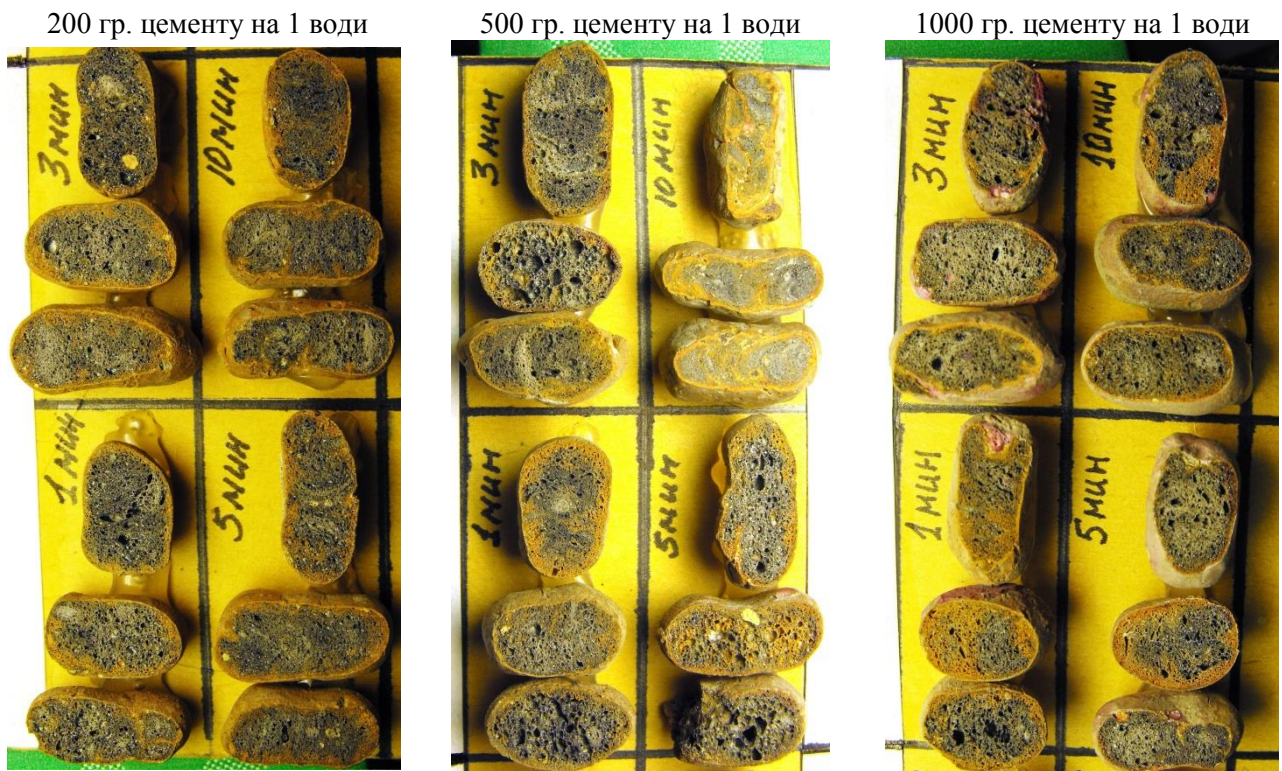


Рис.3.5. Дослідження глибини проникнення в'язучого в керамзитовий гравій при його обробці цементною суспензією

Далі з метою вивчення впливу технологічного прийому обробки пористого заповнювача цементною суспензією на властивості легкого бетону був проведений описаний нижче експеримент. Виготовлялося п'ять паралельних партій керамзитобетону однакового складу: цемент – 500 кг/м^3 , пісок – 710 кг/м^3 , керамзитовий гравій фракції 5-10 мм – 675 л/м^3 , добавка С-3 – 4 кг/м^3

(0,8% від маси цементу, розчинялася у воді змішування), вода – 180 л/м³. Рухомість сумішей цих бетонів складала від 6 до 8 см осадки конусу. Ці п'ять партій виготовлялися за різними технологіями приготування суміші.

Перша партія (умовна назва «без попереднього насичення») виготовлялася з завантаженням у змішувач води після завантаження і попереднього перемішування всіх сухих компонентів. Тобто гравій спеціально не оброблявся в початковій стадії перемішування і контактував вже безпосередньо з цементно-піщаною сумішшю в процесі перемішування легкобетонної суміші, що фактично аналогічно технології виготовлення важкого бетону.

Друга партія (умовна назва «з насиченням водою») виготовлялася з наступною послідовністю завантаження і змішування. Спочатку подавалася вода і керамзитовий гравій, після чого гравій протягом однієї хвилини насичувався водою у змішувачі, далі практично одночасно завантажувалася цемент і пісок.

Третя партія (умовна назва «з насиченням суспензією 30% концентрації») виготовлялася з наступною послідовністю завантаження і змішування. В змішувач подавалася вода, 30% від необхідної кількості цементу і керамзитовий гравій. Після цього протягом однієї хвилини проводилося перемішування суміші, тобто відбувалася обробка керамзитового гравію цементною суспензією, яку умовно можна назвати суспензією 30% концентрації. З врахуванням В/Ц суміші та рецептури легкого бетону фактична концентрація суспензії складала 0,833 кг цементу на літр води. Після даної попередньої обробки в змішувач одночасно завантажувалася пісок і решта цементу.

Четверта партія (умовна назва «з насиченням суспензією 60% концентрації») виготовлялася аналогічно третій, але одночасно з водою у змішувач подавалося 60% від необхідної кількості цементу. Тобто фактична концентрація суспензії складала 1,66 кг цементу на літр води. Відповідно такою суспензією оброблявся гравій при змішуванні протягом однієї хвилини.

П'ята партія (умовна назва «з насиченням цементною суспензією») виготовлялася з наступною послідовністю завантаження і змішування. В

змішувач подавалася вода, весь необхідний на заміс цемент і керамзитовий гравій. Після цього протягом однієї хвилини проводилася обробка керамзитового гравію цементною суспензією даної умовно 100% концентрації (фактична концентрація 2,778 кг цементу на літр води), тобто проходило перемішування керамзитобетонної суміші без піску. Після даної обробки в змішувач завантажувався пісок.

Для всіх п'яти партій перемішування суміші проводилося до досягнення однорідності і займало від 4 до 5 хвилин. У віці 28-ми діб для досліджених бетонів була визначена міцність при стиску при рівноважній вологості та в водонасиченому стані, а також середня густина в сухому стані (після висушування зразків до постійної маси при температурі $105 \pm 5^\circ\text{C}$), при рівноважній вологості та в водонасиченому стані. Отримані дані наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Міцність і середня густина керамзитобетонів,
приготованих за різними технологіями змішування суміші

| Номер та назва партії | Міцність при стиску, МПа | | Середня густина, кг/м ³ | | |
|---|----------------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| | при рівно-важній вологості | в водонасиченому стані | в сухому стані | при рівно-важній вологості | в водонасиченому стані |
| №1 без попереднього насичення | 31,3 | 26,9 | 1667 | 1704 | 1822 |
| №2 з насиченням водою | 29,8 | 25,4 | 1656 | 1695 | 1820 |
| №3 з насиченням суспензією 30% концентрації | 31,8 | 27,5 | 1672 | 1709 | 1826 |
| №4 з насиченням суспензією 60% концентрації | 32,1 | 27,9 | 1669 | 1707 | 1828 |
| №5 з насиченням цементною суспензією | 31,9 | 27,8 | 1671 | 1708 | 1827 |

Аналіз наведених даних показує, що за рахунок застосування технологічного прийому обробки пористого заповнювача цементною суспензією міцність легкого бетону при рівноважній вологості зростає на 2 МПа і більше в порівнянні з аналогічними за складом керамзитобетоном на основі насиченого водою гравію. В водонасиченому стані, тобто у вологих умовах, різниця в міцності між легкими бетонами, приготованим на насиченому цементною суспензією гравію і бетоном на гравії, попередньо насиченому водою, досягає 2,5 МПа. Також бетони на обробленому суспензією гравії виявилися дещо міцніше бетону, приготованого без попереднього насичення заповнювача, тобто при одночасному завантаженні компонентів, але різниця в міцності зразків була на рівні точності експерименту. Тобто технологія з одночасним завантаженням компонентів є також досить ефективною, проте фактично не є зручною завдяки наявності ефекту «злипання» окремих «блоків» суміші безпосередньо після завантаження та ефекту дещо швидшої початкової втрати рухомості суміші. Це проявляється в несуттєво, але гіршому збереженні удобоукладальності суміші після її розвантаження зі змішувача при нетривалому перемішуванні, через доволі довге у часі поглинання вологи не обробленим заповнювачем. При здійсненні операції попередньої обробки заповнювача суспензією цей ефект практично зникає завдяки більшій насиченості пористого гравію суспензією вязучого. Обробка суспензією в значній мірі також дозволяє уникнути ефекту зниження мікротвердості контактного шару між пористим заповнювачем і цементним тістом, який за даними М.К. Хохріна виникає при насиченні заповнювача водою [274,275].

Проведений експеримент також показав, що більш міцні керамзитобетони мали дещо вищу середню густину, що пояснюється саме насиченням в'язучим поверхнево шару пористого заповнювача за рахунок організації раціонального процесу перемішування суміші. Тобто фактична витрата компонентів суміші в перерахунку на 1 м³ несуттєво зростала. Отримані дані щодо впливу технології змішування суміші на міцність легкого бетону досить близькі до результатів досліджень М.З. Сімонова [26], але М.З. Сімонов не проводив експерименти з

цементною суспензією різних концентрацій. Факт більш глибокого проникнення в'язучого в поверхневий шар пористого заповнювача за рахунок технологічної операції його обробки цементною суспензією був також підтверджений мікроскопічним аналізом шліфів керамзитобетону, приготованого за різними технологіями. Ці дані наведено в п.4.5.

Також було досліджено вплив обробки пористого заповнювача цементною суспензією на показники середнього розміру пор і однорідності розмірів пор у керамзитобетоні. Показники α і λ визначалися за кінетикою водопоглинання згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Встановлено, що за рахунок обробки заповнювача середній розмір пор керамзитобетону в п'ятій дослідженій партії, тобто приготованого на обробленому гравії, складав $\lambda=2,6$. Це на 12% менше в порівнянні з даним показником для бетону на основі гравію, насиченого водою, тобто у другій партії, для якої $\lambda=2,3$. При цьому також за рахунок обробки гравію на 15% підвищився показник однорідності пор за розмірами α – з 0,62 до 0,71. Це можна пояснити зменшенням відкритої пористості власне пористого заповнювача, пори якого є переважно більшими за розміри пор у цементно-піщаній матриці легкого бетону, а також кращім насиченням в'язучім контактної зони.

З метою вивчення впливу технологічного методу гідрофобізації поверхні пористого заповнювача на властивості легкого бетону був проведений описаний нижче пошуковий експеримент. Виготовлялося дві партії керамзитобетону з однаковим вмістом цементу, гравію і добавки С-3 на 1 м³. При цьому в першій партії використовувався не оброблений керамзитовий гравій, а в другій – гідрофобізований 0,8% емульсією кремнійорганічної рідини. Технологія гідрофобної обробки керамзитового гравію емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М наведена в п.5.1. За рахунок гідрофобізації поверхні гравію водопотреба бетонної суміші знизилася, відповідно знизилася кількість води у складі за умови збереження рухомості суміші на рівні 5..6 см осадки конусу. Це викликало необхідність корегування кількості піску в складі

для рівності об'єму бетонів. Таким чином, досліджені керамзитобетони мали такі склади:

Перша партія («контрольна»). Цемент – 500 кг/м³, пісок – 710 кг/м³, керамзитовий гравій фракції 5-10 мм – 675 л/м³, добавка С-3 – 4 кг/м³, вода – 178 л/м³.

Друга партія («з гідрофобізованим гравієм»). Цемент – 500 кг/м³, пісок – 721 кг/м³, керамзитовий гравій фракції 5-10 мм – 675 л/м³, добавка С-3 – 4 кг/м³, вода – 170 л/м³.

Для даних двох партій керамзитобетонів у віці 28-ми діб була визначена міцність при стиску та середня густина при рівноважній вологості та у водонасиченому стані. Отримані дані наведено у таблиці 3.3. Як видно з таблиці, міцність керамзитобетону на гідрофобізованому гравії була вище за міцність контрольного складу на 2,1 МПа при рівноважній вологості та на 3,5 МПа у водонасиченому стані. Це можна пояснити як зниженням В/Ц суміші за рахунок зменшення водопоглинання заповнювача, так і меншою ступеню розм'якшення гідрофобізованого керамзитового гравію при насиченні легкого бетону водою, що відображено в п.2.4. Останнє частково підтверджується порівнянням середньої густини легких бетонів двох складів в різних умовах. Якщо при рівноважній вологості середня густина обох бетонів була фактично однаковою, то у водонасиченому стані бетон на гідрофобізованому гравії мав середню густина на 27 кг/см³ нижчу за густина контрольного складу.

Таблиця 3.3

Міцність і середня густина керамзитобетона з гідрофобізованою поверхнею гравію та з контрольної партії

| Номер та назва партії | Міцність при стиску, МПа | | Середня густина, кг/м ³ | |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані |
| №1 контрольна | 32,1 | 27,7 | 1730 | 1829 |
| №2 з гідрофобізованим гравієм | 34,2 | 31,2 | 1727 | 1802 |

Крім того позитивний вплив гідрофобної обробки пояснюється зменшенням об'ємних деформацій керамзитового гравію в процесі структуроутворення бетону, що показано нижче в п.3.4, і що сприяє покращенню сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці. Більш детальні результати досліджень впливу гідрофобізації поверхні пористого заповнювача (керамзиту) на структуру і комплекс фізико-механічних властивостей керамзитобетону наведено в 5-му розділі роботи.

Таким чином проведені дослідження підтвердили робочу гіпотезу, що задача підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд може бути вирішена за рахунок управління структурою шляхом використання ефективних модифікаторів і спрямованого регулювання взаємодії між цементно-піщаною матрицею і заповнювачем, спрямованим на покращення їх сумісної роботи. Для цього запропоновано використання двох технологічних методів: обробка пористого заповнювача цементною суспензією в початковій стадії приготування суміші та гідрофобізація його поверхні емульсією кремнійорганічної рідини. Результати експериментальних досліджень показали ефективність обох технологічних методів, зокрема для матеріалів, що знаходяться у водонасиченому стані.

3.4 Набухання і усадка штучного пористого заповнювача в процесі твердіння бетону

Щільні заповнювачі при зволоженні та висушуванні практично не схильні до зміни об'єму в порівнянні з величиною змін об'єму цементного каменю, але пористі заповнювачі проявляють себе інакше. Тобто розуміння роботи пористих заповнювачів в цементно-піщаній матриці з врахуванням їх набухання і усадки в процесі структуроутворення і експлуатації легких бетонів є важливим для управління механічними властивостями і забезпечення довговічності даних матеріалів. Як показано вище, пористі заповнювачі активно обмінюються вологою з цементно-піщаною матрицею (розчинною

частиною бетону), при цьому можуть як поглинати, так і віддавати вологу на різних етапах життєвого циклу матеріалу, а також при зміні умов експлуатації конструкції. Ці процеси активно впливають на об'ємні зміни не лише цементної матриці, а і заповнювача, через що відповідно впливають на їх сумісну роботу в композиті.

Дослідження Н.І. Макрідіна [276,277] та І.А. Іванова [2] показують, що у результаті 20-ти денного насичення керамзитового гравію водою його набухання в залежності від виду заповнювача складає від 1,5 до 1,9 мм/м, а водопоглинання від 20 до 36% по масі. При цьому за першу добу насичення водою керамзитового гравію його подовження розширення не перевищує 0,7 мм/м. Але при подальшому висушуванні один раз насиченого гравію в ньому залишаються об'ємні зміни на рівні 0,3-0,9 мм/м. На думку дослідників кінетику водопоглинання і об'ємних змін визначає не товщина оболонки, а характер капілярної пористості заповнювача, в тому числі безпосередньо в самій оболонці. Саме цим можна пояснити досить значні розбіжності в одержаних даних.

Проте Н.І. Макрідін не поділяв думки, що всі пористі кам'яні матеріали, в тому числі природні і штучні заповнювачі, при зволоженні будуть обов'язково набухати а при висиханні зменшуватися в об'ємі [277]. Він припускав, що для кожного виду пористого заповнювача існує своє критичне значення вологості, при зміні якого як в меншу, так і в більшу сторону зерна можуть набухати. В такому випадку вихідний стан вологості заповнювачів перед їх застосуванням в бетонній суміші може вплинути на об'ємні зміни бетону. В дослідженнях В.М. Вирового також показаний неоднозначний вплив зволоження керамзитового гравію на його об'ємні зміни [162]. Н.І. Макрідін робив висновок, що описані явища можна пояснити існуванням попередньо напруженого стану гранул керамзиту. При його виготовленні в процесі охолодження виникають нестандартні температурні поля, в результаті чого об'ємні деформації, що виникли, будуть неоднаковими – в зовнішніх шарах гранул виникнуть напруження розтягнення, в внутрішня зона, навпроти, виявляється стислою.

І.А. Іванов [2] притримувався аналогічної думки щодо штучних пористих заповнювачів, в яких проявляються наслідки їх початкового напруженого стану. Виникаючи в піропластичному стані, вони призводить до зростання ступеня неоднорідності механічних і деформативних характеристик окремих гранул. Конкретизувати ступінь неоднорідності напруженого стану фактично не представляється можливим, проте факт її проявлення можна показати непрямым шляхом. За рахунок релаксації цей початковий напружений стан поступово згладжується. В результаті зволоження керамзитового гравію відбувається релаксація описаного вище напруженого стану його гранул, що і пояснює збереження певних об'ємних змін у даному заповнювачі навіть після повного висушування.

Штучні пористі заповнювачі є досить складними нерівновагими аморфно-кристалічними системами, що складаються з газоподібної, аморфної і кристалічної фаз. Кожна зі складових впливає на властивості заповнювача [277]. Пористість зерен заповнювачів складається з комірок відносно великого розміру – 0,1 мм і більше, умовно це макропористість, і комірок дрібного розміру – менше 0,1 мм, умовно це мікропористість, яку ще називають пористістю міжпорових перегородок [278]. Найбільший об'єм пористості та розмір пор є характерним для центральної зони зерна, найменший – для зовнішньої зони.

Найбільш розповсюдженим штучним пористим заповнювачем є керамзит. Технологічні особливості його виготовлення обумовлюють утворення в гранулах двох зон: зовнішньої – більш щільної і міцної, яку можна назвати «оболонкою», і внутрішньої – більш пористого «ядра». Зовнішня щільна оболонка має в основному червоно-вишневий колір і є завтовшки 0,4–1,5 мм. Ядро гранул має темно-сірий колір пористого скла. Поверхневі шари гранул керамзиту містять більше Fe_2O_3 , а внутрішні – FeO [279]. За даними Б.Н. Віноградова [280] у керамзиті переважаючими фазами є кисле алюмосилікатні скло і аморфізована глиниста речовина, а у поверхневому шарі гранул – кристали гематиту. Також наявні кварц, меліліт, шпінель, магнетит, польові

шпати, муліт, слюди та ін. Зазвичай з підвищенням ступеня спучування зерно стає більш неоднорідним. Крім того, гранули керамзиту з глинистих порід різних родовищ відрізняються різним ступенем розвитку більш щільною зовнішньої оболонки [2]. Кисле алюмосилікатне скло і аморфізована глиниста речовина за даними [30] навіть здатні до обмеженої хімічної взаємодії з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням переважно гелевих новоутворень.

Таким чином, характер набухання і усадка штучного пористого заповнювача, зокрема керамзиту, в процесі приготування суміші, твердіння і експлуатації легкого бетону є досить складним і неоднозначним. З одного боку, на зміну геометричних розмірів зерен впливає їхній об'ємний напружений стан, обумовлений напруженнями оболонки та ядра, з іншого боку – процеси обміну з цементно-піщаною матрицею. Підтвердження такого досить складного механізму зміни об'єму керамзитових зерен при зволоженні і висушуванні були отримані в роботах Н.І. Макрідіна і І.Н. Максимової [277,281]. Гранули керамзиту протягом трьох діб витримували у воді, далі вимірювали їх лінійні розміри та висушували при температурі $100..105^\circ\text{C}$ до постійної маси, охолоджували і знову проводили вимірювання. Було встановлено, що при циклічному насиченні і висушуванні керамзиту фіксується розширення і усадка його гранул з накопиченням залишкових деформацій розширення протягом перших п'яти циклів на реальних гранулах і протягом трьох циклів на гранулах з пошкодженим покриттям. Після цього залишкові деформації розширення стабілізуються і при наступних циклах насичення і висушування фіксуються лише деформації набухання та усадки з поступовим зменшенням їх амплітуди. Аналогічні дані були отримані В.М. Вировим [162].

На нашу думку, більшість описаних вище досліджень динаміки набухання і усадки пористого заповнювача при твердінні бетону не достатньо враховують те, що фактично в процесі приготування легкобетонної суміші керамзит активно зволожується лише на певну глибину, а в середині гранул залишається затиснуте повітря. Підтвердженням цього, зокрема, є описані в п.3.3 дослідження глибини проникнення цементної суспензії при обробці

керамзитового гравію. Для моделювання ситуації, максимально наближеної до фактичного впливу вологи на гравій в процесі приготування і твердіння бетону, дослідження об'ємних змін пористого заповнювача проводилися в нескладних експериментальних установках, схема яких показана на рис.3.5, а фото наведено на рис.2.4. Така конструкція дозволяла насичати гравій при швидкому повному зануренні у воду, що ближче до фактичного процесу приготування суміші (рис.3.6.а). Також паралельно досліджувалися об'ємні зміни гравію при його поступовому насиченні водою – вода заливалася в колбу з гравієм на 1/3 висоти зерна за добу, що дозволяло витиснути більшу кількість повітря з порожнин в заповнювачі (рис.3.6.б). На наступну добу вода заливалася ще приблизно на 1/3 висоти зерна керамзиту і т.д.

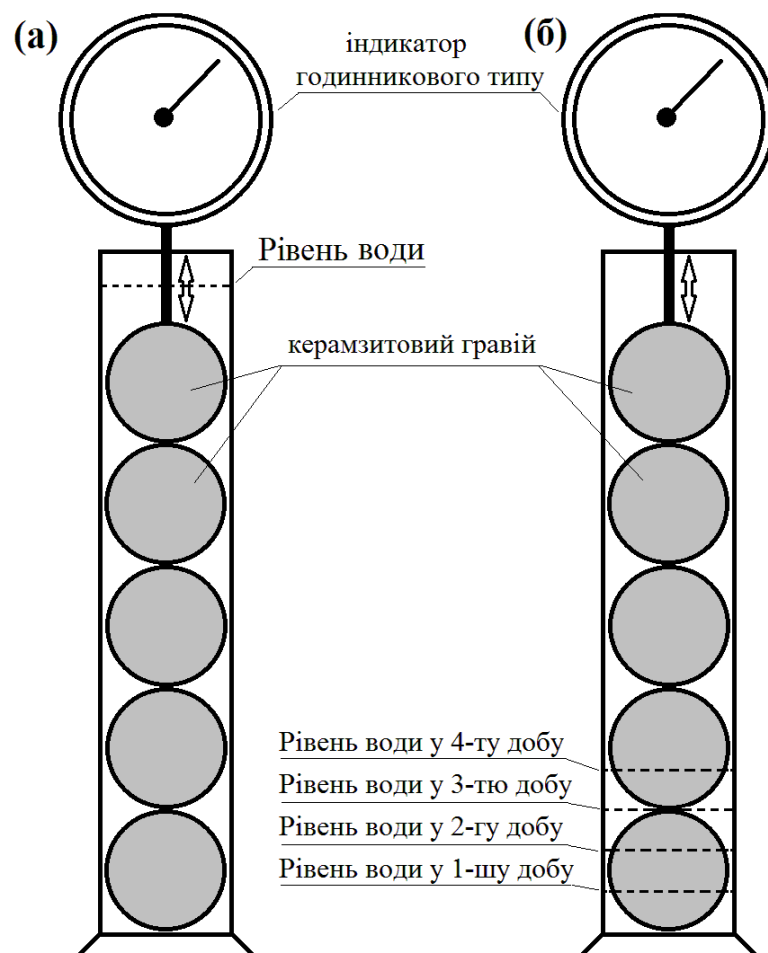


Рис.3.6. Схема проведених досліджень об'ємних змін керамзитового гравію при насиченні водою:

- а) при повному зануренні гравію у воду,
- б) при поступовому насиченні гравію водою

В дослідженнях використовувалися гранули керамзиту виробництва Одеського керамзитового заводу кулеподібної форми двох відібраних вручну фракцій – діаметром 11-12 мм та 18-19 мм. Це було обумовлено геометричними розмірами колб в установках і дозволяло порівнювати набухання і усадку різних за крупністю заповнювачів, при цьому близьких до середніх розмірів керамзиту в стандартних фракціях. Гравій відбирався зі складу керамзитового заводу безпосередньо після закінчення технологічного процесу його виробництва – охолодження після випалу. Випробування об'ємних змін починали у віці гравію 2-3 доби після його виробництва, окремої сушки гравію не проводилося. Такі умови, з одного боку, максимально наближені до реальних умов приготування легкобетонних сумішей, з іншого боку, виключають попереднє зволоження гравію під впливом атмосферних опадів.

Також за аналогічною методикою досліджувалися об'ємні зміни ідентичного за розмірами керамзитового гравію, відібраного з тій же самій промислової партії, який був попередньо гідрофобізований кремнійорганічною рідиною 136-157М з концентрацією в емульсії 0,8%. Гідрофобна обробка проводилася методом короткочасного занурення гравію в емульсію 136-157М з послідовним висушуванням на повітрі до досягнення рівноважної вологості, що займало 4-5 діб. Усереднені результати замірів довготривалого (9 діб) набухання керамзитового гравію (подовження в одній осі) як при його повному зануренні у воду, так і при поступовому насиченні гравію водою, показані на рис.3.7.

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок, що зерна меншого діаметру (11-12 мм) мали більшу сумарну величину набухання в порівнянні з зернами більшого діаметру (18-19 мм). Це можна пояснити, по-перше, більшою площею поверхні таких зерен в одиниці виміру (1 метр), по-друге, їхнім меншим початковим спучуванням в порівнянні з зернами більшого діаметру (18-19 мм), що є причиною більших внутрішніх напружень в зерні. Це також впливає на розміри відкритих капілярів, тріщин та інших порожнин в структурі зерен, що піддаються впливу вологи. Відповідно за рахунок релаксації при зволоженні зерна меншого діаметру мають більше лінійне подовження.

Непрямым підтвердженням останнього є те, що різниця в набуханні гідрофобізованих гранул різного діаметру була меншою за різницю в об'ємних змінах необробленого керамзиту аналогічних розмірів.

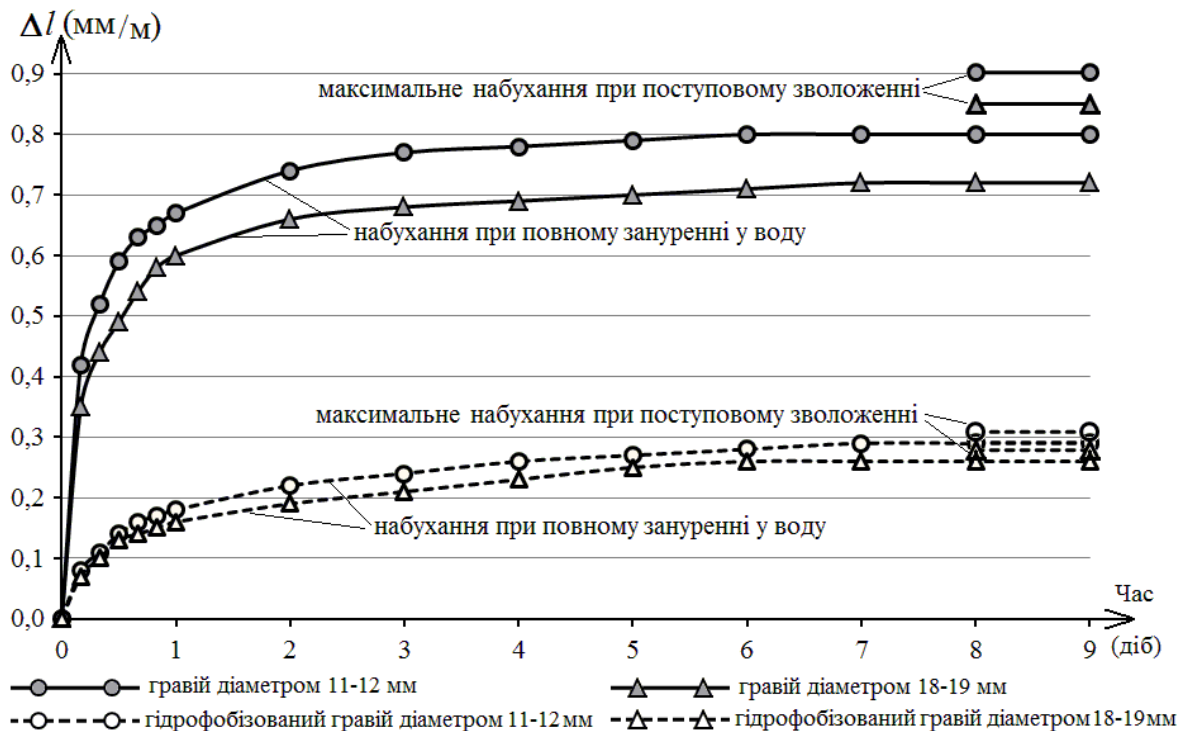


Рис.3.7 Набухання керамзитового гравію при довготривалому насиченні водою

При поступовому насиченні пористого заповнювача водою дана методика проведення експерименту дозволяє визначити лише сумарне значення об'ємних змін (подовження) керамзитового гравію, що показано на рис.3.7. Як видно з діаграми, набухання гравію при поступовому насиченні водою є приблизно на 12% більшим, ніж при насиченні методом повного занурення. Це пояснюється більшим ступенем водонасичення штучного пористого заповнювача за рахунок кращого витиснення повітря з його пор, відповідно більшого проявлення впливу напруженого стану стислої внутрішньої зони його зерен.

Об'ємні зміни гідрофобізованого гравію при довготривалому зволоженні є приблизно в три рази меншими за об'ємні зміни не обробленого гравію. При цьому різниця між набуханням при поступовому зволоженні та набуханням при повному зануренні у воду для гідрофобізованого гравію є набагато меншою,

ніж дана різниця для необробленого гравію – в межах 6..7%. Це свідчить про значне зниження вологісних деформацій гравію при його гідрофобній обробці завдяки перешкоджанню проникненню води у внутрішні порожнини пористого заповнювача. Цей ефект описано в роботах О.А. Кучеренко і В.М. Вирового [162,273,282]. На нашу думку таке зниження об'ємних вологісних деформацій керамзитового гравію при гідрофобізації також частково обумовлюється фактичним первинним змочуванням та висушуванням даного пористого заповнювача при його обробці. Гідрофобізація проводиться водною емульсією кремнійорганічної рідини, відповідно при обробці до формування гідрофобної кремнійполімерної плівки на поверхні гранули в її глибину частково потрапляє волога, яка згодом випаровується. Цей фактичний цикл зволоження – висушування сприяє зниженню напруженого стану керамзитової гранули. Відповідно при наступному потрапленні вологи у порожнини даного штучного заповнювача його об'ємні деформації стають меншими. Безперечно, це є лише одним і не визначним з чинників, які впливають на зміну властивостей гравію при гідрофобній обробці, проте його не варто повністю ігнорувати. Підтвердженням даного впливу операції попереднього зволоження і висушування також може слугувати характер усадки насиченого водою керамзитового гравію при висиханні. Даний характер був проаналізований в тих же самих установках, з яких після проведення досліджень з насиченням була злита вода і гравій в нормальних атмосферних умовах при кімнатній температурі $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ поступово висушувався. При цьому відбувалася його усадка, динаміка якої в часі показана на рис.3.8. На графіках за відлік часу прийнято момент видалення води з установок, при цьому початкове подовження гравію було таким, яким воно було на момент закінчення дослідів з насиченням водою. При висиханні проходив процес усадки попередньо насиченого водою керамзитового гравію. При цьому завдяки висушуванню при кімнатній температурі у порах, капілярах і внутрішніх поверхнях розділу зерен керамзиту до кінця дослідження залишалася частина накопиченої раніше вологи.

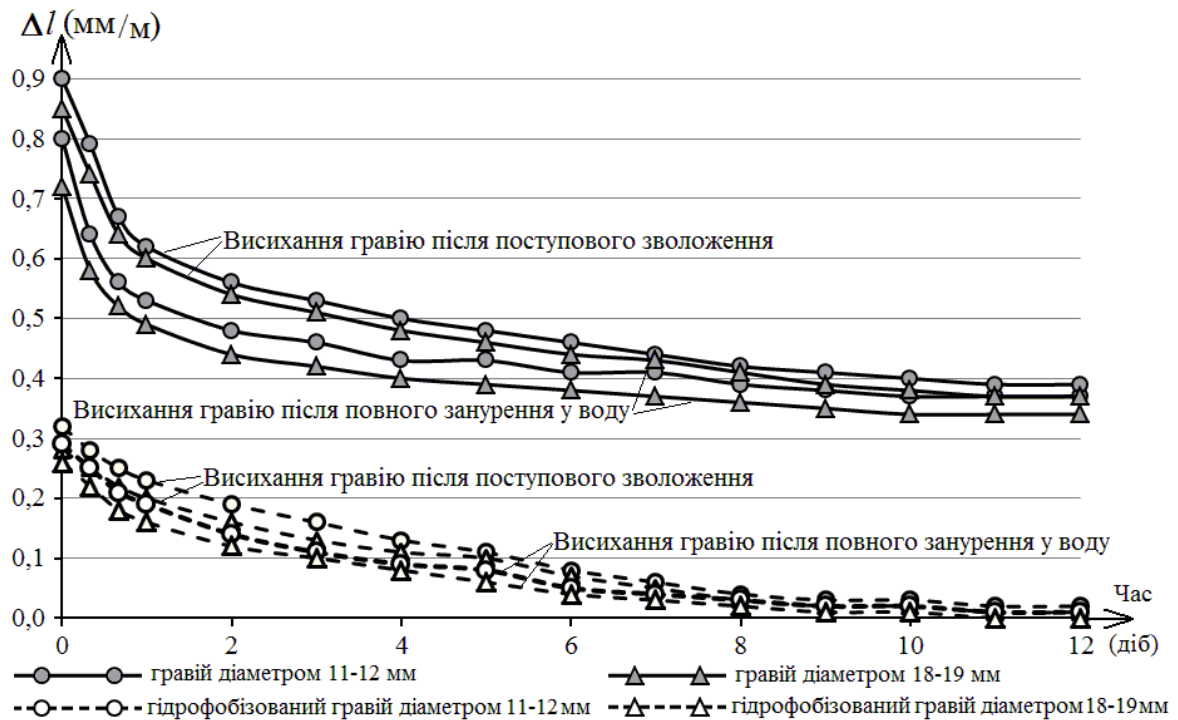


Рис.3.8. Усадка попередньо насиченого водою керамзитового гравію при висиханні

Як видно з графіків, при висушуванні усадка попередньо насиченого водою не гідрофобізованого керамзитового гравію є меншою за його первинне набухання при насиченні, що є наслідком накопичення залишкових деформацій і за характером співпадає з даними Н.І. Макрідіна та І.Н. Максимової [277,281]. Цей ефект набухання і «неповної» усадки є близьким до фактичної картини того, що відбувається при структуроутворенні і експлуатації легких бетонів на штучних пористих заповнювачах. Залишкові деформації у гравії, який насичувався при повному зануренні у воду, а також у гравії, який насичувався при поступовому зануренні, через певний час майже зрівнюються, знаходячись у діапазоні 0,34-0,39 мм/м. При цьому в гравії, який насичувався при поступовому зануренні, деформації усадки проходять довше через більший початковий вміст вологи. Проте усадка при висиханні керамзитового гравію з гідрофобізованою поверхнею практично дорівнює його набухання при насиченні водою і є у 2,2-2,4 рази меншою за усадку необробленого гравію. Таким чином, гідрофобна обробка ефективно знижує вологісні деформації пористого гравію, при цьому частково це обумовлюється первинним

зволоженням і висушуванням керамзиту при його обробці. Але це не знижує ролі впливу гідрофобної плівки на поверхні заповнювача на його водопоглинання та інші масообмінні процеси у бетонній суміші, які обумовлюють якість сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

В реальних умовах твердіння легкобетонної суміші керамзитовий гравій активно поглинає вологу лише на протязі перших декількох годин після подачі в бетонозмішувач, наприклад за даними [2] це від 30 хвилин до 3 годин. Далі за рахунок зниження кількості вільної води в суміші починається зворотній процес – віддача вологи з пористих зерен. Крім того, терміни кінця тужавлення цементу також як правило обмежені 3-4 годинами. Тому для розуміння характеру вологісних деформацій штучного пористого заповнювача саме в початкові терміни утворення структури бетону були проаналізовані набухання і зміна вологості керамзитового гравію після 0,5, 1, 2, 3 і 4 годин від моменту його занурення у воду. Дослідження вологісних деформацій проводилися в описаних вище установках на гранулах розміром 11-12 мм та 18-19 мм. Вологість визначалася на гранулах аналогічного розміру, які зважувалися після заданих проміжків часу знаходження у воді. Використовувався керамзитовий гравій, який після виготовлення не зволожувався. Також досліджувалися деформації і вологість гравію з гідрофобізованою 0,8% емульсією кремнійорганічної рідини поверхнею. Перед дослідженням весь гравій був додатково просушений до постійної маси. Результати визначення значень деформації і вологості гравію наведено на рис.3.9. Аналіз діаграми показує, що набухання гравію з гідрофобізованою поверхнею через 1 годину насичення водою (0,06-0,07 мм/м) є приблизно в 5 разів меншим, ніж необробленого гравію (0,32-0,37 мм/м). Майже така ж різниця у величині деформацій зберігається і після 4-х годин насичення водою: для гідрофобізованого – 0,08-0,09 мм/м, для необробленого – 0,35-0,42 мм/м. Ця різниця у величині та темпі вологісних деформацій обробленого і необробленого гравію пояснюється, в першу чергу, різним темпом їх водопоглинання. Так через 1 годину експонування у воді вологість гідрофобізованого гравію складає 2,4-2,7%, а

необробленого – 12,4-13,4%, тобто майже в п'ять разів більше. Через 4 години експонування зберігається майже 4-х кратна різниця у вологості гравію з обробкою і без – 4,5-4,6% проти 17,2-17,5%. Таким чином, зниження вологісних деформацій гравію при його гідрофобній обробці пояснюється переважно зниженням його водопоглинання.

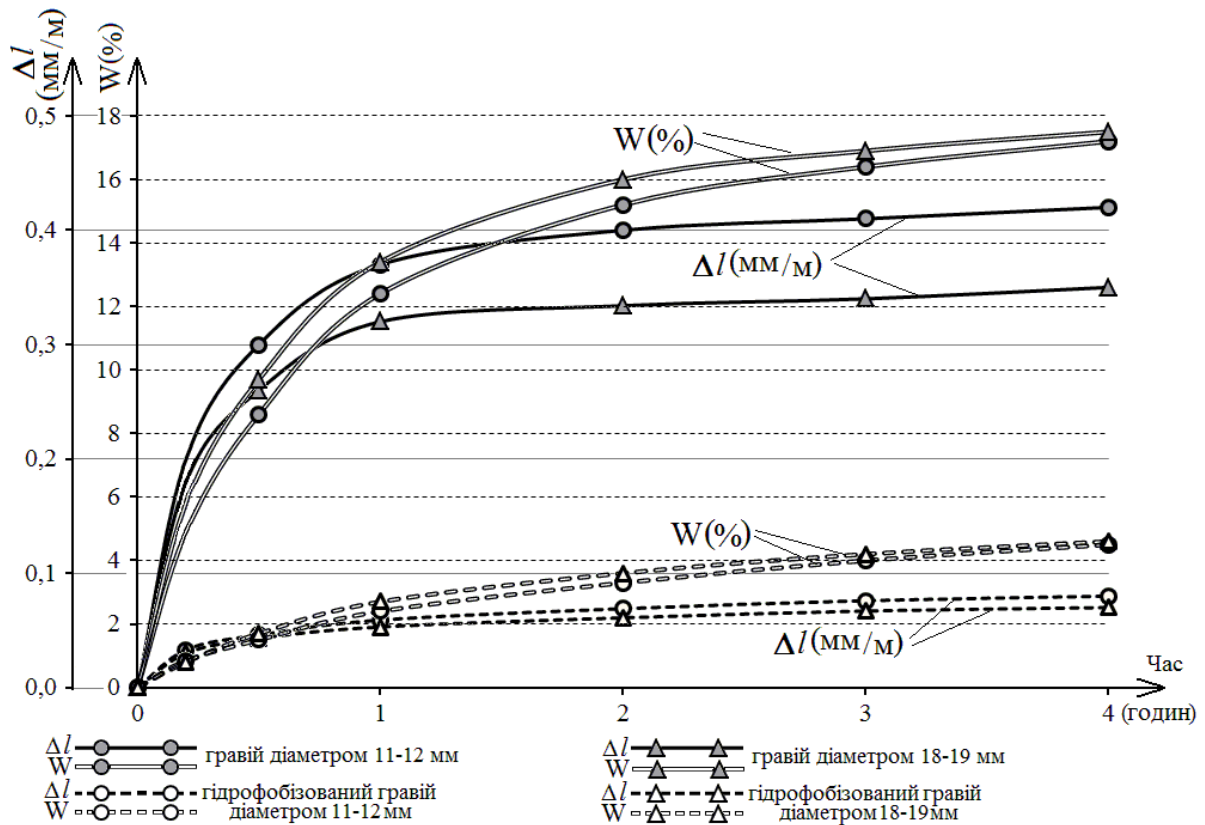


Рис.3.9. Набухання (Δl) і зміна вологості (W) керамзитового гравію за перші 4 години насичення водою

Для аналізу впливу вологості гравію на величину його деформацій набухання при зволоженні за даними описаного вище експерименту (4 години насичення гравію водою) була побудована діаграма, яка відображена на рис.3.10. З неї видно, що вологісні деформації керамзиту не є пропорційними його вологості на початковому етапі поглинання води пористим заповнювачем, який співпадає з періодом активного початого тужавіння бетону. Тобто завдяки збільшенню вологості керамзиту відбувається його набухання, але темп даного набухання у міру зростання вологості заповнювача знижується. Це можна пояснити напруженим станом зерен

штучного пористого заповнювача, а також загальним характером зміни об'єму капілярно-пористого матеріалу при зволоженні.

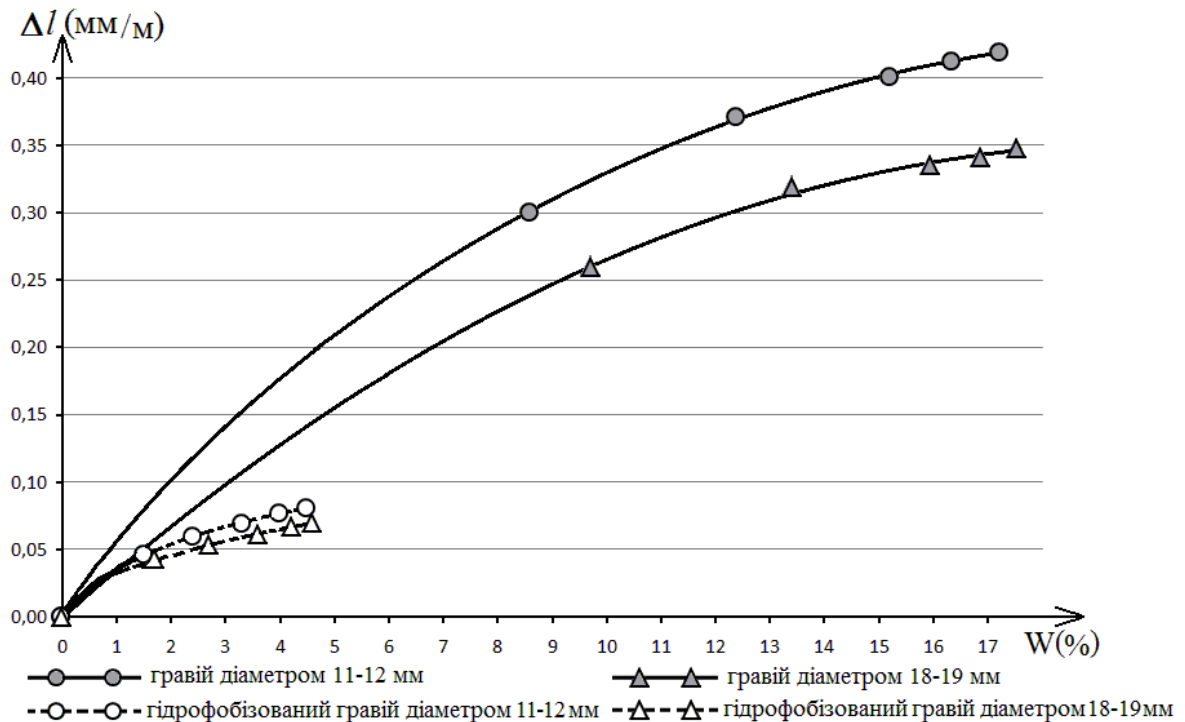


Рис.3.10. Вплив вологості керамзитового гравію на величину його деформацій набухання

Таким чином за рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію досягається суттєве зниження його вологісних деформацій, при цьому найбільший ефект проведеної обробки спостерігається у перші години контакту з водою, тобто на початковому етапі структуроутворення. Це, як показано вище, дозволяє покращити якість сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці, зокрема за рахунок зниження деформацій контактної зони.

Фактично під час структуроутворення бетону після укладання і ущільнення суміші проходять досить складні процеси масообміну між пористим заповнювачем і цементно-піщаною матрицею (розчинною частиною), які не обмежуються лише поглинанням води. При набуханні зерна заповнювача або при збільшенні його об'єму завдяки взаємодії з цементним тістом формування контактної зони відбувається в умовах зустрічного тиску продуктів гідратації цементу та поверхні заповнювача, при цьому вплив також

можуть оказувати продукти гідролізу заповнювача. Подібна ситуація є типовою для бетонів на активних заповнювачах, а також для керамзитобетону. При зменшенні об'єму заповнювача при твердінні бетону, наприклад його частковому розчиненні, формування контактної зони відбувається шляхом заповнення вільного простору на периферії зерна продуктами взаємодії заповнювача і цементу. Це типова ситуація для активних заповнювачів, що містять аморфний кварц, а також частково є справедливою для вапнякового заповнювача [30]. На думку І.А. Іванова і Л.П. Ортліхер, при зволоженні або насиченні водою затверділого бетону відбувається збільшення об'єму як пористого заповнювача, так і цементного каменю. В результаті виникає ситуація двостороннього обтиснення, що забезпечує підвищену ступінь зчеплення з цементним каменем і обтиснення самого пористого заповнювача [2,197,283].

Для оцінки об'ємних деформацій пористого заповнювача в цементно-піщаній матриці в процесі начального етапу структуроутворення був проведений наступний експеримент. Використовувалася експериментальна установка, яка була описана вище та на якій були проведені дослідження об'ємних змін керамзитового гравію при насиченні водою. Керамзитовий гравій поміщався в дану експериментальну установку пошарово разом з модельною сумішшю, яка імітувала цементно-піщаній розчин. При цьому забезпечувався безпосередній контакт сусідніх гранул між собою, що давало змогу вимірювати їх деформації без врахування деформацій розчину. Модельна суміш складалася з кварцового піску фракції 0,315-0,63 мм і молотого до питомої поверхні $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ піску у співвідношенні 2 до 1, а також води у кількості 50% від маси молотого піску. Тобто модельна суміш була подібна до цементно-піщаного розчину з $V/C=0,5$. Використання молотого піску замість цементу було обумовлено необхідністю абстрагуватися від процесів тужавіння в'язучого для максимально можливого відокремлення об'ємних деформацій пористого заповнювача. Фото експериментальних установок під час визначення об'ємних змін пористого заповнювача в модельній системі цементно-піщаного

розчину показано на рис.3.11. В даних дослідженнях використовувалися гранули керамзиту кулеподібної форми діаметром 11-12 мм і 18-19 мм, що як і в описаному вище експерименті було обумовлено розмірами колб в установках. Порівнювалися об'ємні зміни гідрофобізованого і необробленого гравію, що аналогічно процедурі описаних вище досліджень набухання і усадки керамзитового гравію при насиченні водою і висиханні.



Рис.3.11. Визначення об'ємних змін пористого заповнювача при набуханні та усадці в модельній системі цементно-піщаного розчину

Особливість даного експерименту полягає у взаємному масообміні між пористим гравієм і розчинною частиною. Завдяки відсутності у системі цементу вода не втрачалася на гідратацію, проте проходило її повільне випарювання з модельної системи цементно-піщаного розчину в процесі проведення досліджень. На рис.3.12 показаний графік усереднених результатів замірів об'ємних змін керамзитового гравію в даній модельній системі. Показання фіксувалися через 1 і 2 години після початку експерименту, далі кожні 2 години до 12 годин, потім кожні 4 години до 48 годин і далі через 72 і 96 годин (4 доби).

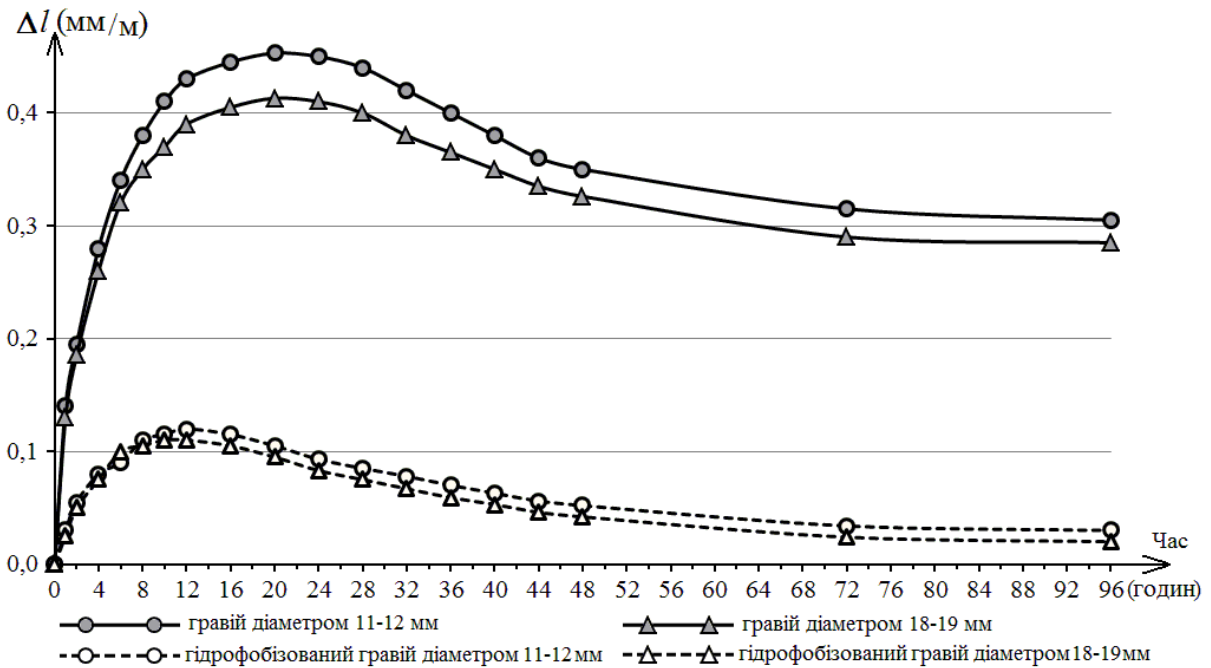


Рис.3.12. Об'ємні зміни керамзитового гравію в модельній системі цементно-піщаної розчину

Аналіз наведених на рис.3.12 графіків показує, що у цементно-піщаному розчині на початковому етапі структуроутворення легкого бетону відбувається набухання пористого гравію, яке досягає максимуму через приблизно 20 годин для необробленого керамзиту і 12 годин для гідрофобізованого (в умовах модельної системи). Це пов'язано з поглинанням вологи з цементно-піщаної розчину, яке з часом уповільнюється і при досягненні умовно «рівноважного» рівня зупиняється. Далі починається процес зворотної міграції вологи в розчин з заповнювача. В модельній системі цей процес пов'язаний з поступовим випаровуванням води, а в реальних умовах – з гідратацією і випаровуванням одночасно. Відповідно в бетонній суміші процес зворотної міграції вологи з заповнювача почнеться відчутно раніше. Дана зворотна міграція викликає поступову усадку керамзитового гравію. При цьому величина набухання пористого гравію як в перші години після контакту з цементно-піщаним розчином, так і надалі є дещо меншою, ніж величина набухання гравію в воді, що пов'язано з обмеженою кількістю вологи, яка може бути поглинена заповнювачем. Набухання гідрофобізованого гравію в розчині є в 4-5 разів нижчим, ніж набухання необробленого гравію. Відповідно усадка

гідрофобізованого гравію при втраті вологи в розчині також є меншою, ніж усадка необробленого гравію.

Таким чином, дослідження в модельній системі цементно-піщаного розчину, який імітував близькі до реальних умови обміну вологи в бетоні показав, що гідрофобна обробка пористого гравію дозволяє суттєво знизити його вологісні деформації в процесі структуроутворення легкого бетону. Це, як показано вище, сприяє покращенню сумісної роботи заповнювача з цементно-піщаною матрицею, що є одним з шляхів покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легких бетонів.

Для більшості конструкцій гідротехнічних споруд водонасичений стан є типовим. При цьому для тонкостінних конструкцій даних споруд, зокрема плавучих, застосовуються переважно заповнювачі розміром до 10 мм. Як показали описані вище дослідження, гранули меншого діаметру мають дещо більші відносні вологісні деформації в порівнянні з крупними гранулами. Крім того, зменшення об'єму пористого заповнювача в процесі твердіння бетону є відчутно меншим за його початкове набухання в суміші. Відповідно для підвищення довговічності і механічних властивостей бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд корисними є операції, спрямовані на обмежене уповільнення процесу обміну вологи заповнювача з матрицею, тобто гідрофобізація його поверхні, а також операції, спрямовані на краще заповнення контактної зони в'язучим, зокрема попередня обробка гравію цементною суспензією. Обидва дані методи сприяють покращенню сумісної роботи пористого заповнювача і цементно-піщаної матриці. Для забезпечення необхідної ефективності даних технологічних методів при вирішенні задачі підвищення довговічності бетону їх слід застосовувати в комплексі з рецептурними методами – використанням комплексних модифікаторів, наповнювачів, дисперсним армуванням тощо.

Висновки за 3-м розділом

1. Запропоновано новий метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі води-середовища або іншої агресивної рідини, збудовано експериментальну установку. Даний метод є менш трудомістким в порівнянні з методикою визначення корозійної стійкості згідно ОСТ 5.9266-76 та дозволяє більш об'єктивно відображати зміну властивостей матеріалу в умовах, що є близькими до реальних умов експлуатації значної частини тонкостінних конструкції гідротехнічних споруд.

2. Обґрунтовано, що підвищення довговічності та фізико-механічних характеристик легких бетонів досягається за рахунок створення структури зі зниженою капілярною пористістю цементно-піщаної матриці, зокрема в контактній зоні. Досягнути цього дозволяє використання модифікаторів та здійснення операцій, що мінімізують об'ємні вологісні деформації заповнювача, за рахунок чого покращується якість сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

3. Запропоновано використання двох технологічних методів обробки пористих заповнювачів, спрямованих на підвищення довговічності легких бетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд завдяки покращенню якості сумісної роботи заповнювача і матриці. Перший – обробка поверхні заповнювача цементної суспензією в початковій стадії перемішування суміші. Другий – гідрофобізація поверхні заповнювача емульсією кремнійорганічної рідини. Обидва запропонованих методи мають здійснюватися в комплексі з рецептурними рішеннями, спрямованими на підвищення довговічності – проектуванням раціональних складів бетонів, введенням модифікаторів: ефективних пластифікаторів, кольматуючих добавок і наповнювачів, дисперсним армуванням тощо.

4. Проаналізовано динаміку проникнення цементної суспензії у зерна керамзиту при обробці. Встановлено, що за рахунок застосування технологічного прийому обробки пористого заповнювача цементною

суспензією міцність легкого бетону зростає на 2-2,5 МПа в порівнянні з аналогічними за складом керамзитобетоном на основі насиченого водою гравію. Також за рахунок обробки заповнювача зменшується середній розмір пор керамзитобетону та підвищується показник однорідності пор за розмірами.

5. Показано, що зниження набухання і усадки заповнювача є важливим механізмом впливу на структуру композиту, спрямованим на підвищення його довговічності завдяки зниженню вологісних деформацій, що зменшує схильність до розкриття тріщин в контактній зоні та матриці. Проаналізовані набухання і усадка штучного пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умов твердіння легкобетонної суміші, зокрема у модельній системі цементно-піщаного розчину. Показано, що при висушуванні усадка попередньо насиченого водою керамзитового гравію є меншою за його первинне подовження при насиченні водою, що є наслідком накопичення залишкових деформацій та зниження попередньо напруженого стану у гранулах керамзиту, при цьому величина набухання керамзитового гравію нелінійно пов'язана з його вологістю. Встановлено, що об'ємні вологісні деформації гідрофобізованого керамзитового гравію у воді та у цементно-піщаному розчині є в 4..5 рази меншим за деформації необробленого гравію, що показує високу ефективність технологічного методу гідрофобізації поверхні гравію при вирішенні задачі покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легкого бетону.

6. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [284-294].

РОЗДІЛ 4

СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ МОДИФІКОВАНИХ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ ДЛЯ ТОНКОСТІННИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

4.1 Плани експериментальних досліджень модифікованих керамзитобетонів для тонкостінних споруд. Властивості легкобетонних сумішей

Як показано у перших трьох розділах роботи, підвищення довговічності легких бетонів на пористих заповнювачах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд досягається за рахунок отримання структури композиту, яка має забезпечувати покращення його водонепроникності, морозостійкості та корозійної стійкості. Методи, які спрямовані на такі зміни структури і властивостей бетону, мають знижувати капілярну пористість цементно-піщаної матриці, підвищувати однорідність пор за розмірами та забезпечувати необхідну замкнуту пористість, зокрема у заповнювачі. Досягнути цього, насамперед, дозволяє введення у склад суміші модифікаторів різної природи. При цьому, як показано в 3-му розділі, також корисними є технологічні операції, спрямовані на покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, насамперед на зменшення вологісних деформацій заповнювача і контактної зони, а також на підвищення міцності та однорідності пористого заповнювача.

Відповідно на третьому етапі роботи, як показано у п.2.1, досліджувалися властивості модифікованих керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. Дані дослідження були спрямовані на виявлення ефективності основних рецептурних методів підвищення довговічності легких конструкційних бетонів в поєднанні з запропонованим технологічним методом обробки поверхні заповнювача цементної суспензією в початковій стадії перемішування суміші. При проведенні досліджень виконувалися дві серії експериментів.

У першій серії за 15-ти точковим оптимальним планом [243,244,295] був проведений 3-х факторний експеримент, у якому варіювалися наступні фактори складу керамзитобетону:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м³;

X_2 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 50 кг/м³;

X_3 – кількість добавки С-3, від 0.5 до 1.0% від маси цементу.

Перемішування сумішей проводилося в примусовому змішувачі при наступній послідовності завантаження компонентів: вода з добавкою, цемент, керамзитовий гравій, пісок. Після завантаження води і цементу для отримання цементної суспензії на протязі приблизно однієї хвилини проходило перемішування даних компонентів. Далі завантажувалася керамзитовий гравій, після чого суміш перемішувалася на протязі ще приблизно однієї хвилини, що забезпечувало попередню обробку пористого гравію цементною суспензією у початковій стадії приготування суміші. Останнім у змішувач завантажувалася пісок. Загальний час перемішування суміші складав 5-5,5 хвилин. Така технологія приготування суміші була обрана з врахуванням отриманих результатів при вивченні впливу обробки пористого заповнювача на властивості легкого бетону (п.3.3). План першій серії експерименту і склади досліджених у неї бетонів наведені у таблиці 4.1.

У другій серії за 18-ти точковим D-оптимальним не симетричним планом був проведений 4-х факторний експеримент, у якому варіювалися такі фактори складу керамзитобетону:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу, від 500 до 600 кг/м³;

X_2 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 40 кг/м³;

X_3 – вміст керамзитового гравію, від 650 до 700 л/м³;

X_4 – кількість поліпропіленової фібри Ваусон, від 0 до 1,2 кг/м³.

План другої серії експерименту і склади досліджених в неї керамзитобетонів наведені у таблиці 4.2.

План першої серії експерименту і склади досліджених керамзитобетонів

| № точки | Рівні факторів | | | Склади керамзитобетонів | | | | | |
|---------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | X ₁ цемент | X ₂ мікрокремнезем | X ₃ добавка С-3 | Цемент (кг/м ³) | Гравій (л/м ³) | Пісок (кг/м ³) | Мікрокремнезем (кг/м ³) | С-3 (кг/м ³) | Вода (л/м ³) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 500 | 665 | 664 | 0 | 2,5 | 214 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | 500 | 665 | 695 | 0 | 5 | 169 |
| 3 | -1 | 0 | 0 | 500 | 660 | 658 | 25 | 3,75 | 183 |
| 4 | -1 | 1 | -1 | 500 | 655 | 637 | 50 | 2,5 | 219 |
| 5 | -1 | 1 | 1 | 500 | 655 | 638 | 50 | 5 | 188 |
| 6 | 0 | -1 | 0 | 550 | 660 | 642 | 0 | 4,13 | 175 |
| 7 | 0 | 0 | -1 | 550 | 655 | 630 | 25 | 2,75 | 197 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 550 | 655 | 631 | 25 | 4,13 | 178 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 550 | 655 | 632 | 25 | 5,5 | 161 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | 550 | 650 | 618 | 50 | 4,13 | 196 |
| 11 | 1 | -1 | -1 | 600 | 655 | 619 | 0 | 3 | 209 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 600 | 655 | 620 | 0 | 6 | 194 |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 600 | 650 | 608 | 25 | 4,5 | 188 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 600 | 645 | 577 | 50 | 3 | 235 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 600 | 645 | 596 | 50 | 6 | 191 |

Вибір саме таких факторів складу в якості варійованих при дослідженнях структури і властивостей модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів в обох серіях експериментів було обумовлено наступними обставинами.

План другої серії експерименту і склади досліджених керамзитобетонів

| № | Рівні факторів | | | | Склади керамзитобетонів | | | | | | |
|----|----------------|------------|----------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | x_1 (цемент) | x_2 (МК) | x_3 (Гравій) | x_4 (фібра) | Цемент (кг/м ³) | Гравій (л/м ³) | Пісок (кг/м ³) | МК (кг/м ³) | Фібра (кг/м ³) | С-3 (кг/м ³) | Вода (л/м ³) |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 550 | 675 | 638 | 20 | 0,6 | 4,4 | 186 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | -1 | 500 | 700 | 680 | 0 | 0 | 4 | 176 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 1 | 500 | 650 | 697 | 40 | 1,2 | 4 | 186 |
| 4 | 1 | -1 | -1 | 1 | 600 | 650 | 650 | 0 | 1,2 | 4,8 | 205 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 600 | 700 | 538 | 40 | 1,2 | 4,8 | 211 |
| 6 | 1 | 1 | -1 | -1 | 600 | 650 | 609 | 40 | 0 | 4,8 | 206 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | -1 | 550 | 700 | 597 | 40 | 0 | 4,4 | 196 |
| 8 | 0 | -1 | -1 | -1 | 550 | 650 | 689 | 0 | 0 | 4,4 | 188 |
| 9 | 0 | -1 | 1 | 1 | 550 | 700 | 646 | 0 | 1,2 | 4,4 | 191 |
| 10 | 1 | 0 | 1 | -1 | 600 | 700 | 561 | 20 | 0 | 4,8 | 204 |
| 11 | -1 | 0 | -1 | -1 | 500 | 650 | 723 | 20 | 0 | 4 | 186 |
| 12 | -1 | 0 | 1 | 1 | 500 | 700 | 653 | 20 | 1,2 | 4 | 189 |
| 13 | 1 | -1 | 0 | -1 | 600 | 675 | 605 | 0 | 0 | 4,8 | 204 |
| 14 | -1 | 1 | 0 | -1 | 500 | 675 | 666 | 40 | 0 | 4 | 180 |
| 15 | -1 | -1 | 0 | 1 | 500 | 675 | 717 | 0 | 1,2 | 4 | 180 |
| 16 | 1 | -1 | 1 | 0 | 600 | 700 | 583 | 0 | 0,6 | 4,8 | 205 |
| 17 | -1 | 1 | 1 | 0 | 500 | 700 | 631 | 40 | 0,6 | 4 | 187 |
| 18 | -1 | -1 | -1 | 0 | 500 | 650 | 745 | 0 | 0,6 | 4 | 182 |

Кількість в'язучого в бетоні істотно впливає на його структуру і відповідно на всі фізико-механічні властивості. Ефективність дії модифікаторів

також може змінюватися в залежності від кількості цементу в композиті. Крім того, для різних тонкостінних конструкцій висуваються різні вимоги щодо класу бетону за міцністю, а основним фактором впливу на міцність легкого бетону є саме кількість в'язучого. Відповідно в якості першого фактору, який варіювався в експериментальних дослідженнях, обрана кількість сульфатостійкого портландцементу. Вибір діапазону варіювання кількості портландцементу від 500 до 600 кг/м³ обумовлено насамперед можливістю застосування досліджених керамзитобетонів в якості суднобудівних матеріалів. Для суднобудівних бетонів згідно діючим галузевим стандартам мінімальна витрата портландцементу дорівнює 500 кг/м³. Крім того, через жорсткі умови експлуатації тонкостінних гідротехнічних споруд, а також через необхідність використання заповнювача з обмеженою крупністю по причині високого ступеня армування даних конструкцій, кількість в'язучого в бетоні для забезпечення його довговічності має бути досить високою.

Мікрокремнезем вводився в склад бетону як модифікатор, який за даними літературного аналізу і попередніх досліджень сприяє організації структури цементного композиту, що забезпечує покращення механічних характеристик і довговічності бетону (п.1.3). У другій серії експериментів діапазон варіювання даного фактору був дещо вузким, ніж у першій, що було прийнято з врахування результатів, отриманих у першій серії експериментів. Проте кількість мікрокремнезему у другій серії не була зафіксована а також була фактором варіювання через необхідність уточнити вплив цього модифікатору з врахуванням зміни сульфатостійкого цементу, яка була проведена по причині вимушеної зміни виробника в'язучого.

Кількість кварцового піску в суміші в обох серіях корегувалася в залежності від кількості інших компонентів (цементу, гравію, мікрокремнезему, води, фібри, добавки) відповідно до відомих методів підбору складу бетонів для забезпечення розрахункового об'єму досліджених сумішей (витрати компонентів на 1 м³). Тобто у другій серії експериментів фактор X_3 фактично показував розсунення гранул крупного заповнювача.

У першій серії експериментів третім варійованим фактором була кількість добавки суперпластифікатору С-3. Дана добавка широко використовувалася у складі важких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд і забезпечувала покращення механічних властивостей і довговічності матеріалу [150,296,297]. Але існувала необхідність уточнення впливу даного модифікатору при використанні в легких бетонах, зокрема виявлення його раціонального дозування. У другій серії експериментів з врахуванням результатів першої серії та після попередніх експериментів на бетонах на основі сульфатостійкого портландцементу виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент» кількість суперпластифікатору С-3 була зафіксована на рівні 0,8% від маси цементу.

У другій серії експериментів одним з варійованих факторів був вміст керамзитового гравію. Цей фактор був включеним в дослідження для вивчення впливу розсунення гранул крупного заповнювача, що описано вище, та з врахуванням того, що більшість відомих методів розрахунку складу легкого бетону дозволяють лише приблизно розрахувати або навіть прийняти кількість гравію у рекомендованому діапазоні з подальшим розрахунком витрат інших компонентів. Також у другій серії експериментів варіювалася кількість поліпропіленової фібри Ваусон. Ця дисперсна арматура ефективно використовувалася у складі важких бетонів для тонкостінних конструкцій, які експлуатуються в жорстких умовах [150,207,292]. Відповідно науковий інтерес представляє дослідження впливу дисперсного армування стійкою до корозії фіброю на властивості легкого бетону для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих.

В якості крупного пористого заповнювача в обох серіях використовувався керамзитовий гравій виробництва Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм марки П150 та з насипною густиною 600 кг/м^3 . В якості дрібного заповнювача використовувався митий кварцовий пісок з $M_{кр}=2,7$. В якості в'язучого в першій серії використовувався сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0 виробництва Новоамвросіївського цементного заводу, в другій серії – аналогічний сульфатостійкий цемент виробництва ПАТ «Івано-

Франківськцемент». Зміна виробника цементу в дослідженні, як зазначалося у п.2.3, була пов'язана з припиненням роботи Новоамвросіївського заводу.

Також з метою аналізу ефективності застосованого технологічного прийому обробки керамзиту цементною суспензією в початковій стадії перемішування суміші на даному етапі досліджень були виготовлені два «контрольних» склади бетону, які були ідентичними до складів в точках №2 і №12 другої серії експериментів. Умовна назва складів №2а і №12а. Відповідно:

- склад №2а: цемент 500 кг/м^3 , керамзит 700 л/м^3 , пісок 675 кг/м^3 , С-3 4 кг/м^3 , вода 176 л/м^3 ;

- склад №12а: цемент 500 кг/м^3 , керамзит 700 л/м^3 , пісок 653 кг/м^3 , С-3 4 кг/м^3 , мікрокремнезем 20 кг/м^3 , фібра $1,2 \text{ кг/м}^3$, вода 189 л/м^3 .

Ці бетони готувалися без попередньої обробки керамзиту цементною суспензією, тобто при перемішуванні суміші в змішувач подавалася вода, потім гравій, а потім цемент і пісок. Вибір саме цих двох складів був обумовлений можливістю порівняння властивостей легких бетонів на обробленому і необробленому гравії як при введенні мікрокремнезему і фібри, так без даних модифікаторів.

Всі легкобетонні суміші в обох серіях експериментів, а також «контрольні», мали рівну рухомість П2 (ОК від 6 до 8 см), що досягалося підбором кількості води. Така рухомість була обрана з врахуванням найбільш розповсюджених вимог до сумішей у технології виготовлення тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. Рівні В/Ц і показники фізико-механічних властивостей досліджених керамзитобетонів у експериментальних точках першої серії наведено у таблиці 4.3, у експериментальних точках другої серії наведено у таблиці 4.4.

Через те, що всі суміші мали рівну рухомість П2, їхня водопотреба і, відповідно, В/Ц відношення залежали від складу керамзитобетону. За даними, які були отримані в 15-ти експериментальних точках першої серії, була побудована експериментально-статистична (ЕС) модель [243,244] впливу факторів складу на В/Ц суміші рівної рухомості:

В/Ц і фізико-механічні властивості досліджених
у першій серії експериментів керамзитобетонів

| № | В/Ц | Міцність при стиску $f_{ck.cube}$ (МПа) | Міцність на розтяг при згині f_{ctk} (МПа) | Водонепро- никність W (атм) | Морозо- стійкість F (цикли) |
|----|-------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,428 | 31,3 | 5,70 | 4 | 350 |
| 2 | 0,338 | 33,2 | 5,99 | 6 | 400 |
| 3 | 0,365 | 34,9 | 5,85 | 10 | 450 |
| 4 | 0,438 | 32,7 | 6,12 | 6 | 400 |
| 5 | 0,375 | 34,8 | 6,32 | 12 | 400 |
| 6 | 0,318 | 37,9 | 6,60 | 8 | 500 |
| 7 | 0,358 | 37,9 | 6,50 | 10 | 500 |
| 8 | 0,324 | 40,1 | 6,67 | 10 | 550 |
| 9 | 0,293 | 40,8 | 7,15 | 10 | 500 |
| 10 | 0,357 | 40,3 | 6,83 | 10 | 500 |
| 11 | 0,349 | 39,5 | 6,92 | 10 | 450 |
| 12 | 0,323 | 41,3 | 6,88 | 10 | 500 |
| 13 | 0,313 | 41,1 | 7,46 | 14 | 600 |
| 14 | 0,391 | 40,4 | 6,83 | 12 | 500 |
| 15 | 0,318 | 42,6 | 7,08 | 12 | 550 |

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,318 - 0,025x_1 + 0,022x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,007x_1x_3 \\
 & + 0,012x_2 + 0,021x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\
 & - 0,032x_3 + 0,009x_3^2
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

За даної ЕС-моделлю була побудована діаграма у вигляді кубу, яка відображена на рис.4.1. Її аналіз показує, що збільшення кількості портландцементу і добавки С-3 очікувано знижує В/Ц сумішею рівної рухомості. Характер цього впливу є нелінійним, відповідно зміна кількості в'язучого від 500 до 550 кг/м³ відчутно знижує В/Ц, а підвищення його

дозування від 550 до 600 кг/м³ вже несуттєво впливає на В/Ц. Аналогічно, у міру зростання кількості суперпластифікатору з 0,5 до 0,8% вплив добавки на В/Ц є віщим, ніж при підвищенні дозування С-3 з 0,8 до 1%. При введенні в керамзитобетонну суміш мікрокремнезему в кількості до 30 кг/м³ її В/Ц змінюється несуттєво. Збільшення кількості мікрокремнезему до 50 кг/м³ викликає необхідність підвищення В/Ц або кількості добавки С-3 для збереження рухомості суміші.

Таблиця 4.4

В/Ц і фізико-механічні властивості досліджених
у другій серії експериментів керамзитобетонів

| № | В/Ц | Міцність при стиску $f_{ck.cube}$ (МПа) | Міцність на розтяг при згині f_{ctk} (МПа) | Водонепро- никність W (атм) | Морозо- стійкість F (цикли) |
|----|-------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,339 | 41,4 | 6,76 | 12 | 550 |
| 2 | 0,352 | 34,6 | 5,87 | 8 | 450 |
| 3 | 0,371 | 37,1 | 6,35 | 8 | 500 |
| 4 | 0,341 | 41,5 | 6,94 | 10 | 600 |
| 5 | 0,351 | 41,9 | 7,10 | 12 | 600 |
| 6 | 0,343 | 43,1 | 6,83 | 14 | 450 |
| 7 | 0,356 | 38,6 | 6,57 | 12 | 500 |
| 8 | 0,342 | 38,4 | 6,49 | 12 | 550 |
| 9 | 0,347 | 38,3 | 6,64 | 10 | 550 |
| 10 | 0,340 | 41,7 | 7,01 | 14 | 500 |
| 11 | 0,372 | 35,8 | 5,93 | 10 | 500 |
| 12 | 0,378 | 36,4 | 6,14 | 8 | 500 |
| 13 | 0,340 | 41,7 | 6,89 | 12 | 550 |
| 14 | 0,359 | 37,2 | 5,97 | 10 | 450 |
| 15 | 0,359 | 35,5 | 6,01 | 8 | 500 |
| 16 | 0,342 | 40,9 | 6,98 | 10 | 500 |
| 17 | 0,373 | 35,6 | 6,04 | 8 | 500 |
| 18 | 0,364 | 35,1 | 5,97 | 8 | 450 |

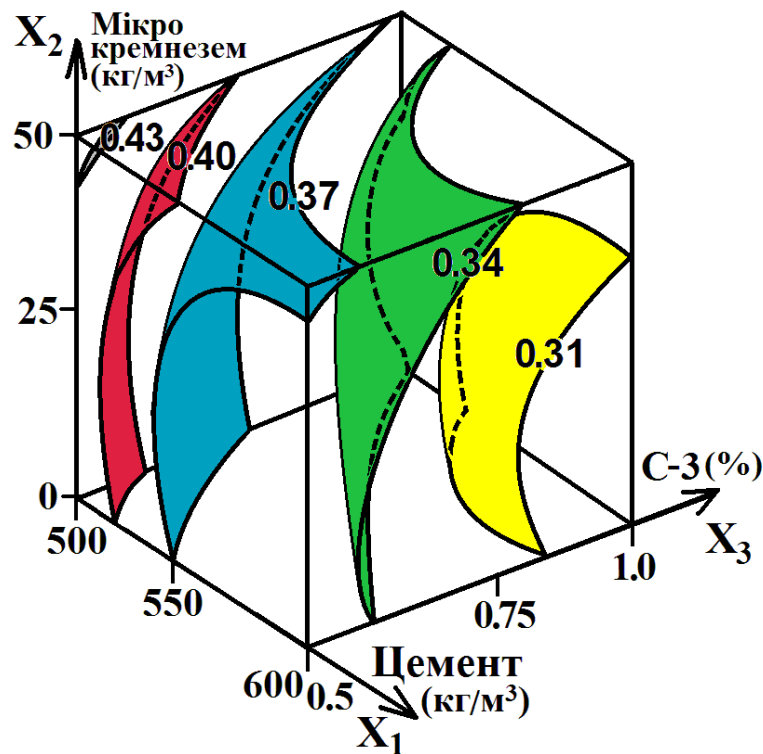


Рис.4.1. Вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу на В/Ц сумішей рівної рухомості

За даними, отриманими у 18-ти точках другої серії експерименту, була побудована показана нижче ЕС-модель впливу 4-х факторів складу на В/Ц легкобетонної суміші рівної рухомості:

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,340 - 0,012x_1 + 0,008x_1^2 - 0,002x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,002x_1x_4 \\
 & + 0,003x_2 \pm 0x_2^2 & & + 0,003x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \\
 & \pm 0x_3 & + 0,008x_3^2 & & + 0,003x_3x_4 \\
 & + 0,002x_4 \pm 0x_4^2 & & &
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

За даною ЕС-моделлю були побудовані однофакторні залежності, що відображають вплив 4-х варійованих факторів складу в зонах екстремумів (найбільших і найменших значень показника) на В/Ц та які показані на рис.4.2. При побудові даних графіків рівні трьох не відображених на кожному з них факторів фіксувалися на значеннях, які забезпечують відповідно максимальне і мінімальне значення В/Ц суміші, тобто проходження через зони екстремумів показника [241].

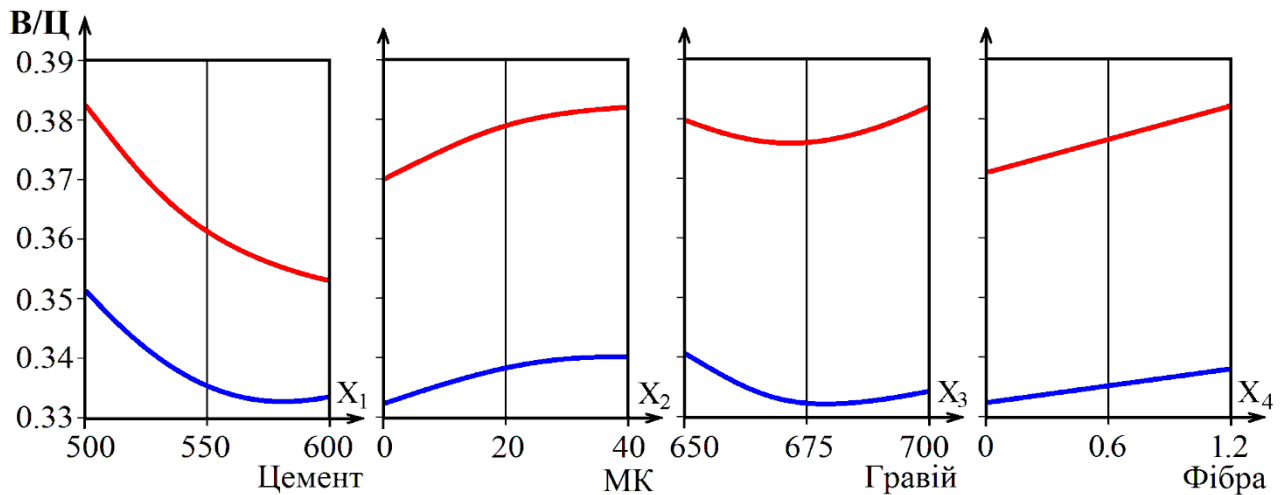


Рис.4.2. Вплив варійованих у другій серії експериментів факторів складу на В/Ц легкобетонних сумішей рівної рухомості в зонах мінімуму і максимуму

Як можна побачити з діаграм, в межах факторного простору даної серії експериментів найбільший вплив на рівень В/Ц сумішей рівної рухомості оказує кількість портландцементу. Вміст гравію і кількість поліпропіленової фібри має обмежений вплив на В/Ц. У міру зростання кількості волокон дисперсної арматури В/Ц суміші зростає фактично лінійно, але це зростання навіть при використанні максимальної кількості фібри ($1,2 \text{ кг/м}^3$) не перевищує величини у 4%. При середньому вмісті гравію ($660\text{-}680 \text{ л/м}^3$) водопотреба і відповідно В/Ц досліджених сумішей були найменшими. Цей ефект пояснюється тим, що виходячи з умов експерименту та правил підбору складу бетону при зміні вмісту керамзитового гравію пропорційно змінювалась кількість кварцового піску для забезпечення розрахункового об'єму матеріалу. Тобто при збільшенні вмісту керамзиту розсунення гравію у суміші зменшувалося завдяки зниженню кількості піску та відповідно розчинної складової. На В/Ц суміші рівної рухомості природно впливає як кількість пористого гравію та піску в даній суміші, так і здатність її компонентів переміщуватися при укладанні. Відповідно для досліджених сумішей найкраща здатність до переміщення компонентів спостерігалася при середньому вмісті гравію, що у свою чергу дозволяє розраховувати на більш «злиту» структуру подібних композитів та їх кращі фізико-механічні показники. При збільшенні кількості портландцементу В/Ц легкобетонної суміші очікувано знижується. При цьому аналогічно першій серії

експериментів характер цього впливу є нелінійним і В/Ц більш відчутно знижується при зміні кількості в'язучого від 500 до 550 кг/м³. Також аналогічно першій серії експериментів при введенні мікрокремнезему водопотреба суміші несуттєво зростає. Але ступень впливу даного фактору на В/Ц є дещо нижчим ніж в першій серії експериментів через менший діапазон варіювання фактору – дозування мікрокремнезему в другій серії експериментів обмежувалося 40 кг/м³ проти 50 кг/м³ в першій серії.

Важливо, що всі досліджені у другій серії експериментів суміші мали достатньо низький рівень В/Ц (0,38 і нижче) завдяки використанню раціональної кількості суперпластифікатору С-3 – 0.8% від маси в'язучого. Така кількість модифікатору була визначена як раціональна за результатами експериментів, проведених у першій серії та у попередніх дослідженнях модифікованих бетонів, зокрема суднобудівних [150,296-298]. При цьому підвищення водопотреби сумішей при введенні до їх складу мікрокремнезему практично повністю компенсувалося за рахунок застосування суперпластифікатору.

В цілому проведення двох описаних в даному параграфі серій експериментів дозволяє дослідити ефективності запропонованих рецептурних методів підвищення довговічності легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд в поєднанні з запропонованим технологічним методом обробки поверхні заповнювача цементної суспензією. При цьому фіксування рухомості суміші на одному рівні дозволяє оцінити дані методи з рахуванням їх впливу на водопотребу, що співпадає з реальними умовами виробництва бетонів.

4.2 Міцність модифікованих керамзитобетонів

Міцність завжди є однією з основних характеристик, що регламентуються для будь якого конструкційного матеріалу, зокрема для бетону тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. Вирішення задачі підвищення довговічності бетону в значній мірі є вирішенням задачі збереження його міцності та інших

фізико-механічних характеристик в часі. Відповідно для всіх досліджених в обох серіях експериментів модифікованих керамзитобетонів визначалася міцність при стиску і на розтяг при згині. Випробування проводилися у 28-ми денному («марочному») віці при рівноважній вологості. Для першої серії ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на величину міцності керамзитобетону при стиску, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ck.cube}} \text{ (МПа)} = & 39,8 + 3,8x_1 - 1,8x_1^2 \quad \pm 0 x_1x_2 \quad \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,8x_2 - 0,7x_2^2 \quad \quad \quad \pm 0x_2x_3 \\
 & + 1,1x_3 - 0,5x_3^2 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

На рис.4.3 показана діаграма у вигляді куба, яка побудована за даною ЕС-моделлю та яка відображає вплив факторів складу модифікованого керамзитобетону на його міцність при стиску. Аналіз діаграми та даних таблиці 4.3 показує, що міцність досліджених бетонів знаходилася у діапазоні від 31 до 43 МПа. Цей рівень міцності при стиску задовольняє вимогам, які висуваються для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих. Як зазначалося, одним з технологічних прийомів, що дозволив досягнути підвищення міцність легких бетонів, була попередня обробка пористого гравію цементною суспензією, що використовувалася при приготуванні суміші. Проте задача підвищення міцності матеріалу залишається актуальною, тому що її вирішення дозволяє знизити товщину конструкцій, за рахунок чого зменшити їх вагу і потенційно розширити сферу їхнього застосування. У міру збільшення кількості портландцементу міцність керамзитобетону зростає, при цьому цей ефект є більш відчутним при підвищенні кількості в'язучого з 500 до 550 кг/м³. Також можна відмітити, що при підвищенні кількості добавки С-3 до 0,8-1% за рахунок зниження В/Ц суміші міцність при стиску досліджених легких бетонів підвищується на 2-2,5 МПа. Введення мікрокремнезему в кількості 30-35 кг/м³ підвищує міцність при стиску керамзитобетонів в середньому на 2 МПа, що складає 6-8%. Тобто ефект підвищення міцності бетону при застосуванні даного модифікатора є

позитивним, проте доволі обмеженим. Специфіку саме такого впливу мікрокремнезему на міцність при стиску керамзитобетону можна пояснити, по-перше, його впливом на В/Ц суміші, а по-друге тим, що ця активна мінеральна добавка, як відомо, має пуцоланові властивості [8,112]. Пуцолани мають дещо більшу ефективність для матеріалів на основі шлакових в'язучих, а в даних дослідженнях використовувався сульфатостійкий портландцемент ССПЦ400-Д0, тобто без добавки шлаку. Проте основною метою використання мікрокремнезему в легких бетонах було підвищення їхньої довговічності завдяки спрямованим змінам в структурі, тобто досягнення покращення комплексу показників якості композиту.

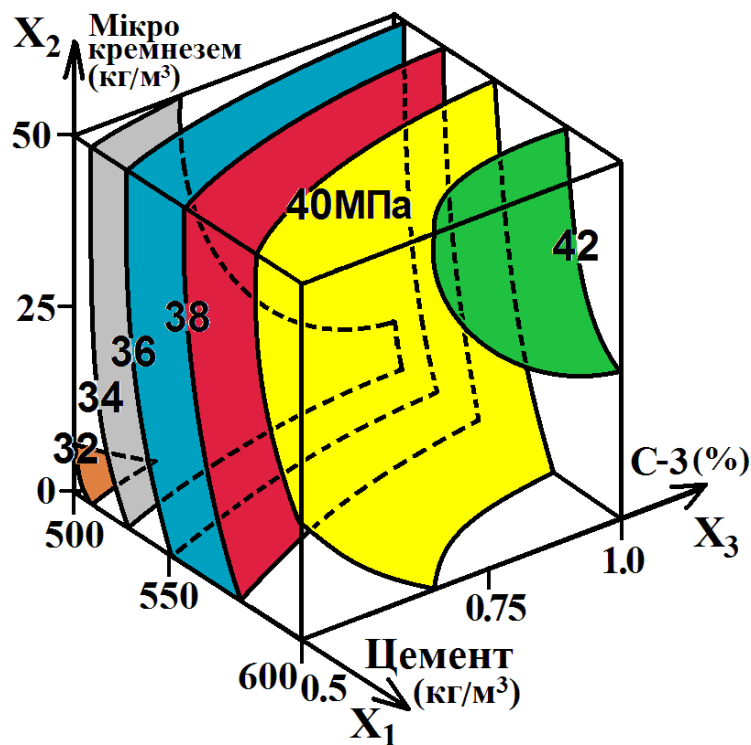


Рис.4.3. Вплив складу керамзитобетону на його міцність при стиску (перша серія експериментів)

Аналіз міцність при стиску досліджених у другій серії експериментів модифікованих керамзитобетонів показав, що рівень даного показника якості матеріалів знаходилася у діапазоні від 34 до 45 МПа, що дещо вище ніж діапазон міцності досліджених у першій серії легких бетонів (31..43 МПа). Це можна пояснити застосуванням оптимальної кількості добавки С-3, більш

раціональним діапазоном варіювання кількості мікрокремнезему та варіюванням розсуненням заповнювача, що дозволяє додатково управляти структурою і відповідно міцністю композиту. Кількість поліпропіленової фібри практично не впливає на міцність при стиску досліджених модифікованих керамзитобетонів. При варіюванні фактору x_4 в межах факторного простору експерименту величина $f_{ck.cube}$ змінюється не більше, ніж на 1 МПа. Ефект низького впливу дисперсного армування саме на міцність при стиску бетону є доволі відомим у будівельному матеріалознавстві [299-303]. Проте основна мета застосування фібри в даному дослідженні полягає в покращенні інших показників якості композиту, що обумовлюють довговічність в складних умовах експлуатації.

Для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію в легкому бетоні на його міцність при стиску за відповідною ЕС-моделлю була побудована показана на рис.4.4 діаграма у формі куба. При її побудові кількість поліпропіленової фібри фіксувалася на середньому рівні $0,6 \text{ кг/м}^3$ ($x_4=0$). Аналіз даної діаграми показує, що у міру збільшення кількості портландцементу міцність керамзитобетону природно зростає. Введення мікрокремнезему в кількості $35-38 \text{ кг/м}^3$ підвищує міцність легкого бетону на $2-2,5 \text{ МПа}$, що фактично аналогічно результатам першої серії експериментів. За рахунок варіювання вмісту гравію в складі досліджених бетонів їхня міцність змінюється на величину до $1,5 \text{ МПа}$. Найбільшу міцність мають склади з вмістом гравію $660-670 \text{ кг/м}^3$, що відповідає меншій В/Ц суміші.

Також важливо зазначити, що міцність при стиску контрольних складів керамзитобетонів №2а і №12а, приготованих без обробки пористого гравію цементною суспензією, складала відповідно $32,5 \text{ МПа}$ і $34,2 \text{ МПа}$, що на $2,1-2,2 \text{ МПа}$ менше значень міцності при стиску аналогічних складів другої серії експериментів. Тобто технологічний прийом обробки гравію цементною суспензією підтвердив свою ефективність.

Контроль міцності при стиску окремих зразків досліджених керамзитобетонів обох серій експерименту в водонасиченому стані показав, що

коефіцієнт розм'якшення даних легких бетонів знаходився в межах 0,85-0,89, що дозволяє казати о задовільній водостійкості матеріалів. Тобто діапазон міцності досліджених у першій серії легких бетонів в вологих умовах експлуатації складає від 26 до 38 МПа, у другий – від 29 до 40 МПа. Це є важливим саме для матеріалів конструкцій гідротехнічних споруд, які експлуатуються в контактi з водою.

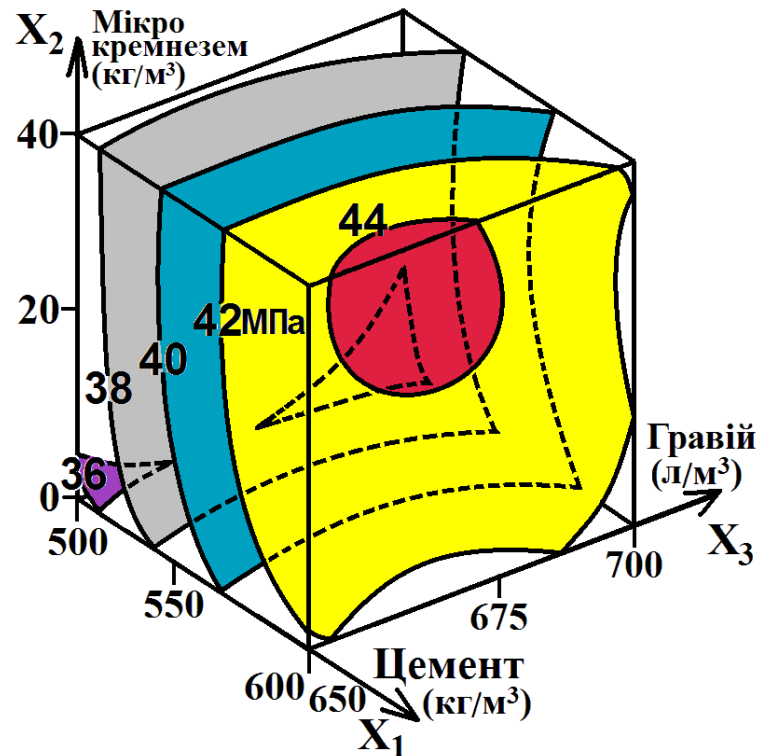


Рис.4.4. Вплив кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на міцність керамзитобетонів при стиску (друга серія експериментів, $x_4=0$)

Таким чином в цілому рівень міцності при стиску досліджених легких бетонів дозволяє використовувати подібні матеріали в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд. Проте як показано вище (п.2.3), тонкостінні конструкції даних споруд піддаються досить складним навантаженням під час експлуатації, відповідно для подібних конструкцій важливим показником якості є міцність бетону на розтяг при згині.

Вплив варійованих у першій серії експериментів даного етапу досліджень факторів складу керамзитобетону на його міцність на розтяг при згині описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{ctk} \text{ (МПа)} = & 6,80 + 0,52x_1 - 0,19x_1^2 - 0,08 x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,11x_2 - 0,13x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\
 & + 0,14x_3 \pm 0x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

За ЕС-моделлю (4.4) була побудована діаграма у вигляді кубу, яка відображена на рис.4.5.

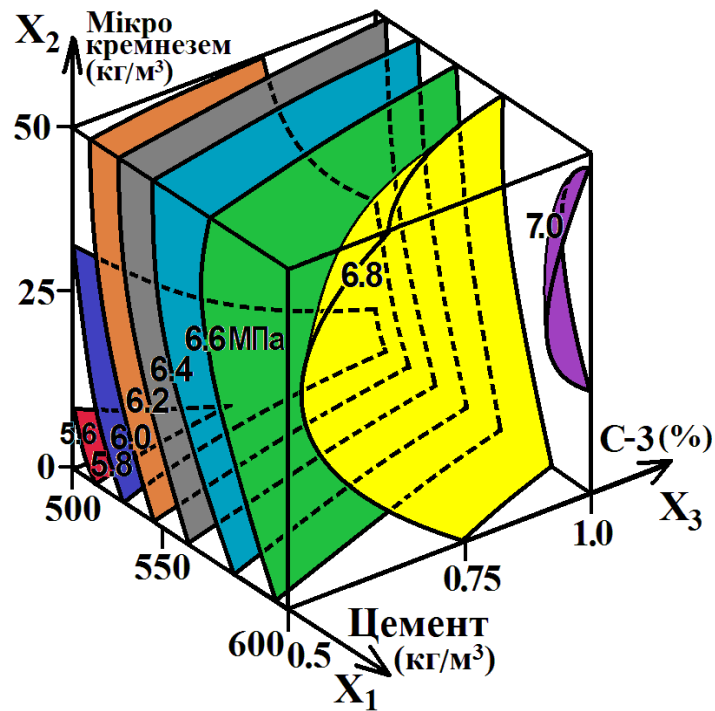


Рис.4.5. Вплив складу керамзитобетону на його міцність на розтяг при згині (перша серія експериментів)

Аналіз даної діаграм дозволяє відмітити, що загальний характер впливу варійованих у першій серії експериментів факторів на міцність на розтяг при згині досліджених керамзитобетонів є аналогічним з їх впливом на значення міцності при стиску. Міцність на розтяг при згині природно залежить від кількості портландцементу. Але вплив фактору x_1 є нелінійним і у міру зростання кількості в'язучого даний вплив поступово знижується. Введення мікрокремнезему в кількості 25-35 кг/м³ підвищує міцність на розтяг при згині керамзитобетонів приблизно на 0,3 МПа, тобто на 7..9%. Аналогічний за масштабом вплив на величину f_{ctk} за рахунок зниження В/Ц оказує підвищення кількості суперпластифікатору з 0,5 до 1%.

Вплив варійованих у другій серії експериментів 4-х факторів складу модифікованого керамзитобетону на його міцність на розтяг при згині описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{ctk} \text{ (МПа)} = & 6,76 + 0,47x_1 - 0,17x_1^2 - 0,03x_1x_2 + 0,03x_1x_3 - 0,02x_1x_4 \\
 & + 0,06x_2 - 0,07x_2^2 - 0,02x_2x_3 + 0,04x_2x_4 \\
 & \pm x_3 - 0,02x_3^2 - 0,04x_3x_4 \\
 & + 0,10x_4 - 0,02x_4^2
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Аналіз ЕС-моделі (4.5) показує, що в межах факторного простору даного етапу експерименту розсунення зерен пористого заповнювача, тобто фактор x_3 , практично не впливає на величину міцності на розтяг при згині керамзитобетонів. Це можна пояснити відносно близькою здатністю розчинної частини бетону і пористого гравію протистояти навантаженням розтягування. Відповідно далі для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, мікрокремнезему та поліпропіленової фібри на розтяг при згині досліджених керамзитобетонів за (4.5) була побудована показана на рис.4.6 діаграма у формі кубу. При її побудові вміст гравію у бетоні фіксувався на середньому рівні ($x_3=0$). Аналіз діаграми показує, що у міру збільшення кількості портландцементу міцність на розтяг при згині керамзитобетону природно, але нелінійно, зростає. Введення мікрокремнезему в кількості 30-35 кг/м³ несуттєво, на 0,2-0,3 МПа, підвищує міцність легкого бетону на розтяг, що аналогічно результатам, отриманим у першій серії експериментів. За рахунок застосування дисперсної арматури величина f_{ctk} досліджених бетонів зростає на 0,4-0,5 МПа, що можна вважати позитивним, проте досить обмеженим результатом. Порівняно низький ефект у підвищенні стійкості до навантажень розтягування керамзитобетонів при застосуванні фібри можна пояснити досить гарною роботою легких бетонів саме при розтягуванні. Це обумовлено, по-перше, гарною адгезією цементно-піщаної матриці до пористого заповнювача, а по-друге, пружними властивостями самого заповнювача. Відповідно такий рецептурний прийом, як дисперсне армування,

має порівняно з важкими бетонами дещо нижчий ефект при вирішенні завдання підвищення міцності на розтяг легкого бетону.

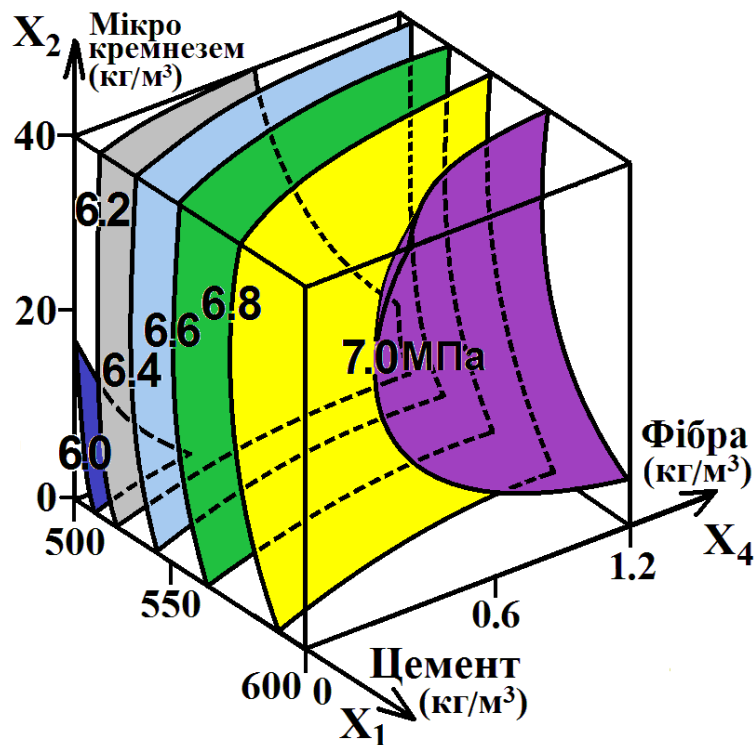


Рис.4.6. Вплив кількості портландцементу, мікрокремнезему і поліпропіленової фібри на міцність на розтяг при згині досліджених керамзитобетонів (друга серія експериментів, $x_3=0$)

Справедливо буде відмітити, що бетони на пористих заповнювачах відрізняються від важких бетонів набагато більшою міцністю на розтяг при згині за умови відносно близьких до важких бетонів величин міцності при стиску [197,261,270]. Зокрема завдяки цьому керамзитобетони є дуже ефективними матеріалами для тонкостінних конструкцій, які експлуатуються в умовах різноспрямованих навантажень. Зазначено вище пояснює той факт, що міцність на розтяг при згині контрольних складів керамзитобетонів, приготованих без обробки гравію цементною суспензією, була нижче значень міцності аналогічних складів другої серії експериментів на 0,1-0,2 МПа, що знаходиться в межах точності визначення даного показника якості. Тобто технологічний прийом обробки штучного пористого заповнювача цементною суспензією, який сприяє підвищенню його міцності та однорідності, несуттєво впливає на величину міцності на розтяг при згині легкого бетону.

Таким чином, за рахунок використання раціональних модифікаторів і дисперсного армування як рецептурних прийомів управління структурою легкого бетону, а також застосування технологічного прийому попередньої обробки гравію цементною суспензією як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, досліджені керамзитобетони мають міцність при стиску до 42..44 МПа при міцності на розтяг при згині до 7 МПа. Міцність даних модифікованих керамзитобетонів задовольняє вимогам до матеріалів для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. Зокрема, досягнутий рівень міцності відповідає вимогам Морського реєстру до суднобудівних керамзитобетонів, які використовуються при будівництві плавучих залізобетонних доків, причалів, будинків, готелів і інших споруд.

4.3 Водонепроникність і морозостійкість керамзитобетонів

Як зазначалося вище, водонепроникність є одним з основних показників якості для бетонів тонкостінних конструкцій, які експлуатуються у підводному положенні або при контакті з водою, тобто при постійній напірній дії води, а також у контакті з корозійним середовищем. Для подібних конструкцій саме водонепроникність в найбільшій мірі забезпечує їх довговічність. При цьому як показано в п.1.6, 2.2 і 3.2, в багатьох випадках водонепроникність має забезпечуватися в комплексі з морозостійкістю матеріалу. Відомо, що проникність бетону залежить не лише від структури його порового простору, насамперед від його капілярної та відкритої пористості, а також від змін структури у часі в результаті різних фізико-хімічних процесів і механічних впливів [212]. До суднобудівних бетонів висуваються найбільш жорсткі вимоги щодо рівня W , тому що крім власне довговічності даний показник якості обумовлює саму експлуатаційну придатність конструкцій споруди [150,151,304]. Відповідно водонепроникність контролювалась для всіх досліджених в рамках двох серій експериментів складів легких бетонів. ЕС-модель, яка описує вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу на водонепроникність керамзитобетону має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W \text{ (атм)} = & 10,7 + 2,0x_1 + 1,1x_1^2 - 0,5x_1x_2 - 1,0x_1x_3 \\
 & + 1,4x_2 - 1,9x_2^2 + 0,5x_2x_3 \\
 & + 0,8x_3 - 0,9x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Слід зазначити, що точність ЕС-моделі (4.6) суттєво обмежена через специфіку дискретної методики визначення водонепроникності. Значення показника W , яке є фактично тиском у атмосферах, що витримує зразок до появи мокрої плями, може бути лише парними, тобто W_0, W_2, W_4 і так далі. Проте це не впливає на загальні тенденції впливу факторів, які варіювалися у експерименті, на цей показник якості бетону. Згідно даних ЕС-моделі (4.6) найбільшу водонепроникність $W_{\max} \approx 14$ атм мають склади у точці з координатами $x_1 = 1, x_2 = 0,3, x_3 = 0$, тобто при максимальній кількості портландцементу, середній кількості суперпластифікатору С-3 та при кількості мікрокремнезему близько 30 кг/м^3 . Найменшу водонепроникність $W_{\min} \approx 4$ атм мають склади в точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$, тобто з мінімальною кількістю цементу і добавки С-3 та без мікрокремнезему. На рис.4.7 показана побудована за ЕС-моделлю (4.6) діаграма у вигляді куба, яка відображає вплив факторів складу модифікованого керамзитобетону на його водонепроникність.

Як можна побачити з діаграми, найбільш суттєво на рівень W досліджених керамзитобетонів впливає кількість портландцементу. При підвищенні кількості в'язучого з 500 до 600 кг/м^3 водонепроникність матеріалу зростає приблизно на 2 марки, тобто на 4 атмосфери. При цьому більше відчутне зростання W за рахунок підвищення кількості цементу відбувається для складів без мікрокремнезему та при мінімальній кількості добавки С-3, тобто модифікованих в меншій мірі. За рахунок введення у склад керамзитобетону $30\text{-}35 \text{ кг/м}^3$ мікрокремнезему його водонепроникність підвищується більш, ніж на марку (2 атмосфери і більше). При збільшенні кількості суперпластифікатору С-3 з $0,5$ до $0,8\text{-}0,9\%$ за рахунок зниження В/Ц рівень W підвищується на величину до 2 атмосфер, тобто приблизно на одну марку.

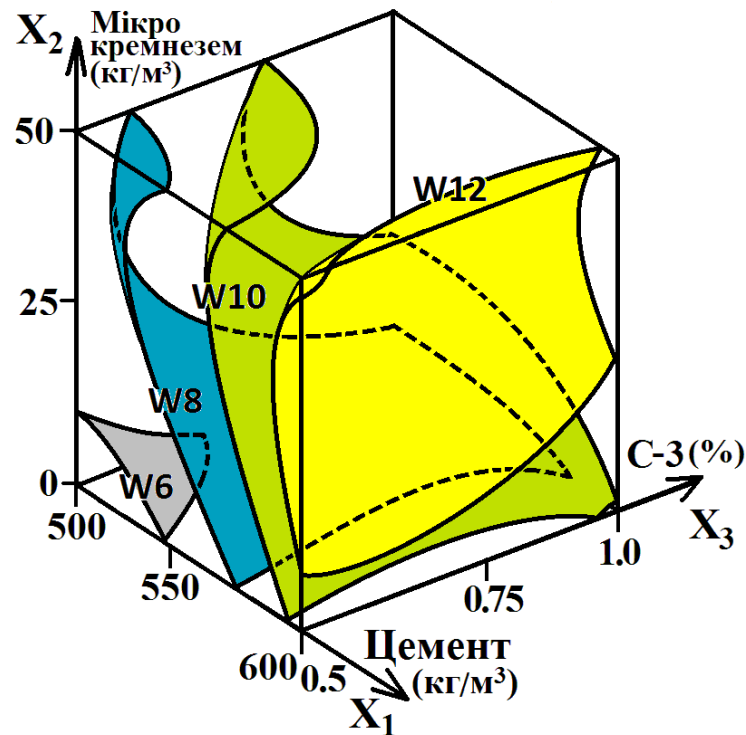


Рис.4.7. Вплив складу керамзитобетону на його водонепроникність (перша серія експериментів)

Вплив варійованих у другій серії експериментів 4-х факторів складу модифікованого керамзитобетону на його водонепроникність описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 W \text{ (атм)} = & 11,9 + 1,8x_1 - 1,2x_1^2 + 0,4x_1x_2 + 0,1x_1x_3 - 0,1x_1x_4 \\
 & + 0,7x_2 - 0,9x_2^2 \quad \pm 0x_2x_3 \quad \pm 0x_2x_4 \\
 & - 0,2x_3 - 0,5x_3^2 \quad \pm 0x_3x_4 \\
 & - 0,8x_4 + 0,5x_4^2
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Точність даної ЕС-моделі аналогічно (4.6) обмежена дискретністю визначення показника W . Аналіз ЕС-моделі (4.7) показує, що кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на водонепроникність досліджених керамзитобетонів. Можна відмітити, що склади легких бетонів з фіброю мають дещо нижчий рівень W , ніж склади без фібри. Але коливання даного показника якості при введенні фібри практично не відрізняється від точності його визначення. При цьому високий рівень водонепроникності бетону, а саме від W_8 до W_{14} , забезпечується застосуванням комплексу рецептурних і

технологічних заходів, зокрема, введенням в усі склади оптимальної кількості суперпластифікатора С-3 в кількості 0,8% від маси цементу та обробкою пористого гравію цементною суспензією. Для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на водонепроникність досліджених керамзитобетонів за (4.7) була побудована діаграма, яка показана на рис.4.8. При побудові даної діаграми рівень фактору x_4 фіксувався на мінімальному значенні. Аналіз діаграми показує, що в цілому характер і масштаб впливу кількості портландцементу і мікрокремнезему на водонепроникність досліджених у другій серії експериментів керамзитобетонів був аналогічним з характером впливу цих факторів в першій серії досліджень. При підвищенні кількості в'язучого з 500 до 600 $\text{кг}/\text{м}^3$ водонепроникність матеріалу зростає майже на дві марки. Найбільший рівень W досягається при введенні у склад бетону мікрокремнезему у кількості 30-35 $\text{кг}/\text{м}^3$. Вміст керамзитового гравію, який фактично показує розсунення крупного заповнювача в суміші, впливає на рівень W не надто суттєво. При цьому максимальна водонепроникність композиту спостерігається при кількості гравію 660-670 $\text{л}/\text{м}^3$.

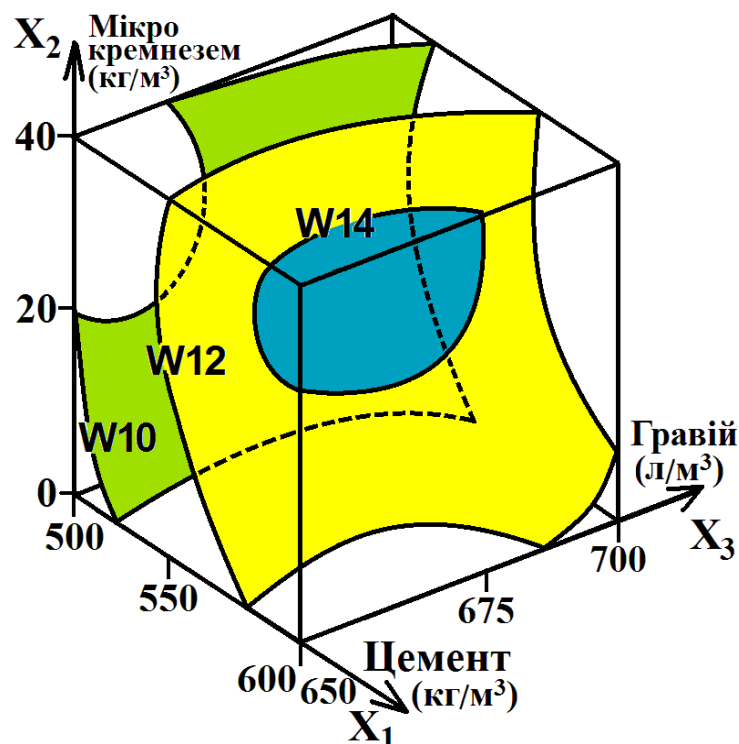


Рис.4.8. Вплив кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на водонепроникність керамзитобетонів (друга серія експериментів, $x_4 = -1$)

На рис.4.9 показано фото зразка-циліндра з діаметром і висотою 15 см, який був розколотий навпіл після проведення випробування на водонепроникність. На фото добре видно злитість і однорідність структури керамзитобетону. Біла лінія на розколі зразка показує фронт просування води в бетонному зразку під тиском 10 атмосфер.



Рис.4.9. Приклад структури дослідженого керамзитобетону (циліндр, який був розколотий навпіл після випробування на водонепроникність)

Контрольні склади керамзитобетону №2а і №12а, приготовані без обробки пористого гравію цементною суспензією, показали водонепроникність на рівні відповідно W6 і W8. Для складу №2а це одну марку нижче водонепроникності аналогічного складу №2 другої серії експериментів, для складу №12а – на рівні аналогічного складу №12. У другому випадку дещо меншу ефективність обробки пористого гравію можна пояснити наявністю фібри в бетоні, яка впливає на показник W істотніше, ніж даний технологічний прийом.

Таким чином, водонепроникність досліджених модифікованих керамзитобетонів при використанні раціональної кількості модифікаторів і застосуванні технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією є достатньо високою. Це дозволяє забезпечити необхідну довговічність легкого бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд в умовах контакту з водою а також гідростатичного тиску.

Також в рамках даного етапу досліджень була проаналізована морозостійкість керамзитобетонів обох експериментальних серій. Як показано вище, саме показник морозостійкості в значній мірі визначає довговічність бетону при експлуатації конструкцій в вологих і повітряно-вологих умовах в кліматичних умовах України та інших країн з помірним кліматом [150,207,210,218]. За даними, наведеними у таблиці 4.3, була побудована ЕС-модель (4.8), яка описує вплив факторів складу, які варіювалися в першій серії експерименту, на морозостійкість керамзитобетону:

$$\begin{aligned}
 F(\text{цикли}) = & 543 + 60x_1 - 17x_1^2 + 6x_1x_2 + 6x_1x_3 \\
 & + 15x_2 - 42x_2^2 - 6x_2x_3 \\
 & + 15x_3 - 42x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Точність ЕС-моделі (4.8), аналогічно з точністю моделей (4.6) і (4.7), також обмежена через специфіку дискретної методики визначення показника якості. В даному випадку морозостійкість фактично визначається з кроком у 50 циклів. Але ця особливість методики, аналогічно з ситуацією при аналізі водонепроникності, не суттєво впливає на загальні тенденції зміни показника морозостійкості при варіюванні факторів складу. Діаграма у вигляді куба, яка була побудована за ЕС-моделлю (4.8) та яка відображає вплив факторів складу модифікованого керамзитобетону на його морозостійкість, показана на рис.4.10.

Аналіз даної діаграми і ЕС-моделі (4.8) показує, що морозостійкість досліджених в першій серії керамзитобетонів знаходилася переважно в діапазоні від F400 до F550. Тобто для даних матеріалів морозостійкість при варіюванні факторів складу змінювалася в меншій мірі, ніж їхня водонепроникність. При цьому характер впливу факторів складу на водонепроникність і морозостійкість керамзитобетону є доволі схожим. Тобто склади з більшою водонепроникністю показували переважно більш високу морозостійкість. Всі досліджені бетони мали високий рівень показника F, що у поєднанні з високою водонепроникністю матеріалу, забезпечує їх довговічність в типових для гідротехнічних споруд умовах експлуатації. Висока

морозостійкість керамзитобетону досягається, насамперед, за рахунок наявності достатньої замкнутої резервної пористості у композиті завдяки використанню легкого заповнювача [3,4,26,35], застосуванню технологічного прийому попередньої обробки, як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, та наявності суперпластифікатору у всіх складах. В найбільшій мірі на морозостійкість досліджених керамзитобетонів впливає кількість портландцементу. Цей вплив має нелінійний характер, тобто при підвищенні кількості в'язучого з 500 до 550 кг/м³ рівень F підвищується відчутніше, ніж при зміні дозування цементу з 550 до 600 кг/м³. За рахунок введення мікрокремнезему в кількості 30 кг/м³ морозостійкість підвищується приблизно на 50 циклів. Подальше підвищення кількості мікрокремнезему неефективно. Також за рахунок зниження В/Ц практично на 50 циклів зростає морозостійкість досліджених керамзитобетонів при підвищенні дозування добавки С-3 з 0,5 до 0,8-0,85% від маси цементу.

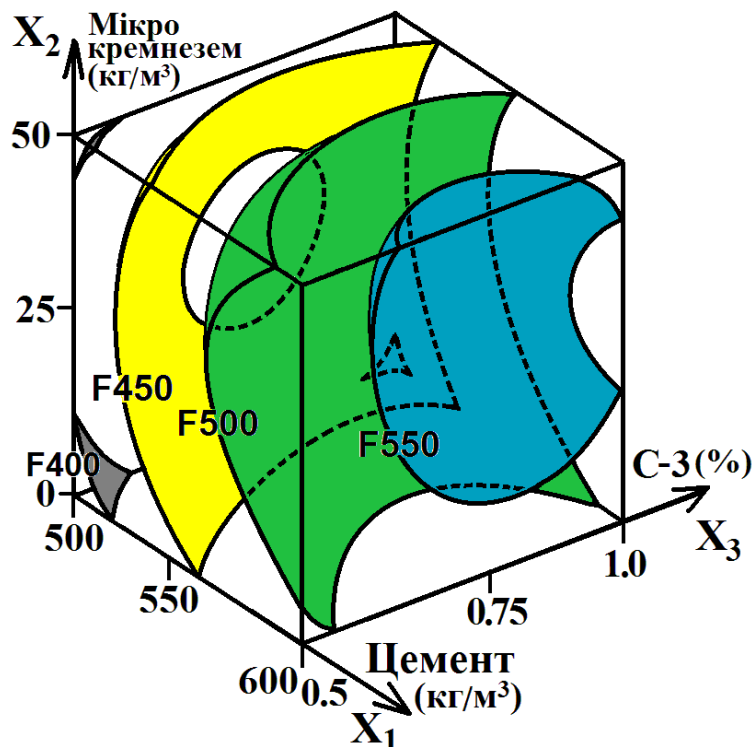


Рис.4.10. Вплив факторів складу керамзитобетону на його морозостійкість (перша серія експериментів)

Вплив варійованих в другій серії експерименту факторів на морозостійкість досліджених керамзитобетонів описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 F(\text{цикли}) = & 548 + 31x_1 - 29x_1^2 - 11x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 14x_1x_4 \\
 & \pm 0x_2 - 16x_2^2 + 17x_2x_3 + 18x_2x_4 \\
 & \pm 0x_3 - 18x_3^2 \pm 0x_3x_4 \\
 & + 30x_4 + 15x_4^2
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

За даною ЕС-моделлю побудована діаграма типу «квадраті на квадраті», яка показана на рис.4.11. При побудові діаграми в якості несучого квадрата обрані фактори x_3 (вміст гравію) та x_4 (кількість поліпропіленової фібри). В полі несучого квадрату побудовані дев'ять двофакторних діаграм, які відображають вплив кількості портландцементу (x_1) і мікрокремнезему (x_2) на морозостійкість легкого бетону відповідно при дев'яти різних комбінаціях факторів x_3 і x_4 . Аналіз даних таблиці 4.4, ЕС-моделі (4.9) та діаграми на рис.4.11 показує, що морозостійкість досліджених у другій серії експериментів керамзитобетонів знаходилася в діапазоні від 400 до 600 циклів. Такий досить високий рівень морозостійкості композитів забезпечувався, зокрема, застосуванням раціональної кількості суперпластифікатору С-3 і високим дозуванням в'язучого. Вплив кількості портландцементу та мікрокремнезему на морозостійкість керамзитобетонів, які досліджувалися в другий серії експериментів, в цілому є аналогічним з їх впливом на даний показник якості в першій серії експерименту. В межах факторного простору експерименту вміст гравію оказує обмежений вплив на рівень морозостійкості легкого бетону, але при підвищенні кількості гравію до 690..700 л/м³ морозостійкість композиту несуттєво знижується. За рахунок застосування фібри в кількості 0,8-1,2 кг/м³ морозостійкість досліджених легких бетонів підвищується приблизно на 50 циклів. Тобто дисперсне армування оказує позитивний вплив на стійкість легкого бетону до заморожування і відтаювання, проте масштаб даного впливу є обмеженим в порівнянні з відомим в матеріалознавстві впливом фібри на морозостійкість важкого бетону [299]. Це пояснюється наявністю у структурі керамзитобетону, пористого заповнювача. Даний заповнювач містить резервну пористість, має гарну адгезію до цементної матриці та здатен розсіювати фронт експлуатаційних тріщин, які з'являються та зростають к композиційному

матеріалі при морозних впливах [14,137]. Це покращує стійкість бетону до дій заморожування і відтаювання. При цьому дисперсна арматура, яка сприяє утриманню від руйнування і відокремлення структурних блоків композиту, виступає як додатковий стабілізуючий фактор, що запобігає деструкції легкого бетону під впливом морозу.

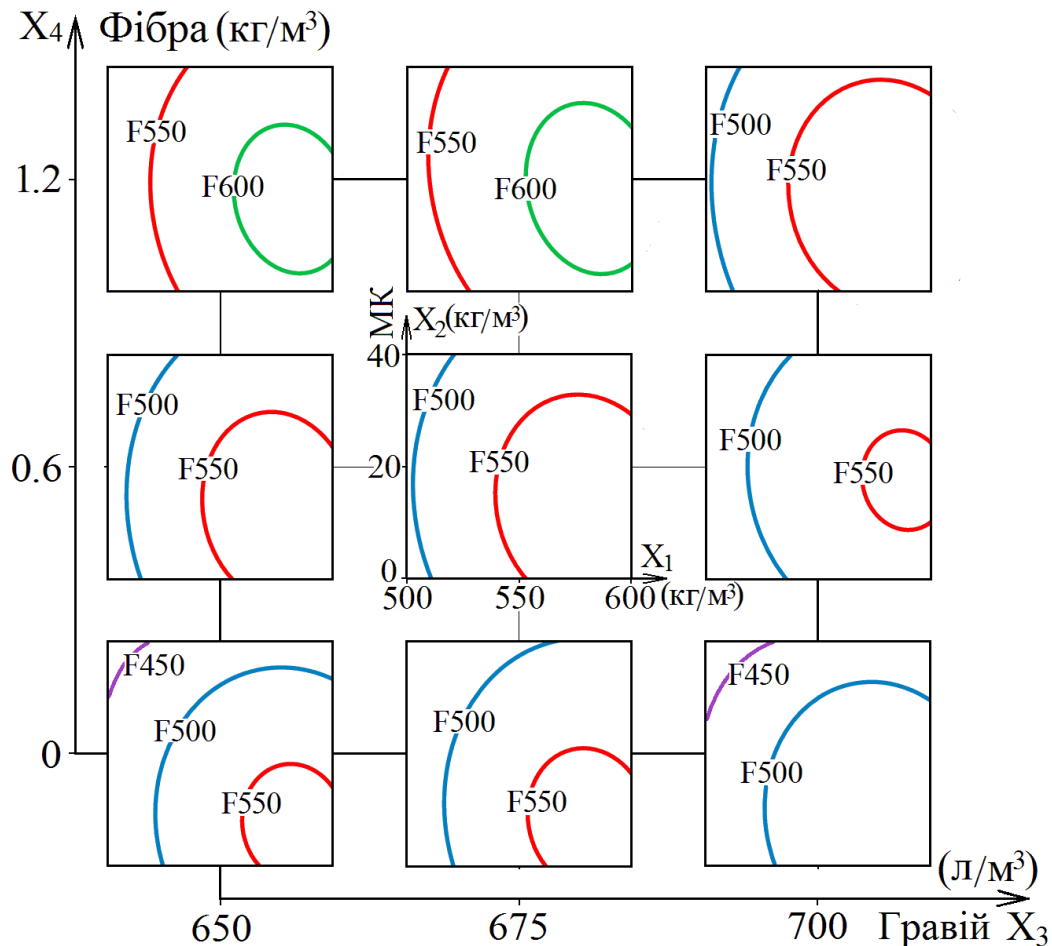


Рис.4.11. Вплив варійованих у другій серії експериментів факторів складу на морозостійкість модифікованих керамзитобетонів

Зазначені вище властивості пористого заповнювача також пояснюють той факт, що як показало порівняння рівня F контрольних складів керамзитобетону №2а і №12а з аналогічними складами №2 і №12 другої серії експерименту, обробка керамзитового гравію цементною суспензією практично не впливає на морозостійкість легкого бетону. З досяжним рівнем точності визначення показника F показники стійкості даних матеріалів до заморожування і відтаювання є рівними. Тобто дана спрямована на покращення однорідності

контактної зони пористого заповнювача операція не суттєво впливає на здатність до сприйняття тиску льоду та розсіювання зростаючих тріщин в композиті при морозній деструкції.

Необхідно відмітити, що як зазначалося в п.2.5, в даних дослідженнях морозостійкість бетону визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні». Тобто отримана марка за морозостійкістю показує кількість циклів заморожування і відтаювання в прісній воді, які витримує бетон до унормованої втрати міцності або маси. При проведенні заморожування і відтаювання у штучній морській воді згідно ОСТ 5.9266-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Методы испытаний бетона» з врахуванням більш жорстких умов впливу марка за морозостійкістю (згідно іншої методики, яка розповсюджується і на легкі бетони) буде відповідно прогнозовано менше. «Автоматичного» переведення марки за морозостійкістю за методикою ДСТУ в марку при проведенні циклів заморожування і відтаювання у морській воді існувати не може через відмінності деструктивних впливів на бетон у різних типах води, зокрема при її замерзанні. Але проведені нашим науковим колективом дослідження показують, що для легких і важких бетонів на сульфатостійкому портландцементі морозостійкість в морській воді є нижчою від показника F за ДСТУ Б В.2.7-49-96 майже вдвічі. Наприклад, керамзитобетон з морозостійкістю F600 (згідно ДСТУ) у морській воді буде мати морозостійкості не нижче 300 циклів (згідно ОСТ 5.9266-76).

Таким чином проведені дослідження показали, що для отримання керамзитобетонів з підвищеним рівнем водонепроникності та морозостійкості, що забезпечує довговічність даних матеріалів, можна рекомендувати вводити до їх складу мікрокремнезем в кількості 30-35 кг/м³ і добавку С-3 в кількості 0,8-0,9%. Додаткове підвищення морозостійкості легкого бетону досягається за рахунок застосування дисперсного армування. Ці рецептурні методи слід використовувати разом з технологічними прийомами, спрямованими на покращення сумісної роботи заповнювача з матрицею, що також є шляхом

підвищення довговічності легкого конструкційного бетону, зокрема з обробкою пористого гравію цементною суспензією. Досягнутий рівень міцності, водонепроникності та морозостійкості досліджених модифікованих керамзитобетонів дозволяє рекомендувати дані матеріали для конструкцій тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих доків, платформ, будинків і готелів.

4.4 Середня густина і вологість модифікованих керамзитобетонів в різних умовах експлуатації

Як зазначалося вище, однією з основних причин застосування легких бетонів в гідротехнічному будівництві є зниження ваги залізобетонних конструкцій. Найбільш важливою і актуальною ця задача є для плавучих залізобетонних споруд. Відповідно в рамках проведених досліджень вивчалася середня густина модифікованих керамзитобетонів в різних умовах експлуатації, тобто при різній вологості (в сухому стані, при рівноважній вологості та у водонасиченому стані). Значення середньої густини і вологості досліджених керамзитобетонів в 15-ті експериментальних точках першої серії експериментів наведені в таблиці 4.5, у 18-ті експериментальних точках другої серії експериментів – в таблиці 4.6.

Значення середня густини бетону визначалося на зразках у віці 90 діб, при цьому також розраховувалася вологість матеріалу. Використання зразків такого віку було обрано зважаючи на те, що в даному віці структура цементного композиту вже є більш стабільною в порівнянні з бетонами у віці 28-ми діб і дані зразки в більшій мірі відповідають матеріалам в реальних умовах експлуатації гідротехнічних і транспортних споруд. Крім того, вологість зразків у «рівноважних» умовах експлуатації зі збільшенням їхнього віку поступово також стає дещо стабільнішою через меншу інтенсивність хімічних і масообмінних процесів в композиті.

Таблиця 4.5

Середня густина і вологість досліджених
у першій серії експериментів керамзитобетонів

| № | Середня густина (кг/м ³) | | | Вологість (% за об'ємом) | |
|----|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| | у сухому стані | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані |
| 1 | 1610 | 1669 | 1741 | 5,9 | 13,1 |
| 2 | 1689 | 1739 | 1791 | 5,0 | 10,2 |
| 3 | 1710 | 1757 | 1816 | 4,7 | 10,6 |
| 4 | 1659 | 1712 | 1786 | 5,3 | 12,7 |
| 5 | 1672 | 1723 | 1773 | 5,1 | 10,1 |
| 6 | 1759 | 1806 | 1862 | 4,7 | 10,3 |
| 7 | 1695 | 1744 | 1810 | 4,9 | 11,5 |
| 8 | 1723 | 1762 | 1813 | 3,9 | 9,0 |
| 9 | 1761 | 1797 | 1854 | 3,6 | 9,3 |
| 10 | 1697 | 1735 | 1792 | 3,8 | 9,5 |
| 11 | 1726 | 1779 | 1831 | 5,3 | 10,5 |
| 12 | 1673 | 1724 | 1769 | 5,1 | 9,6 |
| 13 | 1735 | 1770 | 1826 | 3,5 | 9,1 |
| 14 | 1658 | 1703 | 1772 | 4,5 | 11,4 |
| 15 | 1726 | 1766 | 1815 | 4,0 | 8,9 |

Для досягнення сухого стану зразки висушувалися до постійної маси при температурі $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Під рівноважною вологістю в даній роботі розуміється вологість зразків після тривалого (25-30 діб) зберігання у повітряно-сухих умовах при вологості 80-100% і температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Водонасиченими вважаються зразки після тривалого вільного водонасичення в воді до постійної маси, але не менше 14 діб. Сухий стан позначається індексом "d", рівноважна вологість індексом "n", а водонасичений – індексом "w".

Середня густина і вологість досліджених
у другій серії експериментів керамзитобетонів

| № | Середня густина (кг/м ³) | | | Вологість (% за об'ємом) | |
|----|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| | у сухому стані | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані | при рівноважній вологості | у водонасиченому стані |
| 1 | 1755 | 1800 | 1865 | 4,5 | 11,0 |
| 2 | 1696 | 1753 | 1825 | 5,7 | 12,9 |
| 3 | 1701 | 1756 | 1821 | 5,5 | 12,0 |
| 4 | 1750 | 1794 | 1867 | 4,4 | 11,7 |
| 5 | 1756 | 1802 | 1871 | 4,6 | 11,5 |
| 6 | 1785 | 1815 | 1877 | 3,8 | 9,2 |
| 7 | 1716 | 1766 | 1839 | 5,0 | 12,3 |
| 8 | 1758 | 1804 | 1876 | 4,6 | 11,8 |
| 9 | 1729 | 1780 | 1853 | 5,1 | 12,4 |
| 10 | 1760 | 1804 | 1872 | 4,4 | 11,2 |
| 11 | 1726 | 1781 | 1860 | 5,5 | 13,4 |
| 12 | 1695 | 1753 | 1827 | 5,8 | 13,2 |
| 13 | 1734 | 1778 | 1845 | 4,4 | 11,1 |
| 14 | 1721 | 1771 | 1843 | 5,0 | 12,2 |
| 15 | 1707 | 1762 | 1830 | 5,5 | 12,3 |
| 16 | 1727 | 1769 | 1835 | 4,2 | 10,8 |
| 17 | 1724 | 1772 | 1847 | 4,8 | 12,3 |
| 18 | 1737 | 1780 | 1849 | 4,3 | 11,2 |

Необхідно зазначити, що для більшості конструкцій цивільних і громадських будівель, а також транспортних та інших споруд, середня густина легких бетонів нормується саме у сухому стані. Проте для плавучих залізобетонних споруд навпаки нормується середня густина керамзитобетонів у повітряно-сухому або водонасиченому стані. При цьому в реальних умовах експлуатації багатьох конструктивів вологість бетону буде знаходитися в відповідному «рівноважному» для даних умов стані. На практиці «рівноважна»

вологість не є постійною величиною і залежить від умов експлуатації та фактичних кліматичних умов у кожному проміжку часу.

ЕС-модель, що відображає вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу на середню густину модифікованих керамзитобетонів в сухому стані, тобто без врахування незв'язаної хімічно вологи, що міститься в порах цементно-піщаної матриці та гравію, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_d \text{ (кг/м}^3\text{)} = & 1743,3 + 18,8x_1 - 25,9x_1^2 \pm 0 x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\ & \pm 0x_2 - 20,4x_2^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_2x_3 \\ & + 18,3x_3 - 20,4x_3^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

На рис.4.12.а показана діаграма у вигляді куба, яка побудована за даною ЕС-моделлю та яка відображає вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу керамзитобетону на його середню густину в сухому стані.

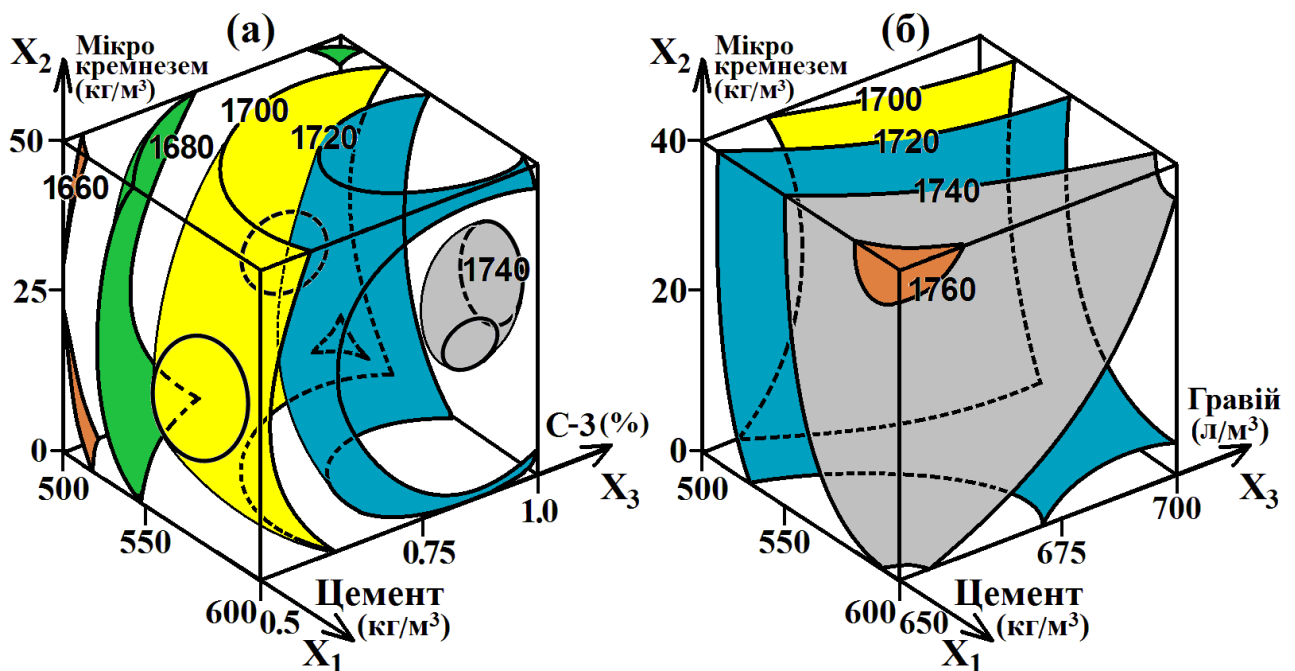


Рис.4.12. Вплив факторів складу керамзитобетону на його середню густину в сухому стані:

(а) – перша серія експериментів, (б) – друга серія експериментів ($x_4=0$)

Аналіз даної діаграми та даних таблиці 4.5 дозволяє сказати, що найбільший вплив на середню густину досліджених керамзитобетонів в сухому стані оказує кількість портландцементу і добавки С-3. При цьому у міру зростання рівня цих

факторів середня густина бетонів підвищується. Це пояснюється тим, що, по-перше, при збільшенні кількості в'язучого розрахунковий склад керамзитобетону містить менше легкого керамзитового гравію, по-друге, при збільшенні кількості суперпластифікатору знижується кількість води замішування, відповідно структура композиту містить менше пор. Вплив кількості мікрокремнезему на середню густина керамзитобетону є схожим з впливом цього фактору на В/Ц суміші, відповідно склади з меншим В/Ц мають дещо більшу середню густина.

Вплив варійованих у другій серії експериментів факторів складу на середню густина модифікованих керамзитобетонів в сухому стані був проаналізований за відповідною ЕС-моделлю, яка була розрахована за даними таблиці 4.6 та яка аналогічна за типом з (4.2), (4.5), (4.7) і (4.9). Аналіз даної ЕС-моделі показав, що кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на середню густина досліджених легких бетонів. За рахунок введення дисперсної арматури густина матеріалу в сухому стані знижується на величину не більше 9 кг/м^3 , що вірогідно є наслідком підвищення водопотреби бетонної суміші рівної рухомості. Для аналізу впливу кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на середню густина досліджених легких бетонів за згаданою ЕС-моделлю була побудована показана на рис.4.12.б діаграма у вигляді куба. При побудові діаграми рівень фактору x_4 фіксувався на середньому значенні. Як можна побачити діаграми, в межах факторного простору другої серії експериментів найбільш суттєво на величину середньої густини керамзитобетону впливає кількість портландцементу. При цьому даний вплив є нелінійним і при підвищенні дозування в'язучого з 500 до 550 кг/м^3 середня густина композиту зростає істотніше, ніж при підвищенні кількості цементу з 550 до 600 кг/м^3 . При збільшенні вмісту пористого гравію з 650 до 700 л/м^3 середня густина керамзитобетонів очікувано знижується на $20\text{-}25 \text{ кг/м}^3$, що є наслідком зменшення кількості розчинної складової в композиті. При введенні $30\text{-}40 \text{ кг/м}^3$ мікрокремнезему середня густина керамзитобетонів в сухому стані зростає на $15\text{-}20 \text{ кг/м}^3$. При цьому максимальна середня густина

керамзитобетонів, що досліджувалися у другій серії експериментів, була дещо вищою, ніж максимальна густина матеріалів, досліджених в першій серії. Це пояснюється варіюванням вмісту в бетоні поритого керамзитового гравію і застосуванням раціональної кількості суперпластифікатору, що давало змогу забезпечити дещо вищу густина композиту.

Діаграма у вигляді куба, яка побудована за ЕС-моделлю, аналогічною (4.10), та яка відображає вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу керамзитобетону на його середню густина при рівноважній вологості, тобто після тривалого зберігання при вологості 80..100% і температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$, показана на рис.4.13. а.

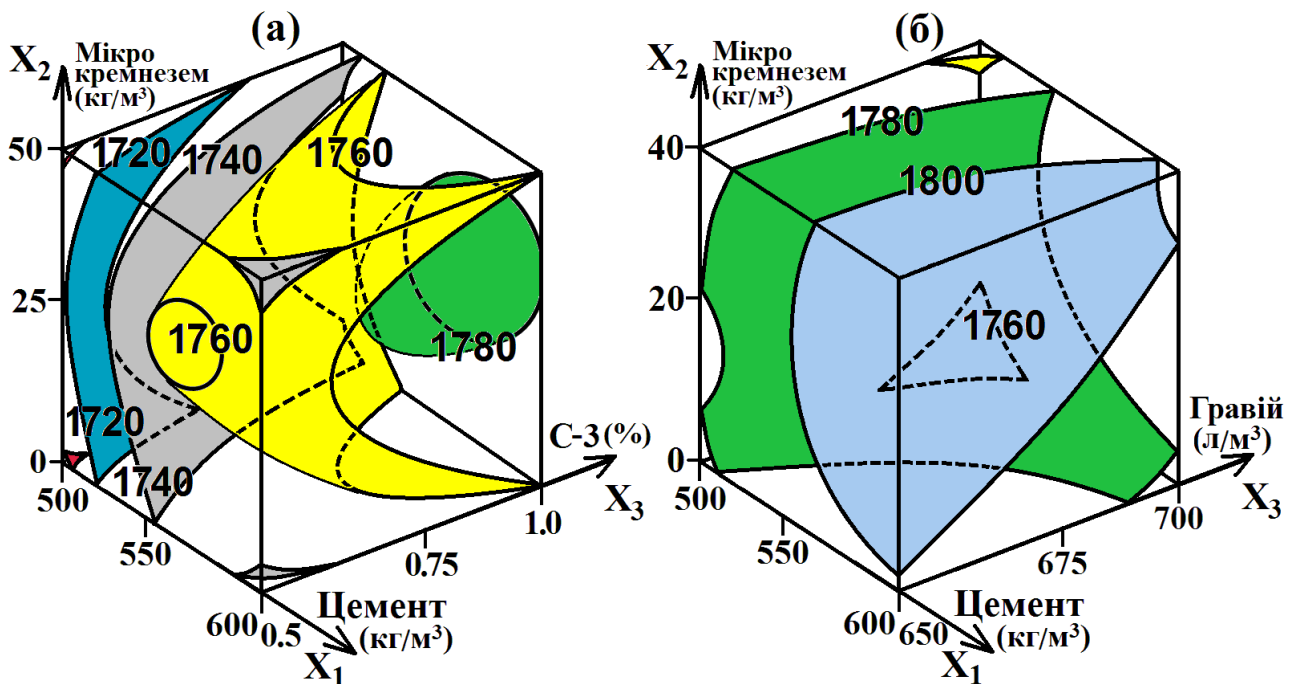


Рис.4.13. Вплив варійованих факторів складу керамзитобетону на його середню густина при рівноважній вологості

(а) – перша серія експериментів, (б) – друга серія експериментів ($x_4=0$)

Аналіз даної діаграми дозволяє зробити висновок, що загальний вплив факторів, які варіювалися у першій серії експериментів, на середню густина керамзитобетонів при рівноважній вологості є майже аналогічним з їх впливом на середню густина даних легких бетонів в сухому стані. При цьому вплив кількості добавки С-3 при рівноважній вологості є дещо нижчим, ніж для сухих

матеріалів. Це можна пояснити тим, що кількість та загальний об'єм пор (а він залежить від В/Ц) у матеріалі при рівноважній вологості менше впливає на його густину, ніж у сухому стані через наявність води у даних порах. Відповідно при рівноважній вологості, тобто при наявності певної кількості вільної вологи в порах композиту, матеріали з різним об'ємом пор менш відрізняються між собою за середньою густиною в порівнянні з різницею в густині тих самих матеріалів в сухому стані.

Аналіз впливу варійованих у другій серії експериментів факторів складу на середню густину модифікованих керамзитобетонів при рівноважній вологості проводився за ЕС-моделлю, аналогічною з (4.2), (4.5), (4.7) і (4.9) та яка була розрахована за даними таблиці 4.6. Встановлено, що тенденції і масштаб впливу даних чотирьох факторів складу є схожим до їх впливу на середню густину бетонів, що знаходилися в сухому стані. Найменше на середню густину керамзитобетонів впливає кількість поліпропіленової фібри, відповідно для детальнішого аналізу впливу трьох інших варійованих факторів складу на середню густину досліджених легких бетонів при рівноважній вологості була побудована діаграма у вигляді куба, яка показана на рис.4.13.б. При побудові діаграми рівень фактору x_4 фіксувався на середньому значенні, що аналогічно з рис.4.12.б. Як можна побачити з діаграми, при рівноважній вологості середня густина досліджених в другій серії експериментів модифікованих керамзитобетонів варіюється менше, ніж середня густина цих матеріалів в сухому стані. Це пояснюється тим, що, як зазначалося вище, при наявності вільної вологи в порах та інших порожнинах матеріали з різним об'ємом пор менш відрізняються між собою за середньою густиною. При підвищенні кількості цементу середня густина керамзитобетону зростає, при збільшенні вмісту поритого гравію – знижується. Кількість мікрокремнезему несуттєво впливає на густину легкого бетону, проте найбільшу середню густину мають склади з вмістом даного модифікатора на рівні 25-30 кг/м³.

Як відмічалось вище, гідротехнічні споруди експлуатуються при постійному контакті з водою, відповідно вологи умови експлуатації є типовими

для більшості конструкцій даних споруд. Для легких суднобудівних бетонів згідно ОСТ5.9880-85 [1] їхня середня густина обмежується діапазоном від 1600 до 2000 кг/м³ у повітряно-сухому або водонасиченому стані. Відповідно на даному етапі досліджень середня густина керамзитобетонів визначалася також в водонасиченому стані. ЕС-модель, яка описує вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу на середню густину досліджених керамзитобетонів у водонасиченому стані, має вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_w \text{ (кг/м}^3\text{)} = & 1835,0 + 11,3x_1 - 17,7x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\ & \pm 0x_2 - 28,2x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\ & + 7,7x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

На рис.4.14.а показана діаграма у вигляді куба, яка побудована за даною ЕС-моделлю. Аналіз діаграми та наведених у таблиці 4.5 даних показує, що у водонасиченому стані діапазон зміни середньої густини керамзитобетонів в рамках факторного простору експерименту є декілька меншим, ніж цей діапазон при рівноважній вологості, а також в сухому стані. Різниця між мінімальною і максимальною густиною водонасичених легких бетонів складає 64 кг/м³, проте як при рівноважній вологості ця різниця складає 96 кг/м³, а у сухому стані – 101 г/м³. Аналогічно викладеному вище, це пояснюється тим, що при насиченні водою загальний об'єм пор в композиті менше впливає на середню густину капілярно-пористого матеріалу через меншу різницю між густиною води, яка знаходиться у порах, з густиною матричного матеріалу, ніж різниця між густиною повітря та того ж матричного матеріалу. Відповідно у водонасиченому стані найменшій вплив на середню густину керамзитобетону оказує кількість суперпластифікатору С-3 – при підвищенні рівня даного фактору з 0,5 до 1% показник ρ_w змінюється у межах 15 кг/м³. При підвищенні кількості мікрокремнезему з 0 до 25 кг/м³ середня густина легкого бетону зростає на 28 кг/м³, подальше підвищення дозування цього модифікатору навпаки знижує рівень ρ_w . За рахунок підвищення кількості портландцементу до 560-570 кг/м³ середня густина водонасиченого керамзитобетону зростає на 24 кг/м³.

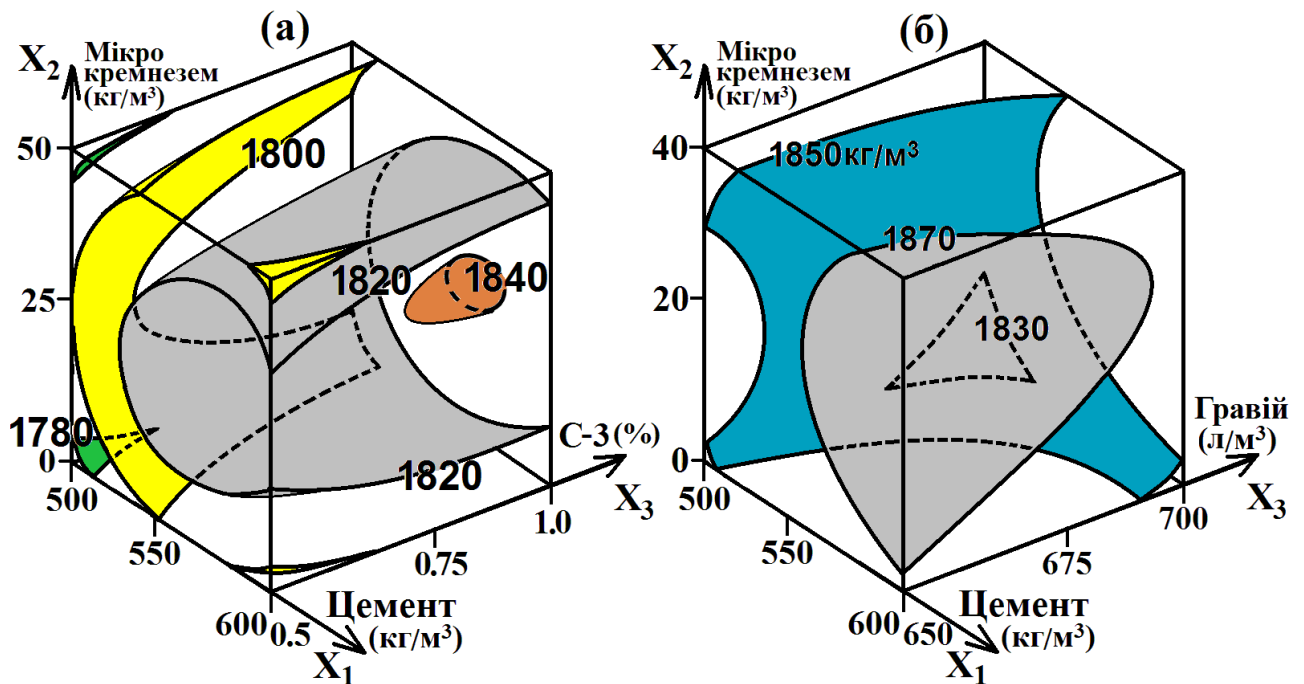


Рис.4.14. Вплив варійованих факторів складу керамзитобетону на його середню густину у водонасиченому стані

(а) – перша серія експериментів, (б) – друга серія експериментів ($x_4=0$)

Вплив чотирьох варійованих у другій серії експериментів факторів складу на середню густину досліджених легких бетонів у водонасиченому стані описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 \rho_w \text{ (кг/м}^3\text{)} = & 1866,3 + 13,7x_1 - 6,8x_1^2 + 4,1 x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 4,7x_1x_4 \\
 & + 3,0x_2 - 10,7x_2^2 + 5,3x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \\
 & - 7,3x_3 \pm 0x_3^2 + 4,9x_3x_4 \\
 & \pm 0x_4 \pm 0x_4^2
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Аналіз даної ЕС-моделі показує, що для водонасичених легких бетонів, так само, як і для бетонів в інших умовах експлуатації, кількість поліпропіленової фібри оказує найменшій вплив на їхню середню густину. Відповідно аналіз впливу кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на середню густину модифікованих керамзитобетонів в водонасиченому стані проводився по діаграмі у вигляді куба, яка була побудована за ЕС-моделлю (4.12) та яка показана на рис.4.14.б. Як видно з даної діаграми, загальний вплив

варійованих в другій серії експериментів факторів складу на середню густину модифікованих керамзитобетонів в водонасиченому стані є схожим з їхнім впливом на середню густину легких бетонів в інших станах, фактично – в інших експлуатаційних умовах. Найбільшу середню густину, 1870 кг/м^3 та вище, мають склади з максимальною кількістю портландцементу при мінімальному вмісті пористого гравію та при введенні мікрокремнезему в кількості $25\text{-}30 \text{ кг/м}^3$.

Контрольні склади керамзитобетону №2а і №12а, приготовані без обробки пористого гравію цементною суспензією, в сухому стані мали середню густину відповідно на 17 кг/м^3 і 15 кг/м^3 меншу за густину аналогічних складів №2 і №12 другої серії експериментів. При цьому у водонасиченому середня густина даних складів була відповідно на 10 і 9 кг/м^3 нижче густини складів №2 і №12, приготованих на обробленому суспензією гравії. Ці результати в цілому збігаються з даними, наведеними у п.3.3, і свідчать про краще проникнення цементного тіста в пори зовнішньої оболонки заповнювача при обробці суспензією, ніж при традиційному методі приготування суміші.

В цілому середня густина досліджених модифікованих керамзитобетонів є на $500\text{..}600 \text{ кг/м}^3$ меншою в порівнянні з середньою густиною альтернативних ним важких бетонів. Це дозволяє за рахунок використання отриманих легких бетонів підвищити ефективність тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних, а також потенційно розширити сфери їхнього застосування в гідротехнічному будівництві. Важливо, що середня густина даних керамзитобетонів в повітряно-сухому (рівноважному) і водонасиченому стані задовольняє вимогам галузевих стандартів на суднобудівний бетон. А як зазначалося вище, застосування легких бетонів дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих залізобетонних споруд.

Також в обох серіях експериментів даного етапу досліджень розраховувалася вологість модифікованих керамзитобетонів в різних умовах експлуатації. З врахуванням доволі значного діапазону варіювання середньої густини легкого бетону методично правильніше визначати вологість даного

матеріалу в % за об'ємом, а не за масою, що точніше відображає вміст води в структурі керамзитобетону. ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих в першій серії експерименту факторів складу керамзитобетону на його рівноважну вологість (в % за об'ємом), тобто вологість матеріалу при його тривалому експонуванні при вологості 80..100% і температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{v.n} (\%) = & 3,82 - 0,36x_1 + 0,30x_1^2 - 0,18x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & - 0,33x_2 + 0,45x_2^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_2x_3 \\
 & - 0,31x_3 + 0,45x_3^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad (4.13)
 \end{aligned}$$

Діаграма у вигляді куба, яка побудована за ЕС-моделлю (4.13) та яка відображає вплив факторів складу керамзитобетону на значення його рівноважної вологості в % за об'ємом, показана на рис.4.15.а.

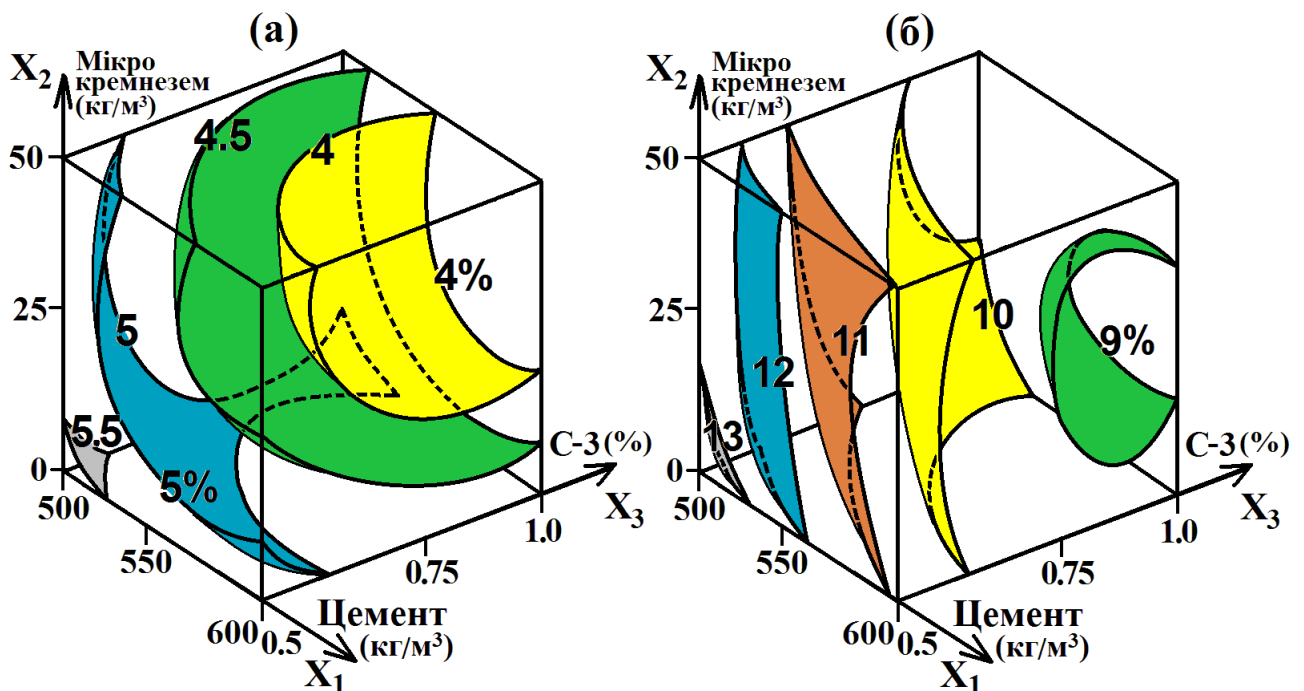


Рис.4.15. Вплив факторів складу керамзитобетону на його вологість в % за об'ємом (перша серія експериментів):

а) в умовах рівноважної вологості; б) у водонасиченому стані

Фактичне значення рівноважної вологості показує, яка кількість гігроскопічної води утримується у структурі капілярно-поритого матеріалу. Більш пористі композити зазвичай містять більше води відповідно вплив

факторів складу на вологість є зворотнім до їх впливу на середню густину. Чіткіше ця тенденція спостерігається для матеріалів у водонасиченому стані. Кількість не зв'язаної хімічно вологи, яка міститься в структурі керамзитобетону при довгому вільному водонасиченні, фактично є величиною відкритої пористості матеріалу. Як відмічалось раніше, в легкі бетони на пористих заповнювачах відрізняються доволі значною замкнутою пористістю, яка не буде містити вологи при вільному водонасиченні. Проте справедливо буде припустити, що та частина пор, яка не заповнилася вологою в експериментальних дослідженнях, також не буде заповнятися вологою і в реальних умовах експлуатації. На рис.4.15.б показана діаграма у вигляді куба, яка побудована за відповідною ЕС-моделлю та яка відображає вплив варійованих у першій серії експериментів факторів складу керамзитобетону на його вологість у водонасиченому стані, тобто фактично на відкриту пористість матеріалу.

Аналіз діаграми та ЕС-моделі показує, що вологість досліджених керамзитобетонів у водонасиченому стані в рамках факторного простору експерименту (фактично – відкрита пористість бетону) змінювалася у достатньо широких межах: максимальне значення W_v на 57% більше за мінімальне значення даного показника. Найбільше на величину максимальної вологості (відкритої пористості) впливає кількість портландцементу і суперпластифікатору С-3. Введення мікрокремнезему в кількості 25-30 кг/м³ знижує вологість і відповідно відкриту пористість легкого бетону.

У другій серії експериментів також аналізувалася вологість досліджених керамзитобетонів. Встановлено, що кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на даний показник. З врахуванням цього на рис.4.16 показані побудовані за відповідними ЕС-моделями діаграми у вигляді кубів, які відображають вплив кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на вологість керамзитобетону в % за об'ємом (рис.4.16.а – в умовах рівноважної вологості, рис.4.16.б – у водонасиченому стані).

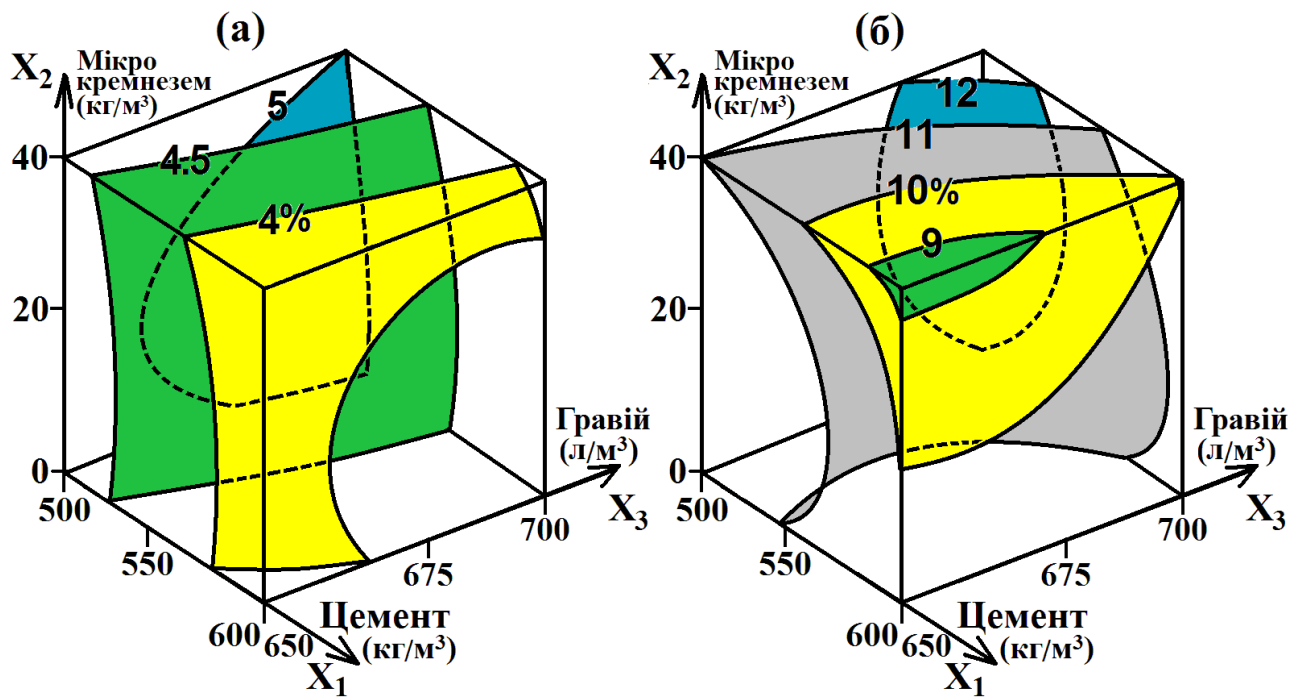


Рис.4.16. Вплив кількості портландцементу, мікрокремнезему та вмісту гравію на вологість керамзитобетону в % за об'ємом (друга серія експериментів, $x_4 = 0$)

а) в умовах рівноважної вологості; б) у водонасиченому стані

Як можна побачити на діаграмах, в «рівноважних» умовах вологість досліджених легких бетонів варіювалася у діапазоні від 3,6 до 5,2%. Кількість мікрокремнезему несуттєво впливає на вологість керамзитобетонів. При підвищенні кількості портландцементу вологість керамзитобетону зменшується, а при підвищенні вмісту пористого гравію – збільшується. Відповідно очікувано найменша кількість вільної вологи міститься в бетонах при максимальній кількості в'язучого і при мінімальному вмісті пористого гравію – тобто в найменш пористих композитах. У водонасиченому стані вологість досліджених керамзитобетонів варіюється в більшому діапазоні, ніж вологість даних матеріалів в рівноважних (повітряно-сухих) умовах. При підвищенні кількості портландцементу вологість водонасичених бетонів, тобто фактично їхня відкрита пористість, прогнозовано знижується. При збільшенні вмісту пористого гравію вологість модифікованих керамзитобетонів у водонасиченому стані підвищується. Введення мікрокремнезему знижує

вологість при вільному водонасиченні, тобто знижує відкриту пористість легких бетонів.

Таким чином можна зробити висновок, що вологість досліджених бетонів як у повітряно-сухих умовах (при рівноважній вологості), так і у стані водонасичення логічно залежить від їх пористості, а значення останньої є величиною відкритої пористості. Відповідно легкі бетони з більшою середньою густиною мали менший рівень вологості та відкритої пористості. Зниження рівня вологості матеріалу є одною зі складових підвищення комфортності перебування людей і роботи обладнання у внутрішніх приміщеннях гідротехнічних споруд. При цьому середня густина розроблених легких бетонів є на 500..600 кг/м³ менше за густину важких бетонів, що дозволяє підвищити ефективність і розширити сферу застосування даних легких бетонів в конструкціях тонкостінних гідротехнічних споруд, в першу чергу – плавучих залізобетонних.

4.5 Аналіз структури модифікованих керамзитобетонів

Для виявлення впливу технологічного прийому попередньої обробки пористого гравію цементною суспензією на початковій стадії перемішування суміші на глибину проникнення в'язучого в поверхневий шар гранул керамзиту був поведений мікроскопічний аналіз шліфів керамзитобетонів, приготованих за різними технологіями. Були використані зразки керамзитобетону складу з точці №2 другої серії експериментів та аналогічного «контрольного» складу №2а, що виготовлявся без технологічного прийому попередньої обробки керамзиту. Як зазначалося вище, при приготуванні «контрольного» складу змішувач послідовно подавалася вода, потім гравій, а потім цемент і пісок. Результати мікроскопічного аналізу шліфів керамзитобетону, приготованого без технологічного прийому попередньої обробки керамзиту показані на рис.4.17, а приготованого з попередньою обробкою керамзиту цементною суспензією показані на рис.4.18. При проведенні аналізу з метою більш точного оцінювання

глибини проникнення в'язучого в поверхневий шар гранул керамзиту фотографування проводилося з розміщенням на шліфі спеціально надрукованої прозорої лінійки з розміром однієї поділки 0,2 мм.

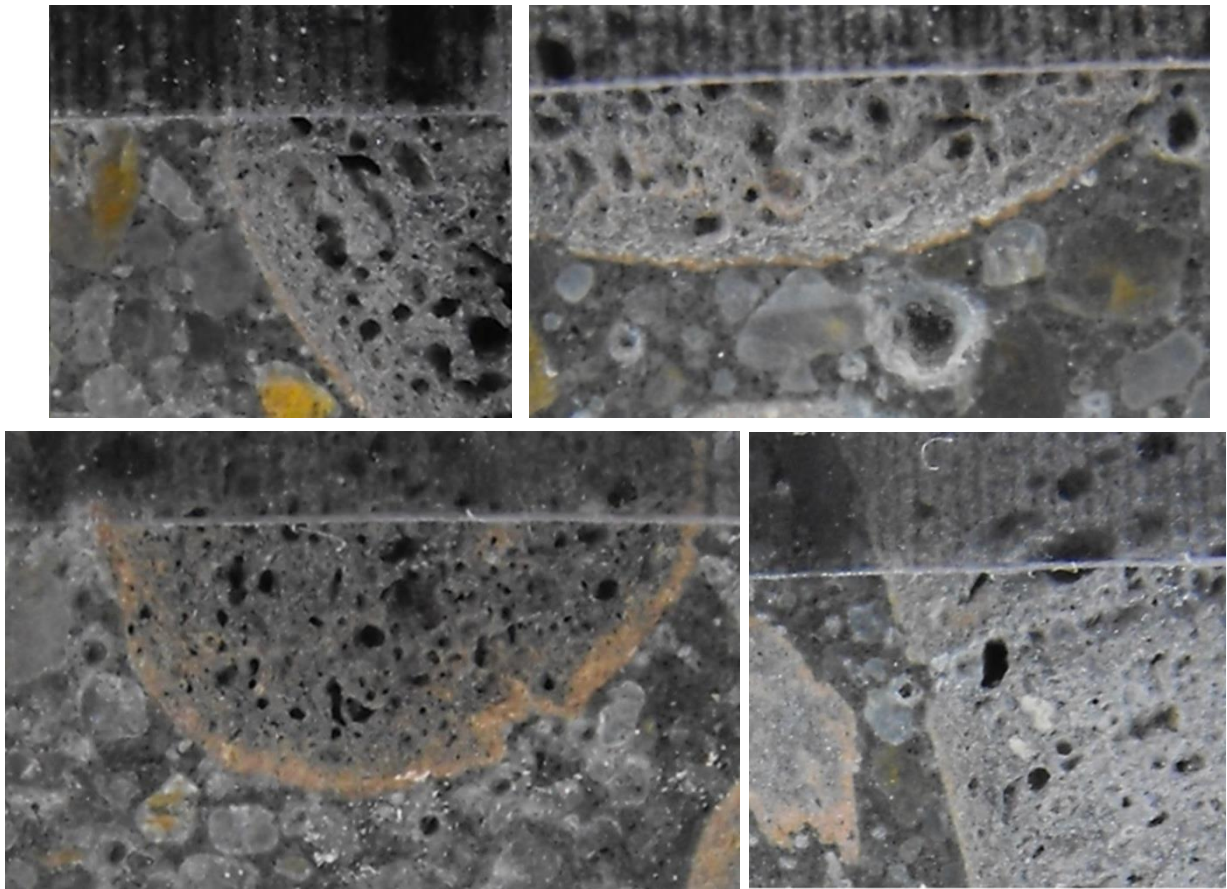


Рис.4.17. Мікроскопічний аналіз шліфів керамзитобетону, приготованого без технологічного прийому попередньої обробки керамзиту (одна поділка на лінійці дорівнює 0,2 мм)

Фото показують, що зовнішній шар гранул керамзиту в силу технологічних особливостей їх виготовлення природно є більш щільним а у внутрішня зона більш пористою. Зовнішня щільна оболонка, яка має червоно-вишневий колір через наявність в неї значної частки Fe_2O_3 [279], переважно має товщину від 0,15 до 0,25 мм. Одразу під оболонкою розташована зона з порами переважно невеликого розміру – 0,1..0,3 мм в діаметрі. Більш крупні пори розташовані переважно ближче до центру гранул. Також з мікрофото можна побачити, що в керамзиті, якій знаходиться в приготованому з використанням попередньої обробки гравію бетоні (рис.4.18), переважна частка пор на глибині

до 1,2-1,6 мм є закольматованими. При цьому в гранулах керамзиту, які знаходяться в бетоні, технологія приготування якого передбачала нетривале знаходження пористого заповнювача в воді при переміщуванні, доволі значна частка пор безпосередня за зовнішню оболонкою є не закольматованими, тобто заповненими повітрям або вологою (рис.4.17). Таким чином поведений мікроскопічний аналіз шліфів керамзитобетону підтвердив краще проникнення цементної суспензії в пори заповнювача при його обробці в початковій стадії перемішування суміші в порівнянні з проникненням в'язучого при «традиційній» технології перемішування легкобетонної суміші.

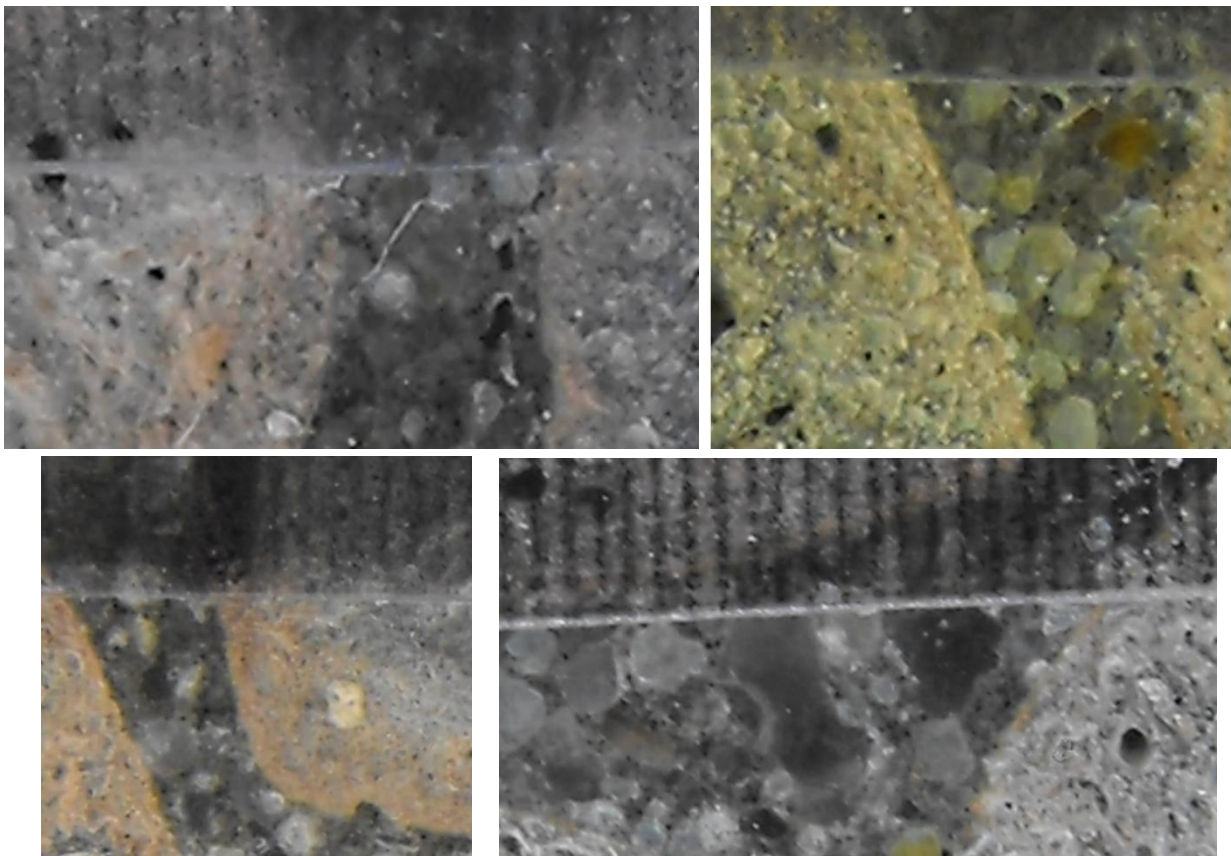


Рис.4.18. Мікроскопічний аналіз шліфів керамзитобетону, приготованого з попередньою обробкою керамзиту цементною суспензією (одна поділка на лінійці дорівнює 0,2 мм)

Крім оптичної мікрозйомки проводився аналіз структури легкого бетону методом електронної мікроскопії. При збільшенні 3000×1 були зроблені фото структури контактної зони пористого заповнювача з цементно-піщаною

матрицею на прикладі зразків керамзитобетону №2, №5 і №12 другої серії експерименту. Окремі фото, отримані в даних дослідженнях, наведені на рис.4.19.

Як можна побачити з фото, пори в контактній зоні заповнювача в легкому бетоні переважно закольматовані кристалами голчатого типу, що забезпечує низьку проникність даних пор для рідини [150,305]. Найбільш чітко це простежується на фото зразків №2 і №5. На мікрофото зразка керамзитобетону №12 досить чітко відображена тріщина к зовнішній оболонки гранули керамзиту, яка заповнена цементною матрицею.

Тобто мікроскопічний аналіз структури досліджених легких бетонів показав наявність активної взаємодії пористого заповнювача з цементною матрицею, а також виявив механізми кольматації пор і тріщин в зовнішній оболонці заповнювача і контактній зоні. Це, зокрема, підтверджує ефективність запропонованого технологічного прийому обробки заповнювача, а також використаних рецептурних прийомів при управлінні структурою керамзитобетону, спрямованою на підвищення довговічності матеріалу.

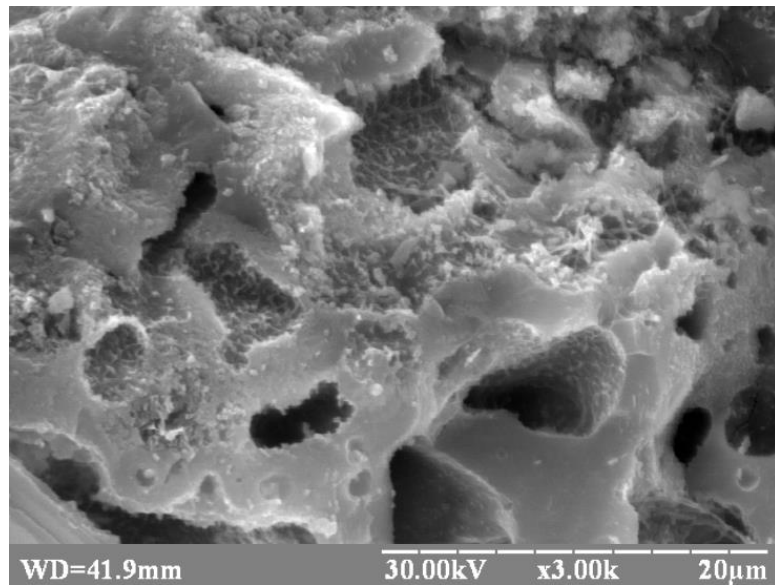
Для модифікованих керамзитобетонів, досліджених в другій серії експериментів, також проводився аналіз їхньої технологічної пошкодженості [14,15,133,136,137]. Значення коефіцієнта технологічної пошкодженості K_{II} (см/см²) визначалося на зразках у віці 2-х років. Усереднені значення даного показника наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

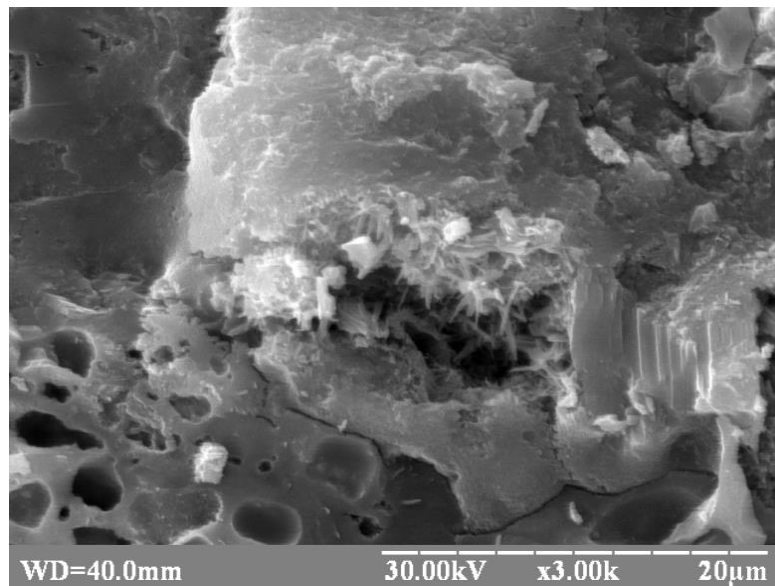
Значення коефіцієнту технологічної пошкодженості K_{II}
для керамзитобетонів другої серії експериментів (см/см²)

| | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| № точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| K_{II} | 2,24 | 2,28 | 2,32 | 2,46 | 2,43 | 2,32 | 2,29 | 2,32 | 2,41 |
| № точки | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| K_{II} | 2,34 | 2,20 | 2,32 | 2,34 | 2,17 | 2,29 | 2,40 | 2,26 | 2,29 |

Склад №2



Склад №5



Склад №12

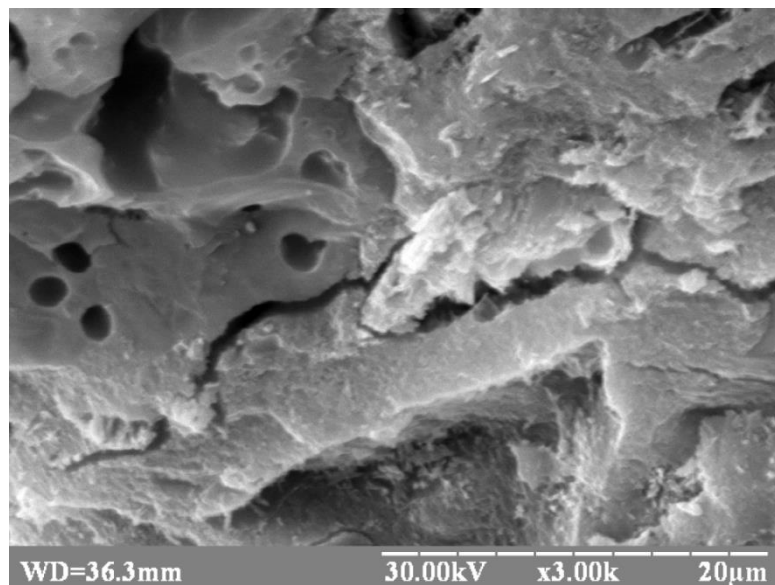


Рис.4.19. Результати електронної мікроскопії структури модифікованих легких бетонів (склади 2-ї серії експериментів).

ЕС-модель, побудована на даними таблиці 4.7, та яка відображає вплив варійованих у другій серії експериментів факторів на коефіцієнт технологічної пошкодженості легких бетонів K_{II} має вигляд:

$$\begin{aligned}
 K_{II} (\text{см/см}^2) = & 2,239 + 0,051x_1 + 0,014x_1^2 - 0,004x_1x_2 - 0,004x_1x_3 - 0,003x_1x_4 \\
 & - 0,021x_2 + 0,022x_2^2 + 0,0033x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \\
 & + 0,012x_3 + 0,041x_3^2 \pm 0,009x_3x_4 \\
 & + 0,026x_4 + 0,036x_4^2
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

За даною ЕС-моделлю збудовані показані на рис.4.20 діаграми, які відображають вплив факторів складу керамзитобетону на його коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{II} в зонах мінімуму і максимуму. При аналізі пошкодженості легкого бетону в цілому не можна однозначно сказати, що є цільовою функцією при управлінні його структурою – підвищення або зниження рівня K_{II} . Рівень K_{II} можна вважати інтегральним показником, що відображає процес утворення і розвитку внутрішніх поверхонь розділу і технологічних тріщин в композиті. Тобто коливання рівня цього показника свідчать про структурні зміни у композиті як в процесі початкового структуроутворення, так і в процесі адаптації структури до умов експлуатації матеріалу та навантажень на конструкцію [14,15].

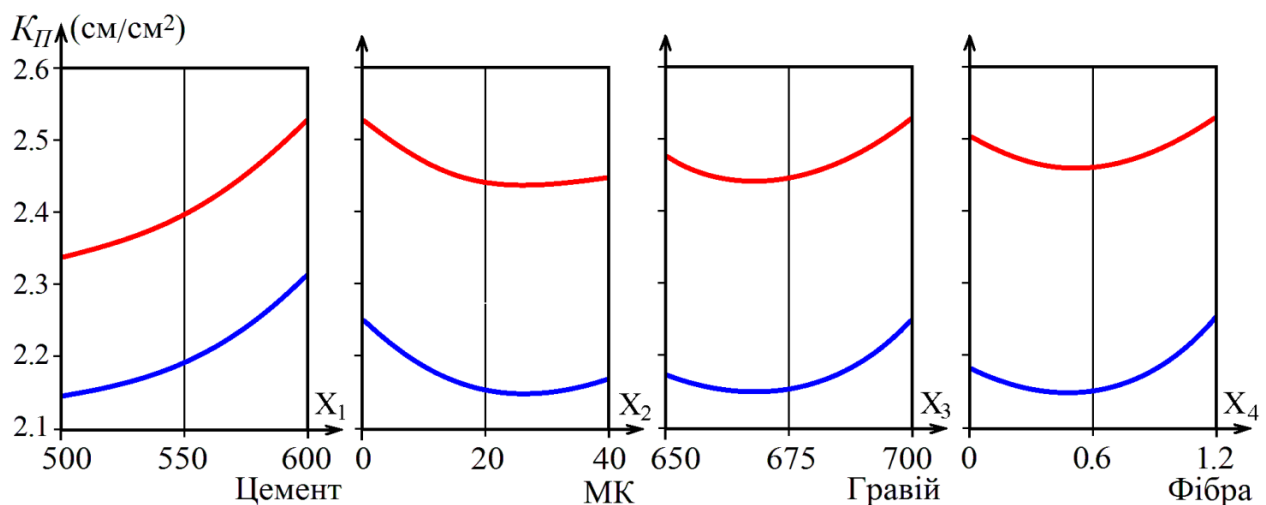


Рис.4.20. Вплив варійованих у другій серії експериментів факторів складу на коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{II} керамзитобетону в зонах мінімуму і максимуму

Аналіз діаграми на рис.4.20 показує, що в найбільшому ступені на рівень технологічної пошкодженості керамзитобетонів впливає кількість портландцементу, при цьому при підвищенні значення даного фактора K_{II} зростає. Це можна пояснити зростанням кількості води у бетонній суміші при підвищенні кількості цементу, що відповідно викликає певне збільшення початкових усадкових деформацій цементно-піщаної матриці. Фібра при варіюванні її кількості від 0 до $0,6 \text{ кг/м}^3$ дещо знижує технологічну пошкодженість легкого бетону, а при зростанні дозування дисперсної арматури до $1-1,2 \text{ кг/м}^3$ значення K_{II} вже навпаки несуттєво підвищується. Таку подвійну дію можна пояснити з одного боку здатністю дисперсної арматури утримувати окремі блоки композиту при формуванні структури, а з іншого боку її впливом В/Ц суміші. Вміст керамзитового гравію в легкому бетоні впливає на значення K_{II} несуттєво, але найменше значення даного показника спостерігається при кількості гравію $660-670 \text{ л/м}^3$. Кількість мікрокремнезему не лінійно впливає на K_{II} , при цьому при введенні даного модифікатора в кількості $25-30 \text{ кг/м}^3$ технологічна пошкодженість керамзитобетону є мінімальною.

Таким чином, проведений аналіз показав значний вплив запропонованих рецептурних методів підвищення довговічності керамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, а саме дисперсного армування і введення мікрокремнезему, на технологічну пошкодженість матеріалу. Це свідчить про вплив даних модифікаторів на процес формування внутрішніх поверхонь розділу і технологічних тріщин в композиті. Важливість даного впливу обумовлена, зокрема, здатністю даних поверхонь і тріщин переносити агресивні речовини в матеріалі та реагувати на зміну експлуатаційних умов [14,15].

Також в рамках даної роботи був проведений рентгенофазовий аналіз структури окремих зразків цементно-піщаної матриці досліджених у другій серії експериментів модифікованих керамзитобетонів. Рентгенівські дифрактограми даних зразків показані на рис.4.21. Ідентифікація сполук (фаз) дала наступні результати:

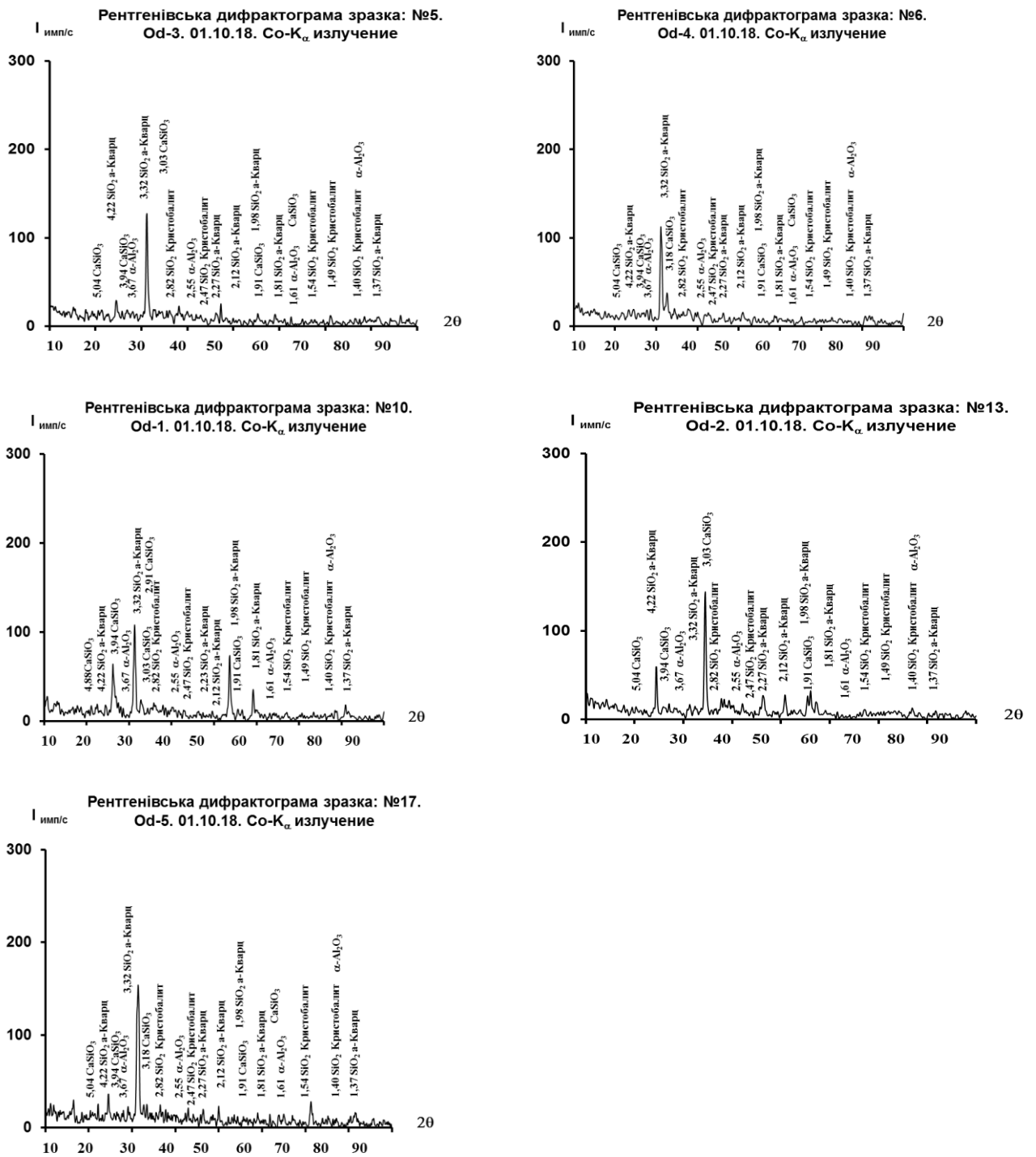


Рис.4.21. Рентгенівські дифрактограми цементно-піщаної матриці досліджених модифікованих керамзитобетонів (друга серія експериментів)

Зразок №5. Спостерігаються фази: CaSiO_3 (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 18%, SiO_2 а-кварц (№ за картотекою JCPDS 83–2465) – 63%, SiO_2 а-кристобаліт (№ за картотекою JCPDS 82–1233) – 9%, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 7%, невизначена фаза – 3%.

Зразок №6. Спостерігаються фази: CaSiO_3 (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 16%, SiO_2 а–кварц (№ за картотекою JCPDS 83–2465) – 62%, SiO_2 а–кристобаліт (№ за картотекою JCPDS 82–1233) – 11%, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 8%, невизначена фаза – 3%.

Зразок №10. Спостерігаються фази: CaSiO_3 (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 16%, SiO_2 а–кварц (№ за картотекою JCPDS 83–2465) – 65%, SiO_2 а–кристобаліт (№ за картотекою JCPDS 82–1233) – 8%, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 8%, невизначена фаза – 3%.

Зразок №13. Спостерігаються фази: CaSiO_3 (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 14%, SiO_2 а–кварц (№ за картотекою JCPDS 83–2465) – 72%, SiO_2 а–кристобаліт (№ за картотекою JCPDS 82–1233) – 5%, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 6%, невизначена фаза – 3%.

Зразок №17. Спостерігаються фази: CaSiO_3 (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 12%, SiO_2 а–кварц (№ за картотекою JCPDS 83–2465) – 72%, SiO_2 а–кристобаліт (№ за картотекою JCPDS 82–1233) – 8%, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (№ за картотекою JCPDS 45–156) – 5%, невизначена фаза – 3%.

Таким чином, всі досліджені зразки цементно-піщаної матриці мали досить близький фазовий склад, який очікувано переважно складався з кварцу як основного мінералу кварцового піску. При цьому зразок №13, до складу якого не входив мікрокремнезем, характеризувався дещо меншою кількістю CaSiO_3 і кристобаліту. Також меншою кількістю фази CaSiO_3 характеризувався зразок №17, що можна пояснити меншою кількістю портландцементу в його складі. Тобто проведений рентгенофазовий аналіз підтвердив вплив мікрокремнезему як пуцоланового компоненту на процеси гідратації портландцементу в досліджених модифікованих легких бетонах.

В цілому проведений різними методами аналіз показав високу ефективність запропонованих рецептурних і технологічних методів при управлінні структурою легких бетонів, спрямованою на покращення їх механічних властивостей та підвищення довговічності. Зокрема підтверджено

краще проникнення в'язучого в порожнини пористого заповнювача при здійсненні технологічної операції його обробки цементною суспензією.

4.6 Механічні властивості, довговічність та кольорова гама декоративних конструкційних керамзитобетонів

Однією з особливостей конструкцій гідротехнічних споруд є складність влаштування їх оздоблення. Відповідно застосування декоративних бетонів є найбільш практичним а іноді навіть єдиним методом підвищення архітектурної виразності подібних конструкцій. Надати декоративні властивості бетонам на пористих заповнювачах можна різними методами, при цьому одним з найпростіших і ефективніших – це застосування кольорових пігментів для зміни кольору матеріалу [306]. Використання безпосередньо готових кольорових цементів для конструкцій гідротехнічних споруд є практично неможливим через не забезпечену стійкість таких в'язучих до сульфатної корозії та деяких інших видів агресивних впливів, які є типовими для даних споруд.

На четвертому етапі роботи досліджувалися властивості, довговічність та кольорова гама декоративних легких конструкційних керамзитобетонів, які можуть зокрема бути використаними в якості суднобудівних. Для зміни кольорової гама легкого бетону застосовувалися неорганічні залізоокисні синтетичні пігменти торгової марки Bayferrox: червоний пігмент IOX R03, основна речовина цього пігменту Fe_2O_3 , а також жовтий пігмент IOX Y02, основна речовина даного пігменту $FeO(OH)$. Дослідження властивостей декоративних конструкційних керамзитобетонів проводилися на двох паралельних серіях зразків.

Перша серія виготовлялася за традиційною для керамзитобетонів технологією. Тобто у змішувач послідовно подавалася вода з розчиненою в ній добавкою-пластифікатором і керамзитовий гравій. Далі, після 30..45 секунд перемішування (насичення гравію водою), подавався цемент і пісок. Залізоокисні пігменти розмішувалися з цементом в сухому стані завчасно, що

було необхідно для забезпечення рівномірності їх розподілу в матеріалі. Таким чином, пористий керамзитовий гравій насичувався переважно водою, а загальна тривалість перемішування складала в середньому п'ять хвилин.

Друга серія виготовлялася з застосуванням технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією. Для цього у змішувач послідовно подавалося 90% від необхідної на заміс кількості води з розчиненими в ній 50% добавки-пластифікатору та 30% від необхідної кількості цементу і ця суспензія перемішувалася приблизно одну хвилину. Далі у змішувач, де знаходилася суспензія, подавався керамзитовий гравій і перемішування продовжувалося ще одну хвилину. Після цього подавалася решта цементу, пісок і решта води з розчиненою добавкою (теж 50%). В даному випадку залізоокисні пігменти розмішувалися завчасно з 70% цементу в сухому стані, тобто у суспензію, яка використовувалася для насичення гравію, пігмент не вводився. Розділення введення добавки-пластифікатору на дві порції було обумовлено тим, що цементна суспензія вимовлялася не зі всією кількістю необхідного цементу для розподілу пігменту в його решті. Таким чином пористий керамзитовий гравій насичувався цементною суспензією, а загальна тривалість перемішування складала в середньому шість хвилин, тобто на хвилину довше, ніж для контрольної серії.

У кожній серії виготовлялося по п'ять партій зразків з різними видами та кількістю пігменту. Всі досліджені бетони мали рівну кількість портландцементу – 500 кг/м^3 , і керамзитового гравію – 670 л/м^3 . У всіх складах застосовувалася добавка-суперпластифікатор С-3 в кількості 0,8% від маси цементу. Для забезпечення рівного розрахункового об'єму суміші кількість піску корегувалася в залежності від застосування у складі легкого бетону пігменту. Один склад (одна партія зразків під №1) у кожній серії був контрольним, тобто без пігменту. Склади №2 і №3 включали червоний пігмент, 10 і 20 кг/м^3 відповідно, аклади №4 і №5 – жовтий пігмент, також відповідно 10 і 20 кг/м^3 . Склади всіх досліджених керамзитобетонів наведені в таблиці 4.8.

Склади досліджених конструкційних
декоративних і контрольних керамзитобетонів

| № партії в кожній з серій | №1, контроль | №2, червоний | №3, червоний | №4, жовтий | №5, жовтий |
|---------------------------|-----------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Цемент | 500 кг/м ³ | | | | |
| Керамзит | 670 л/м ³ | | | | |
| Пісок | 665 кг/м ³ | 655 кг/м ³ | 645 кг/м ³ | 653 кг/м ³ | 641 кг/м ³ |
| С-3 | 4 кг/м ³ | | | | |
| Пігмент | - | Fe ₂ O ₃ 10 кг/м ³ | Fe ₂ O ₃ 20 кг/м ³ | FeO(OH) 10 кг/м ³ | FeO(OH) 20 кг/м ³ |

В якості компонентів бетону використовувалися: сульфатостійкий портландцемент виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент», керамзит фракції 5-10 мм, кварцовий пісок, добавка суперпластифікатор С-3, неорганічні залізоокисні синтетичні пігменти, які описані вище. Всі суміші мали рівну рухомість П2 (ОК від 5 до 6 см), що досягалося підбором кількості води. Значення В/Ц для п'яти досліджених в кожній із серій складів, а також значення фізико-механічних властивостей цих конструкційних декоративних і контрольних керамзитобетонів наведені у таблиці 4.9.

Можна зробити висновок, що зміна технології приготування з традиційної на технологію з обробкою гравію цементною суспензією не вплинула на водопотребу і відповідно В/Ц керамзитобетонної суміші. По окремих складах різниця у значеннях В/Ц між серіями не перевищує 2%. Проте введення пігменту природно викликає необхідність незначного, на 2..6%, підвищення В/Ц суміші через додаткову водопотребу цього дрібнодисперсного компоненту, що є відомим у бетонознавстві ефектом [306,307].

Аналіз міцності досліджених керамзитобетонів при стиску показав, що при введенні як червоного, так і жовтого залізоокисного пігменту в кількості 10 кг/м³, цей показник практично не змінюється і може навіть несуттєво, на 2-5%, зростати попри підвищення В/Ц. При введенні більшої кількості пігменту

(20 кг/м³) міцність при стиску декоративних керамзитобетонів є в середньому на 8% нижче за міцність контрольних складів.

Таблиця 4.9

Фізико-механічні властивості досліджених конструкційних
декоративних і контрольних керамзитобетонів

| Показник | склад №1 | склад №2 | склад №3 | склад №4 | склад №5 |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| В/Ц | 0,347 / 0,354 | 0,368 / 0,358 | 0,367 / 0,360 | 0,354 / 0,358 | 0,366 / 0,366 |
| Міцність при стиску, МПа | 31,3 / 32,0 | 31,6 / 32,4 | 27,9 / 28,5 | 32,1 / 33,6 | 29,4 / 31,3 |
| Міцність на розтяг при згині, МПа | 6,14 / 6,11 | 5,94 / 6,14 | 6,07 / 6,13 | 6,31 / 6,36 | 6,13 / 6,17 |
| Середня густина, при рівноважній вологості, кг/м ³ | 1790 / 1810 | 1770 / 1785 | 1770 / 1780 | 1770 / 1780 | 1770 / 1780 |
| Морозостійкість (циклів) | F500 | | | | F450 |
| Водонепроникність | W8/W10 | W10/W10 | W8/W10 | W10/W10 | W8/W10 |

* – у чисельнику значення показника при приготуванні суміші за традиційною технологією, у знаменнику – при застосуванні обробки пористого гравію цементною суспензією

За рахунок обробки пористого гравію цементною суспензією міцність досліджених конструктивних декоративних і контрольних керамзитобетонів зростала на 1-1,5 МПа. По окремих складах це зростання було в межах від 4 до 7%, тобто було не дуже суттєвим, але відчутним. Це можна пояснити переважно тим, що завдяки технологічній необхідності попереднього перемішування пігменту з цементом для обробки гравію використовувалася суспензія з відносно невеликою кількістю в'язучого, що дещо обмежило її ефективність. Також в даних бетонах використовувався гравій фракції 5-10 мм, тобто доволі дрібний. Відомо, що у міру зменшення розміру (фракції) відносно маломіцного пористого заповнювача вплив його міцності на міцність легкого бетону знижується [27]. Відповідно процедура попередньої обробки

керамзитового гравію цементною суспензією, яка підвищує його міцність, не досить суттєво впливає на міцність композиту в цілому, хоч позитивна тенденція і спостерігається для всіх складів. Міцність на розтяг при згині досліджених декоративних керамзитобетонів практично не відрізнялася від міцності контрольних складів, а для бетонів з вмістом 10 кг/м^3 $\text{FeO}(\text{OH})$ (жовтого пігменту) була навіть на 4..5% вищою. Такий ефект пояснюється тим, що, по-перше, В/Ц суміші мало впливає на величину міцності на розтяг, а по-друге, властивістю пігментів частково виконувати роль мікронаповнювача [308].

Аналіз впливу пігментів і попередньої обробки заповнювача на середню густину досліджених матеріалів показав, що густина декоративних керамзитобетонів є на $20\text{-}30 \text{ кг/м}^3$ нижчою за густину аналогічних контрольних складів, що пояснюється різним В/Ц сумішей. Матеріали на обробленому суспензією гравії мають на $10\text{-}15 \text{ кг/м}^3$ більшу середню густину завдяки кращому насиченню контактної зони керамзиту в'язучим.

Також для декоративних і контрольних керамзитобетонів визначалася їхня морозостійкість і водонепроникність як основні показники, що забезпечують довговічність даних матеріалів. Аналіз показав, що технологічна операція попередньої обробки керамзитового гравію цементною суспензією не впливає на морозостійкість досліджених легких бетонів, що фактично співпадає з результатами описаних вище досліджень подібних матеріалів (п.4.3). При цьому майже всі дані легкі бетони мали досить високий показник морозостійкості – F500. Морозостійкість на рівні F450, що теж можна вважати високим рівнем даного показника, зафіксована лише для складу №5, тобто при введенні жовтого пігменту в кількості 20 кг/м^3 .

Водонепроникність досліджених декоративних і контрольних керамзитобетонів знаходилася в діапазоні W8..W10. За рахунок технологічної операції попередньої обробки керамзитового гравію цементною суспензією водонепроникність контрольних складів, а також декоративних бетонів з максимальною кількістю залізоокісного пігменту підвищувалася на одну марку, що також близько до наведених вище результатів досліджень подібних легких

бетонів (п.4.3). Для декоративних бетонів з кількістю пігменту 10 кг/м^3 вплив обробки гравію на рівень W з досяжною для методики мокрої плями точністю не виявлено. Це можна пояснити здатністю пігменту виконувати в бетоні роль мікронаповнювача, який сприяє підвищенню водонепроникності [309,310], а також меншою концентрацією в'язучого в суспензії. При цьому для бетонів з меншою кількістю пігменту його позитивний вплив ймовірно є вищим за вплив даного пігменту на В/Ц суміші.

Для декоративних бетонів важливою характеристикою є не лише їх фізико-механічні властивості, а і кольорова гама, яка власне в значній мірі і визначає функціональну придатність даних матеріалів. Кольорова гама досліджених декоративних керамзитобетонів аналізувалася наступним чином. Зразки-куби фотографувалися при однаковому освітленні. Далі на цифровій фотографії відокремлювалася область верхньої безпосередньо при фотографуванні грані зразка. У даній області проводилося усереднення кольору завдяки застосуванню фільтру «average» програми Photoshop. Для цього усередненого кольору визначалося його значення за схемами RGB та CMYK. Для кожного складу аналізувалося по шість зразків, після чого вираховувалися середні значення показників кольору. Така методика дозволяла уникнути суб'єктивності при аналізі декоративних властивостей бетону. Зовнішній вигляд зразків декоративних і контрольних керамзитобетонів показано на рис.4.22.

Можна відмітити, що обидві схеми (RGB і CMYK) є пов'язаними та не є ідеальними для аналізу кольорової гама бетону, тому що передбачають наявність відповідно чорного або білого фону. При використанні у якості в'язучого білого цементу схему CMYK можна вважати більш зручною. Проте при використанні сірого цементу фон має приблизно рівномірне забарвлення всіма основними кольорами схеми. Відповідно на нашу думку методично вірніше порівнювати інтенсивність необхідного кольору з іншими, а точніше з сумою $R+G+B$. Показники кольорів у схемі RGB досліджених керамзитобетонів наведені у таблиці 4.10.



Рис.4.22. Зовнішній вигляд зразків декоративних і контрольних керамзитобетонів

Таблиця 4.10

Показники кольорів досліджених конструкційних декоративних і контрольних керамзитобетонів у схемі RGB

| Показник | №1, контроль | №2, Fe ₂ O ₃ 10 кг/м ³ | №3, Fe ₂ O ₃ 20 кг/м ³ | №4, FeO(OH) 10 кг/м ³ | №5, FeO(OH) 20 кг/м ³ |
|----------|-----------------|--|--|--|--|
| Red | 200 / 199 | 207 / 209 | 199 / 207 | 205 / 206 | 211 / 211 |
| Green | 207 / 209 | 181 / 176 | 156 / 155 | 196 / 200 | 198 / 200 |
| Blue | 198 / 194 | 171 / 164 | 143 / 148 | 176 / 176 | 168 / 161 |

* - у чисельнику значення показника при приготуванні суміші за традиційною технологією, у знаменнику – при застосуванні обробки пористого гравію цементною суспензією

Аналіз отриманих даних дозволяє сказати, що у міру зростання кількості червоного залізоокисного пігменту (Fe₂O₃) у бетоні відсоток червоної складової (Red) у сумі трьох складових кольорів схеми R+G+B очікувано зростає. Якщо у контрольних бетонах він був на рівні 33,1%, то для складу №2 це вже 37,0 і 38,1% відповідно для традиційної технології та технології з обробкою гравію цементною суспензією, а для складу №3 – 40,0 і 40,6%. Жовтий колір у схемі RGB є сумою червоної і зеленої складової за умови що R ≈ G. При введенні 10 кг/м³ жовтого пігменту, тобто для складу №4, відсоток Red+Green у сумі R+G+B дорівнює 69,5 і 69,8%, а при введенні 20 кг/м³ жовтого пігменту (склад

№5) – 70,8 і 71,9% відповідно для традиційної технології та технології з обробкою гравію цементною суспензією. Тобто при підвищенні кількості пігменту насиченість декоративного бетону відповідним кольором прогнозуємо зростає.

Також важливим технологічним ефектом можна вважати факт дещо кращих показників кольору при використанні технології з обробки пористого гравію цементною суспензією. Тобто крім впливу на якість сумісної роботи заповнювача і матриці цей прийом оказав певний вплив на кольорову гаму. Це можна пояснити декілька більшим вмістом пігменту саме у розчинній частині керамзитобетону, тому що насичення гравію проводилося суспензією без пігменту. При традиційній же технології приготування суміші частина пігменту залишається в порожнинах і контактній зоні заповнювача. Крім того, додатковий, хоч і не суттєвий вплив на колір оказує те, що при традиційній технології заповнювач насичується переважно водою, відповідно в контактній зоні концентрація цементу є меншою, а у розчині – більшою в порівнянні з технологією з обробкою пористого гравію цементною суспензією. Проте справедливо відмітити, що означені переваги технології з застосуванням обробки пористого гравію цементною суспензією будуть зберігатися переважно саме для конструкційних керамзитобетонів, в яких витрати цементу знаходяться на досить високих рівнях. Відповідно, міцність таких композитів обмежена переважно міцністю пористого гравію, як «найслабшого» компоненту.

Дуже важним показником довговічності та якості в цілому для декоративних бетонів є стійкість їх декоративних властивостей, фактично стійкість кольору в часі. В даних дослідженнях аналіз стійкості декоративних властивостей бетонів проводився методом порівняння кольору зразків, що експонувалися 1 рік під впливом сонячного випромінювання, та кольору аналогічних зразків, що експонувалися без доступу світла. Аналіз показав, що після 1 року експонування на повністю відкритому сонцю просторі зміна кольорової гами декоративного керамзитобетону не перевищувала 4-5%, що

свідчить про прийнятну довговічність даних матеріалів з позиції збереження їх декоративних властивостей.

Таким чином, міцність, морозостійкість і водонепроникність декоративних конструкційних керамзитобетонів з залізоокисними пігментами практично не відрізняється від рівня даних показників якості контрольних бетонів аналогічних складів. За рахунок технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці відчутно зростала міцність при стиску досліджених керамзитобетонів, а також на величину до однієї марки зросла їх водонепроникність. Також за рахунок обробки гравію покращувалась насиченість кольору декоративних бетонів, яка аналізувалася за цифровими фото. При цьому обробка не вплинула на величину В/Ц сумішей рівної рухомості, на міцність керамзитобетонів на розтяг при згині, а також на його морозостійкість.

Тобто модифіковані декоративні конструкційні керамзитобетони, приготовані з використанням технологічного прийому обробки пористого заповнювача, мають високу довговічність, зокрема стійкість кольорової гама, за рахунок чого можуть бути використані в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд для яких існує потреба придання певного кольору для отримання необхідної архітектурної виразності. Наприклад, в якості суднобудівних бетонів для виробництва плавучих споруд (готелів, домів, ресторанів тощо).

Висновки за 4-м розділом

1. Досліджено вплив рецептурних методів управління (введення суперпластифікатору, мікрокремнезему, фібри і залізоокисних кольорових пігментів) в поєднанні з технологічним прийомом обробки поверхні заповнювача цементної суспензією як методу покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці на структуру, властивості та

довговічність керамзитобетонів з різною кількістю в'язучого для тонкостінних гідротехнічних споруд.

2. За рахунок використання модифікаторів і дисперсного армування, а також застосування технологічного прийому попередньої обробки гравію цементною суспензією, досліджені керамзитобетони мають міцність при стиску до 42..44 МПа, міцність на розтяг при згині до 7 МПа. При введенні 30-35 кг/м³ мікрокремнезему міцність при стиску керамзитобетонів підвищується в середньому на 2 МПа (5-7%), а міцність на розтяг при згині – на 0,3 МПа (6-8%). При збільшенні кількості добавки С-3 до 0,8-1% за рахунок зниження В/Ц суміші міцність при стиску досліджених легких бетонів підвищується на 2-2,5 МПа. Міцність розроблених модифікованих керамзитобетонів задовольняє вимогам до матеріалів для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема вимогам Морського реєстру до суднобудівних керамзитобетонів, які використовуються при будівництві плавучих залізобетонних споруд.

3. Водонепроникність керамзитобетонів варіюється в діапазоні від W4 до W14 і на її рівень суттєво впливає кількість портландцементу. За рахунок введення 30-35 кг/м³ мікрокремнезему водонепроникність легких бетонів підвищується на одну марку і більше. При збільшенні кількості суперпластифікатору С-3 до 0,8-0,9% за рахунок зниження В/Ц рівень W підвищується на величину до однієї марки. Контрольні склади керамзитобетону, приготовані без обробки пористого гравію цементною суспензією, мали водонепроникність на одну марку нижче водонепроникності аналогічних складів, приготованих з використанням технологічного прийому обробки гравію суспензією.

4. Морозостійкість досліджених керамзитобетонів знаходиться в діапазоні від F400 до F550, фіброкерамзитобетонів – від F450 до F600. В найбільшій мірі на морозостійкість керамзитобетонів впливає кількість портландцементу. За рахунок введення мікрокремнезему рівень F підвищується приблизно на 50 циклів, аналогічний ефект досягається за рахунок застосування дисперсного

армування поліпропіленою фіброю. Також на 50 циклів зростає морозостійкість керамзитобетонів за рахунок підвищення кількості добавки С-3 до 0,8-0,85%.

5. Середня густина досліджених керамзитобетонів є на 500..600 кг/м³ меншою в порівнянні з середньою густиною важких бетонів, що дозволяє за рахунок їх використання підвищити ефективність тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема підвищити вантажопідйомність плавучих залізобетонних споруд. Середня густина даних керамзитобетонів у повітряно-сухому та водонасиченому станах задовольняє вимогам галузевих стандартів на суднобудівний бетон.

6. Для забезпечення підвищеного рівня міцності та довговічності керамзитобетонів можна рекомендувати вводити до їх складу мікрокремнезем у кількості 30-35 кг/м³ і добавку С-3 у кількості 0,8-0,9%. Додаткового підвищення морозостійкості легкого бетону досягається за рахунок застосування дисперсного армування. Досягнутий рівень довговічності та міцності модифікованих керамзитобетонів дозволяє рекомендувати дані матеріали для конструкцій тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних платформ, доків, будинків і готелів.

7. Встановлена можливість застосування залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей легких бетонів при забезпеченні їх міцності та довговічності. Міцність, водонепроникність і морозостійкість декоративних конструкційних керамзитобетонів з залізоокисними пігментами практично не відрізняється від даних показників якості контрольних бетонів. За рахунок технологічного прийому обробки гравію цементною суспензією покращується насиченість кольору декоративних бетонів, яка аналізувалася за цифровими фото, відчутно зростає міцність бетону при стиску та на одну марку зростає його водонепроникність.

8. Мікроскопічний аналіз структури легких бетонів показав наявність кольматації пор і тріщин в зовнішній оболонці заповнювача і контактній зоні, чим підтвердив ефективність технологічного прийому обробки заповнювача і

використаних рецептурних методів, спрямованих на підвищення довговічності матеріалу, зокрема за рахунок покращення сумісної роботи заповнювача і матриці. Мікроскопічний аналіз шліфів керамзитобетону підтвердив проникнення цементної суспензії в пори заповнювача при його обробці в початковій стадії перемішування суміші. В керамзиті, який знаходиться в бетоні, приготованому з використанням попередньої обробки гравію, переважна частка пор на глибині до 1,2-1,6 мм є закольматованими. Рентгенофазовий аналіз підтвердив вплив мікрокремнезему на процеси гідратації портландцементу в досліджених модифікованих легких бетонах.

9. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [298,311-320].

РОЗДІЛ 5

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ СУДНОБУДІВНИХ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ І ФІБРОКЕРАМЗИТОБЕТОНІВ НА ГІДРОФОБІЗОВАНОМУ ГРАВІЇ

5.1 План проведення експериментів і фактори, які варіювалися при дослідженнях

Як показано в п.2.3, до суднобудівних бетонів висуваються найбільш високі вимоги щодо їхньої довговічності в жорстких умовах експлуатації, які є типовими для плавучих залізобетонних споруд. При цьому для частини конструкцій даних споруд окремою суттєвою вимогою є забезпечення мінімальної можливої вологості бетону «сухого» боку конструкцій. Це важливо з точки зору безпеки, режиму роботи обладнання і комфортності перебування персоналу. Бетони, повністю аналогічні суднобудівним, можуть бути використані не лише для тонкостінних конструкцій залізобетонних плавучих споруд, а і для інших густоармованих конструкцій гідротехнічних споруд, до матеріалу яких висуваються високі вимоги щодо міцності, довговічності та середньої густини, зокрема при різних типах впливу водного середовища (п.1.6).

Як зазначалося в п.3.2, гідрофобізація поверхні пористого заповнювача є одним з методів спрямованого впливу на структуру легкого бетону, що дозволяє покращити комплекс фізико-механічних властивостей матеріалу та підвищити його довговічність. Відповідно на п'ятому етапі роботи досліджувався вплив комплексної модифікації кольматуючою і пластифікуючою добавками, а також застосування технологічного методу гідрофобізації пористого гравію на експлуатаційні властивості та довговічність суднобудівних керамзитобетонів.

Дослідження властивостей суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів, зокрема на гідрофобізованому гравії, проводилися з використанням методів планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання [240-243]. Варіювалися наступні фактори складу:

X_1 – кількість сульфатостійкого портландцементу Новоамвросіївського цементного заводу, від 400 до 600 кг/м³.

Вибір фактора обумовлений необхідністю дослідження суднобудівних керамзитобетонів різних класів (марок), а діапазон варіювання прийнятий виходячи із даних аналізу технічної літератури і попередніх досліджень.

X_2 – концентрація кремнійорганічної рідини 136-157М (колишня ГКР-94м) в емульсії при гідрофобній обробці гравію, від 0 до 1,6%.

Даний фактор обраний з урахуванням необхідності дослідження властивостей легких бетонів як на гідрофобізованому пористому гравії, так і аналогічних бетонів на гравії без обробки. Діапазон варіювання прийнятий виходячи з даних літературного аналізу з урахуванням жорстких умов експлуатації плавучих споруд, а також даних попереднього експерименту, описаного в п.3.3. Для приготування емульсії необхідної концентрації спочатку готувалася 50% водна емульсія кремнійорганічної рідини. Дана емульсія готувалася наступним чином. До відміряного об'єму холодної води додавався желатин з розрахунку отримання 1% розчину, тобто 1 г желатину на 99 г води. Після введення желатину воду нагрівали до 60..70 °С і підтримували температуру до повного розчинення желатину. Потім в емульгатор (швидкісний змішувач малої місткості) вводилася кремнійорганічна рідина і охолоджений до кімнатної температури 1% водний розчин желатину в рівному ваговому співвідношенні, після чого емульсію перемішували до отримання однорідного стану. На основі 50% емульсії безпосередньо перед обробкою гравію готувався водний розчин (емульсія) кремнійорганічної рідини необхідної концентрації – 0,8 або 1,6%. Обробка керамзитового гравію проводилася методом його короткочасного занурення в емульсію з послідуною сушкою на повітрі до досягнення рівноважної вологості, що займало 4..5 діб. При цьому на поверхні гравію утворювалася гідрофобна плівка кремнійорганічного полімеру.

X_3 – кількість кольматуючої добавки Пенетрон Admix (Пенетрон А), від 0 до 2% від маси цементу.

Добавка Пенетрон А успішно застосовується для забезпечення довговічності важких суднобудівних бетонів [150,321], відповідно фактор був обраний з метою виявлення ефективності застосування даної кольматуючої добавки у суднобудівних керамзитобетонах. Діапазон варіювання обраний з урахуванням даних попередніх досліджень і рекомендацій виробника.

X_4 – кількість суперпластифікатору С-3, від 0,5 до 0,9% від маси цементу.

Кількість добавки варіювалася в діапазоні, близькому до оптимального за результатами попередніх експериментів, інших етапів дослідження, а також даних виробника. Фактор був обраний з метою визначення раціональної кількості добавки в суднобудівних керамзитобетонах різної міцності, зокрема для бетонів на гідрофобізованому ґравії. Комплексний модифікатор Пенетрон А + С-3 показав свою ефективність при вирішенні завдання підвищення довговічності важких суднобудівних бетонів завдяки забезпеченню їх високої водонепроникності і морозостійкості без зниження технологічності суміші. Комплексні модифікатори Пенетрон А + суперпластифікатор С-3 і Пенетрон А + С-3 + наповнювач розроблені [150,297,321,322] та запатентовані науковою школою професора А.В. Мішутіна [296,323], автор даної роботи є одним з розробників.

X_5 – кількість поліпропіленової фібри Ваусон, від 0 до 1,2 кг/м³.

Вибір фактору обґрунтовується необхідністю дослідження суднобудівних керамзитобетонів і аналогічних їм фіброкерамзитобетонів, зокрема на гідрофобізованому ґравії. Поліпропіленова фібра була обрана як не схильна до корозії та з врахуванням позитивного досвіду застосування подібної фібри у фібробетонах для тонкостінних конструкцій [323,324]. Діапазон варіювання фактору обрано за результатами проведених раніше досліджень дисперсіоармованих бетонів.

Експеримент проводився за 5-ти факторним 27-ми точковим D-оптимальним планом, перехід до кодованих перемінних виконувався за типовою методикою [242,243]. План експерименту та склади досліджених суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів показані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

План експерименту та склади досліджених
суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

| № | Рівні факторів | | | | | Компоненти керамзитобетонної суміші | | | | | | кременіорганічна рідина у емульсії, % |
|----|-------------------------|---|--------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| | x ₁ (цемент) | x ₂ (кременіор- ганічна рідина) | x ₃ (Пенетрон А) | x ₄ (С-3) | x ₅ (Фібра) | Цемент, кг/м ³ | Керамзитовий гравій, л | Пісок, кг/м ³ | Пенетрон А, кг/м ³ | С-3, кг/м ³ | Фібра, кг/м ³ | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 400 | 690 | 730 | 0 | 2 | 1,2 | 0 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 400 | 690 | 735 | 0 | 3,6 | 0,0 | 0 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 400 | 690 | 725 | 8 | 2 | 0,0 | 0 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 400 | 690 | 730 | 8 | 3,6 | 1,2 | 0 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 400 | 690 | 730 | 0 | 2 | 0,0 | 1,6 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 400 | 690 | 730 | 0 | 3,6 | 1,2 | 1,6 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 400 | 690 | 725 | 8 | 2 | 1,2 | 1,6 |
| 8 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 400 | 690 | 725 | 8 | 3,6 | 0,0 | 1,6 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 600 | 655 | 620 | 0 | 3 | 0,0 | 0 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 600 | 655 | 625 | 0 | 5,4 | 1,2 | 0 |
| 11 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 600 | 655 | 610 | 12 | 3 | 1,2 | 0 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 600 | 655 | 615 | 12 | 5,4 | 0,0 | 0 |
| 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 600 | 655 | 620 | 0 | 3 | 1,2 | 1,6 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 600 | 655 | 625 | 0 | 5,4 | 0,0 | 1,6 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 600 | 655 | 610 | 12 | 3 | 0,0 | 1,6 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 600 | 655 | 615 | 12 | 5,4 | 1,2 | 1,6 |
| 17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 655 | 615 | 6 | 4,2 | 0,6 | 0,8 |
| 18 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 400 | 690 | 730 | 0 | 2,8 | 0,6 | 0,8 |
| 19 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 500 | 670 | 675 | 5 | 3,5 | 0,6 | 1,6 |
| 20 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 500 | 670 | 675 | 5 | 3,5 | 0,6 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 500 | 670 | 670 | 10 | 3,5 | 0,6 | 0,8 |
| 22 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 500 | 670 | 680 | 0 | 3,5 | 0,6 | 0,8 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 500 | 670 | 680 | 5 | 4,5 | 0,6 | 0,8 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 500 | 670 | 675 | 5 | 2,5 | 0,6 | 0,8 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 500 | 670 | 675 | 5 | 3,5 | 1,2 | 0,8 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 500 | 670 | 675 | 5 | 3,5 | 0,0 | 0,8 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 500 | 670 | 675 | 5 | 3,5 | 0,6 | 0,8 |

Обраний план проведення експерименту і варійовані фактори дозволяють провести дослідження ефективності використання модифікаторів і прийому гідрофобізації поверхні гравію з метою регулювання взаємодії між цементною матрицею і пористим заповнювачем на структуру, властивості та довговічність суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів.

5.2 Вплив складу на В/Ц керамзитобетонної суміші

Існуюча технологія виробництва конструкцій залізобетонних плавучих споруд з керамзитобетону вимагає забезпечення достатньої рухомості суміші в залежності від типу конструкції та методу її виготовлення. Для суднобудівних та інших керамзитобетонних сумішей рухомість визначається за осадкою конуса аналогічно рухомості сумішей з важкого бетону. Проте при рівних з важким бетоном значеннях осадки конусу легкість укладання і ущільнення керамзитобетонних сумішей фактично є вищою. Причиною цього є округла форма і незначна вага заповнювача, що дозволяє легко переміщувати суміш і укласти її в опалубку за рахунок застосування менших за інтенсивністю технологічних впливів.

Всі досліджені на даному етапі суміші мали рівну рухомість ОК = 3..4 см, що досягалося підбором кількості води замішування. Тобто водопотреба суміші залежала від складу бетону. Результати визначених рівнів водопотреби і В/Ц легкобетонних сумішей показані в таблиці 5.2. Також в таблиці наведені дані про механічні властивості досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів. За результатами визначення В/Ц сумішей рівної рухомості в 27-ми експериментальних точках була побудована ЕС-модель [242,243], що описує вплив варійованих факторів складу на даний показник:

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,337 - 0,061x_1 + 0,024x_1^2 + 0,020x_1x_2 - 0,006x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\
 & - 0,037x_2 + 0,019x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,004x_2x_4 \pm 0x_2x_5 \\
 & + 0,004x_3 \pm 0x_3^2 \pm 0,004x_3x_4 - 0,009x_3x_5 \\
 & - 0,013x_4 + 0,013x_4^2 \pm 0x_4x_5 \\
 & + 0,013x_5 \pm 0x_5^2 \qquad \qquad \qquad (5.1)
 \end{aligned}$$

Водопотреба і В/Ц сумішей, міцність, водонепроникність і морозостійкість досліджених керамзитобетонів в експериментальних точках

| № точки | Водопотреба, л/м ³ | В/Ц | Міцність при рівноважній вологості | | Міцність в водонасиченому стані | | Водонепроникність W (атм) | Морозостійкість (цикли) |
|---------|-------------------------------|-------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | | | при стиску $f_{ck,cube,n}$ (МПа) | на розтяг при згині $f_{ctk,n}$ (МПа) | при стиску $f_{ck,cube,w}$ (МПа) | на розтяг при згині $f_{ctk,w}$ (МПа) | | |
| 1 | 221 | 0,553 | 31,3 | 5,35 | 26,7 | 4,85 | 2 | 400 |
| 2 | 188 | 0,470 | 32,9 | 5,25 | 28,3 | 4,72 | 4 | 350 |
| 3 | 215 | 0,537 | 31,0 | 6,22 | 27,0 | 4,82 | 6 | 350 |
| 4 | 205 | 0,512 | 32,7 | 5,61 | 28,2 | 5,29 | 6 | 400 |
| 5 | 154 | 0,384 | 24,3 | 5,10 | 21,7 | 4,81 | 6 | 400 |
| 6 | 156 | 0,390 | 26,6 | 5,45 | 23,8 | 5,10 | 6 | 450 |
| 7 | 166 | 0,416 | 24,7 | 5,35 | 21,9 | 5,08 | 6 | 450 |
| 8 | 160 | 0,401 | 26,0 | 5,02 | 23,1 | 4,82 | 6 | 450 |
| 9 | 209 | 0,348 | 43,0 | 7,03 | 38,1 | 6,46 | 8 | 450 |
| 10 | 211 | 0,351 | 45,6 | 7,15 | 40,8 | 6,52 | 8 | 550 |
| 11 | 224 | 0,373 | 42,0 | 7,12 | 37,3 | 6,46 | 10 | 550 |
| 12 | 199 | 0,332 | 45,9 | 6,56 | 40,9 | 5,96 | 10 | 500 |
| 13 | 212 | 0,353 | 32,4 | 5,79 | 29,4 | 5,34 | 10 | 600 |
| 14 | 169 | 0,281 | 33,5 | 5,51 | 30,5 | 5,24 | 10 | 550 |
| 15 | 185 | 0,309 | 34,1 | 6,17 | 33,0 | 5,80 | 12 | 550 |
| 16 | 182 | 0,303 | 35,6 | 6,07 | 31,9 | 5,63 | 12 | 650 |
| 17 | 190 | 0,317 | 44,2 | 6,60 | 40,5 | 6,25 | 10 | 600 |
| 18 | 158 | 0,394 | 34,9 | 5,38 | 31,2 | 5,06 | 8 | 500 |
| 19 | 173 | 0,345 | 34,0 | 5,79 | 30,9 | 5,46 | 10 | 500 |
| 20 | 184 | 0,367 | 40,5 | 5,81 | 35,3 | 5,32 | 8 | 500 |
| 21 | 170 | 0,340 | 39,8 | 5,93 | 36,3 | 5,54 | 10 | 550 |
| 22 | 166 | 0,332 | 39,6 | 5,77 | 36,2 | 5,39 | 8 | 500 |
| 23 | 173 | 0,346 | 38,5 | 5,78 | 34,4 | 5,33 | 10 | 550 |
| 24 | 177 | 0,354 | 37,2 | 5,59 | 32,8 | 5,14 | 8 | 500 |
| 25 | 180 | 0,360 | 39,8 | 6,05 | 35,5 | 5,58 | 8 | 550 |
| 26 | 162 | 0,324 | 40,1 | 5,80 | 36,0 | 5,36 | 10 | 500 |
| 27 | 167 | 0,334 | 40,0 | 5,91 | 35,9 | 5,49 | 8 | 550 |

Аналіз ЕС-моделі (5.1) і даних таблиці 5.2 дозволяє зробити висновок, що кількість добавки Пенетрон А несуттєво впливає на В/Ц легкобетонної суміші. Для більш детального аналізу впливу решти факторів складу суднобудівного керамзитобетону на його В/Ц за ЕС-моделлю (5.1) була побудована діаграма типу «квадрати на квадраті», яка показана на рис.5.1. При її побудові фактор X_3 фіксувався на середньому рівні ($x_3 = 0, 1\%$ добавки Пенетрон А). В якості несучого квадрата для діаграм обрано такі фактори: кількість портландцементу (x_1) і концентрація кремнійорганічної рідини при обробці гравію (x_2). Поля, що відображають вплив кількості добавки С-3 (x_4) і фібри (x_5), побудовані в дев'яти характерних точках. В поле несучого квадрату показані ізолінії мінімальних значень В/Ц суміші, які можуть бути досягнуті при фіксованій кількості портландцементу (x_1) і концентрації кремнійорганічної рідини (x_2) при варіюванні кількості суперпластифікатору С-3 і поліпропіленової фібри.

Аналіз показаної на рис.5.1 діаграми дозволяє сказати, що гідрофобізація поверхні гравію більш ефективно знижує В/Ц сумішею з кількістю цементу нижче 500 кг/м^3 . Це можна пояснити тим, що при великій кількості в'язучого з умов експерименту в суміш вводилася більша кількість суперпластифікатору С-3, який дозувався у відсотках від маси цементу. Крім того, при підвищеній кількості цементу дещо знижується обсяг гравію в керамзитобетоні. Тобто у міру збільшення кількості в'язучого вплив чинника поглинання гравієм води з суміші поступово знижується, відповідно дещо знижується і ефективність застосування прийому гідрофобізації поверхні даного пористого заповнювача.

В досліджених легкобетонних сумішах рівної рухомості при збільшенні кількості С-3 від 0,5 до 0,8% В/Ц відчутно знижується, подальше підвищення дозування суперпластифікатору практично не змінює водопотребу і відповідно В/Ц. При збільшенні кількості портландцементу В/Ц знижується, а при введенні фібри, навпаки, потрібне збільшення кількості води замішування на 7..9% для збереження технологічності суміші. Подібний вплив дисперсного армування на водопотребу пояснюється створенням тривимірної сітки, яка знижує деформаційні властивості суміші [150,299,300].

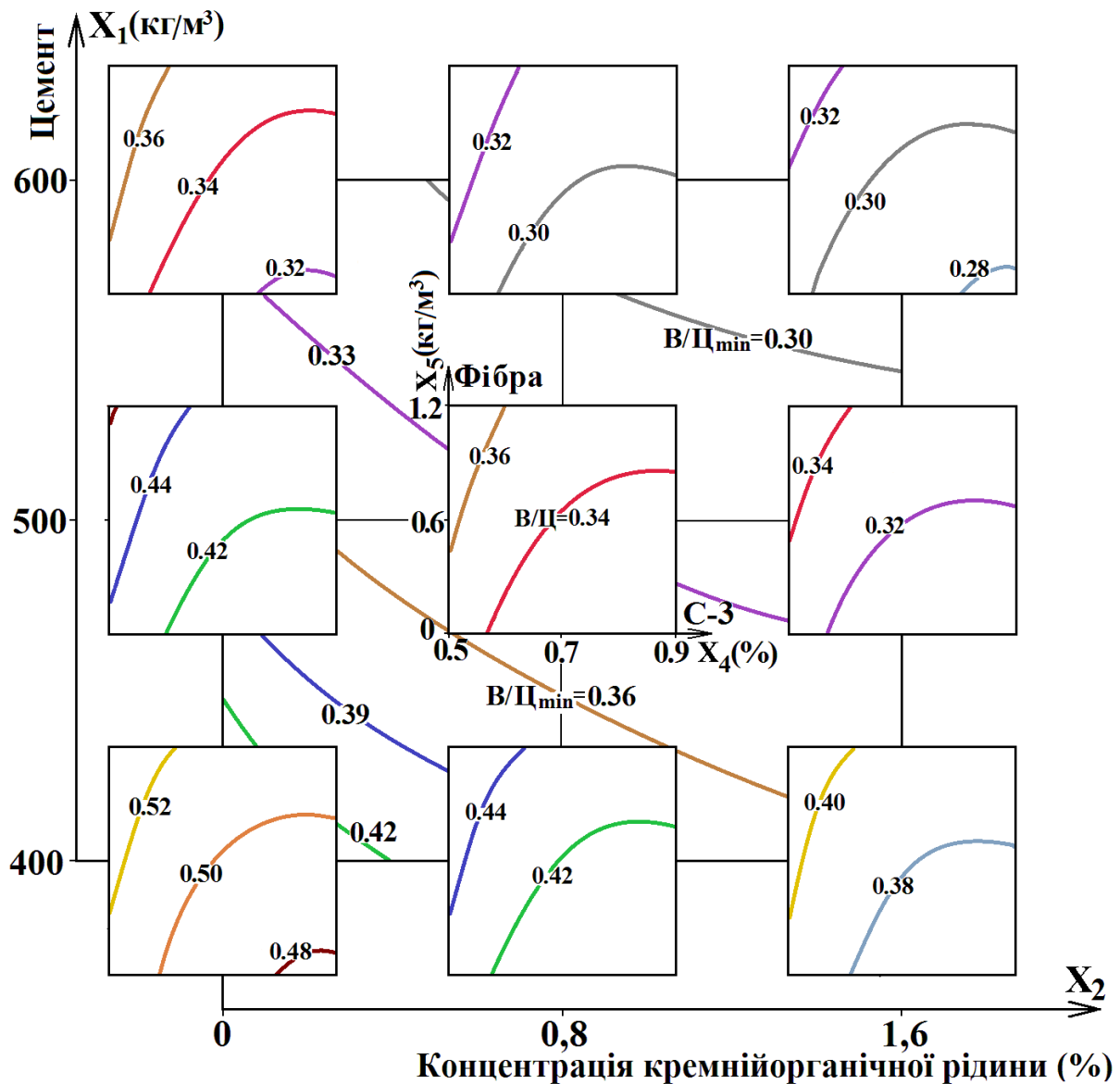


Рис.5.1. Вплив кількості портландцементу, суперпластифікатору С-3, поліпропіленової фібри і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на В/Ц легкобетонних сумішей рівної рухомості

Таким чином, збільшення кількості портландцементу і С-3 знижує В/Ц легкобетонних сумішей рівної рухомості, а введення добавки Пенетрон А не впливає на даний показник. Застосування дисперсного армування несуттєво підвищує В/Ц, а гідрофобізація пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини знижує В/Ц керамзитобетонних сумішей на величину до 20%. Тобто за рахунок застосування технологічного прийому гідрофобізація поверхні пористого заповнювача відчутно знижується В/Ц суміші без погіршення її технологічності.

5.3 Міцність досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

5.3.1 Міцність легких суднобудівних бетонів при стиску

Для бетонів як конструкційних будівельних матеріалів міцність при стиску є одним з основних показників якості, рівень якого задається проектними або нормативними вимогами. Тонкостінні конструкції гідротехнічних споруд сьогодні виготовляються переважно з важких бетонів класів В25 (С20/25), В30 (С25/30) і вище або легких бетонів класів від LC 20/22 до LC 35/38. Для таких плавучих залізобетонних споруд, як доки, готелі, дома і причали використовуються суднобудівні бетони переважно класів В30 і В35 або близьких до них класів легких бетонів LC 25/28, LC 30/33. Ще 30..40 років тому широко використовувалися суднобудівні бетони марок 250-300 (класів В20 і В25). Згідно діючому галузевому стандарту «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування» для залізобетонного суднобудування можна застосовувати керамзитобетони марок від 300 і вище.

Для досліджених на даному етапі модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів визначалася міцність при стиску і на розтяг при згині у віці 28-ми діб. Дані показники якості визначалися у повітряно-сухих умовах (при рівноважній вологості, тобто після зберігання на повітрі з вологістю 80-100% при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$), а також у водонасиченому стані, та вони наведені в таблиці 5.2.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що кількість добавки Пенетрон А і поліпропіленової фібри несуттєво впливає на міцність при стиску досліджених суднобудівних керамзитобетонів. За відповідними ЕС-моделями, аналогічними (5.1), були побудовані діаграми у вигляді кубів, які показані на рис.5.2 та які відображають вплив кількості портландцементу, суперпластифікатору С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на міцність при стиску досліджених легких бетонів. При побудові діаграм кількість фібри та добавки Пенетрону А були зафіксовані на середніх рівнях ($x_3 = x_5 = 0$).

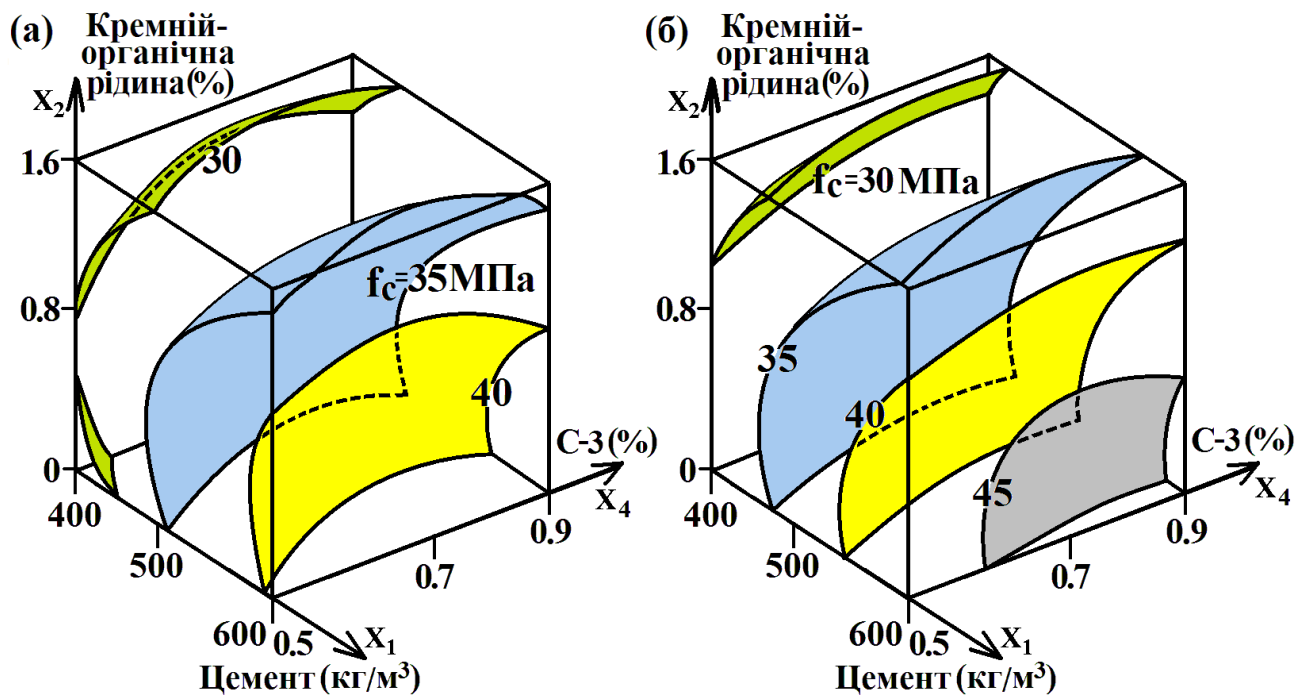


Рис.5.2. Вплив кількості портландцементу, суперпластифікатору С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на міцність при стиску суднобудівних керамзитобетонів ($x_3 = x_5 = 0$):

(а) - в водонасиченому стані, (б) - при рівноважній вологості

Як видно з наведених на рис.5.2 діаграм, збільшення кількості портландцементу природно веде до підвищення міцності керамзитобетону. Найбільшу міцність як при рівноважній вологості, так і у водонасиченому стані мають склади, в які введено приблизно 0,8% суперпластифікатору С-3. Гідрофобізація поверхні пористого гравію кремнійорганічною рідиною при її раціональній концентрації в емульсії підвищує міцність керамзитобетону. Для складів з кількістю цементу 400..450 кг/м³ найбільш ефективною є обробка заповнювача емульсією кремнійорганічної рідини з концентрацією 0,7-0,8%, для складів з кількістю цементу більше 500 кг/м³ ефективніше застосування емульсії з меншою концентрацією – 0,5..0,7%. За рахунок обробки заповнювача міцність при стику легких бетонів підвищується на 10-11% для матеріалів у повітряно-сухих умовах, та на 12-14% для бетонів у водонасиченому стані. Збільшення концентрації кремнійорганічної рідини понад 0,8% не підвищує міцність композиту, що на нашу думку переважно пов'язано з погіршенням

зчеплення заповнювача з розчинної матрицею, тобто зі значним зниженням сил адгезії. Тобто гідрофобна обробка пористого гравію при досягненні певного «балансу» гідрофобних і адсорбційних властивостей заповнювача покращує міцність при стиску керамзитобетону. В першу чергу це відбувається завдяки зниженню В/Ц суміші, в другу – за рахунок покращення сумісної роботи заповнювача і матриці, що досягається зниженням набухання і усадка пористого заповнювача в процесі твердіння суміші, а також встановленням певного балансу між адгезією і когезією матричного матеріалу до заповнювача, тобто вибіркової адгезії матриці [15]. При експлуатації керамзитобетону в водонасиченому стані також важливим стає фактор розм'якшення самого пористого заповнювача.

Застосування гідрофобної обробки дозволяє знизити вплив води на міцність зерен керамзиту, відповідно ефективність даного технологічного прийому при експлуатації конструкцій у вологих умовах зростає. Для підтвердження цього для усіх 27-ми експериментальних точок був розрахований коефіцієнт водостійкості (розм'якшення) легкого бетону $K_w = f_{ck,cube,w} / f_{ck,cube,n}$. Тобто K_w – це відношення міцності водонасиченого матеріалу до міцності матеріалу, що знаходиться в повітряно-сухому стані. На рис.5.3 показана побудована за відповідною ЕС-моделлю діаграма у вигляді квадрата, що відображає вплив кількості портландцементу і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії на величину K_w досліджених керамзитобетонів. При побудові діаграми значення не відображених трьох факторів складу приймалися на середньому рівні ($x_3 = x_4 = x_5 = 0$).

Аналіз діаграми дозволяє відзначити, що всі досліджені керамзитобетони і фіброкерамзитобетони мали достатню водостійкість – коефіцієнт розм'якшення всіх досліджених матеріалів був вище 0,85. При кількості портландцементу більше 500 кг/м^3 значення K_w складає не нижче 0,87, а в разі застосування гідрофобної обробки гравію – не менше 0,88. Значення коефіцієнту розм'якшення легкого бетону при використанні емульсії гідрофобізатору з високою концентрацією навіть перевищує 0,9, проте це пояснюється переважно

незначним зниженням міцності при стиску в умовах рівноважної вологості зразків бетонів на гравії, обробленому емульсією з висою концентрацією кремнійорганічної рідини.

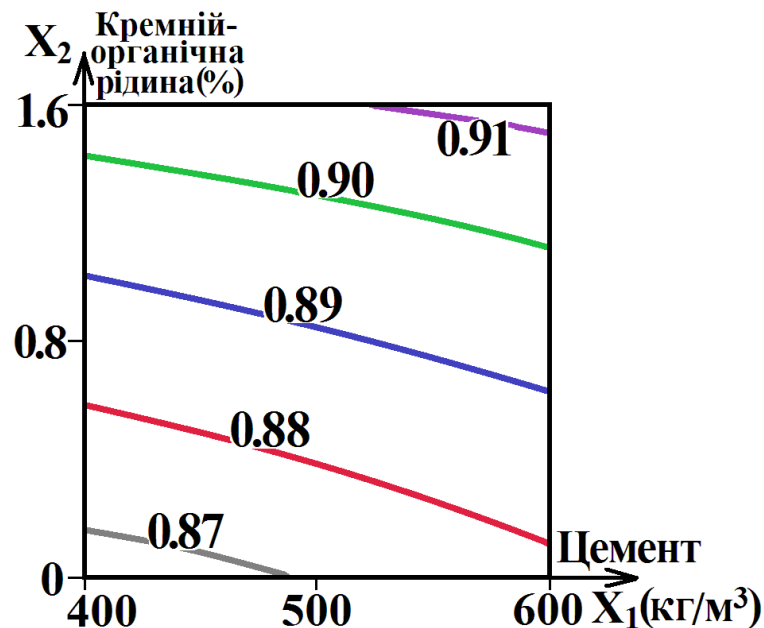


Рис.5.3. Вплив кількості портландцементу і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці керамзитового гравію на коефіцієнт розм'якшення K_w суднобудівного керамзитобетону ($x_3 = x_4 = x_5 = 0$)

В цілому при кількості портландцементу у складі композиту більше 440-450 кг/м³ міцність при стиску модифікованих суднобудівних бетонів і фіброкерамзитобетонів задовольняє вимогам «Правил будівництва корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» до матеріалів для залізобетонних плавучих споруд. За рахунок використання модифікаторів і раціональній гідрофобній обробки гравію при кількості портландцементу 500 кг/м³, що відповідає мінімальній кількості в'язучого згідно ОСТ 5.9880-85 «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування», керамзитобетон показує міцність в водонасиченому стані не менш 35 МПа. З врахуванням стандартних умов визначення міцності при рівноважній вологості даний модифікований легкий бетон відноситься до класів LC 25/28 і LC 30/33. При використанні в складі більшої кількості в'язучого (550-580 кг/м³) в поєднанні з раціональними модифікаторами і застосуванням прийому

гідрофобної обробки поверхні гравію досліджені керамзитобетони мають клас по міцності LC 30/33 і LC 35/38. Це дозволяє використовувати подібні матеріали для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, які піддаються найбільш жорстким робочим навантаженням.

5.3.2 Міцність легких суднобудівних бетонів на розтяг при згині

Тонкостінні залізобетонні конструкції гідротехнічних споруд, зокрема плавучих, як відмічалось вище, зазнають дію різнотипних навантажень, в тому числі згинаючих. Конструкції плавучих залізобетонних споруд, таких як плавучі доки, готелі, ресторани та будинки переважно мають товщину 12-16 см, тобто є тонкостінними [89,150]. Відповідно, завдяки специфічності навантажень, яким піддаються дані конструкції, важливим показником якості бетону для них є міцність на розтяг при згині. Найбільш інтенсивним згинаючим навантаженням піддаються огорожувальні конструкції плавучих споруд, а також палуба або стапель-палуба понтона. Борти понтону піддаються експлуатаційним навантаженням через нерівномірний тиск води. На конструкції бортів також впливає тиск льоду і хвиль. Всередині башт плавучих доків розташовані приміщення різного призначення, а також вмонтоване обладнання, що застосовується при ремонті суден. При технологічному зануренні доку на борти башт додатково діє тиск забортної води. Для бортів плавучих готелів, будинків, ресторанів, а також інших залізобетонних плавучих споруд, що мають внутрішні експлуатовані приміщення, типовими є навантаження, які виникають при швартуванні та буксирування судна, а також інші навантаження, пов'язані з повсякденною експлуатацією. Конструкції плавучих споруд мають високу ступінь армування, однак зважаючи на малу товщини конструкцій, значна частина розтягуючих та згинаючих навантажень сприймаються також і суднобудівним бетоном. Крім того, для огорожувальних конструкцій плавучих споруд не допускається розкриття магістральних тріщин в бетоні, тобто міцність бетону на розтяг важлива також з точки зору надійності експлуатації споруди в цілому.

Вплив варійованих факторів складу на величину міцності на розтяг при згині суднобудівного керамзитобетону у водонасиченому стані ($f_{\text{ctk.w}}$) та у повітряно-сухих умовах ($f_{\text{ctk.n}}$) описують наведені нижче ЕС-моделі:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ctk.w}}(\text{МПа}) = & 5,65 + 0,50x_1 + 0,21x_1^2 - 0,22x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,07x_1x_4 - 0,04x_1x_5 \\
 & - 0,15x_2 + 0,04x_2^2 + 0,05x_2x_3 \pm 0x_2x_4 - 0,04x_2x_5 \\
 & + 0,06x_3 \pm 0x_3^2 - 0,04x_3x_4 + 0,03x_3x_5 \\
 & \pm 0x_4 - 0,23x_4^2 + 0,12x_4x_5 \\
 & + 0,20x_5 \pm 0x_5^2
 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ctk.n}}(\text{МПа}) = & 5,76 + 0,57x_1 + 0,16x_1^2 - 0,24x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,07x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\
 & - 0,24x_2 \pm 0x_2^2 + 0,06x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \pm 0x_2x_5 \\
 & + 0,04x_3 \pm 0x_3^2 - 0,04x_3x_4 \pm 0x_3x_5 \\
 & \pm 0x_4 - 0,16x_4^2 + 0,12x_4x_5 \\
 & + 0,23x_5 \pm 0x_5^2
 \end{aligned} \quad (5.3)$$

За ЕС-моделями (5.2) і (5.3) побудовані діаграми у вигляді «квадратів на квадраті», які показані на рис.5.4. Вони відображають вплив кількості портландцементу, суперпластифікатора С-3, поліпропіленової фібри і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці гравію на величину міцності на розтяг при згині легкого бетону відповідно в водонасиченому стані (рис.5.4.а) і при рівноважній вологості (рис.5.4.б). Кількість добавки Пенетрон А несуттєво впливає на міцність при згині суднобудівного керамзитобетону, тому її вплив не відображено на рис.5.4 а при побудові діаграми фактор x_3 зафіксовано на середньому рівні.

Аналіз діаграм показує, що збільшення кількості портландцементу практично пропорційно підвищує міцність на розтяг при згині досліджених керамзитобетонів як у водонасиченому стані, так і при рівноважній вологості. Зміна кількості добавки С-3 несуттєво впливає на величину f_{ctk} , хоча можна відзначити, що при її дозуванні на рівні 0,7..0,8% від маси цементу міцність досліджених легких бетонів на розтяг при згині є на 0,2..0,3 МПа вище, ніж міцність бетонів з мінімальною (0,5%) або з максимальною (0,9%) кількістю добавки.

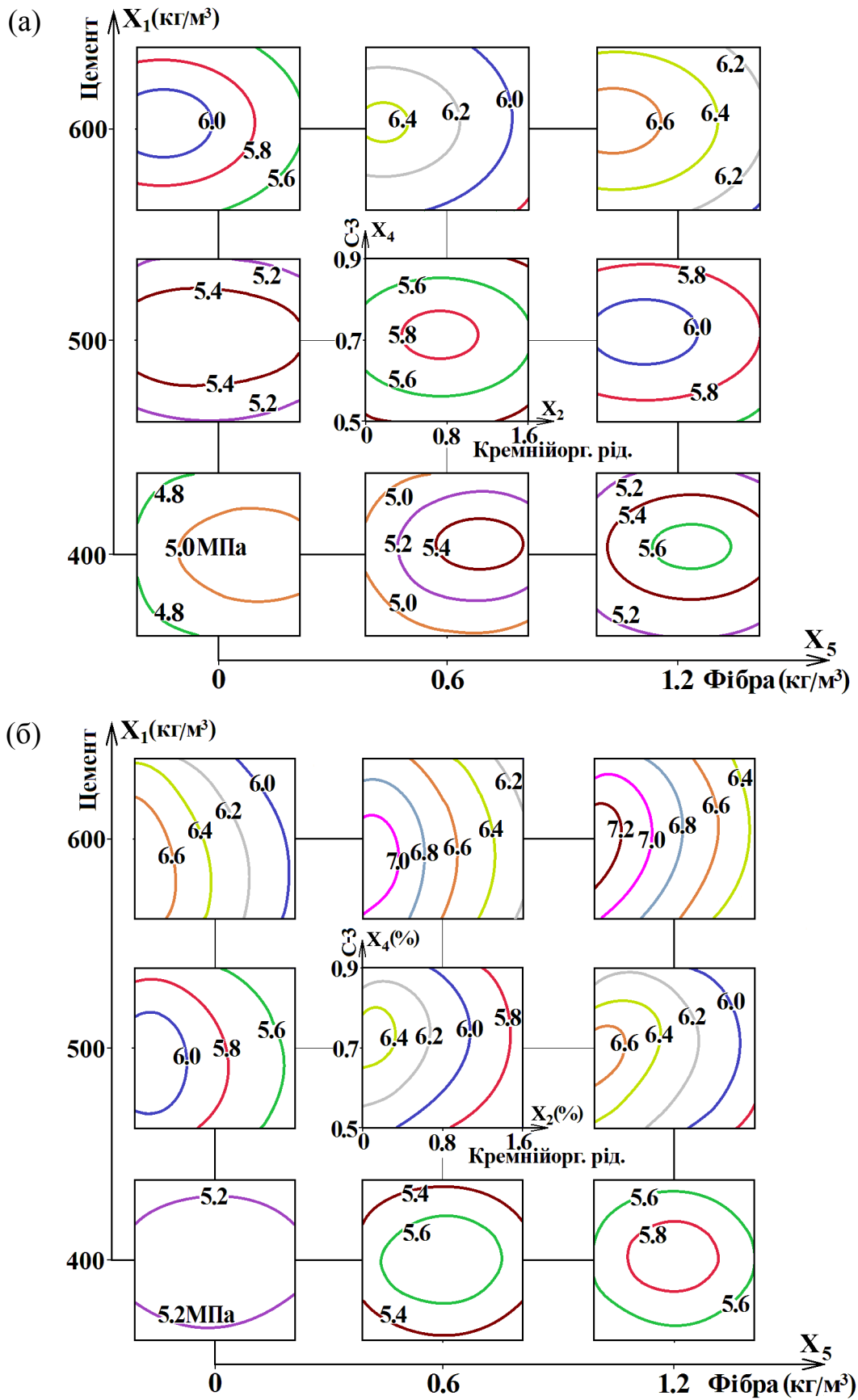


Рис.5.4. Вплив кількості портландцементу, фібри, суперпластифікатору С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на міцність суднобудівних керамзитобетонів на розтяг при згині ($x_3 = 0$):

(а) - в водонасиченому стані, (б) - при рівноважній вологості

За рахунок дисперсного армування фіброю міцність на розтягнення керамзитобетонів підвищується на 0,5-0,8 МПа, тобто на 10-15%. При цьому ефективність застосування дисперсного армування є вищою в більш міцних бетонах, тобто з більшою кількістю цементу, в яких волокна фібри краще утримуються в матриці. Обробка поверхні гравію кремнійорганічною рідиною має дещо різний за масштабом, а для ряду складів навіть і спрямуванням вплив на міцність керамзитобетонів на розтяг при згині в залежності від того, в яких умовах експлуатується матеріал. При рівноважній вологості за рахунок гідрофобізації поверхні керамзиту емульсією з концентрацією кремнійорганічної рідини 0,7-0,8% міцність на розтяг бетонів з кількістю цементу 400-450 кг/м³ несуттєво, до 0,2-0,3 МПа підвищується. Для бетонів з кількістю в'язучого близько 500 кг/м³ обробка гравію аналогічною емульсією практично не впливає на рівень $f_{ctk,n}$, а для бетонів з кількістю цементу 550-600 кг/м³ навіть дещо знижує міцність на розтяг при згині при рівноважній вологості.

У водонасиченому стані при обробці гравію емульсією з концентрацією кремнійорганічної рідини 0,7-0,9% міцність на розтяг при згині керамзитобетонів з кількістю цементу 400..450 кг/м³ підвищується на 0,3-0,4 МПа. При кількості в'язучого близько 500 кг/м³ більш ефективною є концентрація гідрофобізатору 0,4-0,5%, а позитивний вплив обробки на величину $f_{ctk,w}$ стає меншим. При кількості портландцементу 550-600 кг/м³ гідрофобна обробка пористого гравію вже має мінімальний вплив на величину міцності на розтяг при згині керамзитобетону в водонасиченому стані. Пояснення цьому можна дати з врахуванням всіх ефектів взаємодії цементної матриці та пористого заповнювача. Як зазначалося вище, з одного боку, за рахунок гідрофобізації керамзиту відбувається зниження В/Ц суміші та зменшення величини об'ємних вологісних деформації заповнювача в результаті чого зменшуються деформації цементно-піщаної матриці при твердінні, зокрема контактної зони. З іншого боку – зчеплення заповнювача з розчинної матрицею погіршується. При цьому природно на механічні показники легкого бетону впливає міцність самого пористого заповнювача, а гідрофобізований гравій

поглинає менше води, завдяки чому при насиченні бетону водою заповнювач менше знижує власну міцність. Відповідно гідрофобізація поверхні гравію є більш ефективною для керамзитобетонів, які експлуатуються у вологих умовах.

Таким чином, гідрофобна обробка поверхні пористого заповнювача при концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії 0,6-0,8% оказує не суттєвий, але позитивний вплив на міцність керамзитобетону на розтяг при згині при кількості цементу в легкому бетоні до 500-550 кг/м³, а для складів з більшою кількістю в'язучого практично не пливає на даний показник якості. Ступень позитивного впливу обробки гравію на міцність зростає при експлуатації матеріалу в водонасиченому стані. Застосування оптимальної кількості добавки С-3 і дисперсного армування дозволяє відчутно підвищити рівень f_{ctk} легких бетонів як у водонасиченому стані, так і при рівноважній вологості. Загальний досягнутий рівень міцності керамзитобетонів на розтяг при згині дозволяє ефективно використовувати ці матеріали у тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, зокрема у залізобетонному суднобудуванні.

5.4 Водонепроникність і морозостійкість керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

5.4.1 Водонепроникність легких суднобудівних бетонів

Як зазначалося вище, водонепроникність є одним з основних показників якості бетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд. Саме стійкість до проникнення води через бетон (фільтрування) є важливою для забезпечення довговічності капілярно-пористого матеріалу в агресивних середовищах і при постійному напірному впливі на конструкцію. Відповідно для суднобудівних бетонів а також до бетонів інших конструкцій, що експлуатуються у підводному положенні або при постійному контакті з вологою, висуваються найжорсткіші вимоги щодо рівня водонепроникності, і найчастіше вони виражаються в нормуванні марки W [150,151,304].

Водонепроникність жорстко нормується для конструкцій плавучих споруд: доків, понтонів, причалів, плавучих будинків, готелів і ресторанів (п.2.3). Це

пояснюється тим, що для даних споруд течі обводнених конструкції є критичними. Крім того, для приміщень з внутрішньою обробкою та/або з технологічним обладнанням критичною є навіть несуттєва фільтрація води, тому що вона може порушити нормальну експлуатацію споруди в цілому. Зокрема, водонепроникність бетону нормується для конструкцій внутрішніх перегородок і веж плавучих доків. Понтон і значна частина веж притоплюються при технологічному зануренні доку для заходу судна, при цьому у внутрішніх приміщеннях даних частин споруди знаходиться технологічне обладнання та розміщені побутові кімнати для персоналу.

Вплив варійованих на даному етапі досліджень факторів складу на водонепроникність модифікованих керамзитобетонів і фібро керамзитобетонів описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 W(\text{атм}) = & 8,1 + 2,2x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,2x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\
 & + 0,9x_2 \pm 0x_2^2 - 0,4x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \pm 0x_2x_5 \\
 & + 0,9x_3 \pm 0x_3^2 \pm 0x_3x_4 \pm 0x_3x_5 \\
 & + 0,2x_4 - 0,7x_4^2 + 0,4x_4x_5 \\
 & - 0,2x_5 - 0,7x_5^2
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Точність даної ЕС-моделі аналогічно (4.6) і (4.7) обмежена методикою визначення марки за водонепроникністю, тобто відсутністю можливості в натурному експерименті виміряти поступову зміну величини W при варіюванні факторів складу. Методика передбачає лише фіксування переходу від однієї марки до іншої, що слід враховувати при аналізі зміни водонепроникності в рамках факторного простору експерименту. Діаграма типу «куби на квадраті», яка побудована за (5.4) та яка відображає вплив варійованих факторів складу на водонепроникність легкого бетону, показана на рис.5.5. В якості несучого квадрата обрані фактори – кількість портландцементу (x_1) і добавки Пенетрон А (x_3). Куби, що відображають вплив концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці гравію (x_2), кількості суперпластифікатора С-3 (x_4) і фібри (x_5), побудовані в дев'яти точках.

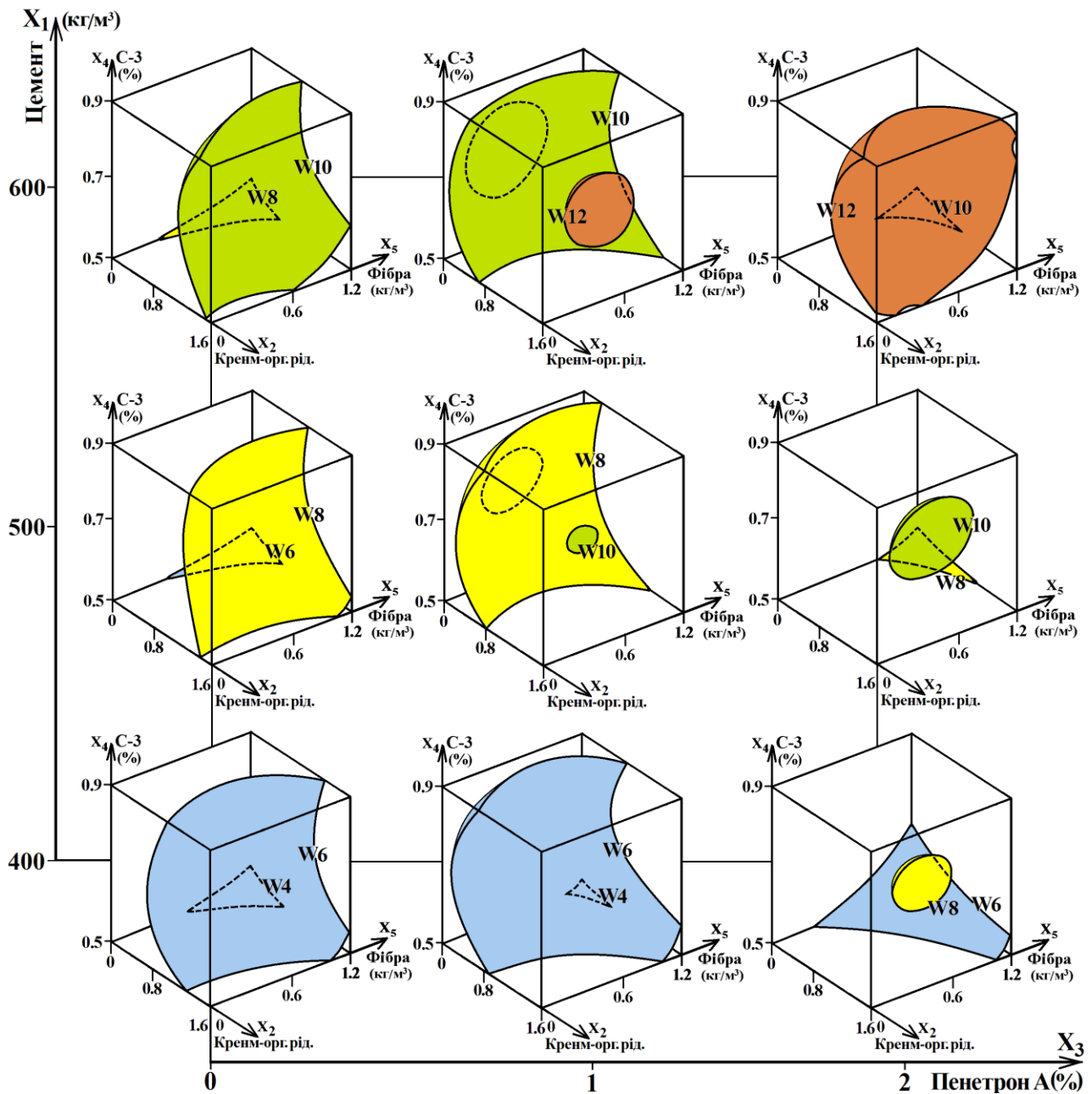


Рис.5.5. Вплив варійованих факторів складу на водонепроникність суднобудівних керамзитобетонів

Аналіз діаграми показує, що збільшення кількості портландцементу істотно підвищує водонепроникність керамзитобетону. Склади з максимальною кількістю в'язучого (600 кг/м^3) мають в середньому на дві марки вищий рівень W, ніж склади з мінімальною кількістю цементу 400 кг/м^3 . За рахунок введення 2% кольматуючої добавки Пенетрон А водонепроникність досліджених керамзитобетонів підвищується приблизно на одну марку, тобто на дві атмосфери, майже незалежно від рівнів інших факторів. За даними виробника

хімічні компоненти цієї кольматуючої добавки вступають в реакцію з іонними комплексами кальцію і алюмінію в'язучого, оксидами і солями інших металів. В результаті цих реакцій в бетоні утворюються нерозчинні кристалогідрати, що заповнюють мережу пор, капілярів і тріщин [325,326]. Заповнені нерозчинними кристалами пори, капіляри і мікротріщини краще опираються проникненню води навіть при високому гідростатичному тиску завдяки дії сил поверхневого натягування рідини. При цьому в бетоні не виникає паровий бар'єр [327].

Гідрофобізація поверхні гравію підвищує водонепроникність керамзитобетону за рахунок зниження В/Ц суміші, зменшення вологісних деформацій заповнювача і матриці в процесі структуроутворенні, а також за рахунок придання заповнювачу певних водовідштовхувальних властивостей. Склади з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 при застосуванні обробки пористого гравію гідрофобизатором з концентрацією 0,7-0,8% показують водонепроникність не нижче W8, при кількості в'язучого 600 кг/м^3 – не нижче W10. Збільшення концентрації гідрофобизатора в емульсії понад 0,8% вже несуттєво впливає на водонепроникності легкого бетону, а також, як показано вище, вже негативно позначається на міцності матеріалу. В цілому гідрофобна обробка поверхні гравію підвищує водонепроникність керамзитобетону не менш, ніж на одну марку, що пояснюється впливом даного прийому на структуру капілярно-пористого композиту. Дисперсне армування несуттєво впливає на рівень W досліджених легких бетонів, але при введенні у склад поліпропіленових волокон в кількості $1-1,2 \text{ кг/м}^3$ даний показник якості матеріалу дещо знижується, що можна пояснити зростанням В/Ц суміші. У всьому факторному просторі експерименту максимальні значення W досягаються при кількості добавки С-3 близько 0,7-0,8%. Це пояснюється тим, що така кількість добавки, зокрема, забезпечувала отримання керамзитобетону з найбільшою середньою густиною, тобто найбільш щільного.

Таким чином, модифіковані керамзитобетони і фіброкерамзитобетони при кількості портландцементу від 500 кг/м^3 , застосуванні 2% добавки Пенетрон А в комплексі з 0,7-0,8% добавки С-3 (як рецептурних методів підвищення

довговічності), а також при використанні технологічного методу обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини раціональної концентрації можуть ефективно використовуватися для конструкцій тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема плавучих. Дані бетони відповідають вимогам Морського реєстру до матеріалів конструкцій плавучих залізобетонних споруд за рівнем їхньої водонепроникності. Крім того, досягнутий рівень W дозволяє забезпечувати високу довговічність модифікованих керамзитобетонів в умовах напірної дії води та/або агресивних впливів різного типу.

5.4.2 Морозостійкість і корозійна стійкість легких суднобудівних бетонів

Вплив заморожування і відтавання є однією з основних причин пошкоджень і руйнувань бетону залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд, що показано в п.1.6 і п.2.3. Відповідно на даному етапі досліджень аналізувалася морозостійкість модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів як один з основних показників якості, що забезпечує довговічність матеріалу. В матеріалознавстві відомо близько 30 гіпотез, які пояснюють морозне руйнування бетону [229]. Найбільш вивченими і широко обговорюваними можна вважати гіпотези впливу кристалізаційного тиску льоду, гідравлічного тиску, прояву капілярних ефектів, осмосу і різних коефіцієнтів температурного розширення складових бетону. Руйнування в результаті дії знакозмінних температур В.М. Москвін [328] умовно поділяв на три типи: поверхневе руйнування у вигляді лущення і відшарування; руйнування по всьому об'єму з розпушуванням структури, але без зовнішніх ознак; руйнування, що супроводжується одночасно внутрішнім розпушуванням і поверхневим лущенням і відшаруванням.

За наведеними в табл.5.2 даними була побудована ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на морозостійкість досліджень модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів:

$$\begin{aligned}
 F(\text{цикли}) = & 538 + 68x_1 + 13x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 + 9x_1x_5 \\
 & + 31x_2 - 40x_2^2 \quad \pm 0x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \pm 0x_2x_5 \\
 & + 10x_3 \pm 0x_3^2 \quad \pm 0x_3x_4 \pm 0x_3x_5 \\
 & + 11x_4 - 16x_4^2 \quad \pm 0x_4x_5 \\
 & + 28x_5 - 16x_5^2
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Найбільший вплив на величину морозостійкості досліджених суднобудівних керамзитобетонів в рамках факторного простору експерименту оказує кількість портландцементу – при збільшенні дозування в'язучого з 400 до 550-600 кг/м³ рівень F матеріалу підвищується приблизно на 100 циклів. Також відчутно, на 50 і більше циклів, підвищується морозостійкість за рахунок дисперсного армування. На стійкість керамзитобетонів до заморожування і відтавання позитивно впливає використання добавки Пенетрон А і застосування прийому гідрофобізації поверхні гравію при раціональній концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії, а також введення оптимальної кількості суперпластифікатору С-3. Для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, фібри, добавки С-3 і концентрації гідрофобізатора при обробці пористого гравію на величину морозостійкості досліджених суднобудівних керамзитобетонів за ЕС-моделлю (5.5) була побудована показана на рис.5.6 діаграма типу «квадрати на квадраті». При побудові даної діаграми рівень фактора x_3 був зафіксований на +1, тобто кількість Пенетрон А для всіх складів дорівнює 2%. Така кількість кольматуючої добавки рекомендується з точки зору підвищення водонепроникності бетону, що показано вище. Важливо відмітити, що при застосуванні 2% модифікатору Пенетрон А також приблизно на 50 циклів підвищується і морозостійкість керамзитобетону. В якості несучого квадрата прийняті фактори x_1 і x_2 (кількість портландцементу і концентрація гідрофобізатора). В поле несучого квадрата показані ізолінії, що відображають рівень максимальної морозостійкості, яка може бути досягнута в відповідних координатах x_1 - x_2 при варіюванні кількості фібри і добавки С-3.

Як видно з діаграми, склади з кількістю портландцементу 500 кг/м³ і вище показують морозостійкість не нижче F500, що дозволяє використовувати подібні матеріали в залізобетонному суднобудуванні. Досягти рівня морозостійки в 500 циклів можна за рахунок гідрофобізації поверхні пористого гравію та введення оптимальної кількості добавки і при меншій кількості в'язучого, але дані склади мають не достатню водонепроникність і не можуть рекомендуватися для конструкцій, які експлуатуються при напірній дії води.

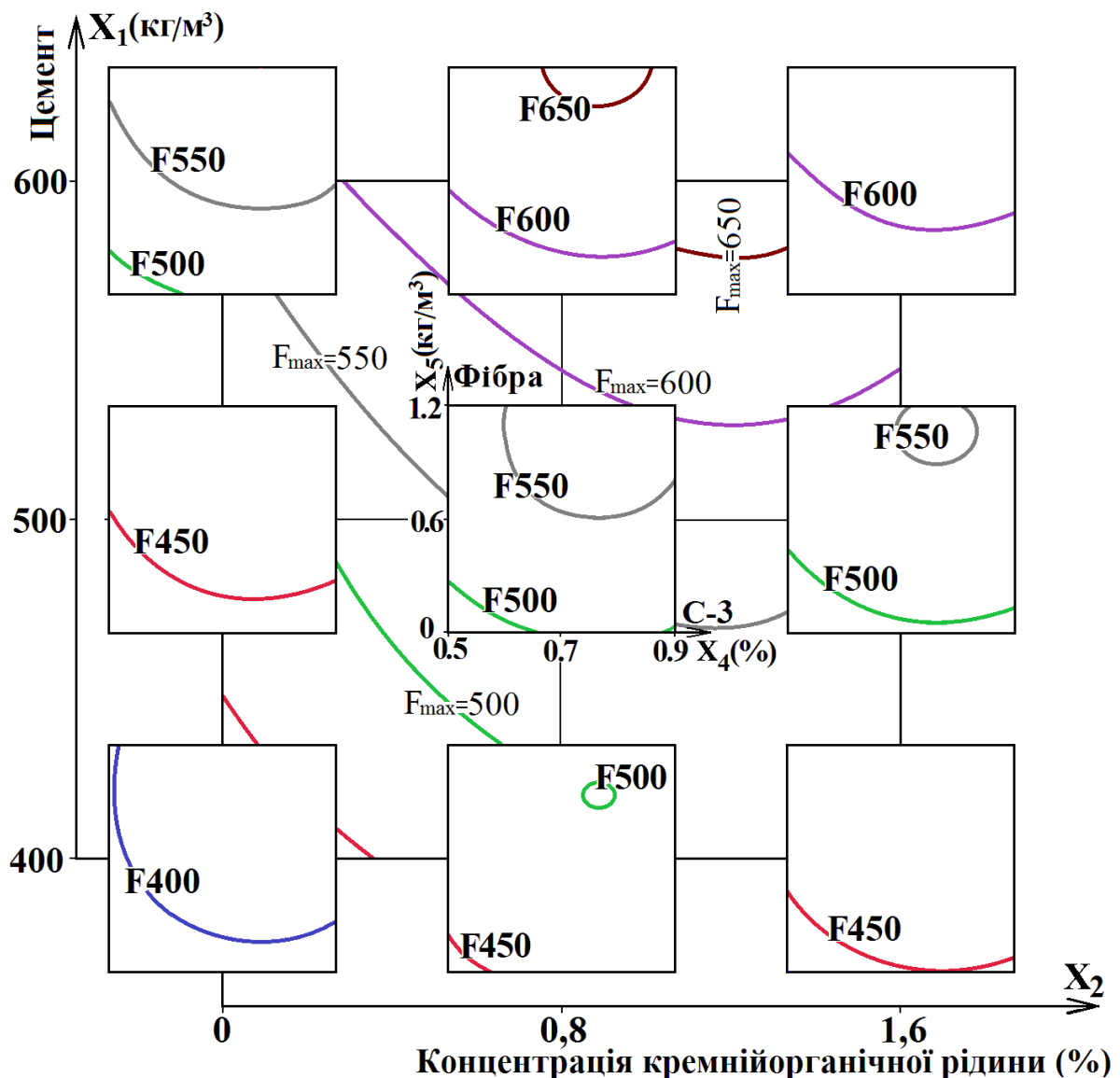


Рис.5.6. Вплив кількості портландцементу, концентрація кремнійорганічної рідини при обробці гравію, суперпластифікатору С-3 і поліпропіленової фібри на морозостійкість суднобудівних керамзитобетонів ($x_3 = 1$)

Практично незалежно від рівня інших факторів, найбільшу морозостійкість показують керамзитобетони з кількістю суперпластифікатора С-3 0,7-0,8%. Подібні бетони, як показано вище, мають найкращу міцність, відповідно рівень їх морозостійкості також є вищим, ніж композитів з іншою кількістю суперпластифікатора. За рахунок дисперсного армування морозостійкість досліджених керамзитобетонів зростає на 50 і більше циклів. При цьому застосування фібри є ефективнішим для більш міцних бетонів, тобто для складів з кількістю портландцементу 500..600 кг/м³, що пояснюється кращим защемленням волокон матрицею матеріалу [299]. В цілому позитивний вплив дисперсного армування на стійкість модифікованих суднобудівних керамзитобетонів до заморожування і відтавання за своїм характером і величиною є аналогічним впливу даного рецептурного прийому на морозостійкість керамзитобетону на обробленому цементною суспензією гравій, що описано в п.4.3, а також з впливом дисперсного армування на морозостійкість важкого суднобудівного бетону, хоч і має дещо меншій масштаб [150,292].

За рахунок прийому гідрофобізації поверхні пористого заповнювача морозостійкість досліджених керамзитобетонів підвищується на 50..100 циклів. При цьому концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії нелінійно впливає на морозостійкість. Рівень показника F найбільш інтенсивно змінюється при підвищенні концентрації модифікатора до 0,7-0,8%. Збільшення концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії до 1-1,1% вже несуттєво підвищує морозостійкість (в порівнянні з матеріалами при обробці гравію емульсією концентрацією 0,7-0,8%), а подальше збільшення концентрації гідрофобізатору позначається вже негативно. Відповідно з врахуванням впливу прийому обробки гравію на показники міцності та водонепроникності досліджених керамзитобетонів концентрацію кремнійорганічної рідини в емульсії рекомендується обмежити рівнем 0,6-0,7%. При цьому за рахунок прийому обробки керамзиту емульсією кремнійорганічної рідини такої концентрації морозостійкість легкого бетону підвищується на 50 і більше циклів. Також слід

зазначити, що як і при аналізі морозостійкості керамзитобетонів на обробленому цементною суспензією гравії, наведеному в п.4.3, рівень F оцінювався за методикою ДСТУ Б В.2.7-49-96. При випробуванні у морській воді згідно методики ОСТ 5.9266-76 дані легкі бетони будуть показувати інший і значно нижчий номінальний (марочний) рівень морозостійкості. Але характер впливу модифікаторів і прийому обробки поверхні гравію на морозостійкість в морській воді логічно буде аналогічним їхньому впливу, описаному в даному параграфі. Тобто забезпечення високої марки за морозостійкістю підвищує довговічність бетону і при експлуатації в морській воді.

Довговічність модифікованих керамзитобетонів в морській воді також забезпечується високим рівнем їх корозійної стійкості в даному середовищі експлуатації. Були проведені дослідження корозійної стійкості бетонів складів №21 і №23 у в штучній морській воді згідно ОСТ 5.9266-76, виконувалося 200 циклів зволоження морською водою і висушування. Обидва досліджені склади бетонів приготовані на керамзиті з гідрофобізованою поверхнею, модифіковані суперпластифікатором і кольматуючою добавкою, мають кількість цементу 500 кг/м^3 та фібри $0,6 \text{ кг/м}^3$. Встановлено, що міцність даних бетонів після корозійного впливу складала відповідно 37,1 МПа і 34,5 МПа (у вологих умовах), що більше міцності даних бетонів в аналогічних умовах у «марочному» 28-денному віці. Це показує високу корозійну стійкість модифікованих суднобудівних фіброкерамзитобетонів в морській воді, що забезпечується, зокрема, використанням сульфатостійкого портландцементу.

В цілому, отримані модифіковані суднобудівні керамзитобетони при кількості портландцементу $500..600 \text{ кг/м}^3$, використанні 0,7-0,8% добавки С-3 і $1-1,2 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленової фібри, а також при застосуванні прийому гідрофобної обробки поверхні гравію емульсією кремнійорганічної рідини з концентрацією 0,6-0,7% показують рівень морозостійкості не нижче F550, що підтверджує ефективність прийнятих рішень щодо управління структурою легких бетонів та забезпечує високу довговічність матеріалу в суворих кліматичних умовах.

5.5 Середня густина суднобудівних фіброкерамзитобетонів в різних умовах експлуатації

Зважаючи на те, що одною з основних цілей застосування легких бетонів в будівництві в цілому та у залізобетонному суднобудуванні зокрема є зниження ваги конструкцій, в рамках даного етапу проведених досліджень вивчалася середня густина модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів в різних умовах експлуатації, тобто при різній вологості. Значення середньої густини, вологості та теплопровідності досліджених суднобудівних керамзитобетонів в 27-ми експериментальних точках наведені в таблиці 5.3.

Аналогічно описаним у п.4.4 дослідженням властивостей керамзитобетонів на обробленому цементною суспензією гравій середня густина і вологість досліджених на даному етапі легких бетонів визначалися на зразках віком 90 діб. Як зазначалося вище, в даному віці структура цементного композиту є більш стабільною в порівнянні зі «стандартним» 28-ми добовим віком і зразки в даному віці в більшій мірі відповідають бетонам в реальних умовах експлуатації. Для досягнення сухого стану зразки висушувалися до постійної маси при температурі $105 \pm 5^\circ\text{C}$, під рівноважної (повітряно-сухою) розуміється вологість після зберігання при вологості 80..100% і температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$, водонасиченими вважаються зразки після тривалого вільного водонасичення в воді до постійної маси. Сухий стан позначається індексом "d", рівноважна вологість індексом "n", а водонасичений стан індексом "w". Як зазначалося вище (п.4.4), якщо для більшості легких бетонів марка за середньою густиною встановлюється в сухому стані, то для суднобудівних бетонів контролюється середня густина у повітряно-сухому і у водонасиченому станах.

ЕС-модель, що відображає вплив факторів складу на середню густину суднобудівних керамзитобетонів в сухому стані, тобто без урахування вільної вологи, що міститься в порах цементно-піщаної матриці та гравію, має такий вигляд:

Середня густина, вологість і теплопровідність досліджених
суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів в різних умовах

| № ТОЧКИ | Середня густина керамзитобетону, кг/м ³ | | | Вологість керамзитобетону, % за об'ємом | | Теплопро- відність (Вт/м*К) |
|------------|---|---------------------------------|---------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| | В сухому стані | При рівноважній вологості | Водо- насиченого | При рівноважній вологості | Водо- насиченого | |
| 1 | 1629 | 1688 | 1790 | 5,9 | 16,1 | 0,66 |
| 2 | 1640 | 1694 | 1791 | 5,4 | 15,1 | 0,67 |
| 3 | 1643 | 1698 | 1791 | 5,5 | 14,8 | 0,70 |
| 4 | 1634 | 1685 | 1773 | 5,1 | 13,9 | 0,62 |
| 5 | 1644 | 1687 | 1759 | 4,3 | 11,5 | 0,60 |
| 6 | 1639 | 1679 | 1745 | 4,0 | 10,6 | 0,61 |
| 7 | 1634 | 1673 | 1732 | 3,9 | 9,8 | 0,56 |
| 8 | 1649 | 1686 | 1742 | 3,7 | 9,3 | 0,58 |
| 9 | 1728 | 1783 | 1844 | 5,5 | 11,6 | 0,70 |
| 10 | 1730 | 1777 | 1847 | 4,7 | 11,7 | 0,67 |
| 11 | 1717 | 1772 | 1825 | 5,5 | 10,8 | 0,66 |
| 12 | 1745 | 1803 | 1851 | 5,8 | 10,6 | 0,73 |
| 13 | 1697 | 1737 | 1792 | 4,0 | 9,5 | 0,59 |
| 14 | 1712 | 1745 | 1805 | 3,3 | 9,3 | 0,65 |
| 15 | 1714 | 1747 | 1804 | 3,3 | 9,0 | 0,57 |
| 16 | 1715 | 1746 | 1804 | 3,1 | 8,9 | 0,58 |
| 17 | 1731 | 1771 | 1827 | 4,0 | 9,6 | 0,63 |
| 18 | 1644 | 1687 | 1758 | 4,3 | 11,4 | 0,57 |
| 19 | 1686 | 1721 | 1783 | 3,5 | 9,7 | 0,56 |
| 20 | 1693 | 1738 | 1814 | 4,5 | 12,1 | 0,73 |
| 21 | 1697 | 1735 | 1789 | 3,8 | 9,2 | 0,59 |
| 22 | 1693 | 1731 | 1795 | 3,8 | 10,2 | 0,59 |
| 23 | 1694 | 1734 | 1793 | 4,0 | 9,9 | 0,63 |
| 24 | 1679 | 1723 | 1781 | 4,4 | 10,2 | 0,57 |
| 25 | 1691 | 1732 | 1791 | 4,1 | 10,0 | 0,57 |
| 26 | 1702 | 1740 | 1797 | 3,8 | 9,5 | 0,58 |
| 27 | 1694 | 1733 | 1792 | 3,9 | 9,8 | 0,58 |

$$\begin{aligned}
\rho_d \text{ (кг/м}^3\text{)} = & 1694,1 + 40,6x_1 - 5,7x_1^2 - 6,4x_1x_2 + 0,8x_1x_3 + 2,1x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\
& - 3,8x_2 - 4,4x_2^2 \pm 0x_2x_3 \pm 0x_2x_4 + 0,8x_2x_5 \\
& + 2,1x_3 \pm 0x_3^2 + 0,8x_3x_4 - 1,4x_3x_5 \\
& + 4,1x_4 - 7,4x_4^2 + 1,5x_4x_5 \\
& - 5,1x_5 + 2,6x_5^5
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Аналіз даної ЕС-моделі показує, що в найменшій мірі на середню густину бетону в сухому стані впливає кількість добавки Пенетрон А – значення коефіцієнтів при факторі x_3 є найменшими. Побудована за даною ЕС-моделлю діаграма типу «квадрати на квадратах», що відображає вплив кількості портландцементу, фібри, добавки С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці пористого гравію на середню густину суднобудівного керамзитобетону в сухому стані показана на рис.5.7. Кількість Пенетрон А при побудові діаграми зафіксовано на середньому рівні.

Аналіз діаграми дозволяє відзначити, що найбільший вплив на середню густину керамзитобетону має кількість портландцементу – склади з дозуванням в'язучого 600 кг/м^3 мають на $80..90 \text{ кг/м}^3$ більшу середню густину в порівнянні зі складами з мінімальною кількістю цементу. Застосування дисперсного армування несуттєво знижує середню густину керамзитобетону за рахунок впливу на його структуру тривимірної сітки волокон і деякого підвищення В/Ц суміші. Кількість добавки С-3 також впливає на середню густину композиту, при цьому найбільшу густину мають склади з кількістю пластифікатору близько 0,8%. Але при використанні дисперсного армування максимальна середня густина бетону досягається при кількості пластифікатору 0,85..0,9% від маси цементу. Концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці поверхні пористого гравію нелінійно впливає на середню густину суднобудівного керамзитобетону в сухому стані. Для бетонів з кількістю цементу 400 кг/м^3 найбільша густина досягається при використанні емульсії з концентрацією кремнійорганічної рідини 1,0-1,3%, для бетонів з кількістю цементу 500 кг/м^3 при використанні 0,6-0,7% емульсії, а для складів з кількістю цементу 600 кг/м^3 при використанні 0,5-0,6% емульсії.

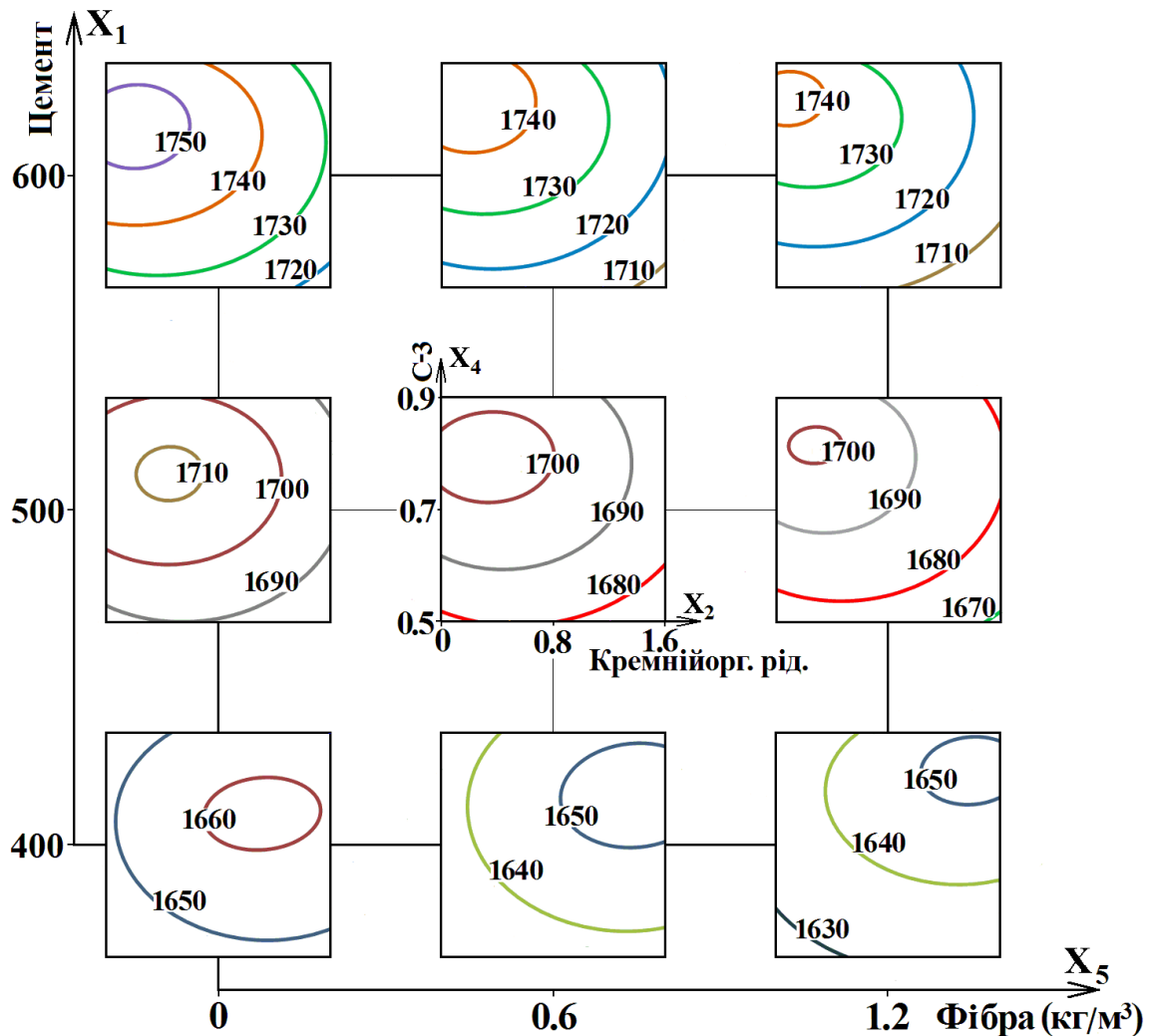


Рис.5.7. Вплив кількості портландцементу, поліпропіленової фібри, суперпластифікатору С-3 і концентрація кремнійорганічної рідини при обробці гравію на середню густину керамзитобетонів в сухому стані ($x_3 = 1$)

Подібний вплив прийому гідрофобізації поверхні гравію на середню густину легкого бетону можна пояснити, з одного боку, зниженням В/Ц суміші, що підвищує її щільність, з іншого боку, наявністю часткового ефекту втягування повітря при використанні кремнійорганічної рідини 136-157М (ГКЖ-94м), яка може не повністю полімеризувалася на поверхні заповнювача. Підтвердженням даного подвійного ефекту є те, що в більшій мірі гідрофобізація гравію знижувала В/Ц сумішей з мінімальною кількістю цементу, відповідно для даних бетонів цей прийом має максимальну ущільнюючу дію. Тобто в залежності від кількості портландцементу в суміші змінюється раціональна з позиції кращого ущільнення суміші концентрація кремнійорганічної рідини в

емульсії. Проте рішення щодо раціональної концентрації гідрофобізатору при обробці гравію не можна приймати виходячи лише зі значення середньої густини матеріалу в сухому стані. По-перше, для гідротехнічних споруд більш характерними є вологі умови експлуатації, по-друге, підвищення середньої густини не може бути цільовою функцією для технології легкого бетону і навіть частішою є зворотна задача, по-третє, для конструкцій плавучих та інших тонкостінних споруд середня густина матеріалу може розглядатися лише в комплексі з показниками його міцності та довговічності.

Як зазначалося вище, середня густина досліджених суднобудівних керамзитобетонів також визначалася при рівноважній вологості. Така вологість найбільш близька до вологості експлуатаційного середовища матеріалу в надводних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих, в типових для них умовах експлуатації. Крім того вологість в даних умовах нормується галузевими нормами на легкий суднобудівний бетон [1]. Проведений аналіз отриманих даних показав, що кількість кольматуючої добавки Пенетрон А несуттєво впливає на середню густину керамзитобетону при рівноважній вологості. Відповідно на рис.5.8 показана діаграма типу «квадрати на квадраті», яка побудована за відповідною ЕС-моделлю і яка відображає вплив кількості портландцементу, фібри, добавки С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці поверхні гравію на середню густину суднобудівного керамзитобетону при рівноважній вологості. При побудові діаграми рівень фактора x_3 фіксувався на середньому значенні (кількість добавки 1%), тобто діаграма побудована в координатах, аналогічних діаграмі на рис.5.7.

Як видно з діаграми, вплив варійованих на даному етапі досліджень факторів на середню густину суднобудівних керамзитобетонів при рівноважній вологості є аналогічним їх впливу на цей показник якості матеріалу в сухому стані. При збільшенні кількості портландцементу середня густина композиту зростає. Кількість поліпропіленової фібри Ваусон несуттєво впливає на середню густину бетону при рівноважній вологості. Найбільшу густину мають композити з кількістю суперпластифікатора С-3 близько 0,7..0,8%.

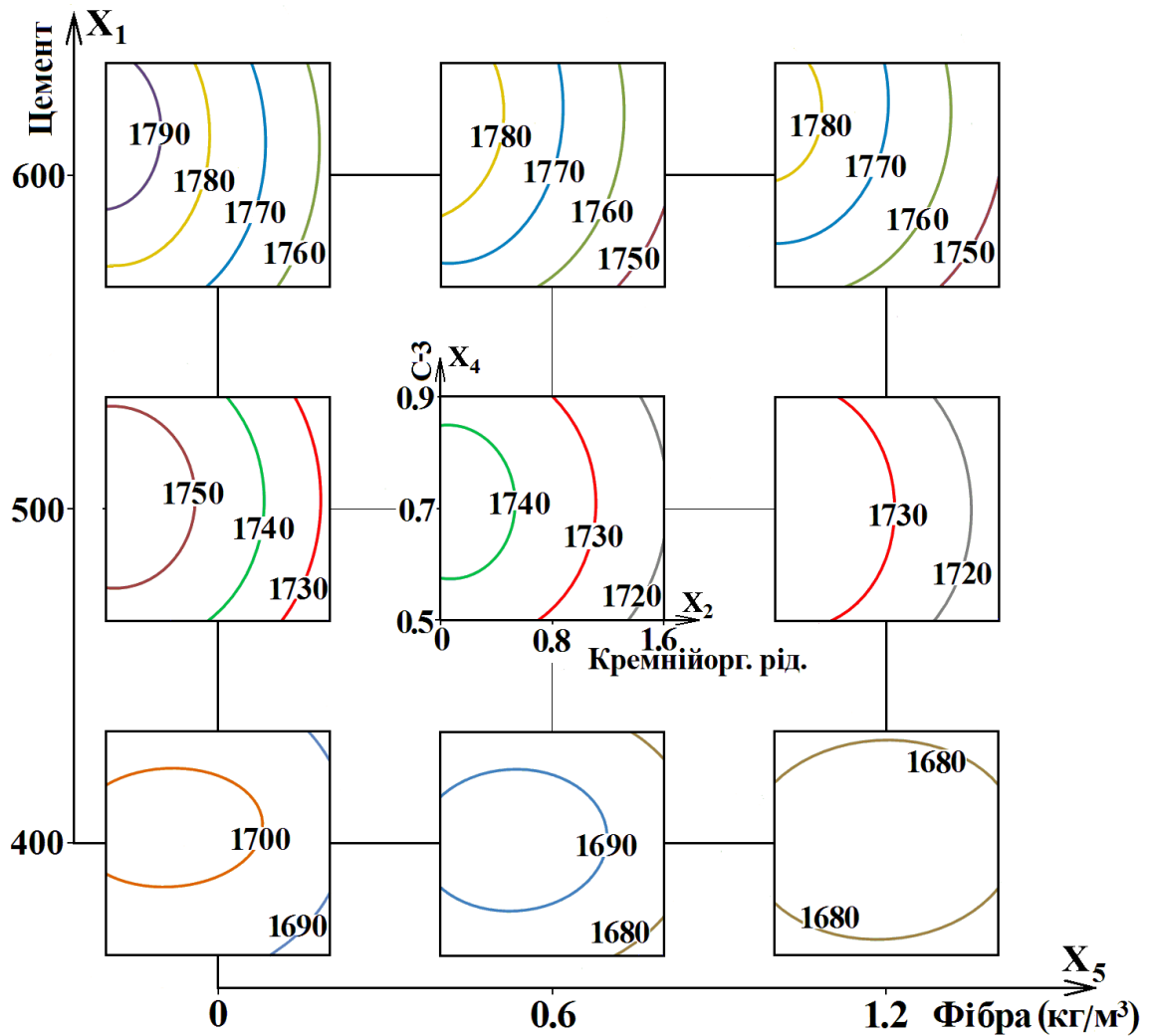


Рис.5.8. Вплив кількості портландцементу, поліпропіленової фібри, суперпластифікатора С-3 і концентрація кремнійорганічної рідини при обробці гравію на середню густину керамзитобетонів при рівноважній вологості ($x_3 = 1$)

Важливо відзначити, що для легких бетонів при рівноважній вологості технологічний прийом гідрофобної обробки пористого гравію має більш істотний вплив на середню густину, ніж для сухих. При цьому величина даного впливу зростає у міру збільшення кількості портландцементу. Якщо при кількості в'язучого 400 кг/м^3 за рахунок гідрофобної обробки середня густина змінюється в межах $5..10 \text{ кг/м}^3$, то для складів з кількістю цементу 600 кг/м^3 даний технологічний прийом знижує середню густину при рівноважній вологості на $30..35 \text{ кг/м}^3$. Таке збільшення впливу гідрофобної обробки для матеріалів, що експлуатуються при рівноважній вологості, пояснюється перешкоджанням проникненню води в пори і капіляри, а також у пористий

керамзитовий гравій. Відповідно для легких бетонів, в яких за рахунок зниження В/Ц при застосуванні обробки пористого гравію кремнійорганічною рідиною середня густина в сухому стані збільшувалася, концентрація гідрофобізатору практично перестає впливати на густину при рівноважній вологості. В цілому за рахунок наявності в структурі композиту адсорбованої води середня густина досліджених керамзитобетонів при рівноважній вологості була на 40..60 кг/м³ вище, ніж в сухому стані.

Для залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд, що знаходяться в постійному або довгостроковому контакті з водою, більш типовим є водонасичений стан бетону. Постійно обводненими є конструкції понтонів залізобетонних плавучих споруд, частина конструкцій насосних станцій, лицювання каналів. Вежі плавучих доків, як зазначалося вище, обводнюються при його технологічному зануренні. Відповідно важливим показником якості для матеріалів конструкцій подібних споруд можна вважати його середню густину в водонасиченому стані. В першу чергу середня густина важлива для суднобудівних бетонів, тому що цей показник якості впливає на вантажопідйомність плавучої споруди.

Вплив варійованих факторів складу на середню густину досліджених легких бетонів в водонасиченому стані (ρ_w) був проаналізований за відповідною ЕС-моделю, аналогічною (5.5) і (5.6). Встановлено, що при введенні добавки Пенетрон А середня густина керамзитобетону в водонасиченому стані змінюється несуттєвим, що аналогічно даному ефекту для матеріалів в сухому стані і при рівноважній вологості. Відповідно на рис.5.9 показана діаграма типу «квадрати на квадраті», що відображає вплив кількості портландцементу, фібри, добавки С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці гравію на середню густину досліджених керамзитобетонів в водонасиченому стані. Аналіз даної діаграми дозволяє сказати, що підвищення кількості портландцементу за рахунок ущільнення цементно-піщаної матриці і зниження частки легкого заповнювача в композиті природно збільшує середню густину керамзитобетону в водонасиченому стані.

Введення фібри несуттєво знижує середню густину композиту, а збільшення кількості добавки С-3 до 0,8% підвищує цей показник. Тобто загальний характер впливу варійованих факторів складу x_1 , x_4 і x_5 на величину ρ_w є аналогічним їхньому впливу на середню густину легкого бетону в інших умовах експлуатації – в сухому стані і при рівноважній вологості.

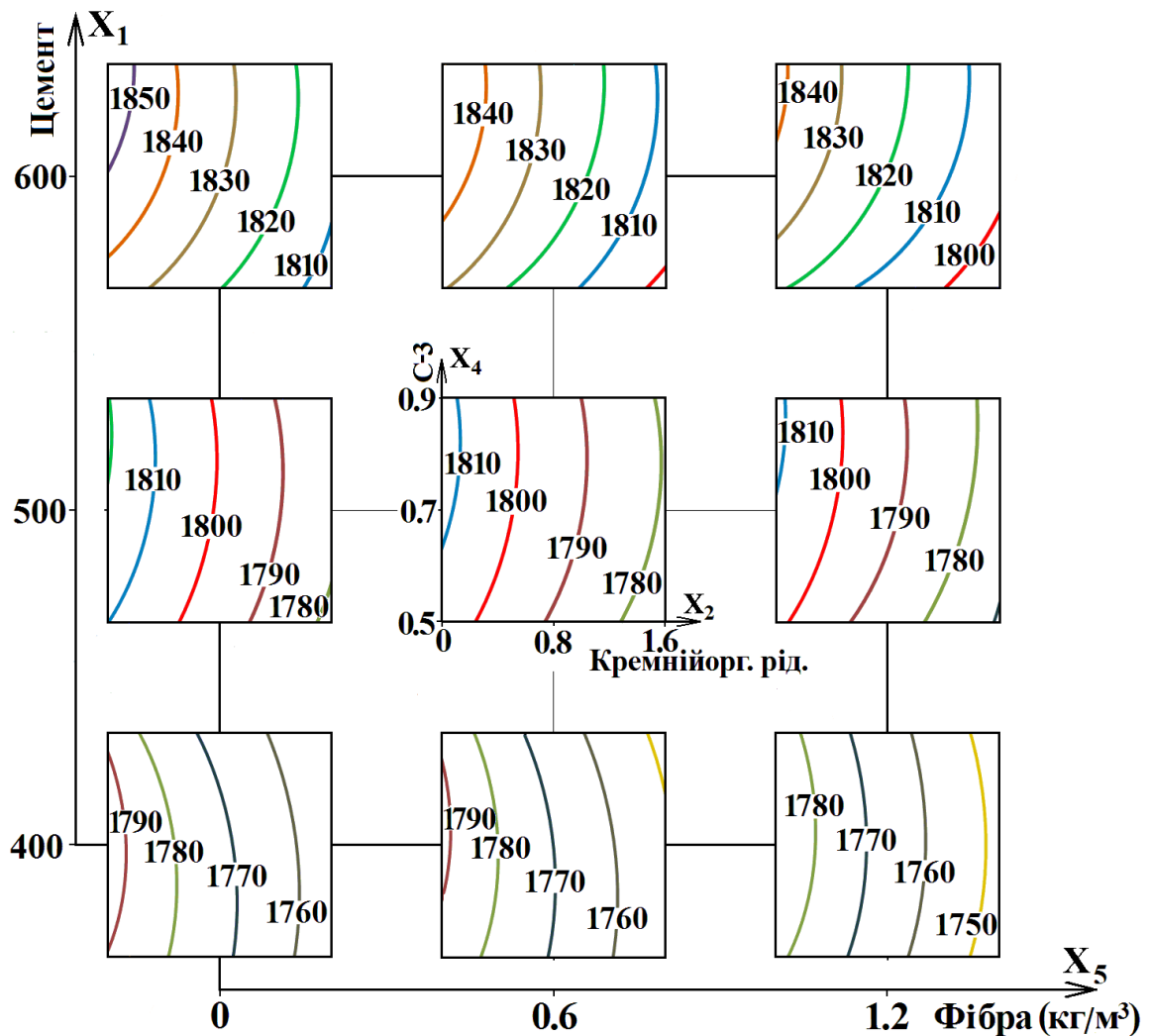


Рис.5.9. Вплив кількості портландцементу, поліпропіленової фібри, суперпластифікатора С-3 і концентрація кремнійорганічної рідини при обробці гравію на середню густину керамзитобетонів у водонасиченому стані ($x_3 = 1$)

Приєм гідрофобізації поверхні пористого керамзитового гравію найбільш істотно впливає на середню густину легкого бетону саме в водонасиченому стані. За рахунок обробки заповнювача емульсією кремнійорганічної рідини максимальної концентрації середня густина досліджених керамзитобетонів у

водонасиченому стані знижується на 30..40 кг/м³ практично незалежно від рівня інших варійованих факторів. Такий ефект пояснюється зменшенням деформацій заповнювача і відповідно контактної зони, а також здатністю кремнійорганічної плівки відштовхувати вологу від поверхні гравію, перетворюючи його пори на замкнені. Відповідно в порожнини заповнювача і матриці проникає значно менше вологи, що і знижує середню густину легкого бетону. При використанні емульсії гідрофобізатора з концентрацією кремнійорганічної рідини 0,6-0,8%, тобто рекомендованої з точки зору забезпечення міцності та довговічності керамзитобетону, середня густина матеріалу в насиченому водою стані знижується приблизно на 30 кг/м³, тобто також досить відчутно. В цілому в водонасиченому стані середня густина досліджених суднобудівних керамзитобетонів була на 110..145 кг/м³ вище, ніж їх густина в висушеному до постійної маси стані.

Важливо відзначити, що окремі проведені дослідження зразків легких бетонів на гідрофобізованому гравії у віці від 2-х до 5-ти років показали, що при впливі однобічного обводнення ефективність технологічного прийому гідрофобізації гравію в вирішенні завдання зниження середньої густини і експлуатаційної вологості керамзитобетонів при довготривалому впливі води в цілому зберігається. При однобічному впливі напірної дії води піддається одна сторона конструкції (зразку), при цьому протилежна сторона конструкції залишається на повітрі і через бетон конструкції проходить двофазна течія рідини «вода – пар», що описано в п.3.1. За рахунок зниження темпу проникнення вологи в матрицю і пористий заповнювач рівновагу між кількістю вологи, що поглинається з «вологого» боку і випаровується з «сухого» боку конструкції встановлюється при більш низькій середній вологості матеріалу. Непрямим підтвердженням цього ефекту служить вплив гідрофобізації поверхні пористого гравію на водонепроникність легкого бетону – тобто зниження проникності при даному виді модифікації.

Таким чином, середня густина досліджених модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів дозволяє ефективно використовувати

ці матеріали в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд. Дані легкі бетони можна називати саме суднобудівними керамзитобетонами через те, що основним об'єктом їх застосування є залізобетонне суднобудування. Досліджені керамзитобетони і фіброкерамзитобетони повністю відповідають вимогам ОСТ 5.9880-85 «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування» і «Правилам будування корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» щодо середньої густини матеріалу, тобто у повітряно-сухому стані їхня середня густина є нижчою 2000 кг/м³. За рахунок застосування прийому гідрофобізації поверхні пористого заповнювача середня густина модифікованих легких бетонів у водонасиченому стані знижується на 30 кг/м³ і більше, що додатково підвищує ефективність даних матеріалів.

5.6 Експлуатаційна вологість і теплопровідність

модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

Описаний в попередньому параграфі аналіз середньої густини досліджених модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів в сухому стані, в умовах рівноважної вологості, а також у водонасиченому стані дозволив визначити значення вологості за об'ємом досліджених композитів (ДСТУ Б В.2.7-170:2008). Як визначалося в п.4.4, з врахуванням значного коливання середньої густини легкого бетону методично точніше аналізувати його вологість саме у відсотках за об'ємом.

Дані про вологості матеріалів в 27-ми досліджених точках наведені в табл.5.4. Вплив варійованих факторів складу на вологість керамзитобетону при рівноважній вологості описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 W_{M \cdot n} (\%) = & 3,87 - 0,15x_1 + 0,21x_1^2 - 0,11x_1x_2 + 0,09x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \pm 0x_1x_5 \\
 & - 0,82x_2 + 0,14x_2^2 - 0,13x_2x_3 \pm 0x_2x_4 + 0,09x_2x_5 \\
 & - 0,06x_3 \pm 0x_3^2 + 0,11x_3x_4 - 0,05x_3x_5 \\
 & - 0,18x_4 + 0,34x_4^2 - 0,13x_4x_5 \\
 & \pm 0x_5 \pm 0x_5^5
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Аналіз даної моделі показує, що «рівноважна» вологість керамзитобетонів, яку ще можна назвати повітряно-сухою або гігроскопічною, найбільш істотно знижується за рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію, яка перешкоджає проникненню вологи в пори матриці і крупного заповнювача. Також досить відчутно знижується «рівноважна» вологість легкого бетону при підвищенні кількості цементу в його складі. Введення кольматуючої добавки Пенетрон А також дещо знижує кількість гігроскопічної вологи, яка знаходиться в матеріалі. Найменшу вологість мають склади з кількістю добавки С-3 близько 0,8%, а введення поліпропіленової фібри несуттєво підвищує рівень $W_{M.n.}$. Проте в цілому вплив факторів x_3 - x_5 на рівноважну вологість керамзитобетону є незначним. Для більш детального аналізу на рис.5.10 показана побудована за ЕС-моделлю (5.7) діаграма у вигляді куба, яка відображає вплив кількості портландцементу, Пенетрону А і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці поверхні гравію на вологість керамзитобетону в умовах рівноважної вологості. При побудові діаграми кількість фібри і суперпластифікатора С-3 приймалися на середньому рівні ($x_4 = x_5 = 0$).

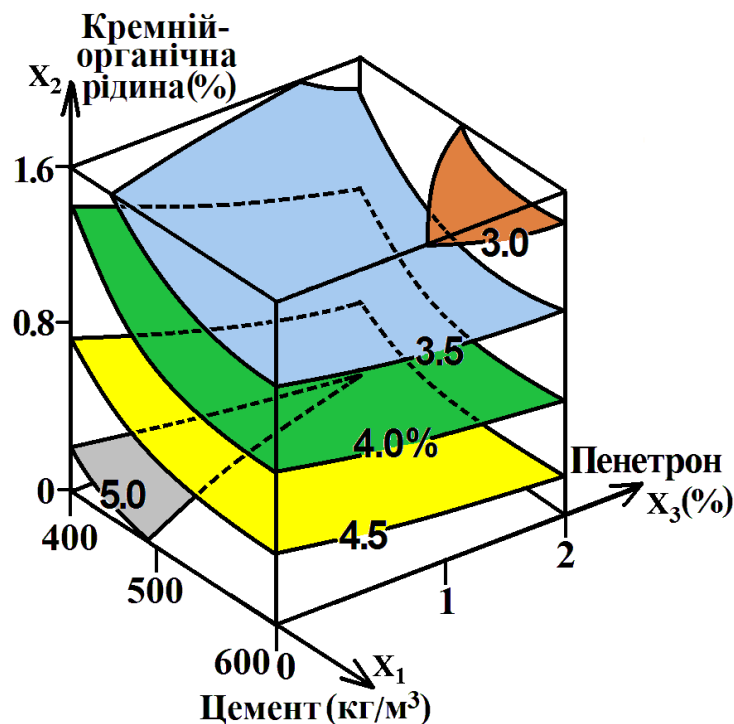


Рис.5.10. Вплив кількості портландцементу, Пенетрона А і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на рівноважну вологість суднобудівного керамзитобетону

Аналіз ЕС-моделі показує, що кількість вологи, яка знаходиться в порах і капілярах суднобудівного керамзитобетону в водонасиченому стані є майже в три рази вищою, ніж в умовах рівноважної вологості. Загальний характер впливу варійованих факторів на величину вологості керамзитобетонів в водонасиченому стані аналогічний їх впливу на рівноважну вологість матеріалу, але при цьому ступінь впливу технологічного прийому гідрофобізації гравію (x_2) і кількості Пенетрону А (x_3) є вищим. За рахунок сумісного застосування кольматуючої добавки Пенетрон А і гідрофобної обробки поверхні пористого гравію кремнійорганічною рідиною рівень вологості матеріалу, що експлуатується при постійному контакті з водою, знижується на 4-5%, тобто приблизно на третину в порівнянні з керамзитобетонами без даних модифікаторів. На рис.5.11 показана побудована за ЕС-моделлю (5.8) діаграма у вигляді куба, яка відображає вплив кількості портландцементу, Пенетрона А і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці гравію на вологість водонасичених керамзитобетонів, тобто на їх відкриту пористість. Діаграма побудована аналогічно показаної на рис.5.10, тобто при її побудові кількість фібри і суперпластифікатора С-3 також приймалися на середньому рівні ($x_4 = x_5 = 0$).

Аналіз діаграми дозволяє сказати, що введення кольматуючої добавки Пенетрон А знижує вологість матеріалу, який експлуатується в умовах постійного контакту з водою на 1-1,5%. Збільшення кількості портландцементу сприяє зниженню відкритої пористості керамзитобетону, відповідно зниженню його максимальної вологості. Легкі бетони, до складу яких входило 600 кг цементу на m^3 , мали на 2-2,5% меншу вологість в порівнянні зі складами з кількістю цементу 400 kg/m^3 . Важливо відзначити, що гідрофобна обробка поверхні гравію має найбільш істотний вплив на вологість керамзитобетону в водонасиченому стані, тобто на його відкриту пористість. При концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії 0,8% вологість матеріалу знижується на 2-2,5%. В результаті подальшого збільшення концентрації гідрофобізатора в емульсії вологість керамзитобетону в водонасиченому стані додатково

знижується, проте не настільки інтенсивно – ще на 1,3-1,7%. Подібний вплив вочевидь пояснюється перешкоджанням проникненню вологи в матрицю та пористий гравій за рахунок обробки його поверхні, яка сприяє зниженню вологісних деформацій. При цьому, як зазначалося раніше, досить відчутний ефект досягається вже при концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії 0,8%. Підтвердженням даного факту може служити те, що як встановлено в рамках даних досліджень і показано вище, за рахунок гідрофобізації поверхні заповнювача суттєво підвищується водонепроникність керамзитобетону.

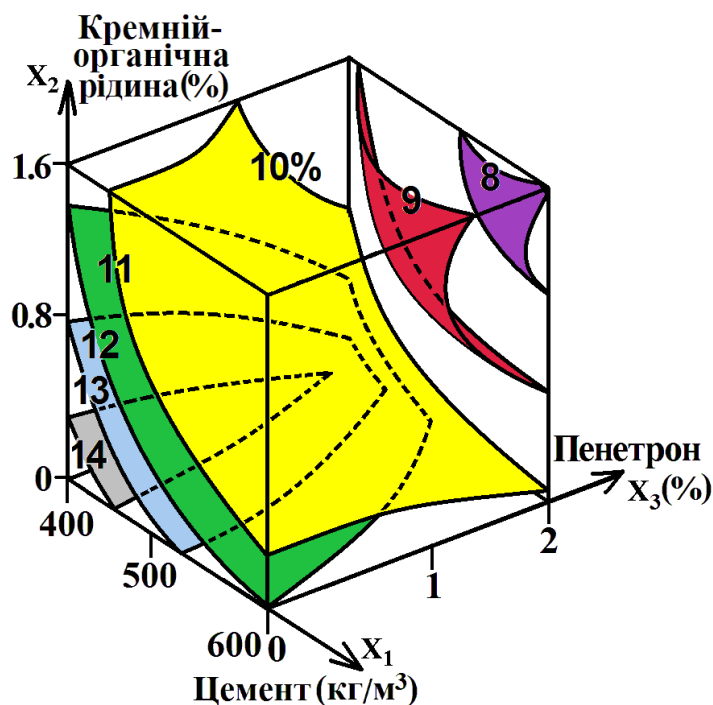


Рис.5.11. Вплив кількості портландцементу, Пенетрона А і концентрації кремнійорганічної рідини при обробці гравію на вологість суднобудівного керамзитобетону в водонасиченому стані

Таким чином, технологічний прийом гідрофобної обробки поверхні пористого гравію дозволяє істотно знизити експлуатаційну вологість легкого бетону для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. При цьому найбільш ефективно знижується вологість бетонів, експлуатованих у водному середовищі, тобто для типових умов експлуатації обводнених з одного боку конструкцій плавучих та інших гідротехнічних споруд. Подібне зниження вологості забезпечує підвищення

комфортності перебування людей в приміщеннях залізобетонного судна, а також поліпшення умов роботи технологічного обладнання.

Крім експлуатаційної вологості легкого бетону одним з важливих показників його якості є теплопровідність. Теплопровідність матеріалу впливає на температурний баланс усередині приміщень залізобетонних плавучих та інших гідротехнічних споруд, наприклад насосних станцій, та за рахунок цього забезпечує комфортність перебування людей в даних приміщеннях. Як зазначалося в п.2.5, рівень теплопровідності матеріалу визначався в умовах рівноважної вологості, оскільки методика вимірювання даного показника не дозволяє проводити випробування на водонасичених зразках. Проте такі умови відповідають тим, в яких експлуатуються надводні конструкції плавучих та інших гідротехнічних споруд. Відповідно отримані дані можуть розглядатися при аналізі комплексу властивостей досліджених керамзитобетонів. ЕС-модель, що відображає вплив варійованих на даному етапі досліджень факторів складу суднобудівних керамзитобетонів на їх теплопровідність має вигляд:

$$\begin{aligned} \lambda(\text{Вт}/(\text{м}\times\text{К})) = & 0,592 + 0,014x_1 \pm 0 x_1^2 \quad \pm 0x_1x_2 \quad \pm 0 x_1x_3 + 0,009x_1x_4 \pm 0 x_1x_5 \\ & - 0,048x_2 + 0,058x_2^2 \quad - 0,011x_2x_3 + 0,008x_2x_4 + 0,008x_2x_5 \\ & - 0,007x_3 \pm 0 x_3^2 \quad \pm 0 x_3x_4 \quad \pm 0 x_3x_5 \\ & + 0,007x_4 \pm 0 x_4^2 \quad \pm 0 x_4x_5 \\ & - 0,012x_5 - 0,013x_5^5 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Аналіз ЕС-моделі (5.9) показав, що кількість кольматуючої добавки Пенетрон А несуттєво впливає на теплопровідність матеріалу, що є очікуваним ефектом з урахуванням призначення даного модифікатора. При введенні фібри теплопровідність легкого бетону маловідчутно знижується, що можна пояснити незначним підвищенням В/Ц суміші та відповідним зменшенням середньої густини матеріалу. Проте величина такого впливу з врахуванням точності визначення теплопровідності зразків не дозволяє говорити про достовірні зміни даного показника якості. Для відображення впливу кількості цементу, добавки суперпластифікатора С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії на величину теплопровідності досліджених керамзитобетонів за ЕС-моделлю (5.9)

була збудована діаграма у вигляді куба, яка показана на рис.5.12. При побудові діаграми рівні факторів x_3 і x_5 фіксувалися на середньому значенні.

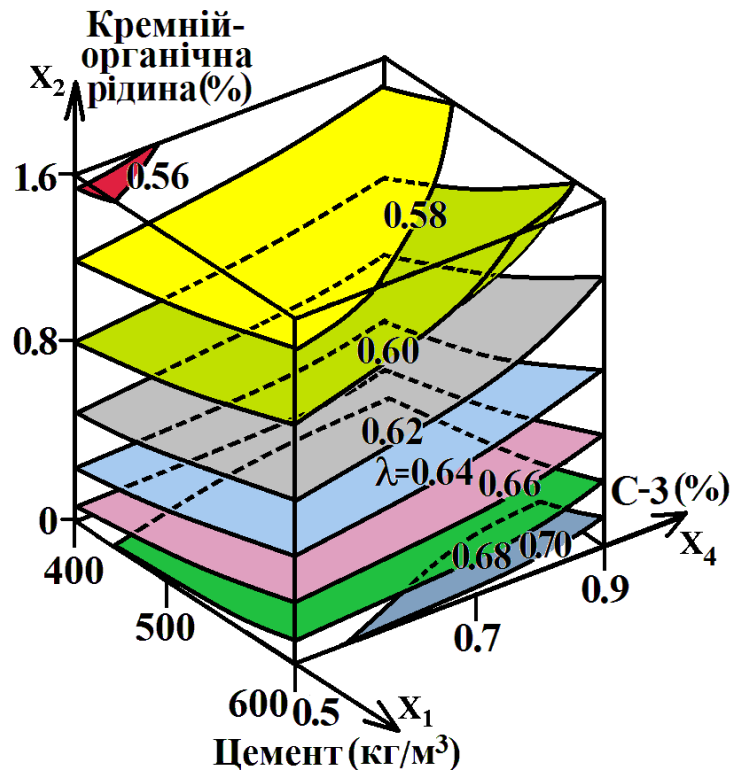


Рис.5.12. Вплив кількості портландцементу, добавки С-3 і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії на теплопровідність суднобудівного керамзитобетону ($x_3 = x_5 = 0$)

Аналіз діаграми дозволяє сказати, що збільшення кількості цементу пропорційно підвищує теплопровідність легкого бетону, проте несуттєво, в межах 0,02-0,03 Вт/(м×К). Аналогічне за величиною зростання теплопровідності керамзитобетону викликає збільшення кількості добавки С-3 з 0,5% до 0,9%. Найбільш відчутне зниження теплопровідності відбувається в результаті гідрофобної обробки поверхні пористого гравію, але величина даного зниження не пропорційна концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії. При використанні емульсії з концентрацією 0,7-0,8% величина теплопровідності керамзитобетону знижується на 0,09-0,10 Вт/(м×К) в порівнянні з матеріалами на необробленому гравії. При використанні емульсії з максимальною концентрацією кремнійорганічної рідини теплопровідності композиту знижується не набагато більше – на 0,11-0,13 Вт/(м×К). Тобто з

урахуванням впливу прийому гідрофобізації на весь комплекс фізико-механічних властивостей досліджених на даному етапі легких бетонів можна рекомендувати обмежити концентрацію кремнійорганічної рідини при обробці поверхні гравію на рівні 0,6-0,8%. Суднобудівні керамзитобетони при використанні даного виду обробки пористого гравію в поєднанні із застосуванням комплексної модифікації кольматуючою добавкою Пенетрон А і суперпластифікатором С-3, а також армуванням поліпропіленовою фіброю, як зазначалося вище, забезпечують необхідний для конструкцій плавучих споруд рівень міцності і довговічності. При цьому розроблені матеріали відрізняються зниженою середньою густиною, експлуатаційною вологістю і теплопровідністю.

Необхідно розуміти, що з врахуванням незначної товщини конструкцій плавучих споруд застосування навіть досить ефективних за показником теплопровідності матеріалів не дозволяє розраховувати на теплозахист приміщень на рівні, що є близьким до захисту житлових або громадських приміщень. Проте комфортність перебування у внутрішніх приміщеннях споруди зі стінами з легкого бетону набагато вище в порівнянні з аналогічними приміщеннями зі стінами з важкого бетону. При цьому також важливо враховувати, що для плавучих та інших гідротехнічних споруд можливе здійснення додаткового утеплення тільки з внутрішнього («сухого») боку конструкції і лише в окремих приміщеннях, відповідно теплова ефективність основного конструкційного матеріалу має велике значення.

Таким чином, розроблені модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони за рахунок своєї низької теплопровідності в порівнянні з важкими бетонами, а також низької експлуатаційної вологості збільшують комфортність перебування людей в приміщенні плавучої залізобетонної споруди, в першу чергу це стосується екіпажу, а також поліпшують умови для роботи технологічного обладнання всередині приміщень гідротехнічних споруд. При цьому найбільший вплив на експлуатаційну вологість і теплопровідність легкого бетону оказує прийом гідрофобної обробки поверхні пористого гравію.

5.7 Структура досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

Структура досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів була проаналізована декількома методом. Зокрема, за допомогою металографічного оптичного мікроскопа Sigeta в режимі кольорового зображення був проведений мікроскопічний аналіз шліф зразків досліджених легких бетонів. Фотозйомка велася цифровою фотокамерою мікроскопу при збільшенні $\times 100$. Окремі приклади отриманих оптичних кольорових мікрофото структури суднобудівного керамзитобетону наведені на рис.5.13. Аналіз показав, що пористий заповнювач має досить щільний контакт з розчинної матрицею по всій поверхні зерен (рис.5.13.а, 5.13.б). а пори в розчинної частини мають переважно незначні розміри і рівномірно розподілені у об'ємі. Але дані оптичні мікрофото характеризуються досить низькою глибиною різкості. Контактну зону пористого заповнювача з цементно-піщаною матрицею було більш детально досліджено по мікрофото, отриманим методом електронної мікроскопії.

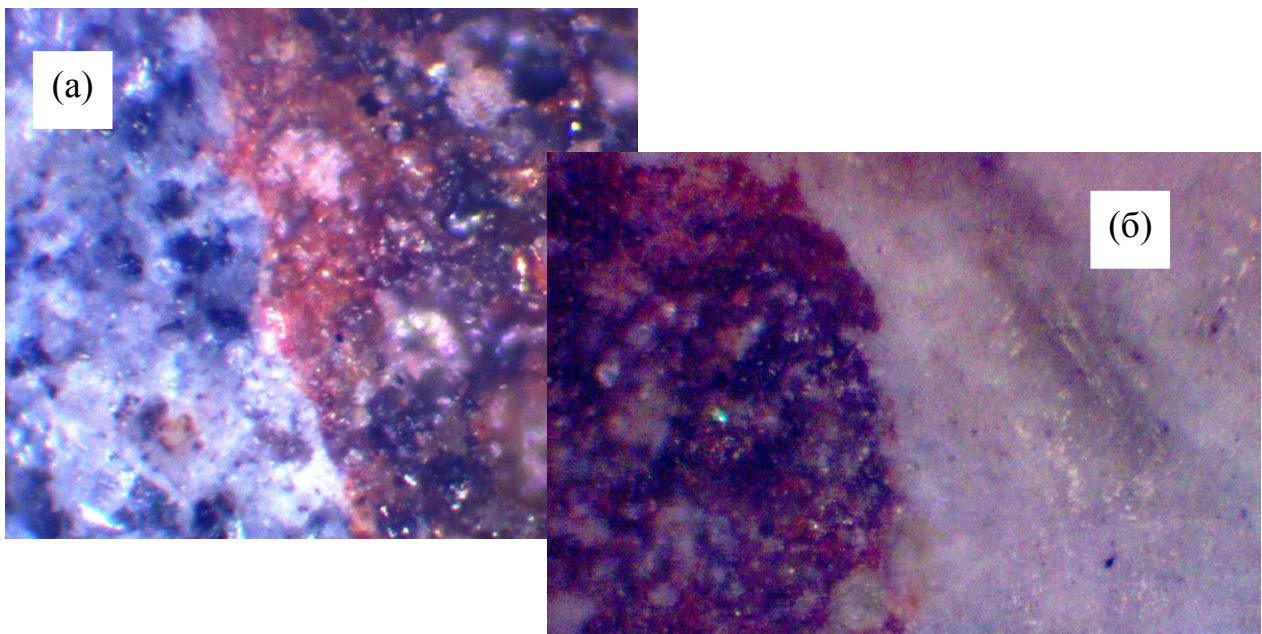


Рис.5.13. Приклади оптичних кольорових мікрофото структури суднобудівного керамзитобетону:

- а) контакт гідрофобізованого пористого заповнювача і розчинної матриці;
- б) зона контакту заповнювача, матриці і фібри.

Результати електронної мікроскопії структури композиту в контактній зоні керамзитового заповнювача і цементно-піщаної матриці модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів показані на рис.5.14. Фото зроблені при збільшенні $100\times$.

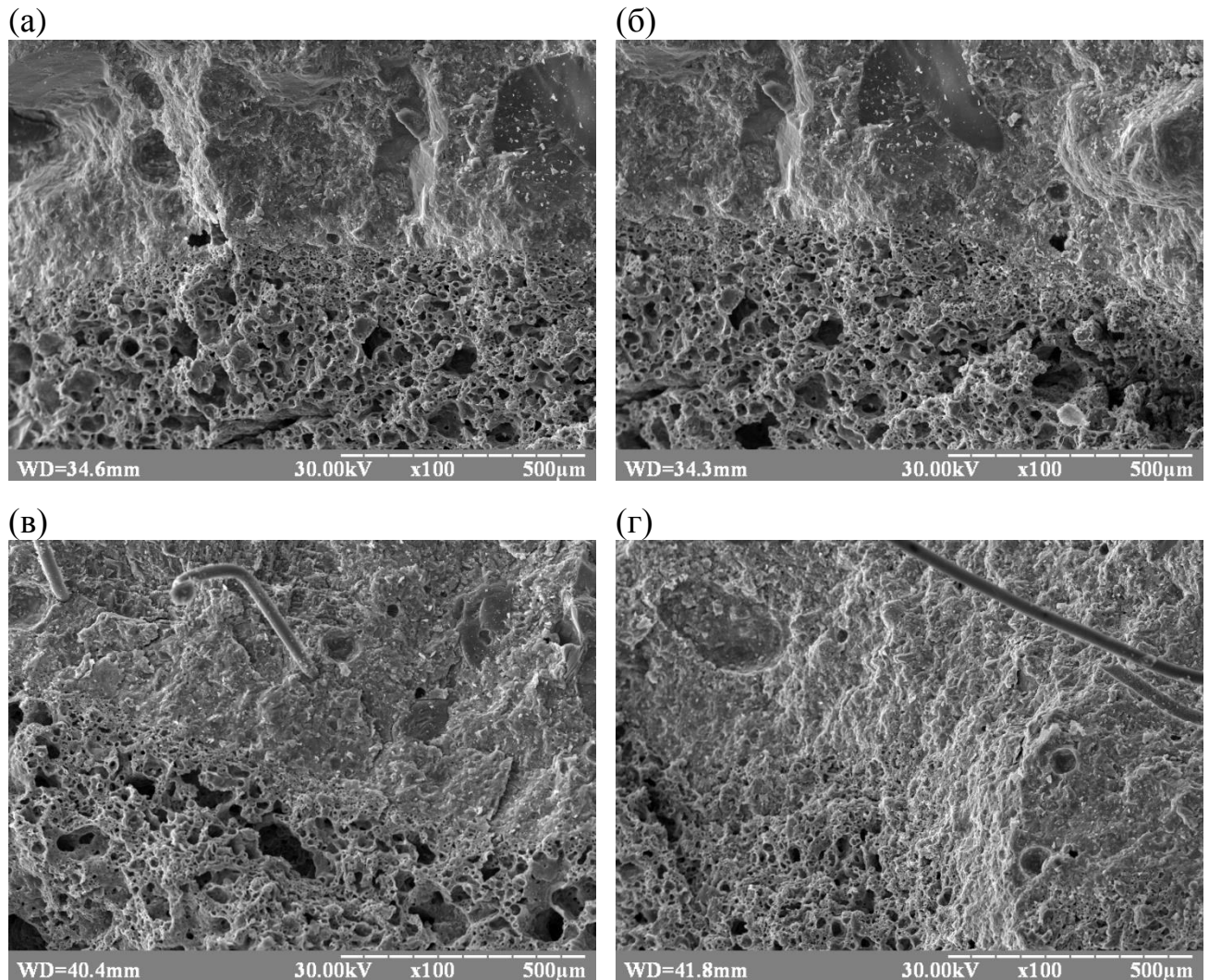


Рис.5.14. Результати електронної мікроскопії структури контактної зони керамзитового заповнювача і цементно-піщаної матриці модифікованих суднобудівних керамзитобетонів:

- а – керамзитобетон на гідрофобізованому заповнювачі
- б – керамзитобетон на заповнювачі без обробки
- в – фіброкерамзитобетон на гідрофобізованому заповнювачі
- г – фіброкерамзитобетон на заповнювачі без обробки

Порівняння мікрофото зразків легких бетонів на гідрофобізованому заповнювачі, тобто на обробленому кремнійорганічною рідиною при

концентрації в емульсії 0,8% (рис.5.14.а і 5.14.в) та на заповнювачі без обробки (рис.5.14.б і 5.14.г) дозволили зробити наступні висновки. В матеріалах на гідрофобізованому заповнювачі границя гранул керамзиту виражена набагато чіткіше, проникнення цементного тіста в заповнювач майже не спостерігається. Цементно-піщана матриця в контактній зоні легких бетонів на гідрофобізованому заповнювачі має щільну структуру з дуже низькою кількістю пор. При цьому для всіх досліджених зразків легких бетонів цементно-піщана матриця щільно прилягає до пористого заповнювача, що можна вважати наслідком зниження їх вологісних деформацій. Також електронна мікроскопія структури бетонів показала, що волокна фібри добре розподілені в композиті та защемлені цементно-піщаною матрицею (рис.5.14.в, рис.5.14.г).

Таким чином отримані результати електронної мікроскопії структури композиту досліджених суднобудівних керамзитобетонів, зокрема в контактній зоні керамзитового заповнювача і цементно-піщаної матриці, підтвердили висловлені вище висновки щодо спрямованого впливу прийому гідрофобної обробки пористого заповнювача в поєднанні з рецептурними методами управління структурою матеріалу. Отримані легкі бетони характеризуються структурою, що забезпечує їх підвищену довговічність в умовах експлуатації, які є характерними для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

Також важливим підтвердженням ефективного впливу використаних рецептурних методів і гідрофобної обробки поверхні заповнювача на структуру композиту є зміна його технологічної пошкодженості, яка відображає основні процеси утворення внутрішніх поверхонь розділу і технологічних тріщин в процесі структуроутворення і експлуатації матеріалу [14,15,133,136,137]. Технологічна пошкодженість досліджених легких бетонів визначалася на зразках у віці 2-х років, що гарантувало їх достатній рівень карбонізації для проявлення технологічних тріщин і поверхонь розділу. Усереднені значення коефіцієнта технологічної пошкодженості по площі K_{Π} (см/см²) у 27-ми експериментальних точках наведені в табл. 5.4. Аналіз відповідної ЕС-моделі, яка побудована за даними табл.5.4, показав, що кількість портландцементу і

добавки Пенетрон А несуттєво впливають на коефіцієнт технологічної пошкодженості досліджених легких бетонів. Побудована за відповідною ЕС-моделлю діаграма, яка відображає вплив кількості добавки С-3, поліпропіленової фібри і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії на коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{Π} досліджених суднобудівних керамзитобетонів показана на рис.5.15.

Таблиця 5.4

Коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{Π} (см/см²) керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів у 27-ми експериментальних точках

| № | K_{Π} | № | K_{Π} | № | K_{Π} |
|---|-----------|----|-----------|----|-----------|
| 1 | 2,32 | 10 | 2,14 | 19 | 2,02 |
| 2 | 2,31 | 11 | 2,24 | 20 | 2,12 |
| 3 | 2,46 | 12 | 2,28 | 21 | 2,0 |
| 4 | 2,14 | 13 | 2,16 | 22 | 1,96 |
| 5 | 2,03 | 14 | 2,11 | 23 | 2,03 |
| 6 | 1,85 | 15 | 2,16 | 24 | 2,06 |
| 7 | 1,92 | 16 | 1,95 | 25 | 1,99 |
| 8 | 2,09 | 17 | 2,04 | 26 | 2,05 |
| 9 | 2,32 | 18 | 1,89 | 27 | 1,97 |

Аналіз діаграми показує, що за рахунок застосування технологічного прийому гідрофобізації поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини з концентрацією 0,6-0,8% значення K_{Π} бетонів знижується на 9-12%. Подальше підвищення концентрації гідрофобізатору вже не менш ефективно, але додатково знижує рівень K_{Π} . При застосуванні дисперсного армування при кількості фібри 0,6-0,7 кг/м³ значення K_{Π} знижується на 5-10%, подальше зростання кількості волокон не впливає на коефіцієнт технологічної пошкодженості бетону. Це можна пояснити здатністю дисперсної арматури утримувати окремі блоки композиту при формуванні структури, але з іншого боку застосування фібри вимагає підвищення В/Ц суміші. За рахунок підвищення кількості добавки С-3 до 0,8-0,9% значення коефіцієнту технологічної пошкодженості досліджених легких бетонів знижується на 8-10%, що також можна пояснити зміною В/Ц суміші.

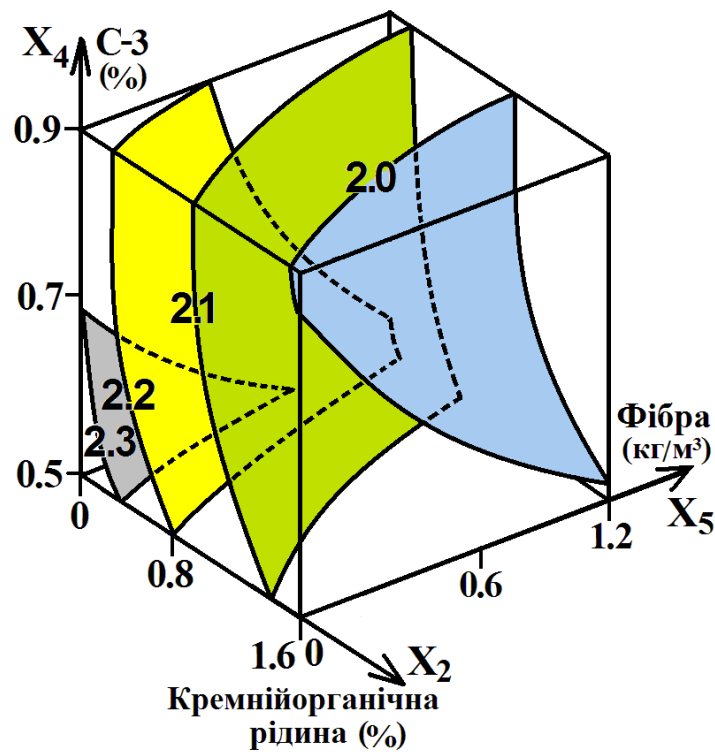


Рис.5.15. Вплив кількості добавки С-3, поліпропіленової фібри і концентрації кремнійорганічної рідини в емульсії на коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{Π} суднобудівного керамзитобетону ($x_1 = x_3 = 0$)

Таким чином, проведений аналіз технологічної пошкодженості досліджених керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів показав, що в найбільшій мірі значення K_{Π} для даних матеріалів знижується за рахунок гідрофобної обробки гравію з раціональною концентрацією кремнійорганічної рідини в емульсії, що свідчить про суттєвий вплив даного прийому на процес структуроутворення композиту.

Висновки за 5-м розділом

1. За рахунок застосування прийому гідрофобної обробки поверхні пористого гравію в поєднанні з використанням кольматуючої та пластифікуючої добавок як рецептурних методів управління структурою отримані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони з підвищеною міцністю, довговічністю та покращеними експлуатаційними властивостями. Застосування легких бетонів дозволяє збільшити вантажопідйомність плавучих

споруд, підвищити комфортність перебування людей в приміщеннях даних споруд, а також поліпшити умови роботи технологічного обладнання.

2. З позиції забезпечення комплексу фізико-механічних властивостей та підвищення довговічності керамзитобетону раціональною є концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії при обробці поверхні пористого гравію на рівні 0,6-0,8%. Прийом гідрофобної обробки поверхні пористого гравію дозволяє знизити В/Ц легкобетонної суміші, зменшити набухання і усадку заповнювача в процесі структуроутворення бетону, досягнути необхідного балансу між адгезією і когезією матричного матеріалу до заповнювача, а також знизити розм'якшення пористого заповнювача в вологих умовах. Це, зокрема, сприяє покращенню сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

3. Встановлено, що збільшення кількості портландцементу, добавки С-3 і гідрофобізація поверхні пористого гравію знижує В/Ц сумішей рівної рухомості. Введення Пенетрону А і фібри практично не впливає на В/Ц керамзитобетонних сумішей. Збільшення кількості портландцементу пропорційно підвищує міцність керамзитобетону при стиску і на розтяг при згині. Найбільший рівень міцності показують склади, в які введено 0,7-0,8% суперпластифікатора С-3. Гідрофобізація поверхні пористого гравію при концентрації кремнійорганічної рідини 0,6-0,8% підвищує міцність при стиску керамзитобетонів, при цьому більш відчутно в водонасиченому стані. За рахунок дисперсного армування міцність на розтяг при згині керамзитобетонів підвищується на 0,5-0,8 МПа.

4. Модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони при кількості портландцементу 500-600 кг/м³, введенні 2% добавки Пенетрон А і 0,7-0,8% добавки С-3, а також при використанні гідрофобної обробки поверхні пористого гравію мають водонепроникність від W8 до W12, морозостійкість не нижче F500 а також високу корозійну стійкість в морській воді, що відповідає вимогам Морського реєстру та забезпечує їх високу довговічність. Найістотніше на водонепроникність бетону впливає гідрофобізація поверхні гравію, кількість портландцементу і кольматуючої добавки. За рахунок гідрофобізації поверхні гравію морозостійкість керамзитобетонів підвищується на 50 і більше циклів, за рахунок дисперсного армування – приблизно на 50 циклів.

5. Середня густина досліджених суднобудівних керамзитобетонів в водонасиченому стані становить 1750..1860 кг/м³, що відповідає вимогам галузевих стандартів. Найбільшу середню густину мають склади з максимальною кількістю цементу і кількістю суперпластифікатора С-3 0,8-0,9%. За рахунок застосування кольматіруючої добавки Пенетрон А і технологічного прийому гідрофобної обробки поверхні пористого гравію кремнійорганічною рідиною рівень вологості матеріалу, що експлуатується при постійному контакті з водою, знижується на 4-5% за об'ємом, тобто приблизно на третину в порівнянні з керамзитобетонами без даних модифікаторів. За рахунок гідрофобізації поверхні гравію теплопровідність легкого бетону знижується на 0,09-0,10 Вт/(м×К), а середня густина у вологому стані на 30..40 кг/м³, що пояснюється зниженням капілярної пористості композиту за здатністю плівки гідрофобізатора перешкоджати проникненню вологи у пори гравію.

6. Проведена електронна мікроскопія підтвердила ефективність застосування прийому гідрофобної обробки поверхні пористого заповнювача в поєднанні з рецептурними методами управління структурою матеріалу. Модифіковані легкі бетони характеризуються структурою, яка забезпечує їх підвищену довговічність в характерних для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд умовах експлуатації. Цементно-піщана матриця в контактній зоні легких бетонів на гідрофобізованому заповнювачі має щільну структуру з низькою кількістю пор. При цьому для всіх досліджених зразків легких бетонів цементно-піщана матриця щільно прилягає до пористого заповнювача. Волокна фібри добре розподілені в матеріалі і защемлені, а пори в розчинної частини мають переважно незначні розміри і рівномірно розподілені у об'ємі. За рахунок гідрофобної обробки поверхні пористого гравію емульсією кремнійорганічної рідини з раціональною концентрацією на 9-12% знижується коефіцієнт технологічної пошкодженості легких бетонів, що свідчить про суттєвий вплив даного прийому на процес структуроутворення композиту.

7. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [294,288,292,323,329-335].

РОЗДІЛ 6
ВЛАСТИВОСТІ І ДОВГОВІЧНІСТЬ БЕТОНІВ
НА РІЗНИХ ТИПАХ ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ.
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

**6.1 Порівняння механічних властивостей бетонів
на гранітному та вапняковому щебені**

Як зазначалося в п.2.1, на шостому етапі досліджувалися властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів. Південь України володіє значними покладами вапняків, використання яких в гідротехнічному будівництві в силу ряду причин сьогодні доволі обмежено. Проте в другій половині минулого сторіччя вапняки доволі успішно використовувалися для різних типів конструкцій гідротехнічних споруд [69,17 та ін.]. Дешевизна видобутку і доставки до споживача даних пористих заповнювачів обумовлюють інтерес до розробки технологій їхнього використання в бетонах з врахуванням сучасного рівня розвитку будівельної галузі. В першу чергу подібні бетони можуть бути корисними і економічно вигідними в південних регіонах України, зокрема в гідротехнічному будівництві.

Для вивчення можливості застосування пористого вапнякового щебеню в бетонах гідротехнічних споруд, а також з метою дослідження ефективності запропонованих практичних методів підвищення довговічності для бетонів на природніх пористих заповнювачах, були проведені описані в цьому і наступному параграфі експерименти. Перший експеримент був спрямовано на порівняння властивостей бетонів на гранітному та вапняковому щебені. Проводилося дві паралельних серії експериментів: на пористому вапняковому і на гранітному щебені. В першій серії застосовувався вапняковий щебінь фракції 5-20 мм з насипною густиною 1200 кг/м^3 , властивості даного щебеню наведені у п.2.4. У другій серії для порівняння досліджувалися повністю аналогічні за складами бетони на гранітному щебені з насипною густиною 1360 кг/м^3 . У обох

серіях експериментів дослідження проводилося за 2-х факторним 9-ти точковим планом. В якості варійованих факторів були прийняті:

X_1 - кількість портландцементу, від 300 до 500 кг/м³;

Даний фактор і в такому діапазоні варіювання був обраний для можливості аналізу і порівняння властивостей бетонів з відчутною різницею в кількості в'язучого в структурі, що забезпечує значні відмінності в рівнях фізико-механічних показників композитів в межах факторного простору експерименту.

X_2 - кількість поліпропіленової фібри Ваусон (діаметр волокон 18,7 мкм, довжина – 12 мм), від 0 до 1 кг/м³.

Даний фактор був обраний з метою проведення дослідження впливу дисперсного армування на властивості бетонів на основі вапнякового щебеню та порівняння ефективності даного рецептурного прийому для бетонів на вапняковому і гранітному щебені.

Всі досліджені у обох серіях експериментів суміші були пластифіковані суперпластифікатором С-3 в кількості 0,8% від маси цементу і мали рівну рухомість П1 (ОК = 2..3 см), що досягалося підбором кількості води і забезпечувало коректність порівняння бетонів між собою. План експерименту і склади досліджених на даному етапі бетонів наведено у табл.6.1. Результати визначених у експериментальних точках обох серій експерименту рівнів В/Ц бетонних сумішей та фізико-механічні показники бетонів на вапняковому і гранітному щебені показані в табл. 6.2.

За результатами визначення В/Ц в 9-ти експериментальних точках для кожної серії були побудовані ЕС-моделі, що описують вплив варійованих факторів складу на даний показник відповідно для обох серій експерименту (індекси відповідно для вапнякового і гранітного щебеню «в» і «г»):

$$\begin{aligned} \text{В/Ц}_v = 0,408 - 0,076x_1 + 0,011x_1^2 \pm 0x_1x_2 \\ + 0,003x_2 + 0,001x_2^2 \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{В/Ц}_r = 0,362 - 0,064x_1 + 0,031x_1^2 - 0,002x_1x_2 \\ + 0,005x_2 + 0,004x_2^2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Таблиця 6.1

План експерименту та склади досліджуваних бетонів
на вапняковому і гранітному щебені

| № | X ₁ цемент | X ₂ фібра | Склад бетону, кг/м ³ | | | | |
|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------|-----|-------|
| | | | Цемент | щебінь вапняковий/гранітний | пісок | С-3 | фібра |
| 1 | -1 | -1 | 300 | 1106/1243 | 703 | 2,4 | 0 |
| 2 | -1 | 0 | 300 | 1106/1243 | 702 | 2,4 | 0,5 |
| 3 | -1 | +1 | 300 | 1106/1243 | 701 | 2,4 | 1,0 |
| 4 | 0 | -1 | 400 | 1091/1226 | 612 | 3,2 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 400 | 1091/1226 | 611 | 3,2 | 0,5 |
| 6 | 0 | +1 | 400 | 1091/1226 | 610 | 3,2 | 1,0 |
| 7 | +1 | -1 | 500 | 1069/1201 | 529 | 4 | 0 |
| 8 | +1 | 0 | 500 | 1069/1201 | 528 | 4 | 0,5 |
| 9 | +1 | +1 | 500 | 1069/1201 | 527 | 4 | 1,0 |

Побудована за даними ЕС-моделями суміщена діаграма у вигляді квадрату показана на рис.6.1.

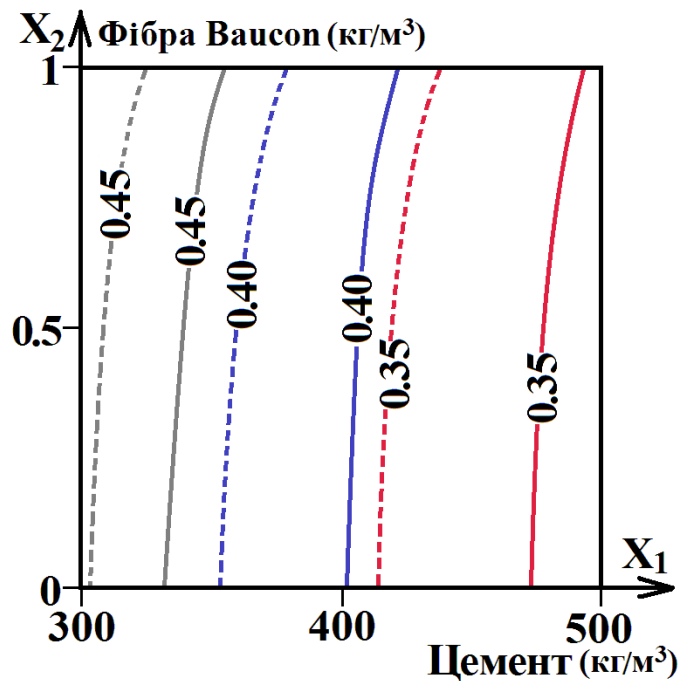


Рис.6.1. Вплив кількості портландцементу та фібри на В/Ц бетонної суміші: — склади на вапняковому щебені, - - - склади на гранітному щебені

В/Ц бетонної суміші і фізико-механічні показники
бетонів на вапняковому і гранітному щебені

| № точки | Вапняковий щебень | | | | Гранітний щебень | | | |
|---------|-------------------|---------------------------|--|---|------------------|---------------------------|--|---|
| | В/Ц | Міцність при стиску (МПа) | Міцність на розтягування при згині (МПа) | Зносостійкість, G_1 , г/см ² | В/Ц | Міцність при стиску (МПа) | Міцність на розтягування при згині (МПа) | Зносостійкість, G_1 , г/см ² |
| 1 | 0,493 | 41,6 | 6,99 | 0,29 | 0,454 | 50,8 | 6,46 | 0,35 |
| 2 | 0,495 | 43,4 | 7,15 | 0,26 | 0,455 | 52,0 | 7,71 | 0,31 |
| 3 | 0,500 | 43,0 | 7,20 | 0,25 | 0,470 | 47,5 | 7,82 | 0,29 |
| 4 | 0,407 | 53,4 | 7,58 | 0,28 | 0,362 | 56,1 | 7,58 | 0,33 |
| 5 | 0,409 | 49,6 | 7,79 | 0,25 | 0,364 | 56,1 | 8,07 | 0,29 |
| 6 | 0,411 | 49,7 | 7,83 | 0,24 | 0,368 | 58,7 | 7,94 | 0,27 |
| 7 | 0,341 | 60,5 | 8,14 | 0,28 | 0,327 | 62,2 | 7,96 | 0,31 |
| 8 | 0,343 | 60,4 | 8,25 | 0,24 | 0,329 | 60,6 | 8,42 | 0,27 |
| 9 | 0,347 | 60,5 | 8,24 | 0,23 | 0,336 | 62,0 | 8,25 | 0,25 |

Як видно з діаграми, найменше В/Ц в обох серіях мають склади з максимальною кількістю цементу і без фібри. Найбільше В/Ц спостерігається в протилежній точці факторного простору – при мінімальній кількості цементу і максимальній кількості фібри. Загальний характер впливу варійованих факторів на В/Ц суміші є аналогічним для складів на обох видах щебеню, але при використанні вапнякового щебеню рівень В/Ц суміші очікувано був дещо вищим, що пояснюється додатковою водопотребою пористого заповнювача. За рахунок застосування суперпластифікатора С-3 всі досліджені суміші мали досить низькі показники В/Ц при забезпеченні їх заданої рухомості.

Середня густина бетонів на вапняковому щебені при рівноважній вологості коливалася від 2270 до 2300 кг/м³. Аналогічні за складом бетони на гранітному щебені мали середню густина від 2380 до 2400 кг/м³. Тобто при використанні пористого заповнювача з щільних порід вапняку середня густина бетону

відрізняється від густини «традиційного» важкого бетону на гранітному щебені приблизно на 100 кг/м^3 .

Аналіз впливу варійованих факторів на величину міцності при стиску досліджених бетонів показав, що для обох досліджених серій кількість фібри не впливає на цей показник якості матеріалів. Відповідно на рис.6.2 показана суміщена діаграма, яка побудована за аналогічними з (6.1) і (6.2) ЕС-моделями, та яка відображає вплив кількості портландцементу на міцність досліджених бетонів при стиску.

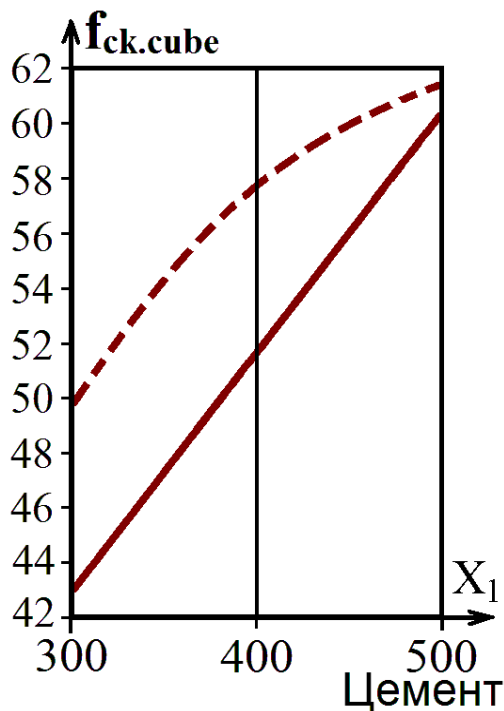


Рис.6.2. Вплив кількості портландцементу на міцність бетонів при стиску:

— склади на вапняковому щебені,
 - - - склади на гранітному щебені

Як видно з діаграми, міцність при стиску бетонів на вапняковому щебені була на 2..7 МПа меншою, ніж аналогічних за складом бетонів на гранітному щебені. Проте у міру збільшення кількості цементу ця різниця знижується і при кількості в'язучого $450\text{-}500 \text{ кг/м}^3$ вона складає 2..3 МПа, тобто 5..8%. Це можна пояснити кращою роботою пористого заповнювача в умовно «жирних» сумішах з великою кількістю цементу, в яких пори заповнювача краще заповнюються розчином в'язучого. Також при зростанні кількості цементу згідно з принципами підбору складу бетону дещо знижується частка крупного заповнювача в суміші та зростає розсунення його зерен. Тобто знижується вплив міцності заповнювача на міцність композиту.

Важливо відзначити, що як зазначалося вище, для багатьох тонкостінних конструкцій міцність при стиску не можна вважати єдиною основною характеристикою матеріалу. Також важливим показником якості бетону таких конструкцій є міцність на розтяг при згині. У типових розрахунках конструкцій частіше всього задається клас бетону за міцністю на стиску, однак відповідно до даного класу бетону задається показник міцності на розтяг при згині. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів обох серій на розтяг при згині описують наведені нижче ЕС-моделі:

$$f_{ctk,в} \text{ (МПа)} = 7,78 + 0,55x_1 - 0,07x_1^2 - 0,03x_1x_2 + 0,09x_2 - 0,07x_2^2 \quad (6.3)$$

$$f_{ctk,г} \text{ (МПа)} = 8,07 + 0,44x_1 \pm 0 x_1^2 - 0,27x_1x_2 + 0,34x_2 - 0,40x_2^2 \quad (6.4)$$

Побудована за даними ЕС-моделями суміщена діаграма показана на рис.6.3.

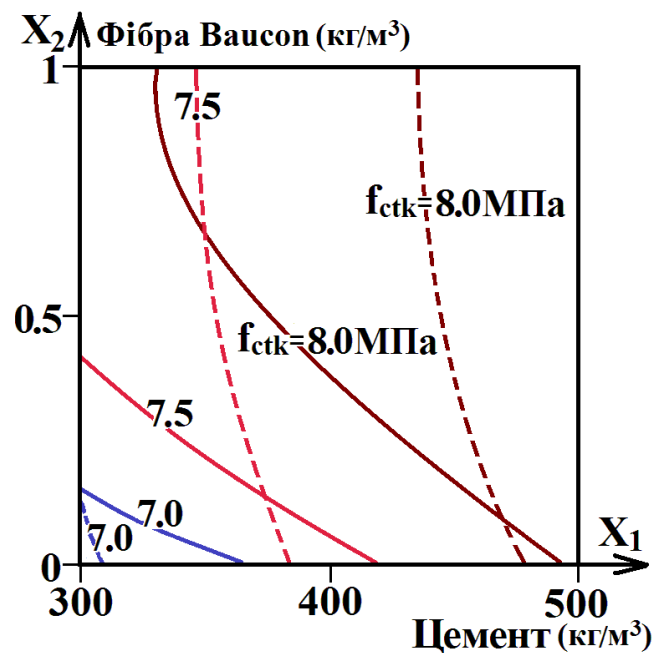


Рис.6.3. Вплив кількості портландцементу та фібри на міцність бетону на розтяг при згині:

— склади на вапняковому щебені, - - - склади на гранітному щебені

Аналіз діаграми дозволяє зробити висновок, що міцність досліджених бетонів на розтяг при згині несуттєво залежить від виду крупного заповнювача

(щебеню). Це є проявом відомого у матеріалознавстві ефекту кращої роботи бетонів на пористих заповнювачах при розтягуючих напруженнях завдяки підвищеній адгезії між розчинною частиною бетону і заповнювачем та здатності даних заповнювачів розсіювати фронт тріщини при її зростанні. В обох серіях найбільшу міцність на розтяг показують склади, в яких введено 0,8-0,9 кг/м³ дисперсного волокна. Введення більшої кількості фібри не ефективно, що пояснюється подвійним ефектом при застосуванні фібри. З одного боку, дисперсна арматура покращує здатність матеріалу опиратися розтягуючим напруженням, з іншого боку – фібра вимагає підвищення В/Ц суміші для збереження рівної рухомості. В цілому, за рахунок введення фібри міцність на розтяг при згині бетонів на гранітному щебені зростає на 0,5-1,0 МПа, а бетонів на вапняковому щебені – на 0,4-0,5 МПа.

Також досить важливим показником якості для бетонів окремих типів гідротехнічних конструкцій, зокрема для водопропускних споруд і лицювань каналів, є його зносостійкість. В подібних спорудах цей показник в значній мірі визначає довговічність конструктивів. Згідно ДСТУ Б В.2.6-145:2010 при одночасному впливі агресивного середовища і стираючого навантаження, наприклад у зоні утворення і руху льоду, ступень агресивного впливу вважається на одну ступень більшою. При абразивному впливі (стиранні) в процесі експлуатації відбувається пошарове руйнування матеріалу. При цьому у бетоні в першу чергу знижується не міцність або морозостійкість, а зносостійкість, критерієм оцінки якої є стиранність. Фактично зношування здійснюється через прошарок рідини, тобто взаємодія носить характер фізичної або хемосорбції [336]. Прошарок рідини в цьому випадку грає роль третього тіла, що збільшує знос. Можна сказати, що зносостійкість бетону як композиту обумовлюється багатьма чинниками: видом заповнювачів, наявністю дисперсної арматури, стиранністю (міцністю) цементного каменю і зони контакту цементний камінь – заповнювач. Бетони на вапняках зазвичай мають дещо вищу стиранність, ніж бетони на гранітному щебені [336]. Для всіх досліджених складів бетонів за стандартною методикою була визначена їх

стиранність (зносостійкість). Побудована за відповідними ЕС-моделями суміщена діаграма, що відображає вплив варійованих факторів складу на стиранність бетонів в двох серіях, показана на рис.6.4.

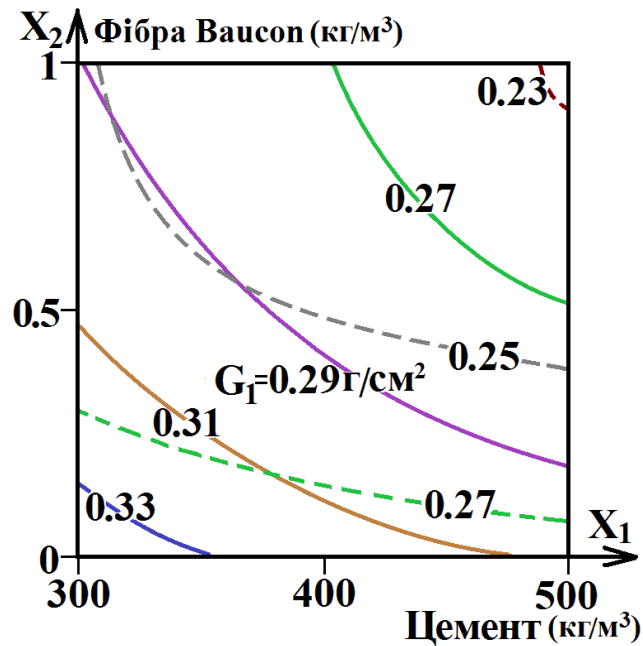


Рис.6.4. Вплив кількості портландцементу та фібри на стиранність бетону:
 — склади на вапняковому щебені, - - - склади на гранітному щебені

Аналіз діаграми дозволяє сказати, що збільшення кількості цементу і введення поліпропіленової фібри прогнозовано знижує стиранність бетонів в обох серіях. При цьому для бетонів на вапняковому щебені діапазон зміни величини G_1 значно вище, ніж для бетонів на гранітному щебені. Дисперсне армування знижує стиранність бетонів як на гранітному, так і на вапняковому щебені приблизно з рівною ефективністю. Тобто при введенні 0,5-0,6 кг/м³ фібри зносостійкість матеріалу підвищується достатньо відчутно, подальше підвищення дозування фібри вже менш ефективне. В цілому стиранність бетонів на вапняковому заповнювачі була вищою, ніж аналогічних важких бетонів. Проте при підвищенні кількості цементу до 450..500 кг/м³ і введенні більше 0,5 кг/м³ фібри показники стиранності бетону на пористому заповнювачі є більшим від стиранності «контрольного» бетону на гранітному щебені лише на 15-20%.

Таким чином результати досліджень механічних властивостей бетонів на вапняковому щебені з міцних перекристалізованих порід вапняку показали, що

за рівнем міцності та зносостійкості дані матеріали можуть бути використані в деяких конструктивах гідротехнічних споруд, наприклад в підпірних стінках та лицюваннях каналів. Для вивчення можливостей підвищення довговічності подібних матеріалів на природніх пористих заповнювачах, що дозволить розширити їх застосування у гідротехнічному будівництві, були проведені описані нижче дослідження властивостей модифікованих бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією.

6.2 Властивості і довговічність модифікованих бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією

Як показано в п.3.3, обробка пористого заповнювача цементною суспензією в початковій стадії перемішування суміші є доволі простим і одночасно ефективним прийомом керування структурою і властивостями легких бетонів. Вапняковий щебінь є пористим заповнювачем, відповідно науковий інтерес представляє вивчення доцільності застосування його обробки з метою підвищення довговічності і фізико-механічних властивостей бетону.

Досліджувалися структура і властивості модифікованих бетонів на вапняковому щебені з міцних перекристалізованих порід вапняку, зокрема вплив обробки пористого заповнювача цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші (характеристики щебеню наведено в п.2.4). Проводився 2-х факторний експеримент за оптимальним 9-ти точковим планом. Варіювалися наступні фактори складу:

X_1 – кількість мікрокремнезему, від 0 до 40 кг/м³. Фактор було обрано з метою дослідження впливу даного модифікатора, який показав свою ефективність на інших етапах роботи, на фізико-механічні властивості та довговічність бетонів на вапняковому заповнювачі.

X_2 – кількість добавки С-3, від 0,5 до 1,0% від маси цементу. Фактор було обрано з метою виявлення раціональної кількості даного модифікатора в бетонах на вапняковому заповнювачі, зокрема обробленому цементною суспензією.

Для всіх складів бетонів кількість портландцементу становила 450 кг/м^3 , що було прийнято виходячи з результатів досліджень, наведених в п.6.1. Всі суміші мали рівну рухомість П2 ($OK=6..8 \text{ см}$). План експерименту і склади досліджених на даному етапі бетонів наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

План експерименту та склади досліджених бетонів на вапняковому щебені

| № | X_1 | X_2 | Склад бетону, кг/м^3 | | | | |
|---|-------|-------|-------------------------------|--------|-------|------------|------|
| | | | Цемент | Щебінь | Пісок | Мікрокрем. | С-3 |
| 1 | -1 | -1 | 450 | 1077 | 569 | 0 | 2,25 |
| 2 | -1 | 0 | | | 572 | | 3,38 |
| 3 | -1 | +1 | | | 574 | | 4,5 |
| 4 | 0 | -1 | | 1073 | 556 | 20 | 2,25 |
| 5 | 0 | 0 | | | 559 | | 3,38 |
| 6 | 0 | +1 | | | 561 | | 4,5 |
| 7 | +1 | -1 | | 1069 | 543 | 40 | 2,25 |
| 8 | +1 | 0 | | | 546 | | 3,38 |
| 9 | +1 | +1 | | | 548 | | 4,5 |

Виконувалося дві паралельних серії експериментів. Готувалися бетони однакових складів за різними технологіями змішування суміші. У першій серії (контрольній, індекс «к») змішування проводилося за традиційною технологією з послідовним завантаженням у змішувач води з добавкою С-3, вапнякового щебеню, портландцементу з мікрокремнеземом (при необхідності) та піску. Загальний час перемішування суміші складав 4-5 хвилин. У другій серії змішування компонентів проводилося з попередньою обробкою пористого вапнякового щебеню цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші (індекс «о»). Як зазначено вище, ця операція проводилася з метою покращення сумісної роботи заповнювача з матрицею, зміцнення поверхневого шару пористого заповнювача та перехідної зони, а також для покращення однорідності властивостей природного пористого заповнювача. Послідовність змішування в другій серії була такою. У змішувач подавалася вода з добавкою

C-3 та портландцемент з мікрокремнеземом (при необхідності). Після однієї хвилини перемішування даної цементної суспензії у змішувач подавався вапняковий щенінь, який далі оброблявся отриманою суспензією протягом 1-ї хвилини, тобто продовжувалося перемішування. Далі в змішувач подавався пісок. Суміш перемішувалася до досягнення однорідності. Таким чином, загальний час перемішування суміші складав 5-6 хвилин, що приблизно на хвилину довше, ніж приготування суміші традиційним способом. Ця хвилинка необхідна для приготування цементної суспензії, проте подальші операції змішування проходять приблизно в тому ж темпі, що і при традиційній технології приготування бетонної суміші з крупним вапняковим заповнювачем. Тобто загальна кількість портландцементу в бетонах обох серій була рівною (450 кг/м^3), проте вводилося в'яжуче за різними технологіями.

Як зазначалося вище, всі суміші мали рівну рухомість. Встановлено, що технологія приготування суміші не впливає на рівень її В/Ц. Тобто водопотреба суміші при застосуванні традиційної технології не відрізнялася від цього показнику при застосуванні попередньої обробки пористого вапнякового щебеню цементною суспензією. В обох серіях експерименту В/Ц однаково залежало від складу бетону на вапняковому щебені. Значення В/Ц сумішей рівної рухомості та механічні властивості досліджених бетонів наведені у таблиці 6.4. ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на В/Ц суміші (для обох серій) має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц}_K = \text{В/Ц}_O = 0,458 + 0,024x_1 - 0,010x_1^2 \pm 0x_1x_2 \\ - 0,046x_2 \pm 0x_2^2 \end{aligned} \quad (6.5)$$

За ЕС-моделлю (6.5) була побудована діаграма у вигляді квадрату, яка показана на рис.6.5. Аналіз даної діаграми показує, що у міру зростання кількості суперпластифікатору з 0,5 до 1% В/Ц суміші знижується. При введенні в бетонну суміш мікрокремнезему у кількості 20-25 кг/м^3 В/Ц підвищується на 7..8%. Подальше збільшення кількості мікрокремнезему до 40 кг/м^3 підвищує В/Ц суміші вже на 9-11%. Тобто застосування даного

модифікатору викликає необхідність незначного підвищення В/Ц або кількості добавки С-3 для збереження рухомості суміші.

Таблиця 6.4

В/Ц бетонної суміші і механічні властивості досліджених бетонів на вапняковому щебені

| № точки | В/Ц | Міцність при стиску (МПа) | | Міцність на розтяг при згині (МПа) | | Середня міцність на розтяг при згині (МПа) |
|---------|-------|---------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|--|
| | | контроль | з обробкою щебеню | контроль | з обробкою щебеню | |
| 1 | 0,476 | 37,4 | 40,6 | 6,17 | 6,65 | 6,41 |
| 2 | 0,404 | 45,8 | 53,2 | 7,40 | 7,61 | 7,51 |
| 3 | 0,394 | 52,7 | 54,1 | 7,83 | 7,93 | 7,88 |
| 4 | 0,505 | 52,1 | 51,2 | 6,73 | 6,79 | 6,76 |
| 5 | 0,455 | 56,2 | 60,8 | 7,58 | 7,46 | 7,52 |
| 6 | 0,414 | 55,3 | 64,9 | 8,15 | 8,09 | 8,12 |
| 7 | 0,517 | 51,3 | 52,7 | 7,26 | 7,06 | 7,16 |
| 8 | 0,485 | 58,1 | 59,0 | 7,39 | 7,68 | 7,54 |
| 9 | 0,414 | 53,0 | 59,1 | 8,14 | 7,97 | 8,06 |

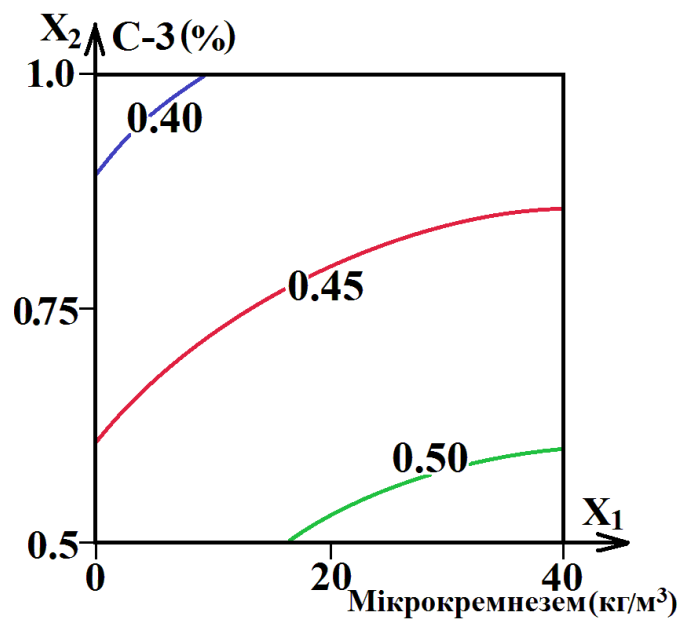


Рис.6.5. Вплив кількості мікрокремнезему і добавки С-3 на В/Ц сумішей бетонів на вапняковому щебені

Для обох досліджених на даному етапі роботи серій бетонів були визначені рівні міцності при стиску та міцності на розтяг при згині (таблиця 6.4). ЕС-моделі, що описують вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів мають вигляд (відповідно для серії, приготованою за традиційною технологією, та серії на обробленому цементною суспензією щебені):

$$f_{\text{ck.cube.K}} \text{ (МПа)} = 56,6 + 4,4x_1 - 4,8x_1^2 - 3,4x_1x_2 + 3,4x_2 - 3,1x_2^2 \quad (6.6)$$

$$f_{\text{ck.cube.O}} \text{ (МПа)} = 61,6 + 3,8x_1 - 5,8x_1^2 - 1,8x_1x_2 + 5,6x_2 - 3,9x_2^2 \quad (6.7)$$

За даними ЕС-моделями були побудовані діаграми, які відображають вплив кількості добавки С-3 і мікрокремнезему на міцність при стиску досліджених бетонів на вапняковому щебені. Для контрольних складів, приготованих за традиційною технологією, діаграма показана на рис.6.6.а, для складів на обробленому цементною суспензією щебені – на рис.6.6.б.

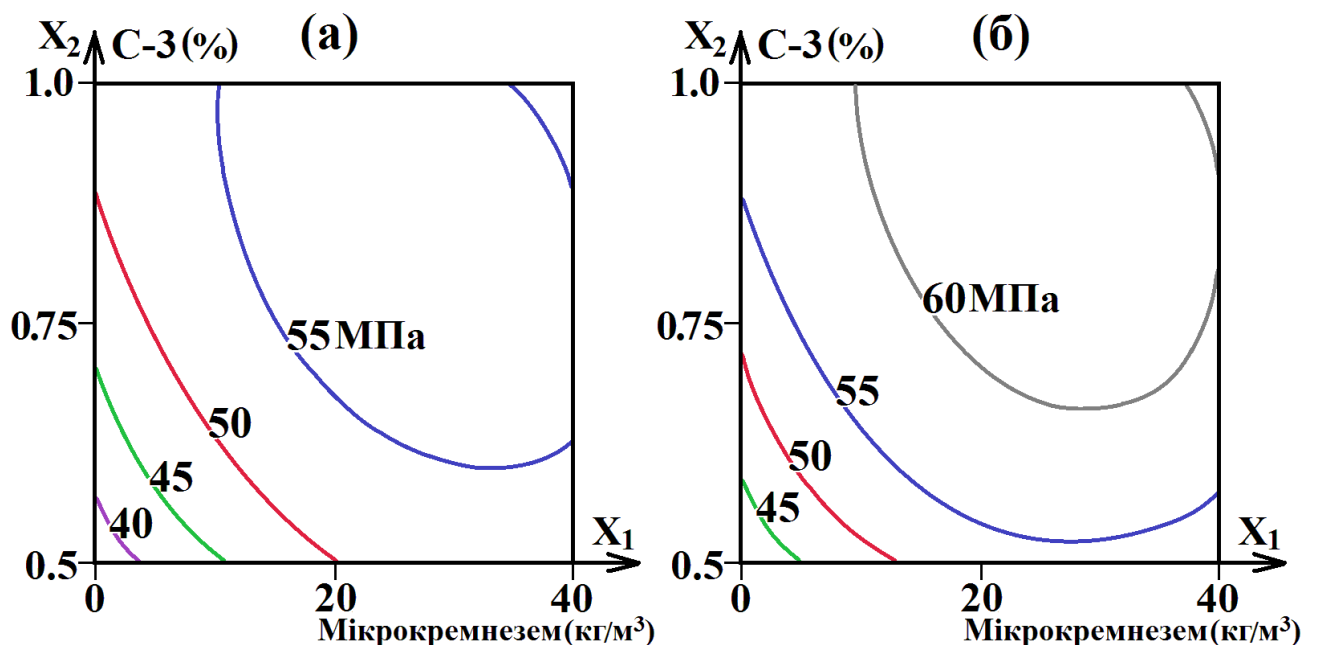


Рис.6.6. Вплив кількості мікрокремнезему і добавки С-3 на міцність при стиску бетонів на вапняковому щебені:

- а) приготованих за традиційною технологією,
- б) на обробленому цементною суспензією щебені

Аналіз діаграм показує, що для обох серій досліджених бетонів максимальну міцність мають склади при кількості добавки С-3 0,8-0,9% (за рахунок зниження В/Ц) і мікрокремнезему приблизно 30 кг/м³. При цьому завдяки застосуванню оптимальної кількості модифікаторів міцність при стиску бетонів зростає на 16-18 МПа в порівнянні зі складами з мінімальною кількістю суперпластифікатору і без мікрокремнезему. Тобто запропоновані модифікатори є ефективними для бетону на вапняковому щебені.

Також важливим технічним ефектом є те, що міцність бетонів на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені була на 4..5 МПа вище за міцність контрольних бетонів аналогічних складів. Тобто за рахунок зміни технології приготування бетону на пористому природному заповнювачі досягається відчутне збільшення міцності кінцевого матеріалу. Як зазначалося вище, на нашу думку даний ефект пояснюється покращенням сумісної роботи заповнювача і матриці, а саме зміцненням поверхневого шару заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону, а також покращенням однорідності заповнювача завдяки насиченню його порожнин цементним тістом. Безперечно, масштаб цих ефектів залежить від співвідношення міцності похідних компонентів композиту і безпосередньо від типу пористого заповнювача, а також від складу бетону. Тобто від всієї ієрархічної побудови структури композиту [14,137].

Аналіз міцності бетонів на вапняковому щебені на розтяг при згині показав, що на відміну від міцності при стику, величина цього показника майже не залежить від технології приготування бетонної суміші. Це можна пояснити тим, що міцність заповнювача в меншій мірі впливає на здатність композита протидіяти розтягуючим навантаженням, ніж навантаженням стиску. Відповідно операція обробки пористого щебеню цементною суспензією у початковій стадії перемішування суміші, одною з основних позитивних рис якої для природніх заповнювачів є їх зміцнення, майже не вплинула на величину міцності на розтяг при згині. Зважаючи на те, що різниця в міцності на розтяг при згині між серіями з обробкою щебеню і без даної обробки

переважно була в межах 3..4%, для подальшого аналізу використовувалась середня міцність на розтяг між аналогічними бетонами двох серій, яка відображена в таблиці 6.4.

ЕС-модель, яка описує вплив варійованих факторів складу на величину міцності на розтяг при згині (як зазначалося вище – для обох серій) має вигляд:

$$f_{ctk.K} = f_{ctk.O} \text{ (МПа)} = 7,52 + 0,16x_1 \pm 0x_1^2 - 0,14x_1x_2 + 0,62x_2 - 0,13x_2^2 \quad (6.8)$$

На рис.6.7 показана діаграма у вигляді квадрату, яка побудована за даною ЕС-моделлю та яка відображає вплив складу бетону на величину його міцності на розтяг при згині.

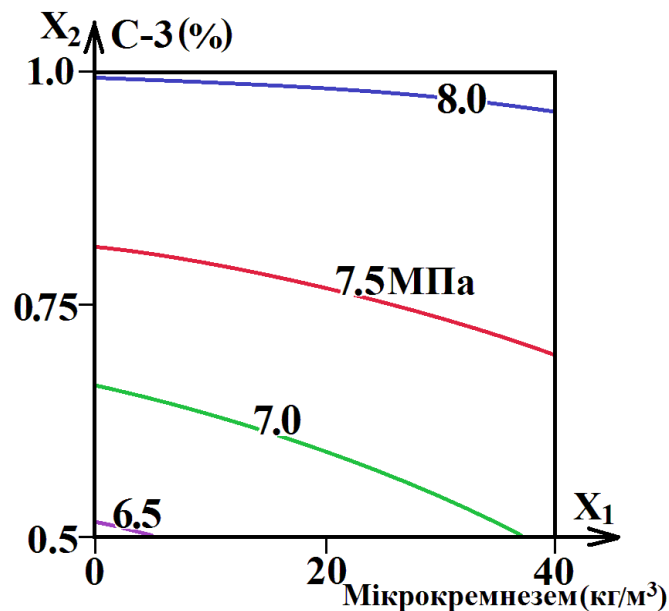


Рис.6.7. Вплив кількості мікрокремнезему і добавки С-3 на міцність бетонів на вапняковому щебені на розтяг при згині

Аналіз діаграми показує, що варійовані на даному етапі досліджень фактори оказують на величину f_{ctk} менший вплив, ніж на величину міцності при стиску. За рахунок введення мікрокремнезему міцність на розтяг збільшується на 0,2-0,6 МПа, при чому у міру збільшення кількості добавки С-3 вплив цього фактору зменшується. При підвищенні кількості суперпластифікатору до 1% величина f_{ctk} досліджених бетонів збільшується приблизно на 1 МПа для складів без мікрокремнезему і приблизно на 1,5 МПа для складів з вмістом 30-40 кг/м³

мікрокремнезему. Таким чином, за рахунок введення модифікаторів на 1-1,5 МПа підвищується міцність бетонів на вапняковому щебені на розтяг при згині.

В цілому встановлено, що попередня обробка вапнякового щебеню цементною суспензією є ефективним технологічним прийомом підвищення фізико-механічних властивостей бетонів на основі даного заповнювача. За рахунок такої обробки міцність бетону при стиску підвищується на 4-5 МПа, проте обробка практично не впливає на міцність бетонів на вапняковому щебені на розтяг при згині. Найбільшу міцність при стиску мають бетони, в яких також застосовано рецептурні методи керування структурою – введено мікрокремнезем у кількості близько 30 кг/м³ і суперпластифікатор С-3 від 0,8 до 0,9%. Механічні властивості модифікованих бетонів на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені дозволяють використовувати подібні матеріали для конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема для тонкостінних, при забезпеченні їхньої необхідної довговічності в заданих умовах експлуатації.

Як зазначалося вище, довговічність тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд в типових для України кліматичних умовах залежить переважно від морозостійкості та водонепроникності бетону. Зокрема, водонепроникність обумовлює стійкість композиту до більшості корозійних пошкоджень, насамперед першого і частково другого типу за класифікацією В.М. Москвіна, а також обумовлює швидкість карбонізації бетону в конструкції [17,192]. Для обох досліджених на даному етапі серій бетонів, тобто приготованих за традиційною технологією та на обробленому цементною суспензією щебені, визначалися рівні водонепроникності та морозостійкості матеріалів у 9-ти експериментальних точках. Значення даних показників наведено у таблиці 6.5. Зовнішній вигляд зразків-циліндрів бетону на вапняковому щебені, які були розколоті після випробування на водонепроникність з метою аналізу особливостей проникнення фронту вологи через матеріал, показано на рис.6.8.



Рис.6.8. Зовнішній вигляд зразків-циліндрів бетону на вапняковому щебені, які були розколоті після випробування на водонепроникність

Таблиця 6.5

Водонепроникність і морозостійкість бетонів на вапняковому щебені

| № точки | Водонепроникність (атм) | | Морозостійкість (циклів) |
|---------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| | контроль | з обробкою щебеню | |
| 1 | 6 | 8 | 300 |
| 2 | 10 | 12 | 350 |
| 3 | 10 | 12 | 350 |
| 4 | 10 | 12 | 350 |
| 5 | 14 | 14 | 400 |
| 6 | 12 | 14 | 400 |
| 7 | 8 | 12 | 300 |
| 8 | 10 | 12 | 400 |
| 9 | 10 | 12 | 350 |

ЕС-моделі, що описують вплив варійованих факторів складу на водонепроникність досліджених бетонів на вапняковому щебені в обох серіях експериментів мають вигляд:

$$W_K (\text{атм}) = 13,3 + 0,3x_1 - 3,0x_1^2 - 0,5x_1x_2 + 1,3x_2 - 2,0x_2^2 \quad (6.9)$$

$$W_O (\text{атм}) = 14,0 + 0,7x_1 - 2,0x_1^2 - 1,0x_1x_2 + 1,0x_2 - 1,0x_2^2 \quad (6.10)$$

Слід зазначити, що точність ЕС-моделей (6.9) і (6.10) аналогічно (4.6), (4.7) та (5.4) дещо обмежена через специфіку дискретної методики визначення водонепроникності бетону, що описана вище при аналізі водонепроникності легких бетонів. Досить «широкий» крок показника W впливає на точність побудови моделей, проте це не впливає на загальні тенденції впливу варійованих факторів на цей показник. На рис.6.9 показані побудовані за ЕС-моделями (6.9) і (6.10) діаграми, які відображають вплив кількості мікрокремнезему та добавки С-3 на водонепроникність досліджених на даному етапі бетонів на вапняковому щебені (рис.6.9.а – для складів, приготованих за традиційною технологією, рис.6.9.б – для складів на обробленому цементною суспензією щебені).

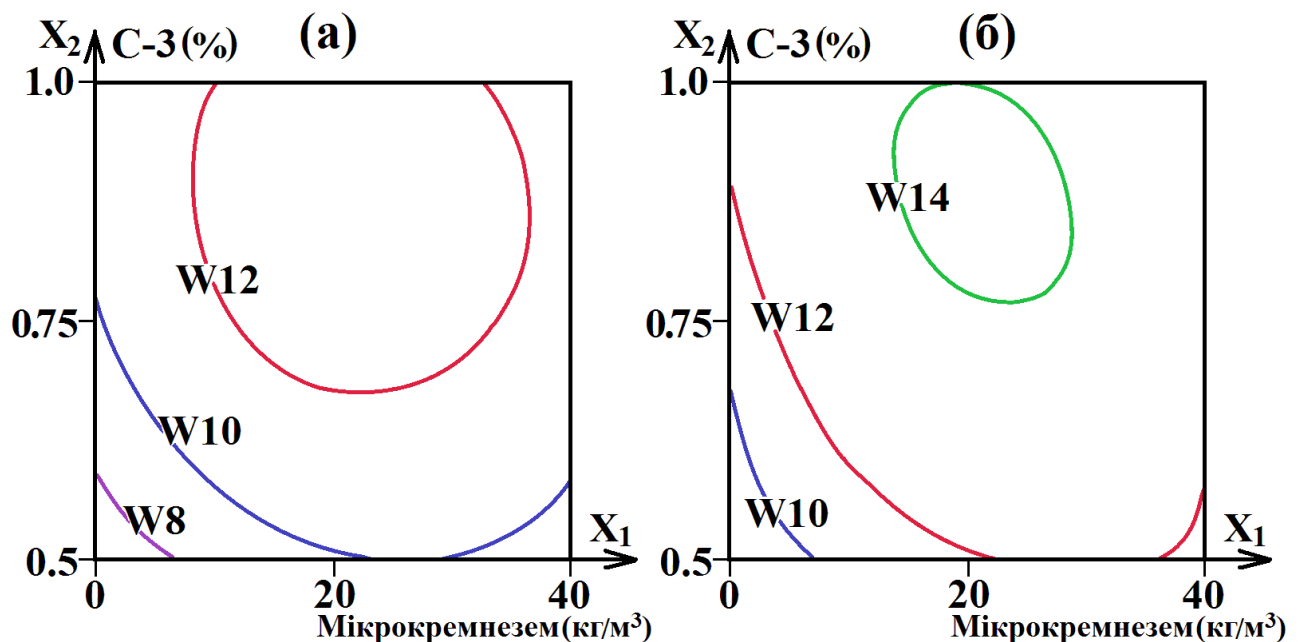


Рис.6.9. Вплив кількості мікрокремнезему і добавки С-3 на водонепроникність бетонів на вапняковому щебені:

- приготованих за традиційною технологією,
- на обробленому цементною суспензією щебені

Аналіз діаграм показує, що завдяки підвищенню кількості суперпластифікатора С-3 з 0,5 до 0,9% від маси цементу водонепроникність досліджених в обох серіях бетонів на вапняковому щебені зростає на величину від однієї до двох марок, тобто від 2 до 4 атмосфер. Даний модифікатор ефективно підвищує довговічність бетону завдяки зниженню В/Ц бетонної суміші рівної рухомості, що відповідно сприяє утворенню більш щільної структури і зниженню проникності композиту. При цьому важливо зазначити, що підвищення кількості добавки С-3 більш ефективно впливає на рівень W бетонів без мікрокремнезему (показник водонепроникності зростає в середньому на 2 марки). Для складів з вмістом 20-25 кг/м³ мікрокремнезему при підвищенні кількості С-3 до 0,9% рівень W бетону зростає приблизно на одну марку. Це пояснюється тим, що активна мінеральна добавка мікрокремнезем також ефективно впливає на рівень W, відповідно вплив від вищої кількості суперпластифікатора стає менш відчутним у модифікованих бетонах з більш щільною структурою.

Також важливим технічним ефектом є те, що водонепроникність бетонів на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені була переважно вищою в порівнянні з цим показником для бетонів, приготованих за традиційною технологією. Різниця в рівнях W в окремих зонах факторного простору складала до 2-х атмосфер, тобто до однієї марки. Цей ефект можна пояснити зменшенням наскрізної пористості композиту завдяки обробці, в першу чергу, контактної зони і заповнювачав, що безпосередньо впливає на здатність композиту опиратися проникненню вологи під тиском. Тобто перенесення води у структурі матеріалу, яке відбувається як по порам і капілярам розчинної складової бетону, зокрема контактної зони, так і по порожнинам пористого заповнювача, ускладнюється.

В цілому, при застосуванні 20-25 кг/м³ мікрокремнезема та підвищеній до 0,9% кількості суперпластифікатора С-3 досягнутий рівень водонепроникності бетонів на вапняковому щебені W12 та вище забезпечує високу довговічність даного матеріалу при напірній дії води, а також сприяє зниженню корозійних

пошкоджень бетону в жорстких умовах експлуатації, які є типовими для гідротехнічних споруд.

Також в рамках даного етапу досліджувалася морозостійкість бетонів на вапняковому щебені, як один з основних показників якості, що забезпечує довговічність матеріалів гідротехнічних споруд в типових для України умовах експлуатації, що зазначалося вище. Проведені дослідження показали, що морозостійкість обох серій бетонів на вапняковому щебені, тобто приготованих за традиційною технологією та на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені, не відрізняється між собою. Коректніше сказати, що точність визначення показника F не дозволяє обґрунтовано розрізняти морозостійкість бетонів однакових складів в двох досліджених серіях експериментів. Відповідно у табл.6.5 наведені данні про рівень F бетонів у 9-ти точках факторного простору експерименту, які є однаковим (спільними) для двох досліджених серій. ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів на вапняковому щебені в обох досліджених серіях має вигляд:

$$F_K(\text{цикли}) = F_0 = 411 + 8x_1 - 42x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 25x_2 - 42x_2^2 \quad (6.11)$$

Як зазначалося вище, точність даної ЕС-моделі обмежена через методикку визначення морозостійкості бетону з фактичним кроком 50 циклів, що за суттю аналогічно ситуації з моделями (4.8), (4.9) і (5.5). Але це обмеження не усуває можливості аналізу характеру впливу факторів на рівень F . На рис.6.10 показана діаграма у вигляді квадрата, яка побудована за наведеною вище ЕС-моделлю та яка відображає вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів на вапняковому щебені. Аналіз даної діаграми показує, що загальний характер впливу на морозостійкість бетону обох варійованих факторів складу є досить схожим. При підвищенні рівня як фактору X_1 , так і фактору X_2 до певного «раціонального» рівня морозостійкість композиту зростає, при подальшому підвищенні рівня фактору знижується. Відповідно область

найбільшої морозостійкості досліджених бетонів у межах факторного простору даного експерименту знаходиться при кількості мікрокремнезему від 20 до 30 $\text{кг}/\text{м}^3$ та добавки С-3 від 0,8 до 0,9%.

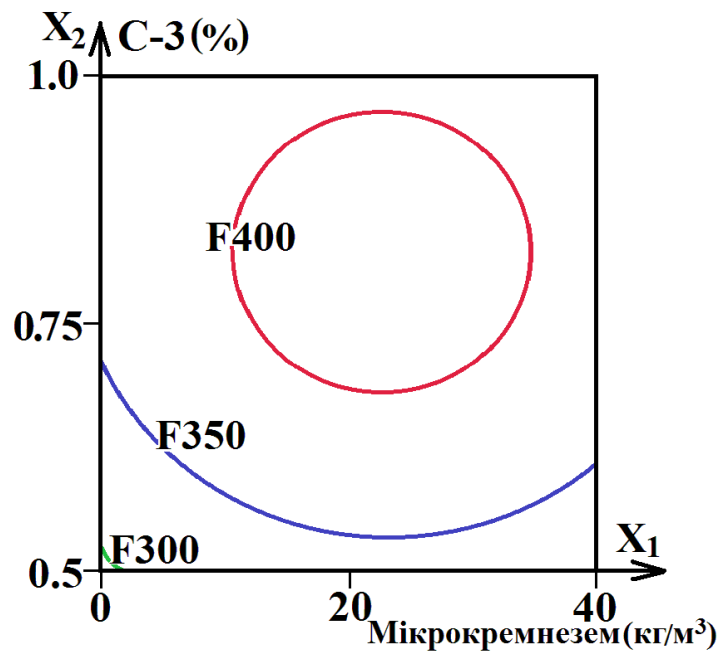


Рис.6.10. Вплив кількості мікрокремнезему і добавки С-3 на морозостійкість бетонів на вапняковому щебені

В цілому, рівень морозостійкості бетонів на вапняковому щебені при використанні раціональної кількості модифікаторів забезпечує достатню довговічність цього матеріалу для ряду конструкцій гідротехнічних споруд в типових для них умовах експлуатації. Також довговічність подібних матеріалів забезпечується тим, що як показано вище, бетони приготовані на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені мають високу водонепроникність. Це підтверджує ефективність запропонованих рецептурних і технологічних прийомів підвищення довговічності бетонів на пористому вапняковому заповнювачі.

По сукупності проаналізованих на даному етапі досліджень фізико-механічних властивостей модифікованих бетонів на обробленому цементною суспензією вапняковому щебені було обрано раціональний склад композиту, який забезпечує найкращі показники міцності та довговічності даного матеріалу: портландцемент – $450 \text{ кг}/\text{м}^3$, щебінь вапняковий – $1072 \text{ кг}/\text{м}^3$, пісок – $560 \text{ кг}/\text{м}^3$, мікрокремнезем – $25 \text{ кг}/\text{м}^3$, С-3 – $4,05 \text{ кг}/\text{м}^3$ (0,9%), вода – $194 \text{ л}/\text{м}^3$.

6.3 Властивості та довговічність керамзитобетонів з різними типами пісків

Як зазначалося в п.2.1, на шостому етапі роботи досліджувалися властивості бетонів на різних типах пористих заповнювачів, зокрема керамзитобетонів з легкими пісками на основі гранульованого піноскла. Метою даних досліджень було порівняння міцності і середньої густини модифікованих гіперпластифікатором керамзитобетонів з різними типами пісків: кварцовим, керамзитовим і піском з гранульованого піноскла. Це дозволяє оцінити можливість і доцільність застосування конструкційних керамзитобетонів на легких пісках в гідротехнічному будівництві, зокрема у якості суднобудівних матеріалів. Як зазначено в п.1.2, новітній світовий досвід показав можливість використання для конструкцій плавучих залізобетонних споруд легких бетонів, які включають не лише крупний пористий заповнювач, а і частково включають пористий пісок [90,103]. В дослідженнях використовувався керамзитовий гравій фракції 5-10 мм Одеського керамзитового заводу з насипною густиною 500 кг/м³. В якості в'язучого використовувався сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0 виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент». В якості дрібного заповнювача використовувалися п'ять різних типів пісків, отриманих за рахунок змішування розсіяних по фракціям заповнювачів.

1. Кварцовий пісок з співвідношенням фракцій (в мм): 2,5-5 – 15%, 1,25-2,5, 0,63-1,25 і 0,315-0,63 – по 25%, 0,16-0,315 – 10%. Тобто модуль крупності даного піску складав 3,1, насипна густина 1580 кг/м³. Цей пісок в дослідженнях використовувався у ролі «традиційного» кварцового.

2. Пісок, в якому 50% об'єму крупних фракцій (1,25-2,5 мм і 2,5-5 мм) було замінено керамзитовим піском відповідних фракцій (пісок виробництва Одеського керамзитового заводу, насипна густина піску у фракції 1,25-2,5 мм – 700 кг/м³, у фракції 2,5-5 мм – 605 кг/м³). Насипна густина даного штучного піску складала 1430 кг/м³. Цей пісок можна розглядати як кварцовий пісок з умовно незначною часткою керамзитового піску.

3. Пісок, в якому 100% об'єму крупних фракцій було замінено керамзитовим піском відповідних фракцій. Насипна густина даного піску складала 1290 кг/м^3 . Цей пісок можна умовно розглядати як гранульовану суміш кварцового і керамзитового пісків.

4. Пісок, в якому 50% об'єму крупних фракцій було замінено гранульованим піносклом відповідних фракцій (піноскло НВП «Технологія», м. Шостка, насипна густина гранульованого піноскла у фракції 1,25-2,5 мм – 270 кг/м^3 , у фракції 2,5-5 мм – 230 кг/м^3). Насипна густина даного штучного піску складала 1330 кг/м^3 . Цей пісок можна розглядати як кварцовий пісок з умовно незначною часткою піноскла.

5. Пісок, в якому 100% об'єму крупних фракцій було замінено гранульованим піносклом відповідних фракцій. Насипна густина даного піску складала 1080 кг/м^3 . Цей пісок можна умовно розглядати як гранульовану суміш кварцового піску і піноскла.

Іншим фактором, який варіювався у дослідженнях, була кількість полікарбосилатного пластифікатору Coral ExpertSuid-5 – від 0,4 до 1% від маси цементу.

Кількість портландцементу у всіх досліджених легких бетонах складала 500 кг/м^3 , кількість керамзитового гравію – 675 л/м^3 . Для забезпечення рівності об'ємів всіх бетонів (відповідно рівності витрати в'язучого і керамзитового гравію на 1 м^3 матеріалу) кількість піску корегувалася в залежності від кількості води у складі, але знаходилася в приблизно однаковому діапазоні за об'ємом $460\text{-}470 \text{ л/м}^3$. Всі суміші мали рівну високу рухомість П5 (ОК складала від 20 до 24 см). Така висока рухомість суміші забезпечувалася, зокрема, застосуванням ефективного пластифікатору полікарбосилатного типу, так званого «гіперпластифікатору». Значення В/Ц суміші і фізико-механічних властивостей досліджених на даному етапі роботи керамзитобетонів на різних типах пісків наведені в табл.6.6.

Рівна рухомість сумішей забезпечувалася зміною кількості води, відповідно В/Ц досліджених сумішей залежало від їхнього складу. На рис.6.11

показані графіки, що відображають вплив кількості пластифікатору і типу піску на В/Ц керамзитобетонних сумішей. Їх аналіз показує, що при збільшенні кількості пластифікатору Coral ExpertSuid з 0,4 до 0,6% від маси цементу В/Ц легкобетонних сумішей на всіх типах піску різко знижується – на 11...13%. При збільшенні дозування пластифікатору до 0,8% В/Ц знижується ще на 2..3%. Подальше підвищення кількості пластифікатору, до 1% від маси цементу, вже неефективне і знижує В/Ц лише приблизно на 1%.

Незалежно від кількості пластифікатору найменше В/Ц мають керамзитобетонні суміші на кварцовому піску а найбільше – на суміші кварцового і керамзитового пісків (керамзитовому піску). Відповідно при заміні 100% крупних фракцій кварцового піску на легкий пористий пісок В/Ц зростає значно відчутніше, ніж при заміні 50% піску. Легкобетонні суміші з дрібним заповнювачем з суміші кварцового піску і піноскла мають дещо вищу водопотребу і відповідно вище В/Ц в порівнянні з керамзитобетонними сумішами на кварцовому піску, але нижчу водопотребу в порівнянні з сумішами на керамзитовому піску. Це пояснюється тим, що гранульоване піноскло має переважно замкнуту пористість, відповідно низьке власне водопоглинання.

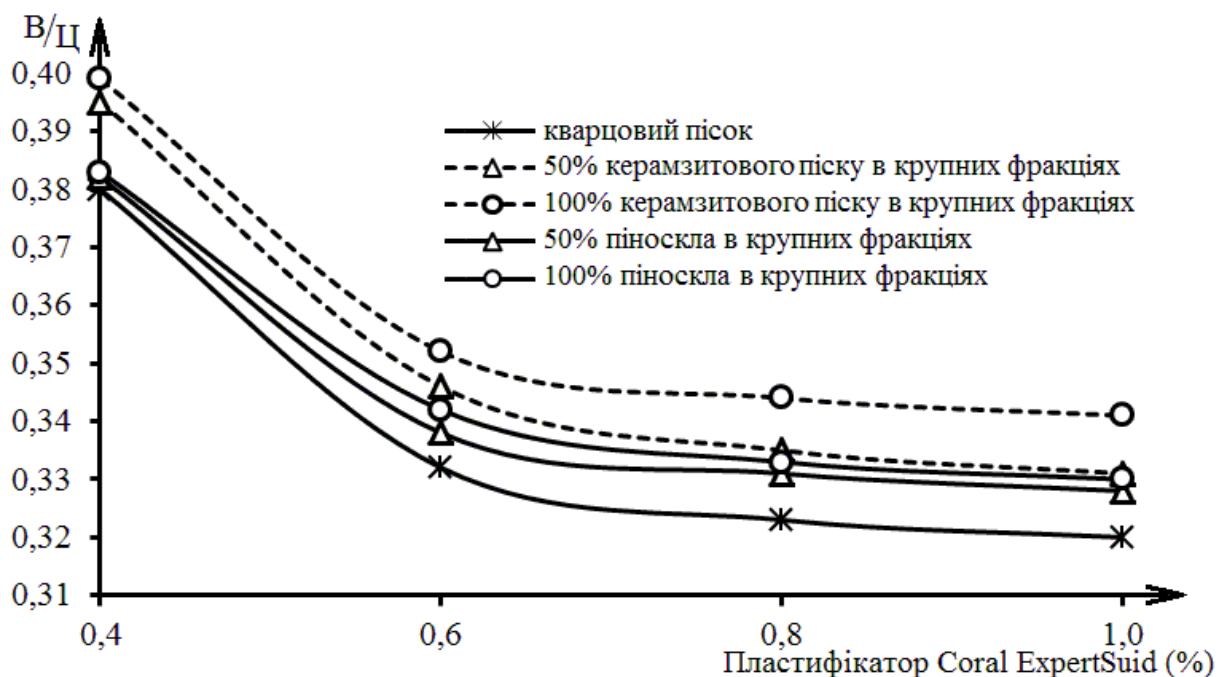


Рис. 6.11. Вплив кількості пластифікатору і типу піску на В/Ц керамзитобетонних сумішей рівної рухомості

В/Ц суміші і фізико-механічні властивості
керамзитобетонів на різних типах пісків

| Тип піску | Пластифік. Coral Expert-Suid-5 (%) | В/Ц | Міцність при стиску (МПа) | Міцність на розтяг при згині (МПа) | Водоне-проник. W (атм) | Морозо-стійкість F (цикли) | Середня густина (кг/м ³) |
|---|------------------------------------|-------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Кварцовий пісок | 0,4 | 0,380 | 22,3 | 5,33 | 10 | 400 | 1597 |
| | 0,6 | 0,332 | 26,1 | 5,47 | 12 | 450 | 1642 |
| | 0,8 | 0,323 | 27,6 | 5,49 | 12 | 500 | 1665 |
| | 1 | 0,320 | 27,5 | 5,46 | 12 | 500 | 1670 |
| 50% керамзитов. піску в крупних фракціях | 0,4 | 0,395 | 20,9 | 5,19 | 8 | 450 | 1547 |
| | 0,6 | 0,346 | 24,3 | 5,28 | 10 | 500 | 1594 |
| | 0,8 | 0,335 | 26,8 | 5,29 | 10 | 550 | 1618 |
| | 1 | 0,331 | 26,9 | 5,21 | 10 | 550 | 1620 |
| 100% керамзитов. піску в крупних фракціях | 0,4 | 0,399 | 20,4 | 4,88 | 6 | 450 | 1509 |
| | 0,6 | 0,352 | 23,6 | 5,01 | 8 | 500 | 1554 |
| | 0,8 | 0,344 | 25,8 | 5,09 | 8 | 550 | 1571 |
| | 1 | 0,341 | 25,3 | 5,04 | 8 | 500 | 1572 |
| 50% піноскла в крупних фракціях | 0,4 | 0,382 | 18,6 | 5,1 | 10 | 450 | 1497 |
| | 0,6 | 0,338 | 20,4 | 5,15 | 12 | 500 | 1535 |
| | 0,8 | 0,331 | 21,5 | 5,19 | 12 | 550 | 1548 |
| | 1 | 0,328 | 20,9 | 5,17 | 12 | 500 | 1549 |
| 100% піноскла в крупних фракціях | 0,4 | 0,383 | 17,5 | 4,33 | 10 | 400 | 1402 |
| | 0,6 | 0,342 | 18,5 | 4,45 | 12 | 450 | 1427 |
| | 0,8 | 0,333 | 19,2 | 4,51 | 12 | 500 | 1439 |
| | 1 | 0,330 | 18,8 | 4,47 | 10 | 500 | 1440 |

Графіки, які відображають вплив кількості пластифікатору і типу піску на міцність досліджених керамзитобетонів, показані на рис.6.12.

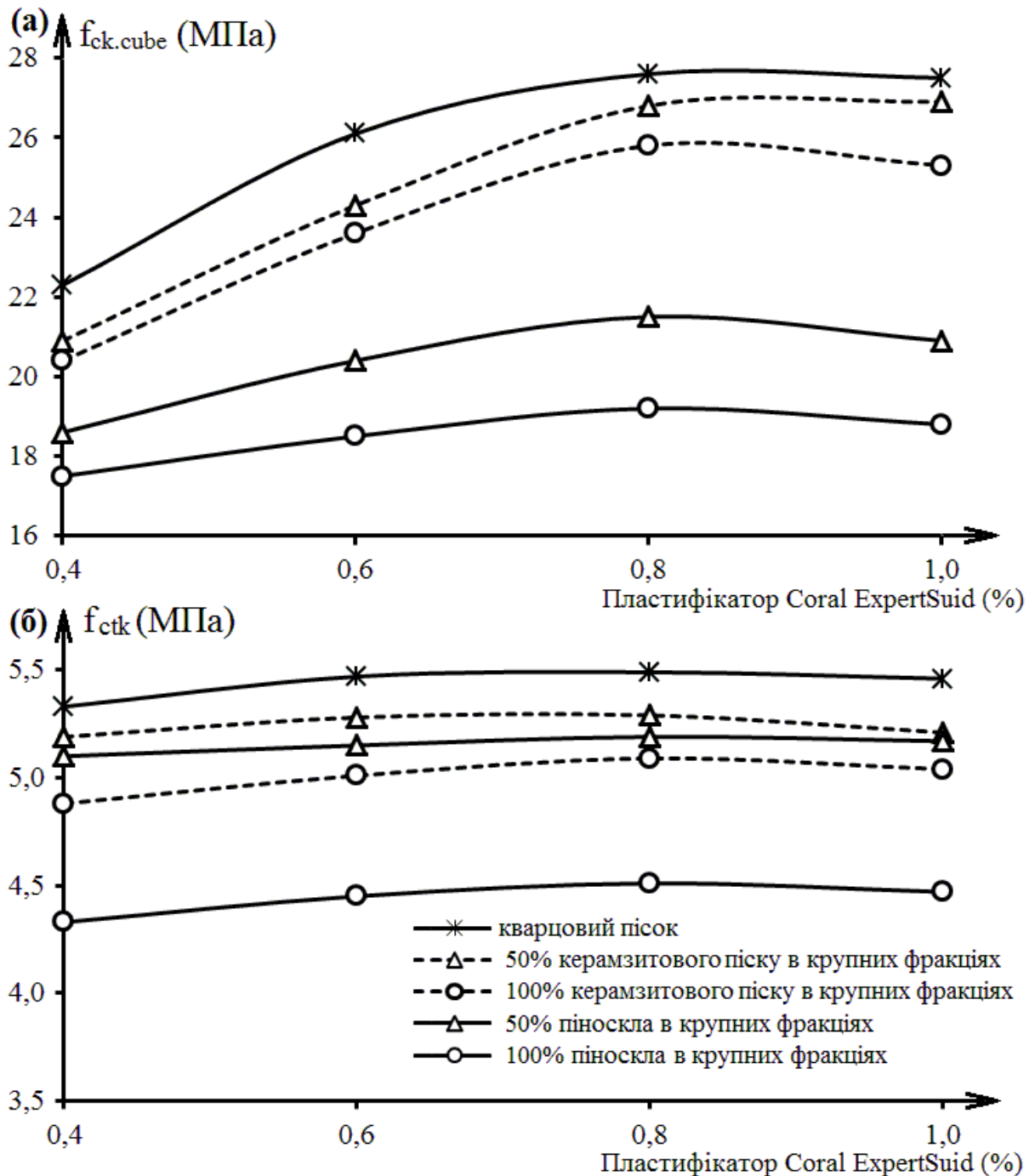


Рис. 6.12. Вплив кількості пластифікатору і типу піску на:

- міцність керамзитобетону при стиску;
- міцність керамзитобетону на розтяг при згині

Їх аналіз дозволяє сказати, що кількість пластифікатору Coral ExpertSuid суттєво впливає на міцність керамзитобетону при стиску (рис.6.12.a), але на

міцність легкого бетону на розтяг при згині (рис.6.12.б) кількість даного модифікатору впливає значно менше. Найбільш міцними є керамзитобетони з кількістю пластифікатору Coral ExpertSuid 0,8% від маси цементу, подальше підвищення дозування добавки неефективне. Тип піску, який використовувався у керамзитобетоні, більш відчутно впливав на величину міцності при стику, ніж на міцність на розтяг при згині. Склади з 50% та 100% керамзитового піску в крупних фракціях показують міцність при стику відповідно на 3-7% та 7-10% нижчу за міцність керамзитобетонів на кварцовому піску. При застосуванні 50% та 100% гранульованого піноскла в піску міцність керамзитобетону при стику знижується відповідно на 17-23% та 23-32% в порівнянні з бетонами на кварцовому піску. Міцність керамзитобетону на розтяг при згині при застосуванні 50% і 100% керамзитового піску в крупних фракціях дрібного заповнювача змінюється на 4-6 і 7-9% відповідно, а при застосуванні аналогічної кількості піску з гранульованого піноскла – на 5-6 і 18-19%. Тобто керамзитобетони при застосуванні легких пористих пісків зберігають досить високу міцність на розтяг при згині, що є важливим для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих.

Основною метою застосування легких пісків в керамзитобетонах є зниження середньої густини матеріалу. Відповідно цей показник якості було проаналізовано і за даними, наведеними в табл.6.6, були побудовані графіки, які відображають вплив кількості пластифікатору і типу піску на середню густину керамзитобетону (в сухому стані) та які показано на рис.6.13. Як видно на графіках, при підвищенні дозування пластифікатору за рахунок зниження В/Ц суміші середня густина керамзитобетону несуттєво зростає – в межах 5%. При застосуванні 50% і 100% керамзитового піску в крупних фракціях дрібного заповнювача середня густина легкого бетону знижується на 4-5% і 6-7% відповідно. Пісок з гранульованого піноскла є більш легким, відповідно при його застосуванні в кількості 50% і 100% від об'єму крупних фракцій середня густина керамзитобетону знижується відповідно на 7-8 і 13-14%. При цьому середня густина керамзитобетону з керамзитовим піском у крупних фракціях не

перевищує 1572 кг/м^3 , а з піском з гранульованого піноскла – 1440 кг/м^3 . Тобто модифіковані керамзитобетони на легких пісках можуть бути використані в якості конструктивних матеріалів в конструкціях, до міцності яких висуваються вимоги відповідного рівня, проте за рахунок використання даних матеріалів зі зниженою середньою густиною досягається зниження ваги конструкцій. Це є найбільш важливою задачею для плавучих залізобетонних споруд, тому що це дозволяє додатково підвищити їх вантажопідйомність.

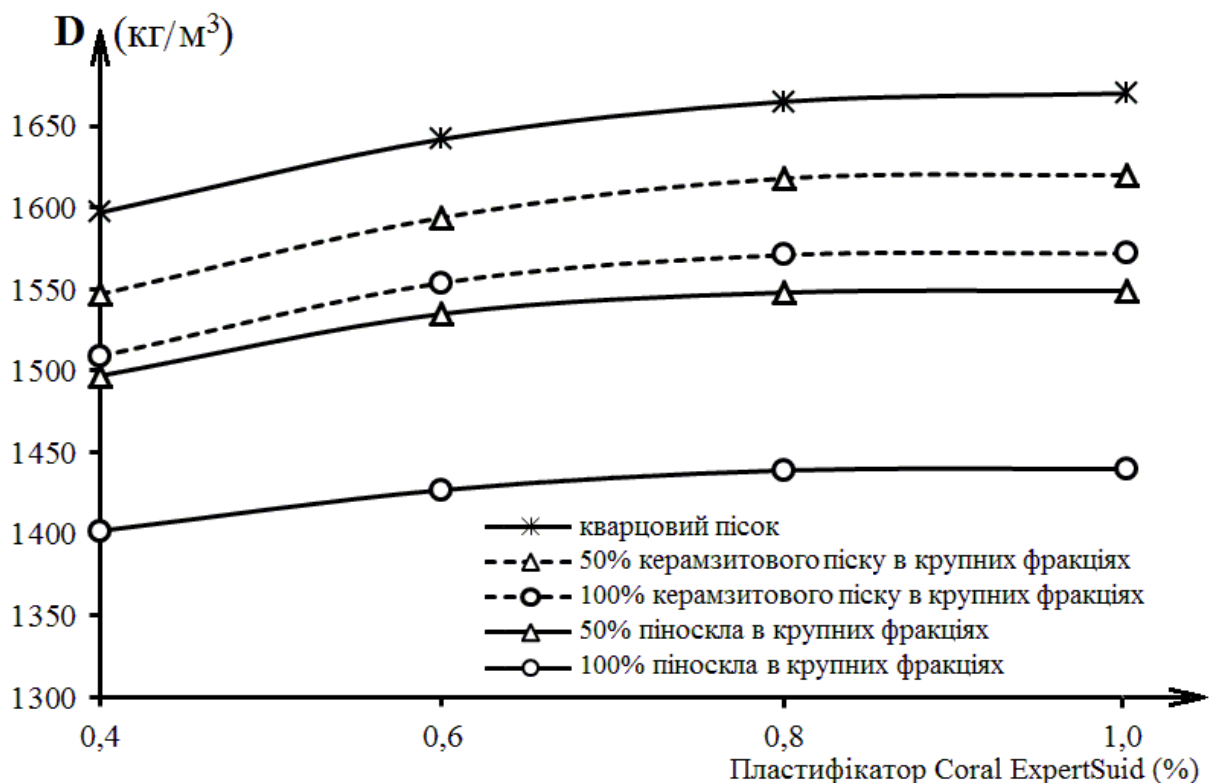


Рис.6.13. Вплив кількості пластифікатора і типу піску на середню густину керамзитобетону

Також були досліджені морозостійкість і водонепроникність керамзитобетонів на різних типах пісків, як основні показники якості, що забезпечують довговічність даних матеріалів. На рис.6.14.а показано вплив кількості пластифікатора і типу піску на водонепроникність керамзитобетону. Як видно з діаграми, керамзитобетони, які включають піноскло в крупних фракціях дрібного заповнювача мають водонепроникність фактично на рівні керамзитобетонів на кварцовому піску.

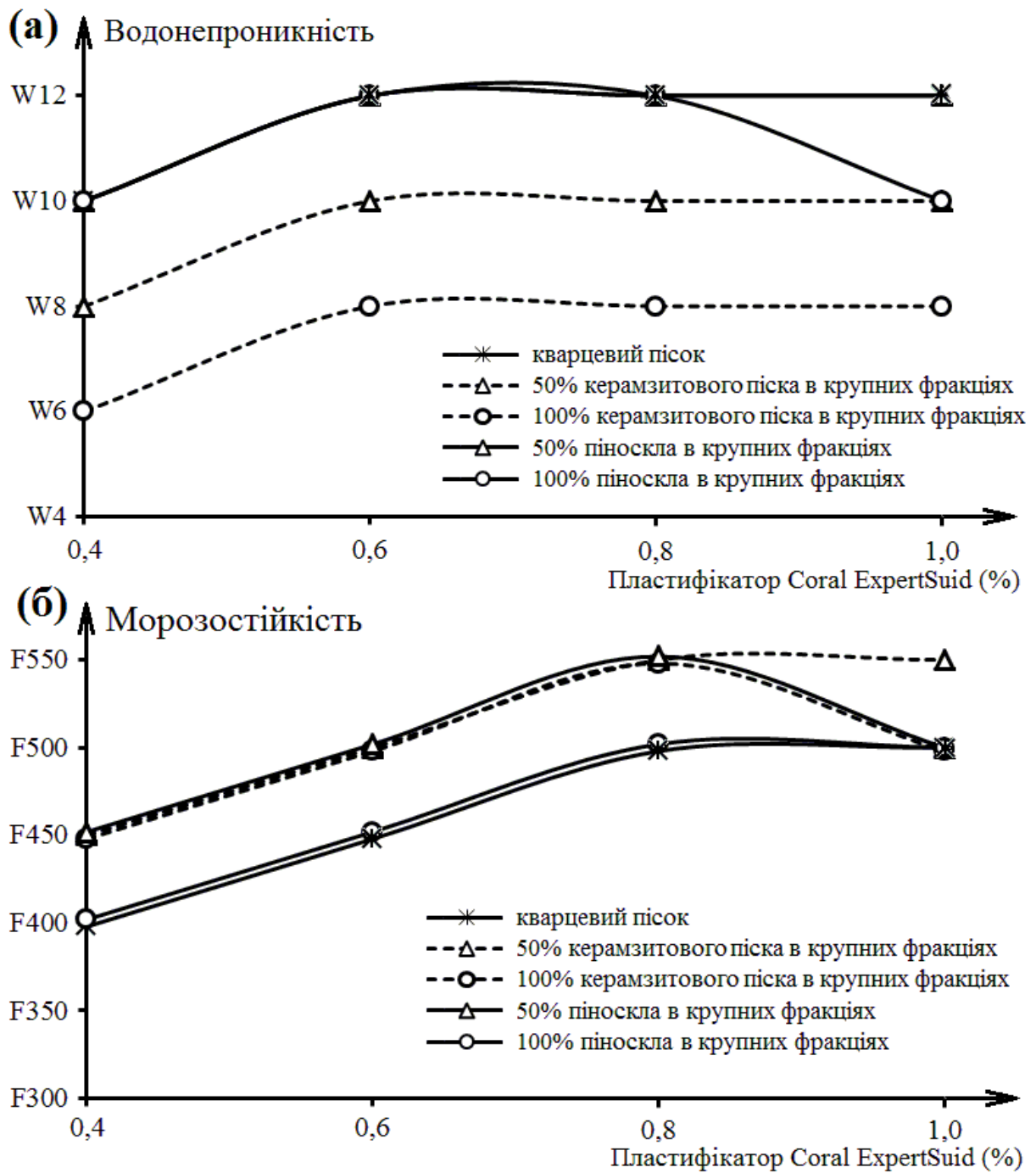


Рис.6.14. Вплив кількості пластифікатору і типу піску на:

- а) водонепроникність керамзитобетону;
- б) морозостійкість керамзитобетону

При застосуванні 50% керамзитового піску в крупних фракціях дрібного заповнювача водонепроникність легких бетонів є приблизно на марку нижче водонепроникності аналогічних керамзитобетонів на кварцовому піску. При підвищенні кількості керамзитового піску в крупних фракціях до 100% рівень W знижується ще приблизно на одну марку, що пояснюється здатністю даного

пористого піску пропускати вологу під гідростатичним тиском. За рахунок підвищення дозування добавки Coral ExpertSuid до 0,6-1,0% водонепроникність досліджених легких бетонів підвищується приблизно на марку.

Вплив кількості пластифікатору і типу піску на морозостійкість керамзитобетону показано на рис.6.14.б. Аналіз діаграми дозволяє сказати, що за рахунок введення до складу керамзитобетону керамзитового піску у кількості 50% від об'єму крупних фракцій його морозостійкість підвищується приблизно на 50 циклів. Майже аналогічного зростання рівня F дозволяє досягнути введення до складу піску в бетоні 50% гранульованого піноскла. При застосуванні 100% піноскла у крупних фракціях піску морозостійкість легких бетонів знаходиться на рівні морозостійкості керамзитобетонів на кварцовому піску. При застосуванні 100% керамзитового піску у даних фракціях морозостійкість бетону є або на рівні, або навіть на 50 циклів вище морозостійкості бетонів на кварцовому піску. Практично незалежно від виду піску найбільшу морозостійкість мають бетони при кількості пластифікатору Coral ExpertSuid-5 0,8% від маси цементу.

На рис.6.15 наведено результати електронної мікроскопії структури контактної зони гранул піноскла і цементно-піщаної матриці. Міжпорові перегородки піноскла мають аморфну склоподібну структуру, відповідно на наведених зображеннях, зроблених при збільшенні $\times 5000$, виглядають як суцільні. Можна зробити висновок, що кристали цементної (цементно-піщаної) матриці мають щільний контакт з гранулами піноскла, що пояснюється, зокрема, незначними вологісними деформаціями гранул піноскла при зволоженні та висушуванні через їх низьке водопоглинання. Це підтверджує можливість застосування пористих пісків на основі гранульованого піноскла в легких бетонах гідротехнічних споруд.

Таким чином, керамзитобетони на всіх досліджених типах пісків показували максимальну міцність при використанні полікарбосилатного пластифікатору Coral ExpertSuid-5 у кількості 0,8% від маси цементу. При застосуванні легких пористих пісків замість кварцового піску міцність

керамзитобетону при стиску знижується більш відчутно, ніж міцність на розтяг при згині. Керамзитобетони, що включали піноскло в крупних фракціях дрібного заповнювача мали низьку середню густину при високій водонепроникності та морозостійкості, яка була на рівні даних показників якості для керамзитобетонів на кварцовому піску. Це забезпечує високу довговічність подібних матеріалів при зниженій середній густині. Модифіковані керамзитобетони на легких пісках можна використовувати в конструкціях, для яких важливо зниження ваги при забезпеченні необхідної міцності матеріалу, в першу чергу – в тонкостінних. Зокрема такі бетони можуть бути використані у залізобетонному суднобудуванні.

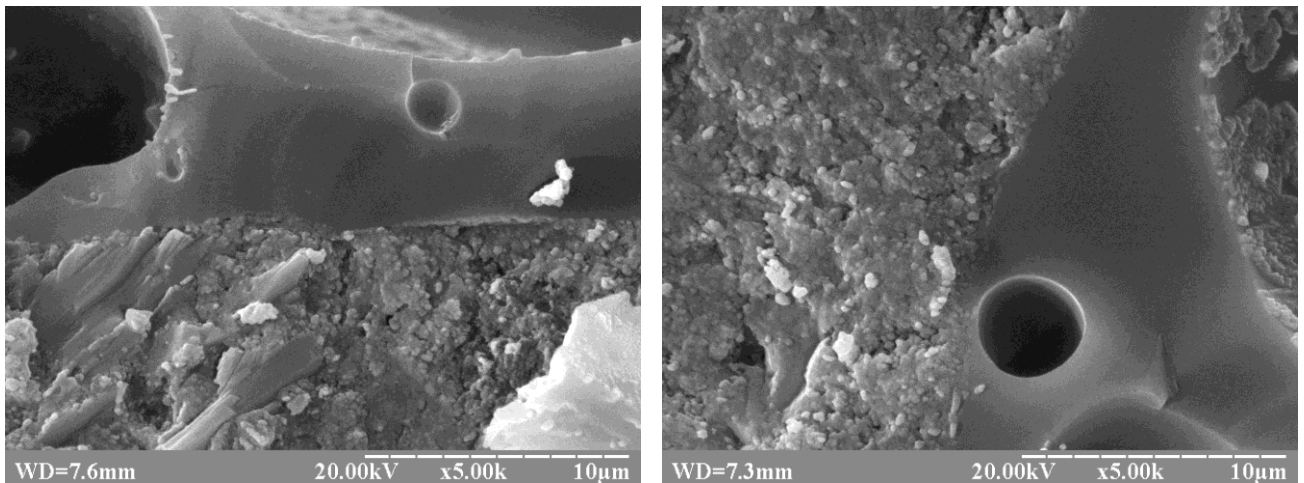


Рис.6.15. Результати електронної мікроскопії структури контактної зони гранули піноскла і цементно-піщаної матриці

6.4 Властивості дрібнозернистих бетонів і фібробетонів на суміші кварцового і керамзитового пісків

Також на даному етапі проводилися дослідження, в яких було виконане порівняння властивостей дрібнозернистих бетонів і фібробетонів на кварцовому і керамзитовому піску. Дрібнозернисті бетони використовуються при ремонтні залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема для поновлення захисного шару арматури, для закладення швів між конструкціями тощо. При цьому частіше всього для таких задач використовуються

дрібнозернисті бетони (розчини) на кварцовому піску. Але при відновленні і ремонті конструкцій з легкого бетону бажано використовувати матеріали, які близькі за властивостями до похідного матеріалу конструкції, зокрема дрібнозернисті бетони з пористим піском. В більшості випадків для гідротехнічних споруд не можна використовувати склади бетонів, повністю основані на пористих пісках через їх порівняно високу водопроникність. Тому актуальною є задача дослідження можливості застосування дрібнозернистих бетонів і фібробетонів на заповнювачі з суміші на кварцового і керамзитового піску. Відомо, що часткова заміна щільного заповнювача пористим дозволяє не лише знизити середню густину бетону, а і підвищити його коефіцієнт конструктивної якості – відношення межі міцності при стиску до середньої густини матеріалу [337]. Проте для дрібнозернистих бетонів при частковому застосуванні пористих пісків частіше всього змінюється фактична гранулометрія заповнювачів через те, що частки пористого піску, в першу чергу – керамзитового, в середньому є крупнішими за частки кварцового піску. З метою порівняння властивостей дрібнозернистих бетонів з різним вмістом легкого керамзитового піску без впливу гранулометрії даного заповнювача були проведені описані нижче експерименти. Методом розсіву було створено пісок зі штучним зафіксованим співвідношенням фракцій за масою (при використанні лише кварцових зерен): 1,25..2,5 мм – 20%, 0,63..1,25 мм – 30%, 0,315..0,63 мм – 20%, 0,16..0,315 мм – 30%. При застосуванні керамзитових зерен їхня кількість вираховувалася та відповідно вводилася за об'ємом, який був аналогічним об'єму тієї фракції кварцового піску, що замінювалася пористим піском. Перший експеримент з порівняння властивостей дрібнозернистих бетонів на різних типах пісків проводився за 15-ти точковим оптимальним планом [241,295]. Варіювалися наступні фактори складу:

- співвідношення пісок/цемент, від 2/1 до 4/1 по масі при використанні кварцового піску. При застосуванні пористого керамзитового піску замінювався відповідний об'єм кварцового піску. Варіювання цього фактора

забезпечувало можливість вивчення впливу пористого піску на властивості дрібнозернистих бетонів різної міцності;

- частка в піску керамзитових зерен фракції 1,25-2,5 мм, від 0 до 100% за об'ємом;

- частка в піску керамзитових зерен фракції 0,315-0,63 мм, від 0 до 100% за об'ємом.

Використовувався портландцемент ПЦ П/Б-Ш-400 Одеського цементного заводу і розсіяний по фракціях керамзитовий пісок Одеського керамзитового заводу. У всі суміші вводився суперпластифікатор С-3 в кількості 0,8% від маси цементу. Всі суміші мали рівну рухомість від 8 ± 1 см по penetрації стандартного конусу. Аналіз водопотреби сумішей, яка з метою забезпечення рівної рухомості сумішей залежала від складу дрібнозернистого бетону, показав, що заміна заповнювача з кварцового піску на керамзитовий підвищує В/Ц, але не більше, ніж на 8..9%. Це пояснюється тим, що в експерименті застосовувався керамзитовий пісок з переважно округлою формою частинок зі спеченою поверхнею, а не легкий пісок, отриманий методом дробленням гравію. Очікувано на В/Ц суміші істотно вплинуло відношення пісок/цемент (П/Ц), при цьому суміші при П/Ц = 2 мали В/Ц \approx 0,34, при П/Ц = 3 В/Ц сумішей складало приблизно 0,42, а при П/Ц = 4 – В/Ц \approx 0,56. Заміна кварцових зерен піску на пористі зерна керамзиту знижує водовідділення суміші, яке визначалося згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002, що свідчить про краще збереження вологи у суміші в процесі її укладання і ущільнення. При цьому дещо більшу здатність до утримання вологи мають зерна меншої фракції (0,315-0,63 мм) завдяки більшій кількості одиничних пористих часток у суміші. Найменше водовідділення мають суміші з максимальною кількістю цементу і керамзитового піску обох фракцій.

На рис.6.16 показані побудовані за відповідними ЕС-моделями діаграми, що відображають вплив співвідношення пісок/цемент та частки керамзитових зерен фракцій 1,25-2,5 мм і 0,315-0,63 мм в піску на міцність дрібнозернистих бетонів при стиску (6.16.а) і на розтяг при згині (рис.6.16.б). Як показує їх

аналіз, в межах факторного простору даного експерименту найбільш істотний вплив на міцність бетону має співвідношення П/Ц. При заміні частини кварцового піску керамзитовим міцність при стиску знижує на 1..5 МПа. При цьому можна відзначити приблизно рівний вплив на міцність крупності керамзитових зерен фракції 1,25-2,5 і 0,315-0,63. Але заміна частини кварцового піску на аналогічні керамзитові практично не позначається на значенні міцності на розтяг при згині.

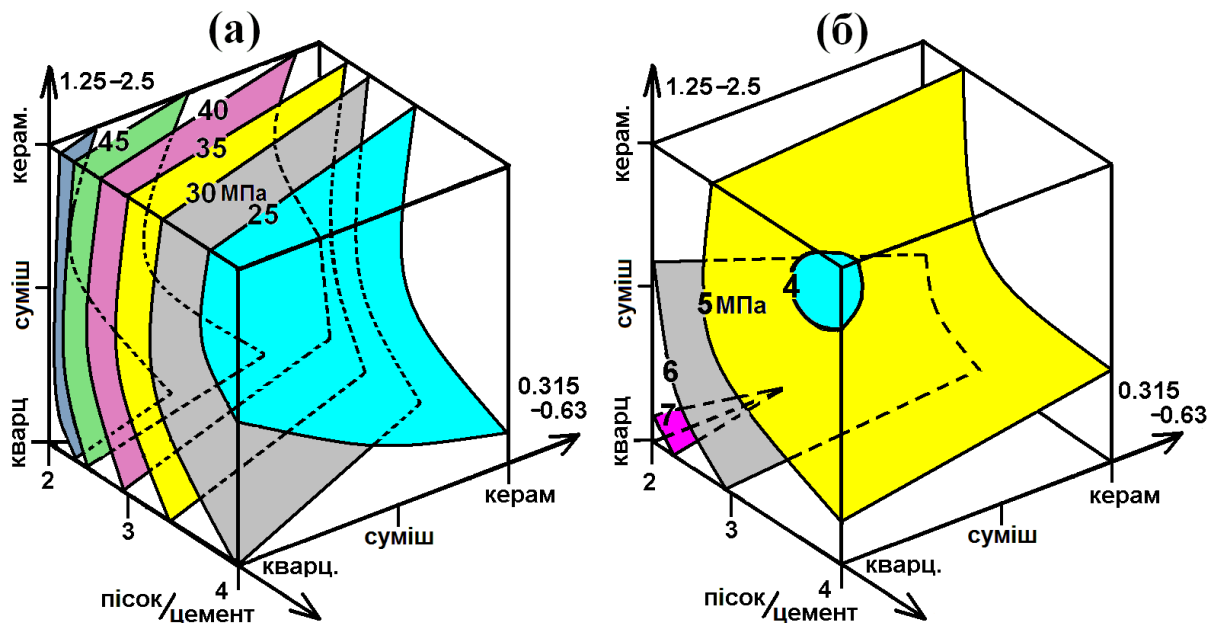


Рис.6.16. Вплив співвідношення пісок/цемент та частки керамзитових зерен фракцій 1,25-2,5 мм і 0,315-0,63 мм в піску на міцність дрібнозернистих бетонів при стиску (а) і на розтяг при згині (б)

Крім міцності дрібнозернистих бетонів також досліджувалася їхня тріщиностійкість і ударостійкість (Т). Тріщиностійкість оцінювалася по рівню критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} (МПа \times м^{0.5}). Однофакторні діаграми, побудовані за відповідними ЕС-моделями та які відображають вплив варійованих факторів на тріщиностійкість і ударостійкість досліджених дрібнозернистих бетонів наведені на рис.6.17.

Аналіз даних діаграм показує, що заміна кварцових зерен піску фракції 0,315-0,63 мм на пористі зерна керамзиту помітно покращують показники K_{IC} і Т, а кількість зерен фракції 1,25-2,5 мм впливає на дані показники якості менш

відчутно. Збільшення П/Ц, тобто зниження кількості цементу, очікувано знижує тріщиностійкість K_{1C} і ударостійкість T бетону. Поліпшення тріщиностійкості при введенні легкого заповнювача пояснюється здатністю частинок зниженої пружності розсіювати фронт зростаючої тріщини в гетерогенному матеріалі [137]. Аналогічно зростання стійкості до динамічних впливів пояснюється демпфуючими властивостями подібних частинок, що сприяють розсіюванню енергії прикладеного до матеріалу удару [142,301].

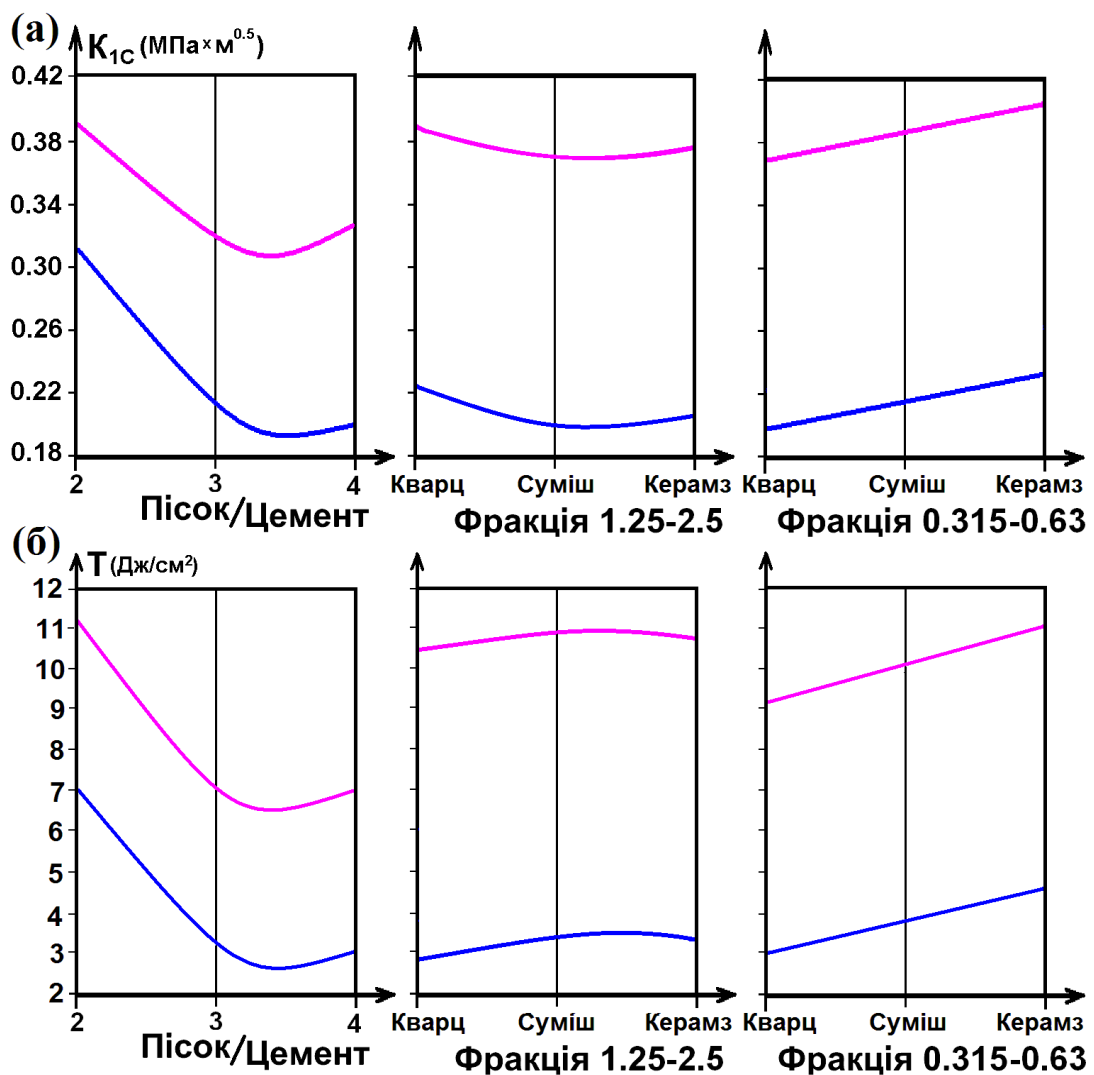


Рис.6.17. Вплив співвідношення пісок/цемент та частки керамзитових зерен фракцій 1,25-2,5 мм і 0,315-0,63 мм в піску на тріщиностійкість K_{1C} (а) і ударостійкість T (б) дрібнозернистих бетонів

Таким чином, було підтверджено високу ефективність легкого заповнювача для підвищення тріщиностійкості дрібнозернистого бетону та його стійкості до

динамічних впливів при забезпечені високої міцності на розтяг при згині, що є важливим для тонкостінних конструкцій, зокрема при їх відновленні.

Як показують дослідження багатьох вчених [299,302,303 та ін.], дисперсне армування дозволяє підвищити ряд якісних показників легких бетонів. Відповідно з метою порівняння ефективності застосування зерен легкого заповнювача як часток пониженої пружності та дисперсного армування при керуванні властивостями дрібнозернистого бетону в рамках даної роботи проводився наступний експеримент. Використовувався аналогічний першому експерименту портландцемент, пісок зі штучним співвідношенням фракцій і добавка С-3 в кількості 0,8% від маси цементу. Співвідношення цемент/пісок в даному експерименті фіксувалося на рівні 1:3 за масою при застосуванні кварцового піску. При цьому за 15-ти точковими оптимальним планом варіювалися наступні три фактори складу дрібнозернистого бетону:

- частка керамзитових зерен в піску фракції 0,315-0,63 мм, від 0 до 70% за об'ємом;
- частка керамзитових зерен в піску фракції 0,16-0,315 мм, від 0 до 70% за об'ємом;
- кількість поліпропіленової фібри Ваусон, від 0 до 1,2 кг/м³.

В даному експерименті всі суміші також мали рівну рухомість 8 ± 1 см по пенетрації стандартного конусу, тобто їх водопотреба залежала від складу. Встановлено, що заміна кварцового піску фракції 0,315-0,63 мм на зерна керамзитового піску майже не впливає на В/Ц суміші для складів без фібри і керамзитового піску фракції 0,16-0,315 мм. Проте для складів з фіброю і максимальною кількістю керамзитового піску фракції 0,16-0,315 мм заміна часті фракції 0,315-0,63 мм легким заповнювачем на 10-12% підвищує В/Ц суміші. Введення фібри і заміна піску фракції 0,16-0,315 мм, природно, підвищує В/Ц суміші рівної рухомості. Суміші з керамзитовими зернами за показником водовідділення були більш однорідними в порівнянні з фібробетонними сумішами на кварцовому піску, що аналогічно результатам експерименту, описаного вище в даному параграфі.

Проведені дослідження властивостей дрібнозернистих бетонів і фібробетонів як при нормальній вологості, так і у сухому і водонасиченому станах показали, що заміна до 70% кварцового піску фракції 0,315-0,63 мм на керамзитові зерна та введення поліпропіленової фібри несуттєво впливає на міцність при стиску даного матеріалу. Заміна піску дрібнішої фракції 0,16-0,315 мм на зерна пористого заповнювача аналогічного розміру дещо знижує міцність композиту, що частково пояснюється підвищенням водопотреби суміші. За відповідною ЕС-моделлю була побудована діаграма, яка показана на рис.6.18 та яка відображає вплив кількості фібри і частки керамзитових зерен двох фракцій в піску на міцність дрібнозернистого бетону на розтяг при згині. Її аналіз показує, що заміна кварцового піску фракції 0,315-0,63 мм керамзитовим підвищує міцність бетону на розтяг при згині на 10..12%, а застосування дисперсного армування підвищує даний показник на 10..15%. Заміна «дрібної» фракції 0,16-0,315 мм на керамзитовий пісок майже не впливає на міцність бетону на розтяг при згині. Але основний ефект від введення фібри та пористого піску досягався у підвищенні тріщиностійкості та ударостійкості дрібнозернистого бетону, зокрема за рахунок пониженої пружності зерен керамзиту в порівнянні з кварцовими [142].

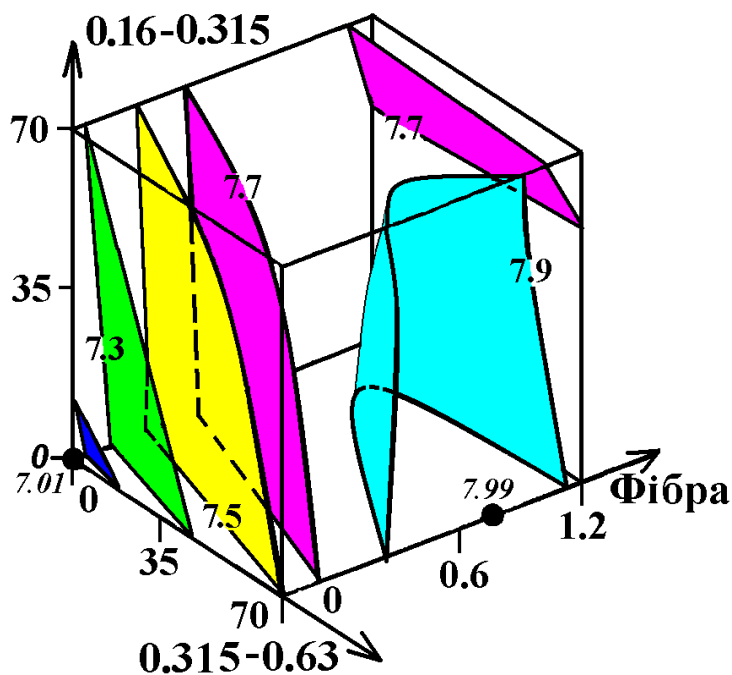


Рис.6.18. Вплив кількості фібри і частки керамзитових зерен фракцій 0,16-0,315 мм і 0,315-0,63 мм в піску на міцність дрібнозернистого бетону на розтяг при згині (МПа)

На рис.6.19 показані діаграми у вигляді квадратів, що відображають вплив кількості керамзитових зерен фракції 0,315-0,63 мм і фібри на тріщиностійкість (рис.6.19.а) і ударостійкість (рис.6.19.б) бетону. Діаграми характеризують бетон без керамзитового піску фракції 0,16-0,315 мм. Їх аналіз показує, що збільшення кількості керамзитових зерен у піску фракції 0,315-0,63 в рамках факторного простору даного експерименту на 12% підвищує тріщиностійкість бетону і 40-65% підвищує його ударостійкість. Аналогічний за масштабом вплив на рівні тріщиностійкості та ударостійкості оказує дисперсне армування бетону поліпропіленовою фіброю.

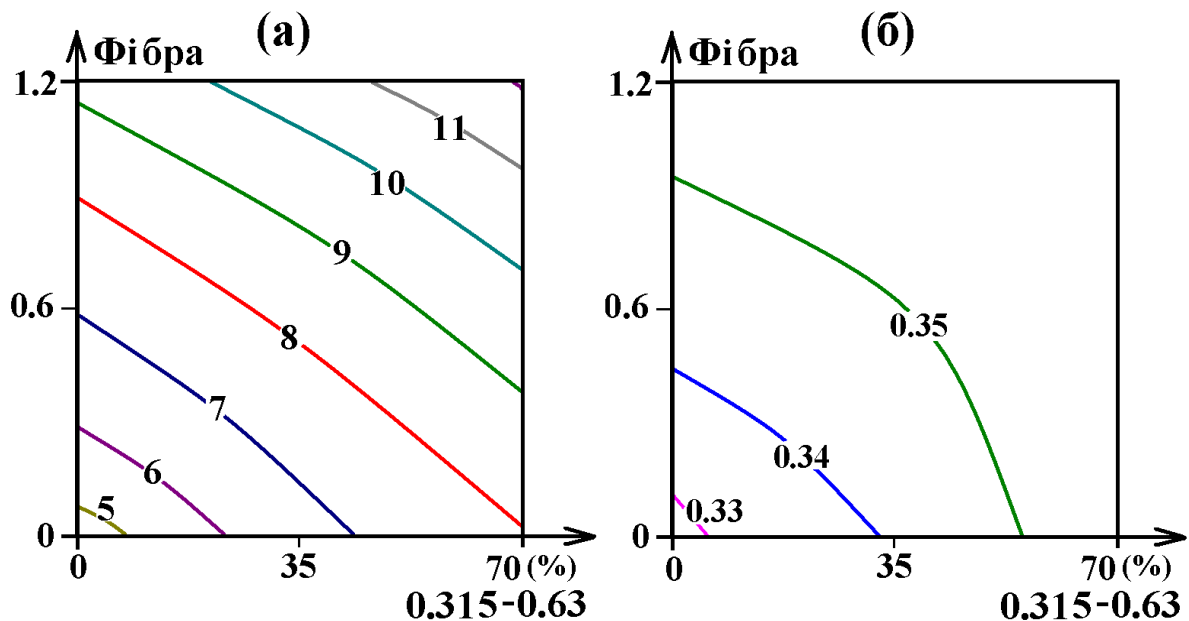


Рис.6.19. Вплив кількості керамзитових зерен фракції 0,315-0,63 мм і поліпропіленової фібри на ударостійкість T (а) і тріщиностійкість K_{1C} (б) дрібнозернистого бетону

Застосування пористого піску також позитивно вплинуло на морозостійкість дрібнозернистого бетону. Бетони, в яких 35% і більше піску фракцій 0,16-0,315 мм і 0,315-0,63 мм складав пористий пісок мали на 50...100 циклів більшу морозостійкість в порівнянні зі складами на кварцовому піску. Цей ефект можна пояснити створенням рівномірно розподіленої і переважно замкнутої резервної пористості в матеріалі. Причому за рахунок введення поліпропіленової фібри морозостійкість матеріалу підвищується приблизно ще

на 50 циклів. Дослідження величини адгезії дрібнозернистого бетону до поверхні керамзитобетону класу В20 (використовувалися стандартні зразки-куби) показали, що для складів на кварцовому піску адгезія становить від 1,1 до 1,3 МПа, а для складів з вмістом пористого піску фракції 0,315-0,63 мм 70% вона становить від 1,4 до 1,5 МПа. Позитивний вплив пористого заповнювача в даному випадку можна пояснити його здатністю краще утримувати воду у суміші, що сприяє зниженню деформацій в свіже укладеному бетоні.

Таким чином, введення до складу дрібнозернистого бетону частки керамзитового піску з раціональним розміром зерен (фракцій) дозволяє керувати властивостями матеріалу з ефективністю, практично рівною ефективності дисперсного армування. Враховуючи економічний фактор, зокрема вартість волокон і технологічність приготування суміші, використання керамзитового піску при певних видах будівельних робіт можна вважати більш вигідним. Зокрема, дрібнозернисті бетони і фібробетони на суміші кварцового і керамзитового пісків за рахунок досягнутого рівня механічних властивостей і морозостійкості можуть бути використані при ремонті або відновленні залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд.

6.5 Практична реалізація результатів досліджень

6.5.1 Вибір оптимальних складів керамзитобетонів

для тонкостінних гідротехнічних споруд методом Монте-Карло

Як зазначено у п.2.1, на цьому етапі роботи було проведено дослідне впровадження отриманих результатів досліджень, зокрема технологічних прийомів і рецептурних методів підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.

За результатами проведених на четвертому етапі роботи досліджень фізико-механічних властивостей і довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема дисперсно-армованих (4-й розділ роботи), з

використанням методу Монте-Карло був проведений вибір оптимальних складів даних матеріалів [244,338]. Для аналізу використовувався комплекс отриманих ЕС-моделей (4.3)-(4.9), що описують вплив варійованих на четвертому етапі роботи факторів складку на міцність керамзитобетонів при стиску, на міцність на розтяг при згині, на морозостійкість та водонепроникність.

При виборі оптимальних складів легких бетонів у якості критеріїв обмеження були прийняті значення міцності при стиску (≥ 40 МПа), міцності на розтяг при згині (≥ 7 МПа) та морозостійкості (≥ 550 циклів). В якості критерію оптимізації було обрано рівень водонепроникності як важливий з позиції довговічності матеріалу. Для реалізації методу Монте-Карло в електронній таблиці Excel було згенеровано 15 тис. точок з випадковим рівномірно розподіленими координатами у факторному просторі експерименту. Для першої серії експериментів четвертого етапу роботи це відповідно рівні 3-х варійованих факторів, для другої серії – 4-х. В даних точках (координатах факторного простору) за відповідними ЕС-моделями були розраховані рівні міцності при стиску керамзитобетону, міцності на розтяг при згині та морозостійкості. Далі автоматично виконується порівняння отриманих рівнів показників якості з заданими критеріями обмеження та розраховується відсоток кількості точок, в яких виконуються всі задані критерії. Далі в цих точках за відповідною ЕС-моделлю розраховується значення водонепроникності та визначаються координати точок (точки), в яких досягається максимальне значення рівня W (при гарантованому забезпеченні міцності і морозостійкості). Приклад реалізації методу Монте-Карло для другої серії експериментів четвертому етапі роботи наведено на рис.6.20.

Таким чином, для першої серії експериментів було встановлено, що у викладених вище умовах експерименту оптимальне рішення (максимальний рівень W) досягається при кількості добавки С-3 на рівні 0,8-0,82% від маси цементу та кількості мікрокремнеземну в діапазоні 25-30 кг/м³. Для другої серії експерименту при виконанні зазначених критеріїв обмеження максимальний рівень W досягається при кількості мікрокремнеземну 25-30 кг/м³, кількості поліпропіленової фібри 0,6-0,7 кг/м³ та при вмісті гравію в діапазоні 670-675 л/м³.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | |
|----|----------------------|-------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------|------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------|------------|------------|--------------|------------|
| 1 | | | b0 | b1 | b2 | b3 | b4 | b11 | b22 | b33 | b44 | b12 | b13 | b14 | b23 | b24 | b34 | |
| 2 | критерій обм | Rb | 41,3 | 3,2 | 0,8 | -0,5 | 0,3 | -0,6 | -0,8 | -1,1 | -0,3 | 0 | -0,2 | 0 | -0,3 | 0,1 | 0 | |
| 4 | | | b0 | b1 | b2 | b3 | b4 | b11 | b22 | b33 | b44 | b12 | b13 | b14 | b23 | b24 | b34 | |
| 5 | критерій обм | Rbt | 6,76 | 0,47 | 0,06 | 0 | 0,1 | -0,17 | -0,07 | -0,02 | -0,02 | -0,03 | 0,03 | -0,02 | -0,02 | 0,04 | -0,04 | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | b0 | b1 | b2 | b3 | b4 | b11 | b22 | b33 | b44 | b12 | b13 | b14 | b23 | b24 | b34 | |
| 8 | критерій обм | F | 548 | 31 | 0 | 0 | 30 | -29 | -16 | -18 | 15 | -11 | 0 | 14 | 17 | 18 | 0 | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | норматив Rb | 40 | | | | | норматив Rbt | 7 | | | | | | | | норматив F | 550 |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | b0 | b1 | b2 | b3 | b4 | b11 | b22 | b33 | b44 | b12 | b13 | b14 | b23 | b24 | b34 | |
| 13 | критерій оптимізації | W | 11,9 | 1,8 | 0,7 | -0,2 | -0,8 | -1,2 | -0,9 | -0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,1 | -0,1 | 0 | | 0 | 0 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | % відп Rb | % відп Rbt | % відп F | всього | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | 57,7 | 10,26 | 25,6333 | 7,633 | |
| 16 | | № | Відповідність всім критеріям | x1 | x2 | x3 | x4 | Rb | Rbt | F | Відповідність Rb | Відповідність Rbt | Відповідність F | | | | | |
| 17 | 1 | 0 | -0,96 | 0,51 | -0,50 | 0,51 | 37,93 | 6,27 | 501 | 0 | 0 | 0 | 8,8 | | | | | |
| 18 | 2 | 0 | -0,90 | -0,98 | -0,48 | 0,17 | 36,17 | 6,06 | 476 | 0 | 0 | 0 | 8,0 | | | | | |
| 19 | 3 | 0 | -0,14 | -0,16 | 0,23 | -0,73 | 40,17 | 6,60 | 530 | 1 | 0 | 0 | 12,3 | | | | | |
| 20 | 4 | 1 | 0,94 | 0,82 | -0,71 | 0,92 | 44,10 | 7,13 | 579 | 1 | 1 | 1 | 12,2 | | | | | |
| 21 | 5 | 0 | -0,16 | -0,44 | -0,18 | -0,17 | 40,24 | 6,62 | | | | | | | | | | |
| 22 | 6 | 0 | -0,80 | 0,02 | -0,48 | 0,28 | 38,35 | 6,32 | | | | | | | | | | |
| 23 | 7 | 0 | 0,37 | -0,54 | 0,64 | 0,96 | 40,98 | 6,89 | | | | | | | | | | |
| 24 | 8 | 0 | -0,05 | 0,76 | -0,43 | -0,90 | 40,81 | 6,60 | | | | | | | | | | |
| 25 | 9 | 1 | 0,83 | 0,65 | 0,56 | 0,58 | 43,01 | 7,07 | | | | | | | | | | |
| 26 | 10 | 0 | 0,23 | 0,52 | 0,46 | -0,58 | 41,34 | 6,80 | | | | | | | | | | |
| 27 | 11 | 0 | 0,07 | 0,33 | 0,94 | -0,68 | 39,78 | 6,72 | | | | | | | | | | |
| 28 | 12 | 0 | -0,36 | 0,51 | -0,95 | 0,54 | 39,93 | 6,67 | | | | | | | | | | |
| 29 | 13 | 0 | 0,02 | 0,56 | -0,51 | -0,99 | 40,97 | 6,62 | | | | | | | | | | |

Рис.6.20. Приклад пошуку оптимального складу керамзитобетону методом Монте-Карло

6.5.2 Вибір оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів

За результатами проведених на п'ятому етапі роботи досліджень довговічності, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів на гідрофобізованому ґравії (5-й розділ роботи) був зроблений вибір оптимальних складів даних матеріалів. Як зазначалося вище, цей легкий бетон позиціонується як суднобудівний через те, що основним об'єктом його застосування є залізобетонне суднобудування.

При виборі оптимальних складів, які можуть бути використані в залізобетонному суднобудуванні, розглядалися тільки керамзитобетони з кількістю портландцементу 500 кг/м^3 і більше. В першу чергу це обумовлено вимогами діючих галузевих стандартів, які не дозволяють в тонкостінних

конструкціях залізобетонних плавучих споруд використовувати бетони з кількістю в'язучого нижче 500 кг/м^3 . Також, як було показано вище (п.5.4), склади з малою кількістю портландцементу мають недостатню водонепроникність і морозостійкість, тому через обмежену довговічність можуть рекомендуватися переважно для конструкцій внутрішніх приміщень плавучих споруд.

При проведенні процедури оптимізації кількість добавки суперпластифікатора С-3 фіксувалося на рівні 0,8% від маси цементу. Таке рішення було прийнято з урахуванням того, що саме при такій або близькій до такої кількості модифікатора спостерігалися найкращі значення для практично всіх досліджених фізико-механічних показників якості суднобудівного керамзитобетону. Відповідно, включати даний фактор в оптимізаційну задачу не обов'язково через заздалегідь очевидне рішення щодо раціональної кількості добавки С-3 в складі модифікованого бетону. Також при проведенні оптимізації фіксувалося кількість кольматуючої добавки Пенетрон А на рівні 2% від маси портландцементу. Це рішення було прийнято з урахуванням значного впливу даної добавки на водонепроникність, морозостійкість і експлуатаційну вологість керамзитобетону (п.5.5, 5.6), відповідно на довговічність даного матеріалу.

Процедура пошуку оптимальних технологічних рішень проводилася графічним методом по діаграмах типу «квадрати», які були побудовані за відповідними адекватним ЕС-моделями [241,243,244]. На квадрати були накладені ізолінії, що відображають рівні основних фізико-механічних властивостей керамзитобетонів: міцності при стиску (в водонасиченому стані), водонепроникності, морозостійкості і теплопровідності. Діаграми були побудовані для складів з різною кількістю портландцементу: 500, 520, 540, 560, 580 і 600 кг/м^3 . Вони показані відповідно на рис.6.21.а - рис.6.21.е.

В якості критеріїв обмеження були прийняті: міцність при стиску, морозостійкість і водонепроникність – тобто основні показники якості, що забезпечують довговічність і конструктивні вимоги матеріалу для тонкостінних залізобетонних конструкцій плавучих споруд.

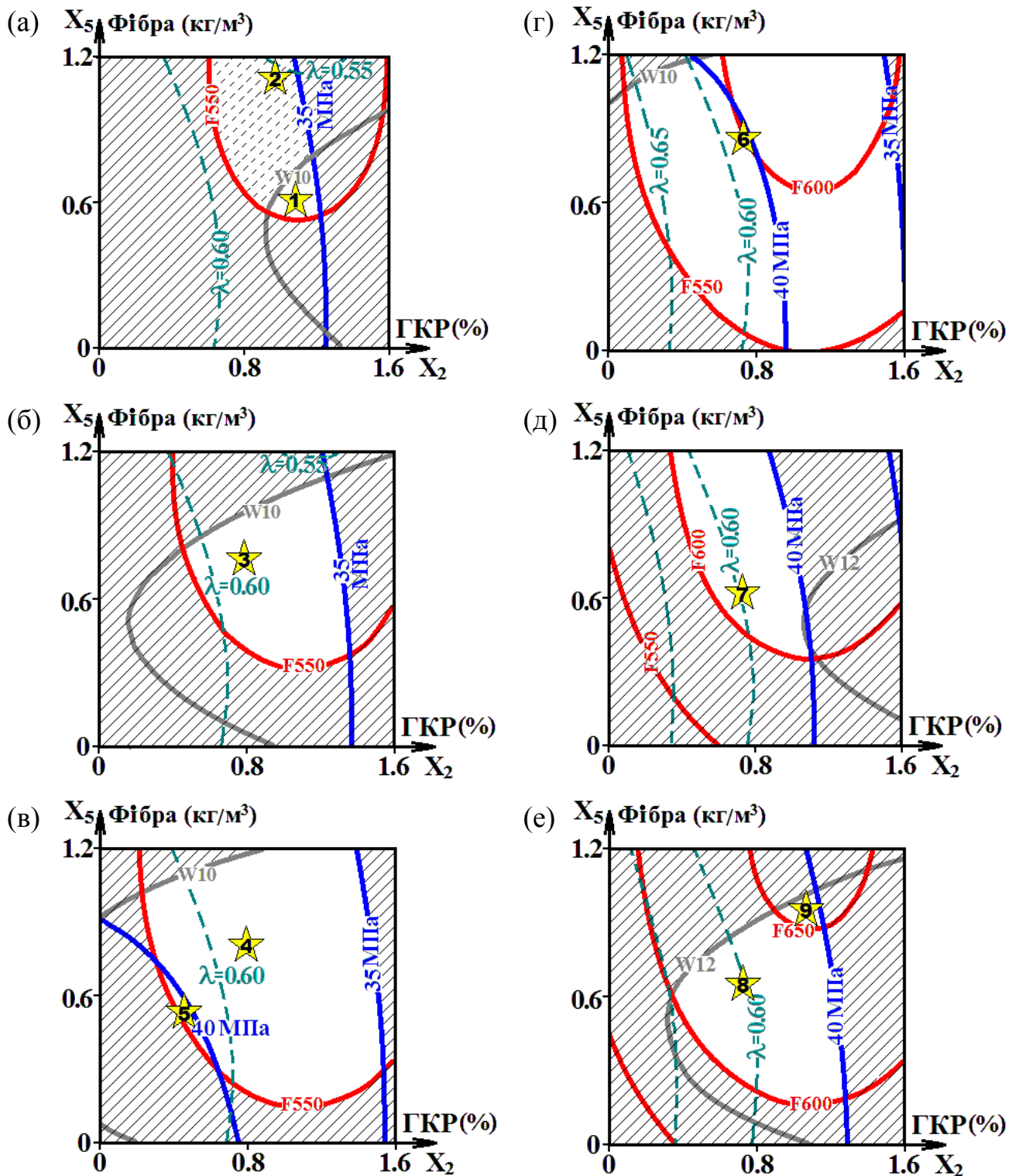


Рис.6.21. Вибір оптимальних складів суднобудівних керамзитобетонів. Кількість портландцементу: а – 500 кг/м^3 , б – 520 кг/м^3 , в – 540 кг/м^3 , г – 560 кг/м^3 , д – 580 кг/м^3 , е – 600 кг/м^3 .

При кількості портландцементу в складі до 560 кг/м^3 (рис.6.21.а-г) міцність в водонасиченому стані обмежується величиною ≥ 35 МПа, морозостійкість

рівнем $\geq F550$ і водонепроникність рівнем $\geq W10$. Рекомендовані рішення (точки в необхідних координатах) показані на діаграмах зірочками з відповідними номерами.

При кількості портландцементу в складі 500 кг/ м^3 (рис.6.21.а) зона, яка задовольняє вищевикладеним вимогам, має незначний розмір. В даному випадку оптимальним можна вважати рішення №1 при концентрації кремнійорганічної рідини при обробці поверхні гравію близько 1% і введенні $0,6 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленової фібри. Проте дане рішення не можна вважати гарантованим зважаючи на об'єктивну величину помилок при випробуваннях зразків матеріалу і побудові ЕС-моделей. Відповідно, якщо зниження водонепроникності до рівня W8 є прийнятним, при витраті портландцементу 500 кг/м^3 існує область рішень при гарантованій морозостійкості не менше F550 (рішення №2). В даному випадку концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії близько 0,9% і кількість фібри близько $1,1 \text{ кг/м}^3$.

При кількості портландцементу в складі 520 кг/ м^3 (рис.6.21.б) зона, яка задовольняє критеріям обмеження, є досить великою, відповідно рекомендоване рішення №3 можна вважати економічно обґрунтованим – кількість фібри $0,8\text{-}0,9 \text{ кг/м}^3$, концентрація гідрофобізатора в емульсії 0,8%.

При кількості портландцементу в складі 540 кг/м^3 (рис.6.21.в) рішення №4, яке задовольняє висунутим вимогам обмеження, практично аналогічно рішенню №3 ($0,8\text{-}0,9 \text{ кг/м}^3$ фібри, концентрація гідрофобізатора в емульсії 0,8%). Однак за рахунок розширення зони оптимальних рішень при такій кількості в'язучого можливе отримання матеріалу з міцністю близько 40 МПа (рішення №5). Для даного рішення кількість фібри $0,5\text{-}0,6 \text{ кг/м}^3$, концентрація гідрофобізатора 0,5-0,6%. Подібні склади можна рекомендувати для конструкцій, які вимагають застосування матеріалів підвищеної міцності без додаткового збільшення вимог щодо довговічності (водонепроникності та морозостійкості).

При кількості портландцементу в складі 560 кг/м^3 (рис.6.21.г) прийняте рішення №6, яке дозволяє отримати матеріал з міцністю 40 МПа при

морозостійкості 600 циклів. Однак надійність даного рішення є досить низькою через малу площу зони оптимуму. Для гарантованого досягнення рівня міцності ≥ 40 МПа, морозостійкості $\geq F600$ і водонепроникності $\geq W10$ необхідно збільшити кількість портландцементу в керамзитобетоні. На рис.6.21.д при кількості портландцементу 580 кг/м^3 показано рішення №7, яке гарантовано задовольняє даним підвищеним вимогам по морозостійкості і міцності (кількість фібри $0,6-0,7 \text{ кг/м}^3$, концентрація гідрофобізатора в емульсії $0,7-0,8\%$).

При кількості портландцементу в складі 600 кг/м^3 (рис.6.21.е) зона оптимальних рішень була цілеспрямовано обмежена з урахуванням додатково підвищених вимог до матеріалу: міцність в водонасиченому стані ≥ 40 МПа, морозостійкість $\geq F600$ і водонепроникність $\geq W12$. Тобто при максимальній кількості цементу можливе отримання найбільш міцних і довговічних матеріалів. З урахуванням описаних вище критеріїв обмеження можна рекомендувати рішення №8 при кількості фібри $0,7-0,8 \text{ кг/м}^3$ і концентрації гідрофобізатора в емульсії $0,7-0,8\%$. При необхідності забезпечувати морозостійкість легкого бетону у 650 циклів можливе рішення №9 з підвищеною до приблизно $1,0 \text{ кг/м}^3$ кількістю фібри і при концентрації гідрофобізатора в емульсії при обробці гравію $1,0-1,1\%$.

Таким чином, серед всіх 9-ти запропонованих оптимальних рішень з точки зору економічної обґрунтованості, тобто витрати компонентів за умови отримання матеріалу необхідного рівня довговічності, міцності і експлуатаційних характеристик, можна рекомендувати 6 складів. Дані склади фіброкерамзитобетонів, а також рівні фізико-механічних властивостей матеріалів, що забезпечуються даними складами, наведені в таблиці 6.7.

Слід зазначити, що при виробництві суднобудівних і аналогічних їм керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів в промислових умовах їх фізико-механічні характеристики можуть відрізнятися від показників рекомендованих складів через іншу якість вихідних матеріалів та через відмінності в умовах твердіння бетонів.

Рекомендовані склади суднобудівних фіброкерамзитобетонів

| Номер рішення на рис.6.21 | Склад фіброкерамзитобетонів | Рівень фізико-механічних властивостей матеріалу |
|---------------------------|---|--|
| 2 | Цемент – 500 кг/м ³ , Пісок – 675 кг/м ³ , Гравій – 670 л/м ³ , С-3 – 4 кг/м ³ , Пенетрон А – 10 кг/м ³ , фібра – 1,1 кг/м ³ , вода – 170 л/м ³ , концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 0,9% | $f_{ck.cube.w} \geq 35$ МПа F550 W8 $\lambda \approx 0,56$ Вт/(м×К) |
| 3 | Цемент – 520 кг/м ³ , Пісок – 662 кг/м ³ , Гравій – 671 л/м ³ , С-3 – 4,16 кг/м ³ , Пенетрон А – 10,4 кг/м ³ , фібра – 0,9 кг/м ³ , вода – 176 л/м ³ , концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 0,8% | $f_{ck.cube.w} \geq 35$ МПа F550 W10 $\lambda \approx 0,58$ Вт/(м×К) |
| 5 | Цемент – 540 кг/м ³ , Пісок – 649 кг/м ³ , Гравій – 667 л/м ³ , С-3 – 4,32 кг/м ³ , Пенетрон А – 10,8 кг/м ³ , фібра – 0,5 кг/м ³ , вода – 181 л/м ³ , концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 0,6% | $f_{ck.cube.w} \approx 40$ МПа F550 W10 $\lambda \approx 0,61$ Вт/(м×К) |
| 7 | Цемент – 580 кг/м ³ , Пісок – 623 кг/м ³ , Гравій – 659 л/м ³ , С-3 – 4,64 кг/м ³ , Пенетрон А – 11,6 кг/м ³ , фібра – 0,7 кг/м ³ , вода – 193 л/м ³ , концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 0,8% | $f_{ck.cube.w} \geq 40$ МПа F600 W10 $\lambda \approx 0,60$ Вт/(м×К) |
| 8 | Цемент – 600 кг/м ³ , Пісок – 610 кг/м ³ , Гравій – 655 л/м ³ , С-3 – 4,8 кг/м ³ , Пенетрон А – 12 кг/м ³ , фібра – 0,7 кг/м ³ , вода – 199 л/м ³ концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 0,7% | $f_{ck.cube.w} \geq 40$ МПа F600 W12 $\lambda \approx 0,60$ Вт/(м×К) |
| 9 | Цемент – 600 кг/м ³ , Пісок – 610 кг/м ³ , Гравій – 655 л/м ³ , С-3 – 4,8 кг/м ³ , Пенетрон А – 12 кг/м ³ , фібра – 1,0 кг/м ³ , вода – 198 л/м ³ , концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії 1,0% | $f_{ck.cube.w} \approx 40$ МПа F650 W12 $\lambda \approx 0,59$ Вт/(м×К) |

В цілому, рекомендовані склади фіброкерамзитобетонів забезпечують вимоги Морського реєстру до суднобудівних матеріалів, що використовуються в залізобетонному суднобудуванні. При цьому за рахунок модифікації їх складу, оптимального підбору співвідношення компонентів композиту та застосування прийому гідрофобної обробки поверхні керамзитового гравію як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці рекомендовані склади забезпечують підвищену довговічність легкого суднобудівного бетону і поліпшені експлуатаційних властивості у вологих умовах експлуатації.

6.5.3 Технологія приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для плавучих залізобетонних споруд

В рамках сьомого етапу проведених в роботі досліджень крім складів модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів з підвищеною довговічністю, фізико-механічними та експлуатаційними властивостями також розроблялася оптимальна технологія виготовлення даних матеріалів та їх застосування при виготовленні (будівництві) тонкостінних плавучих залізобетонних споруд. Дана технологія враховувала розроблені в рамках описаних в даній роботі досліджень технологічні прийоми та рецептурні методи підвищення довговічності легких бетонів.

Технологія розроблялася з урахуванням вимог Регістру судноплавства України, «Правил будівництва корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» і ОСТ5.9880-85 «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування». При розробці технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для плавучих залізобетонних споруд враховувався накопичений багаторічний досвід спеціалістів Херсонського державного заводу «Паллада». Між Одеською державною академією будівництва та архітектури та заводом «Паллада» укладено договір про науково-технічне співробітництво.

Розроблена технологія регламентує застосування в якості в'язучого для легких суднобудівних бетонів тільки сульфатостійкого портландцементу марки 400 і вище, який задовольняє вимогам ДСТУ Б В.2.7-85-99. Даний портландцемент не повинен містити активних мінеральних добавок і шлаку. Вміст в цементі трьохкальцієвого алюмінату (C_3A) має бути не вище 5%. У якості дрібного заповнювача для приготування керамзитобетонів повинен застосовуватися чистий природний кварцовий пісок із зернами фракцій від 0,15 до 5 мм, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95. Для забезпечення морозостійкості матеріалу зміст мулистих і глинистих домішок в піску повинен бути не більше 1%.

Як крупний заповнювач при приготуванні модифікованих керамзитобетонних сумішей для тонкостінних залізобетонних плавучих споруд повинен застосовуватися керамзитовий гравій з розміром зерен від 5 до 10 мм. Гравій повинен відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-17-95 «Гравій, щебінь і пісок штучні пористі». Марка керамзитового гравію за міцністю при стиску у циліндрі повинна бути не нижчою П125 для бетонів класу LC 20/22 і LC 25/28, не нижчою П150 для бетонів класів LC 30/33 і LC 35/38. Керамзитовий гравій повинен мати близьку до кулястої форму зерен. Кількість зерен гравію, довжина яких по витягнутій осі в два і більше разів перевищує їх мінімальний діаметр, має бути не більше 15% за об'ємом. Керамзитовий гравій не повинен включати вапнякових та інших включень, що викликають втрату маси проби при кип'ятінні протягом 4 годин. Поверхня зерен керамзитового гравію повинна бути рівномірно обпечена і оплавлена. У зламі зерна гравію повинні мати однорідну комірчасту структуру.

Для поліпшення довговічності, фізико-механічних характеристик і рухливості легких бетонів для тонкостінних плавучих споруд до складу сумішей рекомендується вводити комплексну добавку суперпластифікатор С-3 (ТУ 6-36-0204229, ТУ 2481-001-51831493-00) + Пенетрон Admix (ТУ 5745-001-55171585-2003).

Для приготування легких суднобудівних бетонів слід застосовувати воду, яка задовольняє вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови».

Для підвищення водонепроникності і зниження теплопровідності керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних плавучих залізобетонних споруд рекомендується проводити обробку поверхні керамзитового гравію гідрофобізатором – емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М (ГКЖ-94м), ТУ У 24.6-23849235-086-2001.

Емульсія кремнійорганічної рідини 136-157м готується наступним чином. Спочатку в швидкохідному змішувачі готується 50%-ва водна емульсія. Основою емульсії є розчин емульгатора. Для приготування розчину

емульгатора в відміряний об'єм холодної води слід додати емульгатор (наприклад – желатин) з розрахунку отримання 1% -ного розчину (1 г емульгатору на 99 г води). Після введення емульгатору воду слід нагріти до 60..70 °С і підтримувати цю температуру до повного розчинення емульгатору. Потім розчин емульгатору слід охолодити до кімнатної температури. Процес приготування емульсії виконується в такій послідовності: в воронку вливається заздалегідь приготовлений розчин емульгатора, потім включається електроміксер і вливається масляниста рідина 136-157М 100%-ної концентрації. Тобто в швидкісний змішувач вводиться гідрофобізатор і розчин емульгатора в рівному ваговому співвідношенні. Далі емульсію слід перемішувати до отримання однорідного стану, проте не менш 2-х хвилин. На основі 50%-ї емульсії безпосередньо перед обробкою гравію слід готувати водний розчин (емульсію) кремнійорганічної рідини 136-157М потрібної концентрації від 0,5 до 0,8%.

Обробку керамзитового гравію емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М слід проводити методом занурення в ємність з емульсією на час від 1 до 2-х хвилин, потім зливати з ємності емульсію і розвантажувати гравій. Після обробки гравій повинен просохнути на повітрі до постійної маси для утворення гідрофобної плівки, але не менше 7 діб. Для забезпечення рівномірного висихання гравій слід перемішувати не рідше одного разу на добу.

Для підвищення морозостійкості і стійкості до динамічних навантажень при виробництві суднобудівного фіброкерамзитобетону в якості дисперсної арматури слід використовувати поліпропіленову фібру Baukon (діаметр волокон фібри 18,7 мкм, довжина - 12 мм), або її аналоги.

Бетонну суміш слід готувати з заздалегідь запроектованого складу легкого суднобудівного бетону, який за своїми фізико-механічними характеристиками і технологічними показниками повинен задовольняти вимогам ОСТ5.9880-85 «Бетон суднобудівний легкий. Технологія приготування та застосування».

Приготування сумішей модифікованих керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд має здійснюватися в бетонозмішувачах

примусового типу. Дозування портландцементу, піску, фібри та сухої добавки Пенетрон Admix проводиться за масою, гравію, води і водних розчинів добавки С-3 – за об'ємом. Відхилення фактичного дозування від заданого не повинно перевищувати: для цементу, води, фібри та добавок $\pm 1,0\%$, для наповнювачів (піску і гравію) $\pm 2,0\%$.

З метою рівномірного розподілу компонентів суміші, зокрема добавок і фібри, завантаження в бетонозмішувачі слід проводити в наступній послідовності: вода з добавкою С-3, портландцемент, добавка Пенетрон Admix, далі гравій а потім пісок. Подача компонентів має здійснюватися без припинення перемішування суміші. При приготуванні фіброкерамзитобетонної суміші в змішувач вводиться від 20 до 30% води далі гравій і волокна фібри. Після цього слід провести «напівсухе» перемішування цих компонентів протягом 1..2 хвилин. Далі в суміш подається цемент, добавка Пенетрон Admix і решта води з добавкою С-3 у вигляді водного розчину, приготованого на ділянці хімдобавок. Останнім в змішувач подається пісок. Після подачі всіх компонентів слід перемішувати керамзитобетону суміш не менше 2 хвилин. Загальний час перемішування складів без фібри повинна бути не менше 4 хвилин, з фіброю – не менше 6 хвилин.

Готова керамзитобетонна суміш повинна бути однорідною і мати необхідну рухливість. Рухливість бетонної суміші повинна визначатися на виході з бетонозмішувача і на місці укладання бетону. Суміш повинна зберігати однорідність і не розшаровуватися при доставці до місця укладання. Максимально допустимий час транспортування і витримки керамзитобетонний суміші до її укладання не повинен перевищувати 45 хвилин у зв'язку зі зменшенням її рухомості. Додавання води в керамзитобетону суміш в період транспортування і укладання забороняється.

Секції корпусу залізобетонного судна, до довговічності та чистоти зовнішніх поверхонь яких висуваються підвищені вимоги (секції бортів, днища, верхньої палуби), необхідно виготовляти на стендах або в формах-матрицях таким чином, щоб зовнішня частина секції (зовнішня поверхня корпусу судна

або доку) була звернена до стенду. Максимальна висота вільного падіння керамзитобетонної суміші при бетонуванні конструкції не повинна бути більше 1,5 м.

При виготовленні конструкцій тонкостінних залізобетонних плавучих споруд в горизонтальному положенні для ущільнення керамзитобетонної суміші слід використовувати поверхневі вібратори або віброрейки з частотою коливань 50-120 Гц. Момент закінчення вібрації визначається за появою на поверхні свіжоукладеного бетону цементного молока та за припиненням виділення з бетонної суміші бульбашок повітря.

Твердіння керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд повинно проходити в умовах, аналогічних умовам твердіння звичайних легких і важких конструкційних суднобудівних бетонів при плюсовій температурі повітря і при регулярному зволоженні бетону. Для створення сприятливих умов набору міцності керамзитобетону в тонкостінній конструкції плавучої споруди слід вживати заходів, що запобігають висиханню керамзитобетону і безпосередньої дії сонця і вітру. При необхідності прискорення твердіння легкого суднобудівного бетону, а також в зимовий період, можна застосовувати його пропарювання. При цьому температура ізотермічного прогріву бетону повинна бути не більше 80°C.

Контроль міцності та інших фізико-механічних характеристик керамзитобетону здійснюється шляхом випробування контрольних зразків. Також необхідно контролювати якість застосовуваних матеріалів, бетонної суміші і бетону, а також дотримуватися вимог з приготування, транспортування, укладання бетонної суміші та догляду за бетоном. При цьому слід керуватися вимогами ОСТ5.9880-85 і «Правил будівництва корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону».

Випробування зразків на водонепроникність здійснюється згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 за методом «мокрої плями». Визначення морозостійкості має здійснюватися у штучній морській воді згідно методики, викладеної ОСТ 5.9266-76 «Бетон суднобудівний важкий. Методи випробувань бетону».

Визначення міцності легкого суднобудівного бетону в конструкціях неруйнівними методами, а також оцінка однорідності і міцності легкого бетону статистичними методами, проводиться з використанням ультразвукових приладів типу УКБ або аналогічних (з урахуванням особливостей оцінки міцності бетонів на легких заповнювачах) відповідно до ДСТУ Б В.2.7-224:2009 і ДСТУ Б В.2.7-226:2009.

За результатами розробки технологічних прийомів виготовлення керамзитобетонів для залізобетонного суднобудування був розроблений «Регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків» для Херсонського державного заводу «Паллада», який був затверджений 29 жовтня 2014 року (Додаток В).

6.5.4 Впровадження результатів досліджень

В рамках даної роботи був розроблений та знаходиться на стадії погодження і громадське обговорення проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий [339].

Даний Державний стандарт розроблено з метою заміни декількох діючих на сьогодні галузевих стандартів в залізобетонному суднобудуванні, які були прийняті ще в радянські часи та є морально і технічно застарілими. А саме на заміну наступних нормативів: ОСТ5.9880-85 «Бетон судостроительный легкий. Технология приготовления и применения», ОСТ5.9267-87 «Бетон судостроительный тяжелый. Общие технические требования», ОСТ5.9330-79 «Бетон судостроительный тяжелый. Типовой технологический процесс приготовления и применения», ОСТ 5.9266-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Методы испытаний бетона», ОСТ5.9265-76 «Бетон судостроительный тяжелый. Технические требования к материалам для приготовления бетона». Автор даної дисертаційної роботи є провідним науковим консультантом та

відповідальним виконавцем проекту ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018 «Будівельні матеріали. Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування».

Тобто необхідність розробки стандарту (ДСТУ) була обумовлена відсутністю в Україні національного нормативного документу, що встановлює та узагальнює технічні вимоги до суднобудівного бетону, який укладається в конструкції корпусів суден і плавзасобів та технології його приготування. Стандарт входить до групи стандартів ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018 Будівельні матеріали.

Проект даного стандарту поширюється на легкий і важкий суднобудівний бетон, який застосовується для будівництва залізобетонних та композитних суден і плавзасобів, що мають необхідні властивості, які забезпечують тривалу і нормальну експлуатацію (довговічність) зазначених об'єктів. Стандарт встановлює класифікацію суднобудівних бетонів та основні технічні вимоги до них за корозійною стійкістю, водостійкістю, водонепроникністю, морозостійкістю і міцністю. Також стандарт встановлює вимоги до матеріалів (цементу, піску, крупного заповнювача, води, добавок) і бетонних сумішей для приготування легких і важких суднобудівних бетонів та методів їх випробувань. Крім того стандарт наводить основні вимоги до технології приготування бетонних сумішей та бетону, вимоги щодо безпеки та збереження навколишнього природного середовища, правила приймання, транспортування і зберігання бетонної суміші та бетону.

В проекти ДСТУ наведені рекомендовані склади легких суднобудівних бетонів, які були розроблені на основі проведених досліджень та з врахуванням досвіду виробництва керамзитобетонних конструкцій.

Згідно проекту стандарту основними технічними вимогами до легкого і важкого суднобудівного бетону є наступні:

- міцність на стиск та на розтяг при згині у віці 28 діб нормального тверднення;
- корозійна стійкість і водостійкість в агресивних середовищах;
- водонепроникність;

- морозостійкість.

Для суден і плавзасобів з тривалим циклом будівництва допускається клас суднобудівного бетону по міцності встановлювати у віці бетону 60 або 90 діб, при цьому вибір віку бетону повинен бути обґрунтований в проекті.

Згідно проекту стандарту для забезпечення довговічності (корозійної стійкості) в різних кліматичних умовах або в агресивному середовищі (воді) бетон повинен мати необхідну міцність, водонепроникність, морозостійкість, хімічну стійкість до даного агресивного середовища, а захисний шар бетону має надійно захищати арматуру від корозії.

Титульний лист другої частини проекту ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018 «Будівельні матеріали. Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування» показано в Додатку Б.

Також результати досліджень, які виконані в рамках даної дисертаційної роботи впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та при виробництві тонкостінних керамзитобетонних конструкцій.

У виробничій практиці НВЦ «Екострой» при проведенні відновлювальних робіт на об'єкті будівництва 24-поверхового оздоровчого комплексу за адресою м. Одеса, Французький бул., 60/1, який розташовано безпосередньо на схилах вздовж моря і «мисова» частина якого знаходиться за межами схилів, безпосередньо виходячи в водну морську зону. Використовувався модифікований керамзитобетон запропонованого складу на основі сульфатостійкого портландцементу. Приготування бетонної суміші проводилося з попередньою обробкою керамзитового гравію цементною суспензією. Результати випробувань контрольних зразків модифікованого керамзитобетону показали, що він має міцність при стиску 34 МПа, водонепроникність W8, морозостійкість F400 і середню густину 1680 кг/м³.

На комбінаті малоповерхового домобудування «Камбіо» була виготовлена опитно-промислова партія тонкостінних керамзитобетонних конструкцій та виробів на основі складу модифікованого керамзитобетону, розробленого в рамках даних досліджень сумісно з аспірантом О.В. Піщевим. При виробництві

даної партії була використана технологія приготування керамзитобетонної суміші з попередньою обробкою керамзитового гравію цементною суспензією в початковій стадії перемішування. Запропонований склад модифікованого керамзитобетону і вдосконалена технологія приготування керамзитобетонної суміші дозволили покращити однорідність суміші та якості бетону у тонкостінних виробках. Проведені випробування показали, що міцність при стиску керамзитобетону в опитно-промислової партії складала 32 МПа, морозостійкість F400, середня густина 1700 кг/м³.

На об'єкті будівництва ПС «Маразліївська» до ПС «Усатово» на ПП «ЄВА» при влаштуванні кабельних колодязів застосовувався бетон класу В35 на основі вапнякового щебеню. При виробництві бетону було використано склад и технологію, розроблену в рамках даної роботи сумісно з аспірантом А.О. Полторапавловим під загальним науковим керівництвом д.т.н., професора А.В. Мішутіна.

Акти впровадження результатів досліджень на даних трьох об'єктах наведено в додатку Г.

Результати роботи впроваджені в навчальному процесі в Одеській академії будівництва та архітектури. Вони використовуються в курсі лекцій навчальної дисципліни «Бетони підвищеної довговічності на різних типах заповнювачів для конструкцій транспортних споруд», яка викладається при підготовці третього (доктор філософії) рівня вищої освіти зі спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія». Також результати досліджень використовуються в курсі лекцій і при проведенні практичних занять з навчальної дисципліни «Наукові основи довговічності автомобільних доріг та аеродромів», яка викладається при підготовці магістрів за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи». Крім того, результати досліджень, викладені в даній роботі, з 2013/2014 по 2017/2018 навчальний роки використовуються при підготовці та виконанні дипломних робіт магістрів за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія»

спеціалізації «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи». Довідка про впровадження наведена в додатку Г.

Таким чином, результати роботи впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі в Одеській академії будівництва та архітектури, зокрема при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії. Також вони були використані при розробці проекту Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який знаходиться на стадії погодження і громадського обговорення.

Висновки за 6-м розділом

1. Підтверджена ефективність застосування запропонованих рецептурних і технологічних методів підвищення довговічності легких бетонів тонкостінних гідротехнічних споруд для бетонів на природніх пористих заповнювачах та для керамзитобетонів на різних типах пористих пісків.

2. Порівняння механічних властивостей бетонів на гранітному та вапняковому щебені показало, що міцність на розтяг при згині даних бетонів є однаковою, при цьому бетони на пористому вапняковому щебені мають на 2..7 МПа меншу міцність при стиску та на 15..20% меншу зносостійкість.

3. Попередня обробка цементною суспензією природнього пористого заповнювача у початковій стадії перемішування суміші є ефективним технологічним прийомом підвищення механічних властивостей і довговічності бетонів. За рахунок обробки вапнякового щебеню міцність бетону при стиску підвищується на 4-5 МПа а водонепроникність приблизно на одну марку. При цьому обробка практично не впливає на міцність на розтяг при згині та морозостійкість бетону на вапняковому щебені.

4. За рахунок введення суперпластифікатору і мікрокремнезему як рецептурних методів керування структурою бетонів на вапняковому щебені міцність бетонів при стиску підвищується на 16-18 МПа, міцність на розтяг при згині – на 1-1,5 МПа. Також комплексна модифікація на 3 марки підвищує

водонепроникність бетонів на пористому вапняковому щебені і на 100 більше циклів підвищує їх морозостійкість. Досягнутий за рахунок модифікації і обробки заповнювача рівень водонепроникності (W12) і морозостійкості (F400) бетонів на вапняковому щебені забезпечує достатню довговічність даного матеріалу і дає змогу використовувати подібні матеріали у ряді конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема в підпірних стінках та лицюваннях каналів.

5. Встановлено, що досягнута міцність і довговічність модифікованих керамзитобетонів на суміші легкого і кварцового піску дозволяє використовувати дані матеріали в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, для яких важливо зниження ваги, зокрема у залізобетонному суднобудуванні. Середня густина керамзитобетонів на суміші кварцового піску і гранульованого піноскла складає 1400-1440 кг/м³, водонепроникність W10-W12, морозостійкість F450-F550, міцність при стиску до 21 МПа, міцність на розтяг при згині до 5 МПа. Тобто при значно меншій середній густині в порівнянні з керамзитобетонами на кварцовому піску бетони з пористим піском мають не нижчу довговічність і міцність на розтяг при згині. Керамзитобетони на всіх досліджених типах пісків показували максимальну міцність при використанні полікарбоксилатного пластифікатору Coral ExpertSuid-5 у кількості 0,8% від маси цементу.

6. За рахунок введення до складу дрібнозернистого бетону частки керамзитового піску з раціональним розміром зерен підвищується морозостійкість, ударостійкість і тріщиностійкість композиту, а також знижується водоотділення бетонної суміші. Дрібнозернисті бетони на суміші кварцового і керамзитового піску можуть бути використані при ремонті та відновленні залізобетонних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд з легких бетонів.

7. З використанням результатів експериментально-статистичного моделювання проведено вибір оптимальних складів модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів на гідрофобізованому гравії для тонкостінних залізобетонних плавучих споруд. Рекомендовані склади

забезпечують підвищену міцність та довговічність легкого суднобудівного бетону, поліпшені експлуатаційні властивості у вологих умовах експлуатації, а також задовольняють вимогам Морського реєстру.

8. З урахуванням вимог Регістру судноплавства України, «Правил будівництва корпусів суден і плавучих споруд із застосуванням залізобетону» і діючих галузевих стандартів розроблена технологія виготовлення модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів, яка використовує розроблені в рамках даної роботи технологічні і рецептурні методи підвищення довговічності легких бетонів. Розроблено та затверджено на Херсонському державному заводі «Паллада» «Технологічний регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків».

9. Результати досліджень впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва, при виробництві тонкостінних керамзитобетонних конструкцій та в навчальному процесі. Розроблено та знаходиться на стадії погодження і громадського обговорення проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий. Необхідність розробки була обумовлена відсутністю в Україні національного нормативного документу, що встановлює та узагальнює технічні вимоги до суднобудівного бетону та технології його приготування.

10. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [287,289,340-352].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розвинуто теоретичні основи і створено практичні методи отримання легких бетонів на пористих заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих. Встановлено, що підвищення довговічності та фізико-механічних характеристик легких бетонів досягається за рахунок управління структурою, спрямованого на зниження капілярної пористості цементно-піщаної матриці, зокрема у контактній зоні заповнювача. Ця задача вирішується шляхом застосування модифікаторів і здійснення операцій, спрямованих на покращення сумісної роботи заповнювача і цементно-піщаної матриці.

2. За результатами натурних обстежень тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд встановлено, що довговічність бетонів в найбільшій мірі обумовлюється стійкістю до впливу вологи при фільтрації, а також до циклічного зволоження та заморожування. Проаналізовано механізми корозійного пошкодження бетонів на пористих заповнювачах з врахуванням впливу експлуатаційного середовища в гідротехнічних спорудах, узагальнено вимоги до даних бетонів. Запропоновано новий метод визначення корозійної стійкості бетону при однобічному впливі води-середовища. Запропоновані та захищені патентами неруйнівний спосіб визначення однорідності бетону в конструкціях та спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону, які ґрунтуються на визначенні зміни технологічної пошкодженості матеріалу.

3. Вдосконалено методи управління структурою і властивостями легких бетонів. Показано, що покращення сумісної роботи пористого заповнювача і цементно-піщаної матриці при структуроутворенні і експлуатації є одним з шляхів покращення механічних властивостей і підвищення довговічності легкого бетону в вологих умовах. Запропоновано використання двох методів обробки пористих заповнювачів, спрямованих на покращення їх сумісної роботи з матрицею: обробка цементної суспензією в початковій стадії

перемішування суміші та гідрофобізація поверхні. Проаналізовано динаміку проникнення суспензії в зерна керамзиту при обробці. Встановлено, що за рахунок обробки пористого заповнювача цементною суспензією зменшується середній розмір пор керамзитобетону та підвищується однорідність пор за розмірами, а також відчутно зростає його міцність.

4. Встановлені закономірності вологісних деформацій штучного пористого заповнювача в умовах, наближених до реальних умов твердіння легкобетонної суміші. Показано, що об'ємні вологісні деформації гідрофобізованого гравію у воді та у цементно-піщаному розчині є в 4..5 разів меншими за деформації необробленого гравію. Усадка при висиханні насиченого водою не обробленого керамзитового гравію є меншою за його первинне подовження при насиченні, що є наслідком зниження попереднього напруженого стану гранул.

5. Вдосконалено рецептурні методи управління структурою легких бетонів. Досліджено вплив модифікаторів, фібри та технологічного прийому обробки гравію цементною суспензією на структуру, властивості та довговічність керамзитобетону. За рахунок обробки гравію суспензією та використання мікрокремнезему, суперпластифікатору, дисперсного армування отримано керамзитобетони з міцністю при стиску до 42..44 МПа і міцністю на розтяг при згині до 7 МПа, що задовольняє вимогам для більшості тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема вимогам Морського реєстру до суднобудівних керамзитобетонів. Водонепроникність модифікованих легких бетонів складає від W4 до W14, морозостійкість – від F400 до F600. За рахунок використання раціональної кількості модифікаторів водонепроникність керамзитобетонів підвищується на дві марки і більше, морозостійкість – на 100 циклів. За рахунок обробки гравію цементною суспензією зростає водонепроникність і міцність при стиску керамзитобетону. Мікроскопічний аналіз структури легких бетонів на обробленому цементною суспензією керамзиті виявив кольматацію пор і тріщин в зовнішній оболонці заповнювача на глибині до 1,2-1,6 мм, а також зниження пористості контактної зони.

6. Показана можливість застосування залізоокисних порошкових пігментів для поліпшення декоративних властивостей легких бетонів. Міцність і довговічність декоративних конструкційних керамзитобетонів не відрізняється від даних показників контрольних бетонів аналогічних складів. При обробці пористого гравію цементною суспензією покращується насиченість кольору декоративних бетонів та зростає їх міцність та довговічність.

7. За рахунок використання кольматуючої та пластифікуючої добавок в комплексі із застосуванням гідрофобної обробки поверхні пористого гравію отримані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони з підвищеною довговічністю та покращеними фізико-механічними і експлуатаційними властивостями. Встановлено, що цементно-піщана матриця в контактній зоні бетону на гідрофобізованому гравії має щільну структуру з низькою кількістю рівномірно розподілених пор. Гідрофобізація поверхні пористого гравію знижує В/Ц легкобетонної суміші, зменшує вологісні деформації заповнювача, а також перешкоджає його розм'якшенню в вологих умовах. Для обробки пористого гравію раціональною є 0,6-0,8% концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії. Модифіковані суднобудівні керамзитобетони і фіброкерамзитобетони за рахунок введення добавок Пенетрон А і С-3, а також при використанні гідрофобної обробки поверхні гравію мають міцність до 45 МПа, водонепроникність від W8 до W12, морозостійкість не нижче F500 і середню густину в водонасиченому стані 1750..1860 кг/м³, що відповідає вимогам галузевих стандартів та забезпечує високу довговічність матеріалу. При застосуванні кольматуючої добавки і гідрофобної обробки поверхні гравію вологість керамзитобетону, що експлуатується в контакті з водою, знижується на третину, середня густина на 30..40 кг/м³, а теплопровідність на 0,09-0,10 Вт/(м×К). Застосування легких бетонів дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд та покращити комфортність перебування людей і умови роботи технологічного обладнання.

8. Встановлена можливість підвищення міцності і довговічності бетонів на вапняковому щебені за рахунок застосування модифікаторів і обробки

заповнювача цементною суспензією. Досягнутий за рахунок застосування суперпластифікатору, мікрокремнезему та обробки заповнювача рівень міцності (50 МПа) водонепроникності (W12) і морозостійкості (F400) бетону на пористому вапняковому щебені забезпечує достатню довговічність матеріалу і дає змогу його використання у ряді конструкцій гідротехнічних споруд.

9. Показана можливість застосування пористих пісків в легких бетонах для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних. Середня густина модифікованих керамзитобетонів з дрібним заповнювачем з суміші кварцового піску і гранульованого піноскла складає 1400-1440 кг/м³, водонепроникність W10-W12, морозостійкість F450-F550, міцність при стиску до 21 МПа, міцність на розтяг при згині до 5 МПа що дозволяє підвищити вантажопідйомність плавучих споруд за рахунок додаткового зниження ваги конструкції при забезпеченні необхідного рівня міцності та високої довговічності матеріалу.

10. Розроблено та затверджено регламент з технології приготування модифікованих суднобудівних керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для виготовлення тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків. Розроблено та знаходиться на стадії погодження проект Державного стандарту України «Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування», який складається з двох частин: Бетон суднобудівний важкий і Бетон суднобудівний легкий. З використанням комплексу експериментально-статистичних моделей та методу Монте-Карло здійснено вибір оптимальних складів керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд. Результати досліджень впроваджені на об'єктах гідротехнічного будівництва та в навчальному процесі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ОСТ5.9880-85. Бетон судостроительный легкий. Технология приготовления и применения. Діє з 01.06.1986 року.
2. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
3. Structural lightweight aggregate concrete / Edited by Dr. J. L. Clarke. Blackie academic & professional, 1993. 161 p.
4. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. К.: Вища школа, 1988. 208 с.
5. Gerwick B. C. Jr. Construction of marine and offshore structures, Third Edition. Baton Rouge:Taylor & Francis, 2005.840 p.
6. Иноземцев А.С. Королев Е.В. Динамика развития высокопрочных лёгких бетонов. Анализ мировых достижений. Международный научно-исследовательский журнал, 2013, №12 (19), часть 1. С.87-94.
7. Chandra S., Berntsson L. Lightweight aggregate concrete. London:Elsevier Science, 2008. 450 p.
8. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Бетони і будівельні розчини. К.: Основа, 2008. 448 с.
9. Дворкин Л.И. Гоц В.И., Дворкин О.Л Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 432 с.
10. Новые возможности энергоэффективного керамзитобетона. В. Горин, С. Токарева, М. Кабанова, П. Уваров. Строительная газета №34, 23 августа 2013 г.
11. Faust Th., Konig G. High strength lightweight-aggregate concrete. Proceedings 2nd International Ph.D. Symposium in Civil Engineering. Budapest: Technical University of Budapest, 1998. 8 p.
12. Звездов А.И. Фаликман В.Р. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре. Жилищное строительство, 2008, №7. С. 2-6.

13. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций. Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, В.Т. Ерофеев. Архитектура и строительство, 2015, №1. С. 93-102

14. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса: ТЕС, 2010. 176 с.

15. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.

16. Полиструктурная теория композиционных материалов. В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, А.Н. Бобрышев и др. Ташкент: Фан, 1991. 345 с.

17. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. М.: Стройизад, 1980. 536 с.

18. Технология и свойства новых видов легких бетонов на пористых заполнителях. / Под ред. Г.А. Бужевича. М.:Стройиздат,1971. 202 с.

19. Бужевич Г.А., Горчаков Г.И. Долговечность легких бетонов на пористых заполнителях / Всесоюзная конференция по легким бетонам: тезисы докладов. М.: Гостройиздат, 1970. С. 61-73.

20. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Высокопрочный керамзит и керамдор для несущих конструкций и дорожного строительства. Строительные материалы, 2010, № 1. С. 9-11.

21. Бужевич Г.А., Карпикова Л.И. Стойкость керамзитобетона при действии морской воды и хлористых солей высокой концентрации. Бетон и железобетон, 1970, №9. С.16-18.

22. Ярмаковский В.Н., Бремнер Т.У. Легкий бетон: настоящее и будущее. Строительный эксперт, 2005, № 20. С.3-4.

23. Alexander M. Mindess S. Aggregates in Concrete (Modern Concrete Technology). 1st Edition. CRC Press, 2005. 448 p.

24. Ицкович С.М. Заполнители для бетона (2-е изд.). Минск: Вышэйшая школа, 1983. 214 с.

25. Израелян В.Р., Абуева З.А., Багдарасян Л.Б. Физико-химические особенности поведения заполнителей вулканического происхождения в бетоне. Ереван: Айастан, 1986. 112 с.
26. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат, 1973. 584 с.
27. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона. М.: Высшая школа, 1991. 272 с.
28. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 332 с.
29. Мала гірнича енциклопедія / за ред. В. С. Білецького. Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. Т. 3. 644 с.
30. Виноградов Б.Н. Влияние заполнителей на свойства бетона. М.: Стройиздат, 1979. 224 с.
31. Штарк Й. Щелочная коррозия бетона; пер. с нем. А. Тулаганов ; ред. П. Кривенко. К., 2010. 144 с.
32. Kenneth S., Harmon P.E. Engineering properties of structural lightweight concrete [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.stalite.com/uploads/EngineeringProperties.pdf>. Дата звернення 14.02.2017
33. Zhang M.H., Gjorv O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 1991, № 88 (3). P. 240-247.
34. Тинель К.-Х. Строительство из легкого бетона: от свойств материала до реализации в сооружениях. Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии, 2012, №2. С. 110-115.
35. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
36. Будников П.П., Колбасов В.М., Пантелеев А.С. О гидратации алюмосодержащих минералов портландцемента в присутствии карбонатных микрозаполнителей. *Цемент*, 1961, №1. С. 5-9.

37. Bonavetti V.L., Rahhal V.F., Irassar E.F. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001. P. 853-859.

38. Пинус Э.Р. Структурообразующая роль карбонатных заполнителей в цементном бетоне. Научно-техническое сообщение ВНИИНепруд, №8. Ставрополь-на-Волге, 1962. С. 101-108.

39. Limestone and silica powder replacements for cement: early-age performance. Bentz, D.P., Ferraris C. F., Jones S.Z., Lootens D., Zunino F. *Cement and Concrete Composites*, 2017, Vol. 78. P. 43-56.

40. Використання техногенних продуктів у будівництві. Л.Й. Дворкін, К.К. Пушкарьова, О. Л. Дворкін та ін. Рівне : НУВГП, 2009. 339 с.

41. A new method of producing high strength oil palm shell lightweight concrete. Shafigh P., Jumaat M.Z., Mahmud H.B., Alengaram U. J. *Materials and Design*, 2011, №32, P. 4839–4843.

42. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.

43. Тольпина Н.М. К вопросу о взаимодействии цементной матрицы с заполнителями. *Современные наукоемкие технологии*, 2016, № 6, часть 1. С. 81-85.

44. Сердюк В.Р. Тенденції виробництва керамзиту та використання керамзитобетону в сучасному будівництві. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2018. № 3. С. 14-22.

45. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Керамзит: опыт и перспективы развития производства и применения. *Строительные материалы*, 2004, № 8. С. 19-20.

46. Волков Ю.С. Конструкции из легких бетонов за рубежом. Тезисы докладов всесоюзного семинара «Эффективные конструкции из легких бетонов». М.: НИЖЕ, 1980. С.25-28.

47. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.:Стройиздат, 1987. 322 с.

48. Экономическая информация о работе промышленности пористых заполнителей СССР за 1986-1990 годы. Самара: НИИКерамзит, 1992. 256 с.
49. Bennett D. Innovations in concrete. London: Thomas Telford, 2002. 369 p.
50. Clay materials used in construction. Edited by G. M. Reeves, I. Sims, J.C. Cripps. Geological Society of London, 2006. 525 p.
51. Lytag® lightweight aggregate. Офіційний сайт компанії Lytag Ltd [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <http://www.lytag.com>
52. Панасюк В.А., Булгакова В.Н. Экологическая и экономическая эффективность современных изделий из вибропрессованного керамзитобетона. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», Одеса:ОДАБА, 2018. С.115-117
53. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.
54. Демидович Б.К., Садченко Н.П. Пеностекло – технология и применение. М.: ВНИИЭСМ, 1990. 44 с.
55. Казанцева Л.К., Верещагин В.И., Овчаренко Г.И. Вспененные стеклокерамические теплоизоляционные материалы из природного сырья. Строительные материалы, 2001, №4. С. 33-34.
56. Давидюк А.Н. Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на стекловидных пористых заполнителях. Дис. на соискание уч. степени д.т.н. по спец. 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2009. 381 с.
57. Иванова С.М. Композиционный цементный пеностеклобетон. Дис. на соискание уч. степени к.т.н. по спец. 05.23.05. Челябинск, 2005. 273 с.
58. Керш В.Я. Влияние состава на структурообразование и свойства полистиролбетона. Містобудування та територіальне планування. К., 2010. Вип. 38. С. 169-174.
59. Полистиролбетон в промышленном и гражданском строительстве. Ибрагимов А.М., Титунин А.А., Гнедина Л.Ю., Лабутин А.Н. Строительные материалы, 2016, №10. С. 21-23.

60. Никифорова Н.А., Масляев А.Ф. Взаимосвязь упругих и прочностных свойств керамзитобетона и его составляющих / Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2008. Вип. 20. С. 130-133.

61. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 330 с.

62. Liu X., Chia K.S., Zhang M.-H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration. Cement and Concrete Composites, 2010, Volume 32, Issue 10. P. 757-766.

63. Chia K.S., Zhang M.H. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. Cement and concrete research, 2002, 32, number 4. P. 639-645

64. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. Спб.: Строй-Бетон, 2006. 692 с.

65. Солопова Г.С. Этапы становления пористых заполнителей и бетонов на их основе. Международный научный журнал «Символ науки», 2015, №12. С. 81-82.

66. Стаценко А.С. Технология бетонных работ. 3-е изд. Минск: Выш. шк., 2009. 239 с.

67. Гидротехнический бетон на литоидной пемзе. Сборник статей. Академия наук Армянской ССР. Ин-т строит. материалов и сооружений. Ред. М.З. Симонов и В. М. Худавердян. Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1958. 294 с.

68. Мамонов Н.В., Орендлихер Л.П. Опыт применения керамзитобетона в виброгидропрессованных напорных трубах. Промышленное строительство, 1978, №7. С. 12-14.

69. Ванеева И.В. Стойкость гидротехнических бетонов на карбонатных заполнителях в сульфат-бикарбонатных средах. Дис. на соискание уч. степени к.т.н. по спец. 05.23.05. Киев, 1983. 212 с.

70. Структурообразование и органогенная коррозия цементных и полимерных бетонов/ Сб. научных работ Пензенского ИСИ. Саратов-Пенза: Приволж.кн. изд-во, 1967. 377 с.

71. Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении. Транспортное строительство. 2007. №9. С. 10-13.

72. Деллос К.П. Легкие бетоны в мостах. М.: Транспорт, 1986. 184 с.

73. Дорф В.А. Довжик В.Г. Высокопрочный керамзитобетон (Обзор опыта производства, особенностей технологии и свойств). Научный редактор В.Я. Валлах. М.1968. 56 с.

74. Cousins T. Roberts-Wollmann C., Brown M.C. High-Performance / High-Strength lightweight concrete for bridge girders and decks. National cooperative highway research program. Report 733. Washington, D.C.: Transportation research board, 2013. 82 p.

75. Helland S. Lightweight aggregate concrete in Norwegian bridges. HPC Bridge Views, Issue No. 11, Sept/Oct. 2000. P.2-3

76. Звездов А.И. Ярмаковский В.Н. Легкие бетоны нового поколения в современном строительстве. Строительный эксперт, 2005, №16, С.10-15.

77. Мишутин В.А., Мишутин Н.В., Яковлева Р.В. Применение легких судостроительных бетонов для постройки морских железобетонных судов и плавучих доков. Технология судостроения, 1986, №8. С.23-25.

78. Мишутин В.А. Исследование судостроительных бетонов. Л.: Судостроение, 1967. 180 с.

79. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков. А.С. Рашковский, Н.Г. Слуцкий, В.Н. Конов и др. Под. ред. А.С. Рашковского. Николаев: НУК, РАЛ-полиграфия, 2008. 614 с.

80. Мишутин В.А. Долговечность существующих бетонов и корпусов плавучих судоремонтных доков, эксплуатируемых в морях с различными климатическими условиями. Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. 123 с.

81. An experiment in Ship Building: [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.concreteships.org>. Дата звернення 13.07.2016.

82. The S.S. Selma – Crystal Beach and Bolivar Peninsula [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.crystalbeach.com/selma.htm>. Дата звернення 21.10.2016.

83. Сиверцев И.В. Железобетонное судостроение. М.:Речной транспорт, 1959. 291 с.

84. How poured ship are built. Popular science, 1943,vol. 142, №6. P. 124-127.

85. Свечников О.И. Снижение металлоемкости корпусов судов внутреннего плавания. М.: Транспорт, 1987. 221 с.

86. Pérez R., Lamas M. Developments in fixed and floating offshore structures. RINA, Royal Institution of Naval Architects - International Conference on ICSOT, 2012, P. 83-91.

87. Evaluation of lightweight concrete performance in 55 to 80 year old ships. Sturm R.D., Mc Askill N., Burg R.G., Morgan D.R. AC ISP 189-7 on High-performance concrete: Research to Practice, 1999. P. 101-120.

88. Волков Ю.С., Рыбалов И.И. Сооружения из железобетона для континентального шельфа. М.: Стройиздат, 1985. 292 с.

89. Носков Б.Д., Правдивец Ю.П. Сооружения континентального шельфа. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. М.: Изд-во АСВ, 2004. 280 с.

90. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology. Science press, Beijing, China, 2017. 280 p.

91. Harmon K.S. Recent research projects to investigate mechanical properties of high-performance lightweight concrete . Theodore Bremner Symposium on High Performance Lightweight Concrete. Thessalonika, Greece: 2003. P. 131-150

92. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Конструкционные легкие бетоны для нефтедобывающих платформ в северных приливных морях и морях Дальнего Востока. Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2015, № 2 (23). С. 85-99

93. Helland S., Aarstein R., Maage M. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. *Structural Concrete (J. of fib)*. 2010, Vol. 11, No. 1. P. 15-24.

94. Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. State-of-the-art report. fib:2015.191 p.

95. Fernández R.P., Pardob M.L. Offshore concrete structures. *Ocean Engineering*. 2013, Volume 58, P. 304-316

96. Aïtcin P.-C. High performance concrete (Modern concrete technology). E & FN Spon:2011. 624 p.

97. Fitzpatrick J., Stenning D.G. Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea . 15th Annual offshore technology conference, Houston, United States; Journal Volume: 2; 2-5 May, 1983, Paper No. OTC 4517. P. 51-60.

98. Johnsen H., Helland S., Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge. Proceedings of International symposium on structural lightweight aggregate concrete. Sandefjord, 1995. P. 373-379.

99. Tasillo C.L., Neeley B.D., Bombich A.A. Lightweight concrete makes a dam float. Special Publication 218: High-Performance Structural Lightweight Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004, P.101-130.

100. New technologies proven in precast concrete modular floating pier for US Navy. Lanier M.W., Wernli M., Easley R., Springston P.S. *PCI journal*, 2005, July-August, Vol.50. Iss. 4. P. 76-99.

101. Use of concrete as the primary construction material for the Pelamis wave energy converter. Khosravi N., Barker L., O'Donoghue V., Benzie J., Newlands M., Jones R. *Renewable Energies Offshore*. Edited by C. Guedes Soares. CRC Press: 2015. P. 305-312

102. Lightweight aggregate concrete. Recommended extensions to model code 90. Identification of research needs. Case studies. *Fib bulletin* 8, may 2000. 362 p.

103. Landbo T., Holm E.B., Ludescher H. MPU Heavy Lifter – a lightweight concrete vessel for heavy offshore lifting operations. Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for our Society. Walraven & Stoelhorst (eds). London: Taylor & Francis Group, 2008. P. 925–929

104. Пичугин Д.А. О развитии технологии серобетонного судостроения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2007, №2 (37). С.114-117

105. Применение высокопрочного судостроительного керамзитобетона в железобетонном судостроении. Инструкция. Л.: Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения, 1969. 40 с.

106. Цветков Н.П. Легкие судостроительные бетоны на пористых заполнителях. Горький: ГИИВТ, 1958. 64 с.

107. Бирюкович К.Л., Бирюкович Ю.Л., Бирюкович Д.Л. Мелкие суда из стеклоцемента и армоцемента. Л.: Судостроение, 1965. 164 с.

108. Суда из армированного бетона: [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://armotsement.ru>. Дата звернення 10.11.2016.

109. Оф-п. Офіційний сайт Херсонського державного заводу «Паллада» : [Електрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.pallada-doc.com>

110. Слуцкий Н.Г., Маломан В.Ф., Рашковский А.С. Строительство железобетонных плавучих сооружений в Украине. Рыбное хозяйство Украины. Спец. выпуск «Морские технологии: проблемы и решения - 2004». Керчь, 2004, № 7. С. 23–26.

111. Lightweight aggregate concrete. Recommended extension to Model Code 90, Guide. Identification of research needs, technical report. Case Studies, State-of-art report. fib Bulletin No. 8, 2000. 118 p.

112. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Ассоциация строительных ВУЗов, 2006. 368 с.

113. Коваль С.В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. Одесса: Астропринт, 2012. 424 с.

114. Rixom M.R. Mailvaganam N.P. Chemical Admixtures for Concrete. Third Edition. London: E & FN Spon, 1999. 437 p.
115. Day K.W. Hudson A.D. Concrete mix design, quality control and specification. Fourth edition. CRC Press. 2013. 349 p.
116. Саницький М.А., Соболев Х.С., Позняк О.Р. Бетони нового покоління та енергоощадні технології будівництва. Вісник Львівського терит. відня акад. будівництва України. 2010, № 5/10. С. 164-171.
117. Зайченко Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой. Макеевка: ДонНАСА, 2009. 207 с.
118. Superplasticizers for concrete. Fundamental, technology and practice. Spiratos N., Page' M., Mailvaganam N.P. et al. Quebec: Supplementary cementing materials for sustainable development, 2006. 322 p.
119. Батраков В.Г. Повышение долговечности железобетона добавками-модификаторами. Бетон и железобетон, 1987, №7. С.40-42.
120. Баженов Ю.М. Технология бетонов. М.: Из-во АСВ, 2007. 528 с.
121. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы. 2-е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 221 с.
122. Аникина В.А. Влияние добавки суперпластификатора на свойства конструктивного керамзитобетона. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Москва, НИИЖБ, 1984. 20 с.
123. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.:Технопроект, 1998. 768 с.
124. Протьюко Н.С. Подбор составов керамзитобетона плотной структуры, в том числе изготовленного из высокоподвижных бетонных смесей. Проблемы современного бетона и железобетона. Выпуск 5. Минск: СтройМедиаПроект, 2013. С. 212-231.
125. Каверин К.О. Високоміцні легкі керамзитобетони, модифіковані полікарбосилікатними суперпластифікаторами. Будівельні матеріали, виробити та санітарна техніка. Науково-технічний збірник, 2015, Випуск 56. С. 47-53.

126. Коваль С.В. Эффективные бетоны для монолитного домостроения. Одесса: Астропринт, 2015. 156 с.
127. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Проектування складів бетонів. Рівне : НУВГП, 2015. 353 с.
128. Химические и минеральные добавки в бетон / Под ред. А.В. Ушерова-Маршака. Харьков: Колорит. 2005. 280 с.
129. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М. Стройиздат, 1989. 188 с.
130. Применение комплексной добавки для бетонов в транспортном строительстве. Гладков В.С., Виноградов В.С., Фридман В.В. и др. Бетон и железобетон, 1989, №4. С.10-11.
131. Морозостойкие бетоны из литых смесей с полифункциональными модификаторами. Розенталь Н.К., Левицкий Е.В., Рабкин В.В., Седов Ю.П. Бетон и железобетон, 1989, №4. С.21-22.
132. Бондар К.В. Особливості композиційної побудови гідроізоляційних матеріалів проникної дії з покращеними експлуатаційними характеристиками. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка, 2013, Вип. 49. С. 163-169.
133. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. Под. ред. Л.И. Дворкина. К.: Будивэльныйк, 1991. 136 с.
134. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Ш. Мд. Интенсивная технология бетонов. М. Стройиздат, 1989. 264 с.
135. Пшинько А.Н., Краснюк А.В., Бычков С.А. Анализ технологий производства и способов модификации легких бетонов на неорганических вяжущих и заполнителях / Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2010. Вип. 35. С. 150-155.
136. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса: Місто майстрів, 1998. 168 с.

137. Композиционные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. В.С. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. К.: Будивэльнык, 1991. 144 с.

138. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов. Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1980, № 8. С. 61-70.

139. Шейніч Л.О., Іонов Д.С., Сопов В.П. Особливості процесів структуроутворення цементного каменю, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 52. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2013. С. 308-314

140. Каприелова С.С., Батраков В.Г., Шейнфелд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. Бетон и железобетон, 1999, №6. С. 6-10.

141. Пушкарьова К.К., Гончар О.А., Каверин К.О. Особливості модифікації цементної матриці для отримання високоміцних легких керамзитобетонів. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка, 2014, №52. С. 43-48.

142. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.

143. Самойлов А., Григорьев Д. Принципы получения непроницаемых бетонов при подземном строительстве. Архитектура. Реставрация. Дизайн и Строительство, 2008, №1(37). С.41-43.

144. Пушкарьова К.К., Каверин К.О. Використання високоміцних керамзитобетонів в каркасно-монолітному будівництві. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2016. вип. 33, С. 75-83.

145. Пушкарьова К.К., Каверин К.О. Вплив органо-кремнеземистої добавки на реологічні та технологічні властивості керамзитобетонних сумішей. Наука та будівництво, 2018, №1. С.67-72

146. Shetty M.S. Concrete technology. Theory and practice. New Delhi: S. Chand & company ltd, 2000. 624 p.
147. Зоткин А.Г. Бетоны с эффективными добавками. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
148. Каприелов С.С. Шейнфельд А.В. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами. Материалы международной конференции "Долговечность и защита конструкций от коррозии", М., 1999. С.191-196.
149. Shannag M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25. P. 658-662.
150. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений. Одесса: Эвен, 2011. 292 с.
151. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов тонкостенных плавучих и портовых гидротехнических сооружений / А.В. Мишутин, Н.В. Мишутин. – Одесса: Одесский центр научно-технической и экономической информации, 2003. – 192 с.
152. Цементный композиционный материал для гидроизоляции и ремонта. Т.А. Костюк, А.И. Бондаренко, В.А. Арутюнов, А.В. Рачковский / Системи обробки інформації, 2016, випуск 7 (144). С.58-60.
153. Локочинский А.А. Проектный выбор гидроизоляции при современном строительстве. Технологии строительства, 2016, №1-2. С. 32-38
154. Self-healing phenomena in cement-based materials: State-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC. Editors: Mario de Rooij, Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, Erik Schlangen. RILEM, 2013. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www.rilem.org/docs/2013142416_unedited-version-221-shc.pdf. Дата звернення 08.10.2017.
155. Иванов И.А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1974. 287 с.

156. Сарапин И.Г., Кондратьев М.И. Влияние способа уплотнения на прочность керамзитобетона. Бетон и железобетон, 1968, №12. С.3-5

157. Приходько О.М. Морозостойкость конструктивного керамзитобетона в морской воде / Защита строительных конструкций от коррозии: Материалы координационного совещания. М.: Изд-во литературы по строительству. 1966. С.182-194.

158. Technical report Ishikawajima Harima. Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength, 2004. Vol. 44, №2. P. 83-90.

159. Хуторянский М.С., Цапкина Ф.И. Новые данные о приготовлении бетонных смесей на пористых заполнителях. Строительные материалы, 1962, № 10.С.16-18.

160. Рекомендации по применению пластифицирующих добавок в керамзитобетоне для тонкостенных конструкций. – М: Всесоюзный ордена октябрьской революции научно-исследовательский институт транспортного строительства, 1988 – 14 с.

161. Кучеренко А.А. О механизме гидрофобизации бетона. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 35. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. С. 207-213.

162. Выровой В.Н. Улучшение качества и повышение стойкости керамзитобетона путем обработки керамзитового гравия: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05. Днепропетровск, 1978. 21 с.

163. А.с. № 863556. СССР, Кл. С 04 В 31 / 40. Способ обработки легкого заполнителя. Кучеренко А.А., Выровой В.Н., Шкрабик И.В. №2737967/29-33; заявл. 19.03.79; опубл. 15.09.81, Бюл. № 34.

164. Хигерович В.Г., Бирюк М.Г. Активные органические добавки, улучшающие керамзитобетон. Строительные материалы 1967, №3, С.28-30

165. Соков В.Н. Энергоэффективная скоростная технология получения высокотемпературных теплоизоляционных материалов, М.:МГСУ,2014. 328 с.

166. Сайт запорізького державного підприємства «Кремнійполімер»: [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <http://silic.com.ua>. Дата звернення 16.06.2017

167. Кремнийорганические соединения и материалы на их основе: труды совещания по химии и практическому применению кремнийорганических соединений, Л.:Наука, 1984. 294 с.

168. Вершинина О.С. Применение кремнийорганических соединений в строительстве. М.:МИСИ,1989. 62 с.

169. Ершова С.Г. Гидрофобная защита плотных цементных и керамических материалов водорастворимыми кремнийорганическими соединениями. Новосибирск: Известия вузов. Строительство, 2004, № 8. С.65-70.

170. Кучеренко А.А., Лопатко А.Э., Феофанов А.Н. Керамзитобетонные пролётные конструкции. Одесса:Маяк, 1975. 204 с.

171. Кучеренко А.А. Структура бетона на гидрофобизированном керамзитовом гравии. Строительные материалы и конструкции, 1984,№ 1. С. 16.

172. Высокопрочные керамзитобетоны на горячем заполнителе. А.Д. Кирнев, М.А. Ужахов, Г.В. Несветаев, Е.В. Мальцев. Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион, 2006, часть 2, приложение № 13. С. 18-22

173. Айрапетов Г.А. Ужахов М.А. Особенности структуры керамзитобетона на горячем заполнителе. Бетон и железобетон, 1995, №6. С.9-11.

174. Internal curing of concrete. State-of-the-Art Report of RILEM technical committee 196-ICC. Edited by K. Kovler and O.M. Jensen. RILEM Report 41. RILEM Publications S.A.R.L; 2007. 141 p.

175. Иванов И.А., Нефедов В.В. Влияние однородности керамзита на свойства керамзитобетона / Бетон и железобетон. 1978. №6. С. 13-15.

176. Lightweight aggregate as internal curing agent to limit concrete shrinkage. J. Browning, D. Darwin, D. Reynolds, B. Pendergrass. ACI Materials Journal, 2011, November-December. P.638-644

177. Jensen O.M., Hansen P.F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, 2001, P. 1859-1865
178. Афанасьева В.Ф. Дефекты в конструкциях в процессе строительства и современные приемы их устранения. *Технологии бетонов*, 2014, № 7. С. 33-37.
179. Curing of Concrete. Datasheet. *Cement Concrete & Aggregates Australia*, April 2006. 7 p. [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: <http://www.boral.com.au/brochures/ordering/PDF/DS2006Curing.pdf?pdfName=DS2006Curing.pdf>. Дата звернення 22.10.2017.
180. Zaichenko M., Lakhtaryna S., Korsun A. The influence of extra mixing water on the properties of structural lightweight aggregate concrete. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 117. P. 1036-1042
181. Чернявский В.Л., Гасанов А.Б. К адаптации абиотических систем. *Будівельні матеріали та вироби*, 2013, №5-6 (82-83). С.40-43
182. Кинд В.В. Коррозия цементов и бетона в гидротехнических сооружениях. М.: Госэнергоиздат, 1955. 320 с.
183. Бабушкин В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1966. 216 с.
184. Бабушкин В.И. Защита строительных конструкций. Харьков: Вища школа, 1989. 166 с.
185. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред / Под ред. Москвина В.М. – М.: Стройиздат, 1975.– 236 с.
186. Брыков А.С., Васильев А.С., Мокеев М.В. Сульфатостойкость портландцементного камня с алюмосодержащими ускорителями схватывания. *Цемент и его применение*. 2013, №6. С.59-63.
187. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. Днепропетровск: Нова ідеологія, 2002. 116 с.
188. Valenta O., Modry S. A study of the deterioration of surface layer of concrete structures. *Int. symp. RILEM. Durability of Concrete*, Prague, v.111, 1969. P. A55–A64.

189. Иванов Ф.М., Розенталь Н.К. Оценка агрессивности и прогнозирование долговечности подземных конструкций. Бетон и железобетон, 1990, №3. С.7–9.
190. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1976. 206 с.
191. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. М.: Стройиздат, 1977. 220 с.
192. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: в 2 ч. С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, Чернякевич О.Ю., А.В. Степанова, Под ред. С.Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2016. Ч.1. 390 с. Ч.2. 204 с.
193. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности бетона по обобщенному критерию. Вестник БНТУ, № 2, 2009 С.5-12
194. Леонович С.Н. Теоретические основы расчета, долговечности железобетона при карбонизации. Материалы VI Международного научно-технического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь». Минск: УП Технопринт, 2000, С. 225-237.
195. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Основы математической теории процессов коррозии бетона. М.: Научный мир, 2006. 40 с.
196. Файвусович А.С., Довгань И.В., Гудкова Е.А., Конев Д.А. Коррозия бетонов надземных портовых сооружений. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 20. Одеса: Місто майстрів, 2005. С. 368-377.
197. Орентлихер Л.П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях. М.: Стройиздат, 1988. 136 с.
198. Костюк А.І., Столевич І.А., Столевич О.І. Физико-механические свойства конструкционного керамзитобетона в зависимости от состава и пористости керамзита. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 56. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2014. С. 116-123.
199. Попов Н.А. Новые виды легких бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 193 с.

200. Рахимбаев, Ш.М. Принципы выбора цементов для использования в условиях химической агрессии. Известия Вузов. Строительство. 1996, №10. С.65–68.

201. Рахимбаев Ш.М., Карпачева Е.Н., Толыпина Н.М. О выборе типа цемента на основе теории кольтмации при сложном составе агрессивной среды. Бетон и железобетон, 2012, №5.С.25–26.

202. Урбанович И.Н., Алексеев С.Н. Производство железобетона заданной долговечности. Бетон и железобетон. 1988, №2. С.37–39.

203. Новичков П.И. Взаимосвязь интенсивности коррозии со структурой и влажностью порового пространства бетона. Вестник Мордовского университета, Серия «Архитектурно-строительные науки», 2008, №4. С.159-164

204. Грушко И.М., Дегтерева Э.В., Маслов В.В. Обеспечение сохранности арматуры в бетоне в морской воде. Бетон и железобетон. 1989, №6. С.36–38.

205. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Пер. с нем. А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко. К.: Оранта, 2004. 301 с.

206. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. Стройиздат, 1976. 128 с.

207. Гідротехнічні та дорожні бетони. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Дорофєєв В.С., Мішутін А.В. Одеса: Евен, 2012. 214 с.

208. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1983. 212 с.

209. Мишутин А.В. Развитие научных основ повышения долговечности судостроительных бетонов. Дис. на соискание уч. степени д.т.н. по спец. 05.23.05. Одесса, 2009. 345 с.

210. Невилль А.М. Свойства бетона. Пер. с англ. В. Д. Парфенова и Т. Ю. Якуб. М.: Стройиздат, 1972. 344 с.

211. Лыков А.В. Теория сушки. М.:Энергия, 1968. 472 с.

212. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. М.:Энергия, 1968. 192 с.

213. Плугин А.А. Физико-химическая модель долговечности бетона и железобетона / Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. наук. праць. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 77. С. 104-119.
214. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М.: Из-во литературы по строительству, 1965. 195 с.
215. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М.: Стройиздат, 1968. 176 с.
216. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шиссель П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 317 с.
217. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М. Стройиздат, 1979. 344 с.
218. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.
219. Powers T. The physical structure of Cement and Concrete. Cement and Lime Manufacture. V. 29, №2, 1956. 270 p.
220. Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня. 4-й международный конгресс по химии цемента. М. Стройиздат, 1964. С. 174-189.
221. Дворкин О.Л. Многопараметрическое проектирование составов бетонов. Ровно: РГТУ, 2001. 121 с.
222. Дворкин Л.Й., Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона с заданными свойствами. Ровно: РДТУ, 1999. 202 с.
223. Шестоперов С.В. Долговечность бетона. М: Автотрансиздат, 1955. 480 с.
224. Патент №38003, Україна, Спосіб визначення однорідності якості бетону / Дорофеев В.С., Вировой В.М., Мішутін А.В., Кровяков С.О., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

225. Патент № 20590, Україна. Спосіб прискореного визначення морозостійкості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Романов О.А., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2007 р.

226. Балалаев Г.А., Медвелев В.М., Мощанский Н.А. Защита строительных конструкций от коррозии. М.: Стройиздат, 1966. 224 с.

227. Добшиц Л.М. Основы получения долговечных бетонов. Сборник трудов научно-практической конференции «Строительное материаловедение – теория и практика». М.:СИП РИА, 2006. С. 252-256.

228. Якобсон М.Я. К вопросу обеспечения морозостойкости бетонов для транспортного строительства. Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии. М.: Центр экономики и маркетинга, 2002. С.172-175.

229. Подвальный А.М. Механизм морозного разрушения бетонных и железобетонных конструкций // Бетон и железобетон – пути развития. Том 3. Технология бетона. Сборник трудов 2 всероссийской конференции. М. 2005. С.171-177.

230. Федосов С.В., Базанов С.М. Сульфатная коррозия бетона. М.: АСВ, 2003. 192 с.

231. Розенталь Н.К. Первичная защита бетонных и железобетонных конструкций. Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии. М. Центр экономики и маркетинга, 2002. С.44-52.

232. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стойиздат, 1970. 272 с.

233. Рогачко С.И. Ледовые нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. Одесса: ОГАСА, 2017. 209 с.

234. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М. Стройиздат, 1982. 196 с.

235. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. М.: Высшая школа, 1991. 288 с.

236. Правила постройки корпусов судов и плавучих сооружений с применением железобетона. Регістр Судноплавства України. К.: РСУ, 2007. 120 с.

237. Офіційний сайт компанії Coral [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://coral.ua>. Дата звернення 23.05.2018.

238. Офіційний сайт виробника пігментів Bayferrox (підрозділ LanXESS GmbH) [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://bayferrox.com>. Дата звернення 22.06.2018.

239. Бутт Ю.М. Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М., Высшая школа, 1973. 504 с.

240. Компьютерное материаловедение строительных композиционных материалов. Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Ильяхин и др. М: Из-во Российской инженерной академии, 2006. 256 с.

241. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.

242. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-ое изд. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.

243. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.

244. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.

245. Использование COMPEX-99 при моделировании параметров кривых пластической прочности цементно-полимерных композиций с фиброй Куралон / [Вознесенский В.А., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. и др.] // Наук. вісник буд-ва: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. Вип.8. Харків, 1999. С.21-28.

246. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Т.3.

Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин и др. Под ред. А.Н. Плугина. К.: Наук. думка, 2012. 288 с.

247. Физико-математические модели долговременной ползучести и безнапорной водонепроницаемости цементного камня и бетона / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин и др. / Збірка наукових праць ЛНАУ. Луганськ: ЛНАУ, 2004. №40. С.145-154.

248. Приймаченко А.С., Шейніч Л.О. Моделювання процесу корозії високоміцних бетонів у сульфатному середовищі. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 2(6). С. 53-59.

249. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. О связи критерия морозостойкости с реальной морозостойкостью бетона. Бетон и железобетон, 1981, №1. С.19–20.

250. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.

251. Любимова Т.Ю., Пинус Э.Р. О свойствах контактной зоны на границе между вяжущим и заполнителем в бетоне. Доклады Академии наук СССР. Химическая технология. М., 1965. С. 1439-1442.

252. Гордон С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. М.: Стройиздат, 1969. 151 с.

253. Ольгинский А.Г. Оценка и регулирование структуры зоны контакта цементного камня с минералами заполнителями. Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.23.05. Харьков, 1994. 37 с.

254. Ольгинский А.Г., Чернявский В.Л. Влияние среды на адаптационные зоны контакта заполнителей с цементным камнем в бетоне. Бетон и железобетон. 2000, №4 С. 5-8.

255. Гладышев Б.М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетонов. Харьков: Вища школа, 1987. 168 с.

256. Булатов А.И., Видовский А.Л. Обжатие цементным камнем заполнителей в бетоне. Бетон и железобетон, 1985, №3. С.24-26.

257. Розвиток власних деформаційних процесів в період організації

структури бетону. О.О. Коробко, В.М. Вировой, В.Ю. Тофанило, Р.В. Пархоменко / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2014. Вип. 28. С. 45-52.

258. Ключко Б.Г., Кушвид А.А. Трещинообразование бетона в процессе эксплуатации конструкций. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2004. Вип. 3. С. 124-126.

259. Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. М: Стройиздат, 1973. 135 с.

260. Толыпина Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей: дис. д-ра техн. наук: 05.23.05. Белгород, БГТУ, 2014. 354 с.

261. Довжик В.Г., Дорф В.А., Петров В.П. Технология высокопрочных керамзитобетонов. М.: Стройиздат, 1976. 136 с.

262. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.

263. Имитационная модель макроструктуры бетона. В.И. Кондращенко, В.Д. Кудрявцева, А.В. Кендюк и др. Вісник національного технічного університету ХПІ. 2010. № 52. С. 21-35.

264. Комохов П.Г., Грызлов В.С. Структурная механика и теплофизика легкого бетона. Вологда: Вологодский науч. центр, 1992. 320 с.

265. Хохрин Н.К. Защита от коррозии строительных конструкций зданий и сооружений железнодорожного транспорта. М.: ВЗШТ, 1988. 76 с.

266. О кинетике структурообразования при твердении цементов в присутствии карбонатных заполнителей. Любимова Т.Ю., Нисневич Л.М., Левкова Н.С., Михайлов Н.В. Коллоидный журнал, 1972, Т.34. №6. С.868-877.

267. Штакельберг Д.И. Термодинамика структурообразования водно-силикатных дисперсных материалов. Рига: Зинатне, 1984. 200 с.

268. Корнилович Ю.Е. Исследование прочности растворов и бетонов. К.: Госстройиздат УССР, 1960. 220 с.

269. Пушкарьова К.К., Каверин К. О. Дослідження особливостей формування контактної зони «в'язуча речовина – керамзитовий гравій» та оцінка її впливу на кінетику нарощування міцності легких бетонів. *Керамика: наука и жизнь*, 2017, №1. С. 32-41.

270. Грушко И.М., Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1973. 155 с.

271. Зошук Н.И. Влияние крупности заполнителя на прочность бетона. *Бетон и железобетон*, 1988, №1. С.8-9.

272. Калмыкова Е.Е. Исследование процессов структурообразования легкобетонных смесей. Всесоюзн. конф. по легким бетонам. Сб. №5. Ереван: АИСМ Госстроя Арм. ССР, 1970. С.56-60.

273. Кучеренко А.А. Выровой В.Н. Свойства обработанного керамзита и керамзитобетона. *Будівельні матеріали і конструкції*. 1973, №5. С 25-56.

274. Хохрин Н.К. Контактная зона в бетонах. *Изв.вузов. Стр-во и архитектура*. 1971, №8. С.82-85.

275. Хохрин Н.К. Процессы структурообразования и химическая стойкость легкого бетона на пористых заполнителях. Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.23.05. Самара, СамИИТ, 1998. 82 с.

276. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных композитов. Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, А.П. Прошин и др.: Под ред. В.И. Соломатова. Саратов: Изд-во Саратов.универ, 2001. 278 с.

277. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны. Пенза: ПГУАС, 2013. 324 с.

278. Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе. Под ред. Ю.П. Горлова. М.: Стройиздат, 1987. 304 с.

279. Підвищення міцності керамзитового гравію регулюванням його напруженого стану. Солоха І.В., Пона М.Г., Луцюк І.В., Семеген Р.І. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2005, № 536: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 231-233.

280. Виноградов Б.Н. Петрография искусственных пористых заполнителей.

М.: Стройиздат, 1972. 135 с.

281. Влажностные деформации искусственных пористых заполнителей. Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, М.В. Маслова и др. Технологии бетонов, 2008, №2. С.30-31.

282. Кучеренко А.А., Выровой В.Н. Набухание и усадка керамзита в структурообразовании бетона. Будівельні матеріали і конструкції. 1975, №5. С 42-43.

283. Повышение трещиностойкости и водостойкости легких бетонов. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Лифанов И.И., Мурадов Э.Г. М.: Стройиздат, 1971. 157 с.

284. Кровяков С.О. Наукові та практичні основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №73, С.73-80.

285. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Рецептурно-технологічні методи підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 36. Рівне: Волинські береги, 2018. С.55-63.

286. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. Наука та будівництво, 2017, №3. С. 50-58.

287. Кровяков С.А., Мишутин Н.В., Заволока Н.В. Опыт применения и перспективы использования бетонов на легких заполнителях в гидротехническом и транспортном строительстве. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2013, №52. С. 134-139.

288. Кровяков С.А., Мишутин А.В. Обработка поверхности пористых заполнителей как метод повышения долговечности легких бетонов гидротехнических и транспортных сооружений. Проблемы современного бетона и железобетона. Випуск 9, 2017. С.279-294.

289. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Досвід і перспективи застосування бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №61. С.278-284.

290. Гапоненко Е.А., Кровяков С.А. Обеспечение долговечности бетона водопропускных и водоотводных сооружений на автомобильных дорогах. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 26. Рівне: НУВГП, 2013. С.53-58.

291. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Панасюк В.О. Сушицький Е.Б. Набухання і усадка керамзитового гравію в процесі твердіння бетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2018. С.74-78.

292. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Довговічність легких і важких суднобудівних бетонів. Збірник наукових праць за матеріалами I міжнародної азербайджансько-української конференції «Building Innovations – 2018». Баку, ПолтНТУ, 2018. С. 162-164

293. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини. Тези доповідей II міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд», Одеса:ОДАБА, 2017. С.81-83

294. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Применение модифицированных бетонов для снижения проницаемости конструкций водопропускных и водоотводных сооружений на автодорогах. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2013, Випуск 50. С. 92-96

295. Таблицы планов эксперимента. Для факторных и полиномиальных моделей. Справочное издание. / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. Под ред. В.В. Налимова. М.: Металлургия, 1982. 753 с.

296. Патент № 19814, Україна, Бетонна суміш з добавками Пенетрон А + С-3 / Дорофеев В.С., Мишутін А.В., Романов О.А. Заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2006 р.

297. Мішутін А.В. Вплив комплексної добавки суперпластифікатор С-3 + Пенетрон на властивості дрібнозернистого бетону / А.В.Мішутін, С.О. Кровяков, О.А. Романов // Дороги і мости. Випуск 6: Збірка наукових статей – Київ, 2006. – С. 257-266.

298. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Долговечные бетоны для тонкостенных сооружений, эксплуатируемых во влажной среде. Дороги і мости, Випуск 7, в 2-х т., т.2.К.: ДерждорНДІ, 2007. С. 67-70.

299. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

300. Mobasher B. Mechanics of fiber and textile reinforced cement composite. New York: CRC Press, 2011. 452 p.

301. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса: Внешрекламсервис, 2004. 270 с.

302. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete reinforced with soda can waste fibre. Ya. Naryanto, A. Widyaningrum, G.H. Sudibyo, A. Maryoto. The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF 2017) Volume 138, [Електрон. ресурс]. - Режим доступа: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/52/matecconf_eacef2017_01021.pdf.

Дата звернення 23.12.2016.

303. Aghaee K., Yazdib M.A., Tsavdaridisc K.D. Investigation into the mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires. Magazine of concrete research, 2014, 66(1). P. 1-9.

304. Бондурянский З.П., Дьячков М.А., Меламед Э.Е. Морские железобетонные суда. Л.: Судостроение, 1966. 200 с.

305. Experimental investigation on pore structure characterization of concrete exposed to water and chlorides / Jun Liu, Kaifeng Tang, Qiwen Qiu, Dong Pan, Zongru Lei, Feng Xing . Materials, 2014, Vol. 7, Issue 9, PP. 6646-6659

306. Huber J. Decorative Concrete. 2nd edition. Menlo Park, Calif.: Sunset Pub. Co., 2007. 192 p.

307. Кузьмина В.П. Неорганические пигменты для сухих строительных смесей и декоративных бетонов. Свойства. Эффективность применения. Популярное бетоноведение, 2005, №2 (4). С.2-8.

308. Петричко С.Н. Прочностные характеристики декоративных судостроительных бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Вип. 44. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2011. С. 258-263.

309. Лейдерман Л.П. Свойства декоративных бетонов с использованием железоокисных пигментов Челябинского завода ЖБИ №1. Автореф. дис. канд. тех. наук 05.23.05. Челябинск, 2003. 19 с.

310. Петричко С.Н., Мишутин А.В. Состав и свойства декоративных судостроительных бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. 48. С. 37-42

311. Kroviakov S.O., Mishutin A.V., Pisev O.V., Kryzhanovskiyy V.O. Effect of composition on the strength of modified expanded clay lightweight concrete. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №71, С.107-112.

312. Підвищення довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд за рахунок застосування модифікаторів. А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, О.В. Піщев та ін. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №69, С. 100-105.

313. Кровяков С.О., Петричко С.М., Дудник Л.В., Ткаченко Г.Г. Декоративний конструкційний керамзитобетон на обробленому цементною суспензією гравії. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №66, С.66-71.

314. Kroviakov S., Mishutin A., Pisev O. Management of the properties of shipbuilding expanded clay lightweight concrete. International Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol 7, No 3.2, pp. 245-249.

315. Mishutn A., Kroviakov S., Pisev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Tehnički glasnik 11, 3 (2017). (Technical Journal, Vol.11 No.3) pp. 121-124.

316. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Механічні властивості модифікованих суднобудівних керамзитобетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №63. С.161-166.

317. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Властивості легких бетонів на різних видах пористих заповнювачів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №62, С.119-125.

318. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Петричко С.М. Стійкість кольорової гама декоративних керамзитобетонів. Збірка тез доповідей другої науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса: ОДАБА, 2018. С.101

319. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В. та ін. Міцність модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», Одеса:ОДАБА, 2018. С.80-83.

320. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В., Заволока М.В. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса, 2016. С.65-67

321. Мишутин А.В., Гапоненко Е.А., Кровяков С.А. Влияние модификаторов на структуру и свойства бетонов для тонкостенных гидротехнических сооружений. Прогрессивные материалы и технологии в современном строительстве. Новосибирск: НГАУ, 2008. С. 133-136.

322. Романов О.А., Мішутін А.В., Кровяков С.О. Дрібнозернисті бетони для гідромеліоративних споруд, модифіковані комплексною добавкою Пенетрон + С-3. Проектування бетонів із заданими властивостями: Мат-ли V науково-практичного семінару «Структура, властивості та склад бетону». – Рівне: вид-во РДЦНТіЕІ, 2006. С. 168-174.

323. Патент № 32920, Україна, Модифікована бетонна суміш / Дорофеев В.С., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Гапоненко К.О. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

324. Гапоненко Е.А. Мишутин А.В. Кровяков С.А. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны повышенной водонепроницаемости, морозостойкости и трещиностойкости для гидротехнических сооружений мелиорации. Мат-ли науково-практичного семінару «Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості». Київ: Поліпром, 2008. С. 59-64

325. Лутфиева И.З. Серия инновационных материалов Пенетрон: высокое качество и снижение издержек строительства. Строительные материалы оборудование, технологии XXI века, 2007, №10. С. 22-23.

326. Penetron Admix. Crystalline waterproofing admixture [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <https://www.penetron.com/products/PENETRON-ADMIX/data-sheet.pdf>. Дата звернення 04.11.2016.

327. Гідроізоляційні цементні композити проникної дії / А.А. Пługін, Т.О. Костюк, О.Ю. Прошин та ін. Харків: Колегіум, 2018, 268 с.

328. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре. В.М. Москвин, М.М. Капкин, Б.В. Мазур, А.М. Подвальный. М.: Из-во литературы по строительству, 1967. 132 с.

329. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Богуцький В.Л. Оптимізація складу суднобудівного керамзитобетону підвищеної довговічності. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №60. С.160-165.

330. Мішутін А.В. Кровяков С.О., Богуцький В.Л. Застосування модифікованих бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2015, Випуск 56. С.68-74.

331. Мишутин А.В., Богуцкий В.Л., Кровяков С.А. Прочность и средняя плотность судостроительного бетона на керамзитовом гравии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2014, №53. С.245-251.

332. Kroviakov S., Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia, Vol. (1) Issue (4), August 2017. pp. 2-10.

333. Mishutin A., Kroviakov S., Zavoloka M., Bogutsky V, Stanchyk Ie. Increasing the durability of expanded clay lightweight concretes for thin-walled hydraulic engineering structures. Meridian Ingineresc, Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association, 2016, №4, pp.42-45.

334. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N., Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability. ICCS16. Madrid, Spain, 2016. pp. 741-747.

335. Мішутін А.В., Богуцький В.Л., Кровяков С.О. Модифіковані керамзитобетони для тонкостінних плавучих споруд. Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті, 2014, №2. С. 104-110.

336. Толмачев С.Н. Сравнительная оценка истираемости монолитного бетона и его компонентов. Строительные материалы, 2012, №12. С. 11-13.

337. Лахтарина С.В., Зайченко Н.М Влияние частичной замены плотных заполнителей пористыми на среднюю плотность и прочность бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2013, №52. С.151-160.

338. Lyashenko T., Voznesensky V., Boiko S., Shtakelberg D. Analysis of concrete property fields and search for the best compositions using Monte Carlo method. Brittle Matrix Composites 7. Cambridge and Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., ZTUREK RSI, 2003. P. 351-358

339. Проект ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018 Будівельні матеріали. Бетон суднобудівний. Технічні умови та технологія приготування: [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <https://ndibmv.kiev.ua/dstu-b-v-2-7-khkhkh2018-budivelni-materiali-be>. Дата звернення 01.10.2016.

340. Кровяков С.О., Дудник Л.В. Порівняння властивостей модифікованих керамзитобетонів з різними типами пісків. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 35. Рівне: НУВГП, 2018. С.18-25.

341. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №67, С. 89-95.

342. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування пористих заповнювачів у бетонах для транспортних споруд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2016, Вип. 98. С. 145-155.

343. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування вапнякового щебеню для бетонів жорстких дорожніх покриттів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №58. С.250- 255.

344. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах заповнювача. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2015, Випуск 31. С.251-257

345. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Порівняння ефективності застосування зерен пониженої пружності і дисперсного армування при керуванні властивостями дрібнозернистого бетону. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010, №14. С. 163-168.

346. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Вплив дисперсного армування і зерен пониженої пружності на властивості дрібнозернистого бетону. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2010, №38. С.389-394.

347. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов при зафиксированной гранулометрии заполнителей. Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип.72. К.: ДП НДІБК, 2009. С. 99-104.

348. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов в сухом и водонасыщенном состоянии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2009, №34. С. 116-122.

349. Кровяков С.О. Мишутін А.В. Полторапавлов А.О. Механічні властивості бетону на обробленому цементною суспензією карбонатному щебені. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №64. С.147-152.

350. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Дудник Л.В. Дослідження легких бетонів з різними типами дрібного заповнювача. Тези доповідей 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса:ОДАБА, 2018. С.269.

351. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Полторапавлов А.О. Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу модифікаторів на міцність бетону на вапняковому щебені. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2017. С.51-53.

352. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Полторапавлов А.О. Застосування місцевого заповнювача в транспортному і гідротехнічному будівництві в одеському регіоні. Збірка тез доповідей науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса:ОДАБА, 2016. С.117.

**Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Кровяков С.О. Наукові та практичні основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №73, С.73-80.
2. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Рецептурно-технологічні методи підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 36. Рівне: Волинські береги, 2018. С.55-63.
3. Kroviakov S.O., Mishutin A.V., Pishev O.V., Kryzhanovskiy V.O. Effect of composition on the strength of modified expanded clay lightweight concrete. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №71, С.107-112.
4. Кровяков С.О., Дудник Л.В. Порівняння властивостей модифікованих керамзитобетонів з різними типами пісків. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 35. Рівне: НУВГП, 2018. С.18-25.
5. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. Наука та будівництво, 2017, №3. С.50-58.
6. Підвищення довговічності керамзитобетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд за рахунок застосування модифікаторів. А.В. Мішутін, С.О. Кровяков, О.В. Піщев та ін. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №69, С.100-105 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

7. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №67, С.89-95 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

8. Кровяков С.О., Петричко С.М., Дудник Л.В., Ткаченко Г.Г. Декоративний конструкційний керамзитобетон на обробленому цементною суспензією гравії. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №66, С.66-71 (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

9. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Полторапавлов А.О. Механічні властивості бетону на обробленому цементною суспензією карбонатному щебені. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №64. С.147-152. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

10. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Механічні властивості модифікованих суднобудівних керамзитобетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №63. С.161-166. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

11. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування пористих заповнювачів у бетонах для транспортних споруд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2016, Вип. 98. С.145-155.

12. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Піщев О.В. та ін. Властивості легких бетонів на різних видах пористих заповнювачів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №62, С.119-125. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

13. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Досвід і перспективи застосування бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №61. С.278-284. (*індексується наукометричною базою Index Copernicus*).

14. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Богуцький В.Л. Оптимізація складу суднобудівного керамзитобетону підвищеної довговічності. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №60. С.160-165.

15. Мішутін А.В. Кровяков С.О., Богуцький В.Л. Застосування модифікованих бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2015, Випуск 56. С.68-74.

16. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Застосування вапнякового щебеню для бетонів жорстких дорожніх покриттів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2015, №58. С.250- 255.

17. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах заповнювача. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2015, Випуск 31. С.251-257.

18. Мишутин А.В., Богуцкий В.Л., Кровяков С.А. Прочность и средняя плотность судостроительного бетона на керамзитовом гравии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2014, №53. С.245-251.

19. Кровяков С.А., Мишутин Н.В., Заволока Н.В. Опыт применения и перспективы использования бетонов на легких заполнителях в гидротехническом и транспортном строительстве. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2013, №52. С.134-139.

20. Гапоненко Е.А., Кровяков С.А. Обеспечение долговечности бетона водопроницаемых и водоотводных сооружений на автомобильных дорогах. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 26. Рівне: НУВГП, 2013. С.53-58.

21. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Порівняння ефективності застосування зерен пониженої пружності і дисперсного армування при керуванні властивостями дрібнозернистого бетону. Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010, №14. С.163-168.

22. Кровяков С.О., Даниленко А.В. Вплив дисперсного армування і зерен пониженої пружності на властивості дрібнозернистого бетону. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2010, №38. С.389-394.

23. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов при зафиксированной гранулометрии заполнителей. Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип.72. К.: ДП НДІБК, 2009. С.99-104.

24. Кровяков С.А. Даниленко А.В. Влияние демпфирующих частиц на свойства мелкозернистых бетонов в сухом и водонасыщенном состоянии. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2009, №34. С.116-122.

25. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Долговечные бетоны для тонкостенных сооружений, эксплуатируемых во влажной среде. Дороги і мости, Випуск 7, в 2-х т., т.2.К.: ДерждорНДІ, 2007. С.67-70.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

26. Kroviakov S., Mishutin A., Pishev O. Management of the properties of shipbuilding expanded clay lightweight concrete. International Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol 7, No 3.2, pp.245-249 (*індексуються наукометричною базою Scopus*).

27. Mishutn A., Kroviakov S., Pishev O., Soldo B. Modified expanded clay light weight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. Tehnički glasnik 11, 3 (2017). (Technical Journal, Vol.11 No.3) pp.121-124 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

28. Kroviakov S., Mishutn A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimanyia, Vol. (1) Issue (4), August 2017. pp.2-10.

29. Кровяков С.А., Мишутин А.В. Обработка поверхности пористых заполнителей как метод повышения долговечности легких бетонов

гидротехнических и транспортных сооружений. Проблемы современного бетона и железобетона. Выпуск 9, 2017. С.279-294.

30. Mishutin A., Kroviakov S., Zvoloka M., Bogutsky V, Stanchyk Ie. Increasing the durability of expanded clay lightweight concretes for thin-walled hydraulic engineering structures. Meridian Ingineresc, Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association, 2016, №4, pp.42-45.

Патенти на корисні моделі

31. Патент № 32920, Україна, Модифікована бетонна суміш / Дорофєєв В.С., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Гапоненко К.О. заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

32. Патент №38003, Україна, Спосіб визначення однорідності якості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мішутін А.В., Кровяков С.О., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2008 р.

33. Патент № 20590, Україна. Спосіб прискороного визначення морозостійкості бетону / Дорофєєв В.С., Вировой В.М., Мишутін А.В., Кровяков С.О., Романов О.А., заявник і утримувач патенту ОДАБА, 2007 р.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

34. Mishutin A., Kroviakov S., Mishutin N., Bogutsky V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability. ICCS16. Madrid, Spain, 2016. pp.741-747 (*індексуються наукометричною базою Web of Science*).

35. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Панасюк В.О. Сушицький Е.Б. Набухання і усадка керамзитового гравію в процесі твердіння бетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2018. С.74-78.

36. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Довговічність легких і важких суднобудівних бетонів. Збірник наукових праць за матеріалами I міжнародної

азербайджансько-української конференції «Building Innovations – 2018». Баку, ПолтНТУ, 2018. С. 162-164.

37. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Петричко С.М. Стійкість кольорової гама декоративних керамзитобетонів. Збірка тез доповідей другої науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси», Одеса: ОДАБА, 2018. С.101.

38. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Дудник Л.В. Дослідження легких бетонів з різними типами дрібного заповнювача. Тези доповідей 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса:ОДАБА, 2018. С.269.

39. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В. та ін. Міцність модифікованих керамзитобетонів і фіброкерамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних і транспортних споруд. Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», Одеса:ОДАБА, 2018. С.80-83.

40. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Полторапавлов А.О. Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу модифікаторів на міцність бетону на вапняковому щебені. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання і оптимізація композитів», Одеса, 2017. С.51-53.

41. Кровяков С.О. Мішутін А.В. Метод дослідження корозійної стійкості бетонів при однобічному впливі агресивної рідини. Тези доповідей II міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд», Одеса:ОДАБА, 2017. С.81-83.

42. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В., Заволока М.В. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону. Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса, 2016. С.65-67

43. Кровяков С.О., Дудник Л.В., Полторапавлов А.О. Застосування місцевого заповнювача в транспортному і гідротехнічному будівництві в одеському регіоні. Збірка тез доповідей науково-практичної конференції

«Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси»,
Одеса:ОДАБА, 2016. С.117.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

44. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Применение модифицированных бетонов для снижения проницаемости конструкций водопропускных и водоотводных сооружений на автодорогах. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. 2013, Випуск 50. С.92-96.

45. Мішутін А.В., Богуцький В.Л., Кровяков С.О. Модифіковані керамзитобетони для тонкостінних плавучих споруд. Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті, 2014, №2. С.104-110.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

- міжнародний науково-технічний семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 22-23 листопада 2018 р. – очна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (Україна, м. Рівне, 16-18 жовтня 2018 р. – очна участь).
- II науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (Україна, м. Одеса, 27-29 вересня 2018 р. – очна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 31 травня 2018 р. – очна участь);
- міжнародна конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2018» (Азербайджан, м. Баку, 24-25 травня 2018 р. – заочна участь);
- 74-та науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 17-18 травня 2018 р. – очна участь);
- міжнародна конференція «Структурування, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (Україна, м. Одеса, 11-13 квітня 2018 р. – очна участь);
- міжнародний науково-технічний семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 16-17 листопада 2017 р. – очна участь);
- II міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Україна, м. Одеса, 16-17 листопада 2017 р. – очна участь)
- міжнародна науково-технічна конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону». (Україна, м. Полтава, 18-20 жовтня – очна участь)

- міжнародна конференція MATRIB 2017 (матеріали, трибологія, переробка). International Conference MATRIB 2017 (materials, tribology, recycling) (Хорватія, м. Вела-Лука, 29 червня – 1 липня 2017 р. – заочна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 1 червня 2017 р. – очна участь);
- 73-тя науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 18-19 травня 2017 р. – очна участь);
- міжнародна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку (Україна, м. Київ, 23-24 листопада 2016 р. – очна участь);
- міжнародний науково-технічний семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 27-28 жовтня 2016 р. – очна участь);
- науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (Україна, м. Одеса, 22-24 вересня 2016 р. – очна участь);
- друга Міжнародна конференція щодо сталого розвитку бетону ICCS16. Second International Conference on Concrete Sustainability, held in Madrid, Spain. (Іспанія, м. Мадрид, 13-16 червня 2016 р. – заочна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 3 червня 2016 р. – очна участь);
- міжнародна конференція «Структуроутворення, міцність і руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (Україна, м. Одеса, 14-15 квітня 2016 р. – очна участь)
- міжнародна науково-практична конференція «Бетони, цементи і добавки для бетонів в сучасному будівництві: актуальні питання виробництва і застосування» (Україна, м. Київ, 2-3 грудня 2015 р. – очна участь);

- міжнародна конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Україна, м. Одеса, 13-15 жовтня 2015 р. – очна участь);
- ІХ науково-технічний семінар "Структура, властивості та склад бетону" «Шляхи ресурсо- та енергозбереження при виробництві в'язучих, бетонів та розчинів» (Україна, м. Рівне, 4-5 листопада 2015 р. – очна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 5 червня 2015 р. – очна участь);



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ Б В.2.7-XXX:2018

Будівельні матеріали

БЕТОН СУДНОБУДІВНИЙ.

ТЕХНІЧНІ УМОВИ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПРИГОТУВАННЯ

Частина 2. Бетон суднобудівний легкий

(проект, перша редакція)

Продовження додатку Б

ДСТУ Б В.2.7-XXX-2

УКНД: 47.020.10; 91.100.30

Ключові слова: бетон, бетонна суміш, водонепроникність, добавка, керамзит, корозійна стійкість, маса, міцність на стиск, морозостійкість, рухомість, склад, суднобудівний бетон.

Директор ДП «НДІБМВ»,
канд. техн. наук _____ Н. Дюжилова

Голова ТК 305,
заступник директора з наукової роботи
ДП «НДІБМВ»,
доктор техн. наук _____ С. Лаповська

Ректор ОДАБА
канд. техн. наук, професор _____ А.Ковров

Завідувач кафедри Автомобільних доріг
і аеродромів ОДАБА,
науковий керівник,
доктор техн. наук, професор _____ А. Мішутін

Провідний науковий консультант,
відповідальний виконавець,
начальник науково-дослідної
частини ОДАБА,
канд. техн. наук, доцент _____ С. Кровяков

Старший науковий
співробітник ОДАБА,
канд. техн. наук _____ М. Мішутін

Відповідальний
виконавець,
старший науковий співробітник
ДП «НДІБМВ» _____ Т. Демченко

Науковий
співробітник
ДП «НДІБМВ» _____ Т. Ліхвар

Міністерство промислової політики України
Херсонський державний завод «Паллада»

«Затверджую»
Директор ХДЗ «Паллада»
Єрмаков Д.В.
« 29 » жовтня 2014 р.



Регламент

з технології приготування модифікованих
суднобудівних керамзитобетонів для виготовлення
тонкостінних плавучих споруд та плавучих доків

РОЗРОБЛЕНО

Міністерство освіти і науки України

Одеська державна академія будівництва та
архітектури

Центр НТТМ по архітектурі та будівництву

Ректор



заслужений діяч науки і
техніки України,
проф., д.т.н. **В.С. Дорофєєв**

Науковий керівник

заслужений діяч науки і
техніки України,
д.т.н. проф. **А.В. Мішутін**

Виконавці

с.н.с. к.т.н. **С.О. Кровяков**
с.н.с. к.т.н. **М.В. Мішутін**
м.н.с. **В.Л. Богуцький**

ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ
Одеське відділення
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР

ЕКОСТРОЙ^{ТМ}

Вих.№ 34/1 від 03.07.2018 р.

**Акт впровадження
результатів наукових досліджень**

Цей акт засвідчує, що у період з 2015 по 2016 рр. у виробничій практиці науково-виробничого центру «Екострой» були використані деякі результати докторської дисертаційної роботи Кровякова С.О. за темою «Наукові основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд»: зокрема при проведенні ремонтних та відновлювальних робіт на об'єкті незавершеного будівництва за адресою м. Одеса, Французький бул., 60/1 «24-поверховий оздоровчий комплекс», який розташований безпосередньо на схилах вздовж моря і «мисова» частина якого знаходиться за межами схилів, безпосередньо виходячи в водну морську зону.

Для виготовлення ремонтних сумішей використовувався модифікований керамзитобетон, до складу якого вводилася добавка суперпластифікатора С-3, мікрокремнезем Стахановського заводу феросплавів і поліпропіленова фібра Ваусон. Бетон готувався на основі сульфатостійкого портландцементу виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (500 кг на м³ бетону) і керамзитового гравію фракції 5-10 мм виробництва Одеського керамзитового заводу. Приготування бетонної суміші проводилося з попередньою обробкою керамзитового гравію цементною суспензією.

Результати випробувань контрольних зразків модифікованого керамзитобетону показали, що він має міцність при стиску 34 МПа, водонепроникність W8 і морозостійкість F400 і середню густину після висушування до постійної маси 1680 кг/м³.

Ефективність від впровадження даного модифікованого керамзитобетону на об'єкті будівництва науково-виробничого центру «Екострой» забезпечується його високою міцністю і довговічністю.

Даний акт не відноситься до фінансових документів.



Головний інженер центру

Тихонюк С.А.

Продовження додатку Г

«Затверджую»

Проректор з наукової роботи
Одеської державної академії
будівництва та архітектури

Є.В. Клименко

« 28 » червня 2018 р.



«Затверджую»

Головний технолог
ТОВ «Комбінат малоповерхового
домобудування «Камбіо»

В.О. Панасюк

« 28 » червня 2018 р.



АКТ

про випуск опитно-промислової партії виробів
з модифікованого керамзитобетону
на ТОВ «КМД «Камбіо»

У квітні 2018 року на комбінаті малоповерхового домобудування «Камбіо» була виготовлена опитно-промислова партія тонкостінних керамзитобетонних конструкцій та виробів на основі складу модифікованого керамзитобетону, розробленого в Одеській державній академії будівництва та архітектури в рамках наукових досліджень, що проводяться докторантом кафедри автомобільних доріг і аеродромів, к.т.н., доц. Кровяковим С.О. і аспірантом Піщевим О.В. Об'єм бетону опитно-промислової партії складав 8,4 м³. При виготовленні бетону використовувався керамзит Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм (670 кг/м³), добавка суперплатифікатор СП-1 (3,8 кг/м³), кварцовий пісок Микитівського кар'єра (672 кг/м³) і портландцемент виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент» (480 кг/м³). При виробництві даної партії також була використана технологія приготування керамзитобетонної суміші з попередньою обробкою керамзитового гравію цементною суспензією в початковій стадії перемішування в примусовому змішувачі. Запропонований склад модифікованого керамзитобетону і вдосконалена технологія приготування керамзитобетонної суміші дозволили покращити однорідність суміші та якості бетону у тонкостінних виробках.

Проведені випробування показали, що міцність при стиску керамзитобетону в опитно-промислової партії складала 32 МПа, морозостійкість F400, середня густина 1700 кг/м³.

АКТ

про впровадження результатів наукових досліджень
на об'єкті будівництва підрядником якого виступала ПП «ЄВА»

Цей акт підтверджує, що на об'єкті будівництва ПС «Маразліївська» до ПС «Усатово», кабельна траса яка розташована за адресою м. Одеса, ул. В.Арнаутська, Розумовська, Майстерська, Розкидайлівська, А. Воробьова, С. Ядова, а також Ленінградське шосе. При влаштуванні кабельних колодців застосовувався бетон класу В35 на основі вапнякового щебеню Великодолинського кар'єру. Загальна площа кабельних колодців складає 585 м², об'єм використаного бетону для влаштування перекриття та дна – 128,8 м³. Об'єм бетону, використаного для підпірної стінки, склав 98,7 м³. При виробництві бетону було використано склад и технологію, розроблену спеціалістами кафедри автомобільних доріг і аеродромів Одеської державної академії будівництва та архітектури: докторантом кафедри, к.т.н., доцентом С.О. Кровяковим і аспірантом кафедри А.О. Полторапавловим (під загальним науковим керівництвом д.т.н., професора А.В. Мішутіна).

Завдяки застосуванню технології з попередньою обробкою вапнякового щебеню цементною суспензією, а також суперпластифікатору і мікрокремнезему в якості модифікаторів бетону, отримано бетон міцністю 45 МПа, водонепроникністю W10 і морозостійкістю F350. Це дозволило знизити товщину шару конструкцій та забезпечити можливість її експлуатації в вологих умовах. При експлуатації конструктиву з жовтня 2015 року до вересня 2017 року слідів фільтрації на підпірній стінці та пошкоджень і руйнувань бетону стінки і покриття паркінгу не виявлено.

Директор ПП «ЄВА»



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]



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@ogasa.org.ua, веб-сайт: www.ogasa.org.ua, код ЄДРПОУ 02071033

30.07.2018 № 08-15-966

Г

Г

На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі Кровякова Сергія Олексійовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за темою «Наукові основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд», впроваджені в навчальний процес в Одеській академії будівництва та архітектури. Вони використовуються в курсі лекцій навчальної дисципліни «Бетони підвищеної довговічності на різних типах заповнювачів для конструкцій транспортних споруд», яка викладається при підготовці третього (доктор філософії) рівня вищої освіти зі спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія». Також результати досліджень використовуються в курсі лекцій і при проведенні практичних занять з навчальної дисципліни «Наукові основи довговічності автомобільних доріг та аеродромів», яка викладається при підготовці магістрів за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи».

Крім того, результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі Кровякова С.О., з 2013/2014 по 2017/2018 навчальний роки використовуються при підготовці та виконанні дипломних робіт магістрів за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізації «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи».

Проректор з НІР, д.т.н., проф.

Ю.Крутій

875000