

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ БЕТОНІВ  
ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ І ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД  
ШЛЯХОМ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ПОРИСТОГО ЗАПОВНЮВАЧА**

Кровяков С.О., кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри ПБЕАД Одеської державної академії будівництва та архітектури, ORCID 0000-0002-0800-0123,  
Мішутін А.В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ПБЕАД Одеської державної академії будівництва та архітектури, ORCID 0000-0001-9512-6084

**INCREASING THE DURABILITY OF LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE  
FOR HYDRAULIC ENGINEERING AND TRANSPORT STRUCTURES  
BY TREATING THE SURFACE OF A POROUS AGGREGATE**

Kroviakov S.O., PhD, associate professor, doctoral student, Highways department of the Odessa state academy of civil engineering and architecture, ORCID 0000-0002-0800-0123,  
Mishutin A.V., doctor of science, professor, head of Highways department of the Odessa state academy of civil engineering and architecture, ORCID 0000-0001-9512-6084

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ  
ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ**

Кровяков С.А., кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры ПСЭАД Одесской государственной академии строительства и архитектуры, ORCID 0000-0002-0800-0123,  
Мишутин А.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ПСЭАД Одесской государственной академии строительства и архитектуры, ORCID 0000-0001-9512-6084

**АНОТАЦІЯ:** Для ряду гідротехнічних і транспортних споруд ефективні бетони на легких пористих заповнювачах. Зокрема легкі бетони широко використовуються для плавучих залізобетонних споруд, таких як нафтовидобувні платформи, плавучі доки, готелі та будинки. Україна є однією з небагатьох країн, що володіють технологією залізобетонного суднобудування.

Проаналізовано роботу пористого заповнювача в структурі бетону. Відомо, що при твердінні бетону відбувається активний обмін речовиною між заповнювачем і матрицею. Крім того, на властивості бетону впливає адгезія матриці до пористий заповнювача і усадка-набухання заповнювача. При твердінні бетону в його структурі утворюються тріщини і внутрішні поверхні розділу. По даним тріщинам, поверхням розділу і порам в матриці та заповнювачі передається рідина і газ. Відповідно для підвищення довговічності бетону гідротехнічних і транспортних споруди необхідно зменшити його проникність.

Запропоновано два методи обробки поверхні пористого заповнювача. Перший метод – гідрофобізація поверхні кремнійорганічною рідиною оптимальної концентрації. Недоліком даного методу є необхідність виконання додаткової технологічної операції. Була встановлена оптимальна концентрація кремнійорганічної рідини в емульсії від 0.6 до 0.7%. Другий метод – обробка поверхні заповнювача цементної суспензією. Даний метод простіше першого, тому що обробка проводиться безпосередньо під час приготування бетонної суміші. Обидва методи знижують проникність структури, за рахунок чого підвищують довговічність бетону, а також підвищують його міцність. Перший метод більш ефективний для керамзитобетонів плавучих та інших гідротехнічних споруд, для яких важлива експлуатаційна вологість бетону. Другий метод більш ефективний для бетонів на природних пористих заповнювачах, тому що обробка підвищує їх однорідність.

В цілому завдання підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах має вирішуватися комплексно, тобто крім обробки заповнювача необхідно застосовувати хімічні добавки. Встановлено, що для бетону гідротехнічних і транспортних споруд ефективні комплексні модифікатори, що включають суперпластифікатор і кольматуючу добавку або суперпластифікатор і мікрокремнезем. Отримано модифіковані бетони на легких заповнювачах з водонепроникністю до W14.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** легкі бетони, пористі заповнювачі, довговічність, корозійна стійкість, морозостійкість, водонепроникність, модифікатори, обробка заповнювача .

**ABSTRACT:** Concretes on lightweight porous aggregates are effective for some hydraulic engineering and transport structures. In particular, lightweight concretes are often used for floating reinforced concrete structures (oil platforms, floating docks, hotels, houses). Ukraine is one of the few countries that have the technology of reinforced concrete shipbuilding.

The work of the porous aggregates in the concrete structure was analyzed. It is known that the active substance exchange occurs between the aggregate and the matrix when the concrete hardens. Also on the properties of concrete affects the adhesion of the matrix to the porous aggregate and shrinkage-swelling of the aggregate. When concrete is hardened, cracks form in its structure. Liquid and gas are transferred through these cracks and pores in the aggregate. To increase the durability of concrete hydraulic engineering and transport structures it is necessary to reduce its permeability.

Two methods for treating the surface of a porous aggregate have been proposed. The first method is the hydrophobization of the surface by a silicon-organic fluid of optimum concentration. However, this method requires an additional technological operation. Was found the optimal concentration of silicone fluid in the emulsion is 0.6-0.7%. The second method is surface treatment with cement slurry. This method is simpler than the first method, since the processing is done in the preparation of a concrete mix. Both methods reduce the permeability of the structure, thereby increasing the durability of the concrete. Also, the treatment of the porous aggregate increases the strength of the concrete. The first method is more effective for expanded clay concrete of floating and other hydraulic structures, for which the operating humidity of concrete is important. The second method is more effective for concrete on natural porous aggregates, since the treatment makes the filler more homogeneous.

The task of increasing the durability of concrete with porous aggregates must be solved comprehensively. In addition to the treatment of aggregate, complex additives should be used. Has established that complex additives are effective for concrete for hydraulic engineering and transport structures, which include superplasticizer and colmatizing additive or superplasticizer and silica fume. Modified concrete on lightweight aggregates with water resistance up to W14 is obtained.

**KEYWORDS:** lightweight concretes, porous aggregates, durability, corrosion resistance, frost resistance, water resistance, modifiers, aggregate treatment.

**АННОТАЦИЯ:** Для ряда гидротехнических и транспортных сооружений эффективны бетоны на легких пористых заполнителях. В частности легкие бетоны широко используются для плавучих железобетонных сооружений, таких как нефтедобывающие платформы, плавучие доки, отели и дома. Украина является одной из немногих стран, обладающих технологией железобетонного судостроения.

Проанализирована работа пористого заполнителя в структуре бетона. Известно, что при твердении бетона происходит активный обмен веществом между заполнителем и матрицей. Кроме того, на свойства бетона влияет адгезия матрицы к пористому заполнителю и усадка-набухание заполнителя. При твердении бетона в его структуре образуются трещины и внутренние поверхности раздела. По данным трещинам, поверхностям раздела и порам в матрице и заполнителе передается жидкость и газ. Соответственно для повышения

долговечности бетона гидротехнических и транспортных сооружения необходимо уменьшить его проницаемость.

Предложено два метода обработки поверхности пористого заполнителя. Первый метод – гидрофобизация поверхности кремнийорганической жидкостью оптимальной концентрации. Недостатком данного метода является необходимость выполнения дополнительной технологической операции. Была установлена оптимальная концентрация кремнийорганической жидкости в эмульсии от 0.6 до 0.7%. Второй метод – обработка поверхности заполнителя цементной суспензией. Данный метод проще первого, так как обработка производится непосредственно при приготовлении бетонной смеси. Оба метода снижают проницаемость структуры, за счет чего повышают долговечность бетона, а также повышают его прочность. Первый метод более эффективен для керамзитобетонных плавучих и других гидротехнических сооружений, для которых важна эксплуатационная влажность бетона. Второй метод более эффективен для бетонов на природных пористых заполнителях, так как обработка повышает их однородность.

В целом задача повышения долговечности бетонов на пористых заполнителях должна решаться комплексно, т.е. помимо обработки заполнителя необходимо использовать химические добавки. Установлено, что для бетона гидротехнических и транспортных сооружений эффективны комплексные модификаторы, включающие суперпластификатор и кольматирующую добавку или суперпластификатор и микрокремнезем. Получены модифицированные бетоны на легких заполнителях с водонепроницаемостью до W14.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** легкие бетоны, пористые заполнители, долговечность, коррозионная стойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, модификаторы, обработка заполнителя.

**Постановка проблеми.** Для цілого ряду споруд, зокрема гідротехнічних і транспортних, ефективним можна вважати застосування бетонів на легких пористих заповнювачах. Наприклад у керамзитобетону вигідно поєднуються велика міцність при малій об'ємній масі, що обумовлює високу конструктивну ефективність і довговічність при низькій теплопровідності. Якщо у цивільному будівництві обсяги застосування керамзитобетону впали через появу ефективних ніздрюватих бетонів, то в галузі залізобетонного суднобудування керамзитобетон залишається безальтернативним. Для залізобетонних плавучих споруд використання керамзитобетону дозволяє знизити вагу судна за рахунок чого підвищується його вантажопідйомність. Застосування легких бетонів також дозволяє значно поліпшити комфортність перебування людей та обладнання в приміщеннях залізобетонного судна. Тому актуальною є задача підвищення довговічності суднобудівних керамзитобетонів завдяки застосуванню сучасних модифікаторів і технологій.

Крім того у світовій практиці бетони на легких заповнювачах все частіше застосовуються для прогонних конструкцій, зокрема при будівництві мостів та шляхопроводів. З розвитком будівельних технологій відкривається перспектива отримання ефективних і довговічних бетонів на місцевих легких заповнювачах, що забезпечують необхідну конструктивну міцність. Таким чином, задача підвищення довговічності конструкційних бетонів на пористих заповнювачах є актуальною.

**Аналіз останніх публікацій.** Бетони на легких заповнювачах мають декілька істотних переваг, а саме [1]: зменшення маси конструкцій, що забезпечує зниження навантажень на фундаменти, підвищення вантажопідйомності залізобетонних плавучих споруд і зниження маси від повного навантаження конструкцій, які працюють на згин; підвищення стійкості до динамічних навантажень і вогнестійкості конструкції, забезпечення «внутрішнього догляду» бетону; підвищення продуктивності праці завдяки використанню більш простих механізмів для монтажу конструкцій.

Властивості матеріалу обумовлюються його структурою, при цьому модель структури, яка розглядається дослідником, має бути у співвідношенні з конкретним виробом або

конструкцією [2]. Наприклад, для легких бетонів пористість регулюється як на рівні заповнювач, так і на рівні розчинної складової, що дозволяє отримувати матеріали, які мають сприятливу для формування мікроклімату сорбційну вологість. При правильному призначенні складу бетони на пористих заповнювачах забезпечується первинний захист арматури від корозії без додаткових витрат і високу водонепроникність. В основі цього ефекту лежить протидія просуванню вологи, породжена стисненим повітрям у порах і капілярах заповнювача: чим глибше в товщу зерна проникає вода, тим сильніше протидія повітря (при забезпечені необхідної структури). Таким чином, при певній глибині насичення подальше проникнення води в зерно пористого заповнювача припиняється [1]. Наприклад у роботі [3] показано, що введення попередньо насиченого пористого заповнювача у склад високорухливого легкого бетону знижує капілярний підсос матеріалу і його проникність іонами хлору. Сам рівень водонепроникності легкого бетону є рівним до проникності важкого бетону з аналогічної кількістю в'язучого.

Одним з найбільш розповсюджених пористих заповнювачів для бетону є керамзит. У ньому поєднуються достатня міцність при малій об'ємній масі, що обумовлює високу конструктивну ефективність і довговічність при низькій теплопровідності [4]. Для залізобетонного суднобудування у всьому світі сьогодні застосовують саме різні види керамічних заповнювачів. Зокрема, з легкого бетону класу по міцності LC-60 та марки за середньою густиною D1950 збудована плавуча нафтова платформа Heidun, яка працює в норвезькому секторі Північного моря [5]. У склад бетону для побудованої у 1998 році нафтової платформи Hibernia (Канада) частково входив спучений сланець Stalite:  $255 \text{ кг/м}^3$  у суміші з  $430 \text{ кг/м}^3$  гранітного щебеню, що складало майже 50% від об'єму крупного заповнювача. Щільність такого «напівлегкого» бетону (semi-lightweight concrete) –  $2160 \text{ кг/м}^3$ , міцність – більше 70 МПа. Платформа експлуатується на глибині до 80 м а її корпус розрахована на 30 років роботи без ремонту [6]. Першою арктичною плавучою спорудою з бетону на пористих заповнювачах вважається кесонний Tarsiut island для моря Бофорта (Канада), який був збудований для розробки піску у 1982 році та експлуатується і сьогодні [7]. Для цієї споруди застосовано бетон щільністю  $2240 \text{ кг/м}^3$  з якого були вироблені конструкції з попередньо напруженою арматурою. Легкий бетон класу LC55 (на основі заповнювача Liapor 8) застосовано для виробництва понтонів і головного прогону плавучого мосту Nordhordland Bridge у Норвегії [8]. Завдяки зниженню ваги конструкцій та організації водонепроникних переборок плачучись мосту забезпечується навіть при затопленні двох відсіків понтону. Конструкційний легкий бетон з щільністю приблизно  $2000 \text{ кг/м}^3$  і міцністю 35 МПа застосовувався для конструкцій плавучих воріт дамби Braddock на річці Мононгієла (Пенсільванія, США). Зниження щільності бетону дозволило знизити осадку плавучої споруди понад 3 м, що було важливо для конкретних умов експлуатації [9]. Одним з новітніх проектів споруд з легкого бетону у відкритому морі є спуско-підйомний комплекс MPU Heavy Lifter [10]. 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 легкий пісок для отримання бетону класу LC35/38 при середній густині менше  $1600 \text{ кг/м}^3$ , що було необхідного для плавучості та міцності понтонів. Міжнародна федерація бетону і залізобетону (fib) ще у 1995 році сформулювала рекомендації щодо повного переходу на застосування в конструкціях нафтових платформ високоміцного легкого бетону, спочатку класів LC40-50, а потім і класів LC60-70 [11]. При цьому для такого бетону рекомендовано використовувати природні пористі заповнювачі з вулканічних або осадових гірських порід, а також штучні пористі заповнювачі, зокрема на основі продуктів переробки за екологічно чистим і нізкоенергоємними технологіям великих техногенних утворень металургії, паливної енергетики та хімічної промисловості.

В Україні також існує досвід застосування суднобудівного керамзитобетону. На Херсонському заводі залізобетонного суднобудування «Паллада» в 70-ті роки минулого століття були побудовані кілька керамзитобетонних плавучих доків [12]. Обстеження даних

плавучих споруд показали довговічність конструкцій з керамзитобетону при експлуатації в Баренцевому, Каспійському та інших морях [13]. Більшість з даних доків експлуатується і сьогодні [14]. Сьогодні Україна є однією з небагатьох країн світу, яка володіє технологією залізобетонного суднобудування.

Таким чином проведений аналіз досвіду застосування бетонів на легких заповнювачах у гідротехнічному і транспортному будівництві показав, що при правильному проектуванні їх складу подібні матеріали мають високу довговічність та задовільні фізико-механічні характеристики при забезпеченні зниження ваги конструкцій. При цьому одним з найперспективніших напрямків застосування легкого конструкційного бетону є залізобетонне суднобудування. Для більш ефективного застосування подібних матеріалів у вітчизняній і світовій практиці необхідно опрацювання наукових основ підвищення їх довговічності, а також створення практичних прийомів їх виробництва.

**Мета дослідження:** розвиток теоретичних основ і створення практичних прийомів підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд (зокрема плавучих залізобетонних) за рахунок обробки поверхні пористого заповнювача та застосування модифікаторів.

**Результати досліджень.** Бетон гідротехнічних і транспортних споруд зазнає одночасного впливу різних експлуатаційно-кліматичних факторів, які викликають руйнування його структури. Це часта зміна температури, заморожування відтаювання, зволоження та висушування, хімічні впливи, обростання водоростями й живими організмами, а також тиск і динамічний вплив рідини та льоду. Г.П. Вербецький вказував [15], що основною умовою довговічності бетону у водному середовищі є його непроникність, яка забезпечується зниженням наскрізної пористості. Однак при одночасній дії знакозмінних температур також не менш важливою можна вважати морозостійкість бетону, яка найбільш ефективно підвищується за рахунок створення системи «резервних» замкнених пор. Тому із всіх якісних характеристик бетону, що впливають на його довговічність, слід виділити його морозостійкість і непроникність.

За параметрами пористості матеріалу можна лише приблизно судити про ступень його проникності. Для капілярно-пористого матеріалу з 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 [16]. В бетонах на пористих (легких) заповнювачах капілярно-пористою структуру має не тільки цементний камінь, а й сам заповнювач. Відповідно на відміну від важких бетонів, значний вплив на подібні композити оказує процес міграції води як в заповнювач, так і з нього. В роботі [17] 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 суміші з моменту її змішування з водою і продовжуються тривалий час при твердінні бетону і експлуатації бетонної конструкції. Ці процеси в різній мірі впливають на структуру під час приготування, укладання, ущільнення суміші та при наборі міцності бетону. І.А. Іванов [1] вказував, що при оцінці структури бетону, особливо легкого, необхідно звертати увагу на два її основні критерії: однорідність і злитість. Також він вказує на те, що важливою особливістю структури бетонів на пористих заповнювачах є підвищене зчеплення його цементно-піщаної частини заповнювачем, яка є в 1.7-2.5 рази вищою в порівнянні з зчепленням з щільним щебенем.

Для бетонів характерні три можливі варіанти руйнування під впливом навантажень [18]: по розчинній частині при незруйнованому заповнювачі; по розчинній частині та по контактній зоні між розчинною частиною і заповнювачем; по заповнювачу і розчинній частині. Для бетонів на пористих заповнювачах найбільш характерним є другий і третій варіанти. Тобто сила зчеплення розчинної частини з заповнювачем є важливою особливістю структури легких бетонів, яка зумовлює іншу схему руйнування, ніж у важкого бетону. Відповідно технологічні методи, спрямовані на підвищення міцності та покращення інших

фізико-механічних показників легких бетонів, доволі суттєво відрізняються від аналогічних за суттю методів для важких бетонів.

Відомо, що фізичні сили взаємодії між цементною матрицею і крупним заповнювачем обумовлені, насамперед, стягуванням цементного каменю при його усадці, а також наявністю ділянок хімічного зчеплення і донорно-акцепторної взаємодії. Для кращої реалізації сил адгезії і тертя необхідно забезпечити щільний контакт поверхонь в'язучого і заповнювача як визначальних міжфазних поверхонь для даного композиційного матеріалу [19]. Більшість дослідників однією з причин досить щільного прилягання в'язучого до заповнювача і арматури називають наявність стягуючих сил, обумовлених усадковими деформаціями. Проте у роботі [20] не підтвердили 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 [2,21] 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 к зміні щільності в локальних ділянках матриці та провокує зміну форми поверхонь розділу та виникнення нових поверхонь. За рахунок цього з'являються порожнини у вигляді тріщин на границі з заповнювачем та у матричному матеріалі. При когезії матричного матеріалу вищої за адгезію до заповнювача тріщин 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, що твердне, при її вибірковій адгезії до заповнювача, що наприклад характерно для гранітного щебеню [21].

У роботі [22] показано, що у процесі мікроруйнування в структурі бетону найбільша кількість тріщин спостерігається саме в контактній зоні заповнювач – цементна матриця, причому тріщини по межі зчеплення частіше всього є відкритими і безперервними. Тріщини зчеплення з'являються в результаті водовідділенням і диференціальних об'ємних деформацій, тобто є різновидом технологічних тріщин [2,21]. 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 цементній матриці зазвичай поширювалися між сусідніми зернами великого 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 і порожнин, а і проникність заповнювача.

У бетоні з заповнювачем обкатаної форми в залежності від способу упаковки зерен на їх стиках утворюються порожнини з цементної 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 мікро- і макротріщин. Відповідно однією з причин зниження міцності 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. Толипіна [23] робить висновок, що негативний вплив зменшення товщини цементної оболонки на стійкість бетону залежить від усадки цементної матриці.

Проте одночасно з процесами, які описані вище і які є спільними для бетонів на різних типах заповнювача, 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 на різних етапах формування та існування

структури залежать від властивостей як заповнювача, зокрема його поверхні, так і від властивостей цементно-піщаної матриці. З одного боку, зерна пористого заповнювача адсорбують воду з навколишнього розчину, що поліпшує зчеплення заповнювача з розчином, перешкоджає утворенню седиментаційних пустот і сприяє формуванню навколо зерен шару зі зміцненого розчину. 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. При достатньому ступені заповнення вологою порожнин заповнювача в процесі його попереднього перемішування з водою в бетонозмішувачі подальша адсорбція води з розчину буде мінімальною і обумовленою насамперед повільним поступовим проникненням вологи вглиб зерна заповнювача. Тобто при використанні більш крупного заповнювача процес адсорбції вологи буде протікати довше, ніж при використанні більш дрібних фракцій (гранул).

З часом в процесі структуроутворення (твердіння бетону), як відомо, буде проходити зворотній процес міграції вологи з заповнювача до розчинної частини, що зменшує усадку останньої і сприяє кращій гідратації цементу. Протікання цього процесу також залежить від капілярно-пористої структури і крупності заповнювача. Також необхідно враховувати набухання і усадку самого зерна заповнювача. Тобто по мірі зволоження, яке відбувається в процесі приготування і укладання бетонної суміші, пористі заповнювачі в більшій чи меншій мірі збільшуються у об'ємі. При втраті вологи проходить зворотній процес – усадка зерен заповнювача.

В залежності від адгезійних властивостей поверхні заповнювача змінюється вплив його крупності на міцність бетону. При забезпеченні достатньої адгезії заповнювача до цементної матриці при підвищенні його крупності міцність бетону зменшується. У випадку незначної адгезії зерен навпаки – зростає при використанні більш крупного заповнювача [24]. Крім того, при підвищенні крупності зерен заповнювача зменшується однорідність бетону по міцності, відношення міцності на згин до міцності при стиску, а також границі мікротрещиноутворення [25].

Для бетонів на пористих заповнювачах, які з одного боку мають гарну адгезію до цементної матриці, а з іншого – змінюють свій об'єм через набухання і висушування, корисними є як технологічні операції, спрямовані на зменшення водопоглинання заповнювача, так і спрямовані на покращення його адгезії. Для конструкційних легких бетонів високої міцності також актуальною є задача підвищення міцності заповнювача. Це пов'язано з тим, що для таких матеріалів в значній мірі саме цей показник, а не витрата в'язучого, обмежує їх максимальну міцність. Обидві окреслені вище задачі було запропоновано вирішити двома методами, кожен з яких має свої особливості.

Перший метод – гідрофобізація поверхні пористого заповнювача. Це дозволяє знизити адсорбцію води з цементної матриці (розчинної частини), за рахунок чого підвищити В/Ц суміші без погіршення її технологічності, а також зменшити зміни об'єму зерен заповнювача та матриці в процесі структуроутворення [26]. Крім того, гідрофобізація пористого заповнювача сприяє перетворенню значної частини його пор на замкнуті, що знижує проникність композиту в цілому і сприяє підвищенню його довговічності. Для бетонів гідротехнічних і транспортних споруд гідрофобізація заповнювача також дозволяє знизити експлуатаційну вологість матеріалу (в першу чергу – самого заповнювача), що підвищує міцність у вологих умовах експлуатації а для закритих приміщень також підвищує комфортність експлуатації. Важливо зазначити, що ступень гідрофобізації має бути оптимальною для кожного типу бетону в залежності від властивостей заповнювача і цементної матриці. Тобто необхідно зберігати певний баланс між зниженням водопоглинання заповнювача і його адгезією до цементної матриці.

Проведені нашим науковим колективом експериментальні дослідження суднобудівного керамзитобетону із застосуванням гідрофобізації поверхні гравію показали [27], що даний технологічний прийом дозволяє підвищити водонепроникність легкого бетону на 1 марку

(2 атм.). Також він приблизно на 50 циклів підвищує морозостійкість керамзитобетону та на 10-12% його міцність при стиску. Ще досить важним ефектом було зниження приблизно на 20% експлуатаційної вологості легкого конструкційного бетону в умовах постійного контакту з водою. Гідрофобна обробка проводилась емульсією кремнійорганічної рідини 136-157М (стара назва ГКЖ-94) різної концентрації. Була встановлена оптимальна концентрація гідрофобізатору у емульсії – 0.6-0.7%. Подальше підвищення концентрації кремнійорганічної рідини неефективно. Основним недоліком такого прийому модифікації є необхідність проведення додаткової технологічної операції при виробництві бетону.

Другий метод – обробка пористого заповнювача цементною суспензією. Обробка проводиться безпосередньо при змішуванні, тобто цей прийом технологічно є простішим. Для обробки у змішувач подається вся необхідна вода з 30% від необхідної на заміс кількості портландцементу. Дали на протязі приблизно хвилини готується суспензія (проводиться перемішування) у яку потім подається пористий заповнювач. Після ще приблизно однієї хвилини перемішування заповнювача у цементній суспензії для здійснення безпосередньо обробки, у змішувач подається решта компонентів легкобетонної суміші. Оптимальна кількість цементу у суспензії була визначена за результатами попередніх експериментів при кількості в'язучого у бетоні від 400 до 500 кг/м<sup>3</sup>. Важливо зазначити, що даний технологічний прийом відрізняється від «класичної» технології приготування легкобетонної суміші лише тим, що у змішувачі пористий заповнювач насичується не водою, а цементною суспензією, через це загальний час перемішування збільшується приблизно на 1 хвилину.

Обробка цементною суспензією зміцнює поверхневий шар крупного пористого заповнювача та перехідної зони між заповнювачем і розчинною частиною бетону. Тобто підвищує адгезію заповнювача до матриці. Справедливо відзначити, що ступень як зміцнення заповнювача, так і зміни адгезії залежить від структури зерен заповнювача. Також важливим ефектом обробки є те, що вона дозволяє покращити однорідність заповнювача завдяки заповненню його тріщин, пор та інших порожнин цементним тістом. Останній ефект є найбільш важливим при використанні природніх пористих заповнювачів, які зазвичай є досить різномірними по щільності та міцності навіть у межах однієї партії. Більш пористі та тріщинуваті зерна, які є слабкішими і відповідно руйнуються при меншому навантаженні та є більш проникними для рідини і газу, завдяки насиченню в'язучим менше відрізняються від більш щільних зерен, що робить структуру бетону одноріднішою.

Нашим науковим колективом проводилися дослідження ефективності технологічного прийому обробки цементною суспензією заповнювача суднобудівних керамзитобетонів і бетонів на щебені з перекристалізованого вапняку. Було встановлено, що для суднобудівних керамзитобетонів, в яких використовується керамзитовий гравій крупністю до 10 мм, попередня обробка дозволяє підвищити міцність при стиску на 5-10% і водонепроникність матеріалу на величину до однієї марки. Для бетонів на вапняковому заповнювачі (фракція щебеню 5-20 мм, насипна щільність 1200 кг/м<sup>3</sup>, марка по міцності 600) обробка цементною суспензією підвищує міцність при стиску на 10-15% і водонепроникність у середньому на одну марку. При цьому максимальна водонепроникність модифікованого суперпластифікатором і мікрокремнеземом керамзитобетону та бетону на обробленому щебені досягала марки W14 [28,29]. Таким чином метод обробки цементною суспензією є більш ефективним для бетонів на природніх пористих заповнювачах, проте також є досить ефективним для підвищення довговічності конструкційних керамзитобетонів.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** В цілому обидва проаналізовані методи модифікації поверхні пористого заповнювача дозволяють підвищити довговічність конструкційних бетонів на легких заповнювачах для гідротехнічних і транспортних споруд завдяки підвищенню водонепроникності та міцності матеріалу. При цьому метод гідрофобізації поверхні є більш раціональним при виробництві бетонів конструкцій, для яких важливою є експлуатаційна вологість. Зокрема це конструкції плавучих доків, готелів, домів та споруд для освоєння континентального шельфу. Метод обробки пористого заповнювача цементною суспензією є більш ефективним для бетонів на природніх пористих



заповнювачах завдяки підвищенню їх однорідності. Також він досить ефективно підвищує довговічність конструкційних керамзитобетонів завдяки сприянню утворенню замкнутої пористості у заповнювачі. Обидва проаналізовані методи позитивно впливають на міцність заповнювача, проте по різному на його адгезію до цементної матриці. Відповідно від співвідношення величин когезійної і адгезійної міцності компонентів в композиті, а також від крупності заповнювача, можна рекомендувати тій чи інший спосіб модифікації його поверхні для досягнення підвищення довговічності бетону.

Також важливо відзначити, що задача підвищення довговічності бетонів на пористих заповнювачах для гідротехнічних і транспортних споруд має вирішуватися комплексно. Тобто склад бетону необхідно проектувати з врахуванням забезпечення мінімальної проникності і високої морозостійкості, для чого мають бути застосовані сучасні модифікатори. Зокрема більшість дослідників і власні дослідження авторів показали високу ефективність комплексних добавок, які складаються з суперпластифікатору і кольматуючої добавки або з суперпластифікатору і мікрокремнезему.

Таким чином проведені дослідження дозволили розвинути теоретичні основи отримання бетонів на легких заповнювачах із заданими експлуатаційними властивостями та підвищеною довговічністю для гідротехнічних і транспортних споруд. Запропоновано практичні технологічні прийоми, які дозволяють знизити проникність бетонів і перетворити більшість пор заповнювача на замкнуті, за рахунок цього підвищується довговічність композиту.

### Література

1. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.
2. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. – Одесса: Полиграф, 2016. – 244 с.
3. 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.
4. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Керамзит: опыт и перспективы развития производства и применения – Строительные материалы, 2004, № 8. – С. 19-20.
5. 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.
6. Aitcin P.-C. High performance concrete (Modern concrete technology). – E & FN Spon:2011 – 624 p.
7. Fitzpatrick J., Stenning D.G. Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea / J. Fitzpatrick, //15th Annual offshore technology conference, Houston, United States; Journal Volume: 2; 2-5 May, 1983, Paper No. OTC 4517 – P. 51-60.
8. 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.
9. 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.
10. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology –Science press, Beijing, China, 2017. – 280 p.
11. 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.
12. 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.
13. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с.
14. 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.

15. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
16. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. – М.: Энергия, 1968 – 192 с.
17. Ортлихер Л.П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях – М.: Стройиздат, 1988. – 136 с.
18. Корнилович Ю.Е. Исследование прочности растворов и бетонов. – К.: Госстройиздат УССР, 1960. – 220 с.
19. Гладышев Б.М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетонов. – Харьков: Вища школа, 1987.– 168 с.
20. Булатов А.И., Видовский А.Л. Обжатие цементным камнем заполнителей в бетоне – Бетон и железобетон, 1985, №3.– С.24–26.
21. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. – Одесса: ТЕС, 2010. – 176 с.
22. 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.
23. Тольпина 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.
24. Грушко И.М. Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1973.– 155 с.
25. Зоцук Н.И. Влияние крупности заполнителя на прочность бетона – Бетон и железобетон, 1988, №1 – С.8-9
26. Кучеренко А.А. О механизме гидрофобизации бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 35. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. – С. 207-213.
27. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures / [A. Mishutin, S. Kroviakov, N. Mishutin, V. Bogutsky ]//ICCS16. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability, held in Madrid, Spain on 13 - 15 June 2016 – P. 741-747
28. Мішутін А.В., Кровяков С.О., Полторапавлов А.О. Довговічність бетонів на вапняковому щебені, обробленому цементною суспензією // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. №67 – Одеса: ОДАБА, 2017. – С. 89-95
29. Застосування методів планування експерименту при дослідженні властивостей керамзитобетону / [Кровяков С.О., Мішутін А.В., Піщев О.В., Заволока М.В.] // Матеріали міжнародного науково-технічного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» – Одеса: ОДАБА, 2016. – С.65-67

### References

1. Ivanov I.A. Lightweight concretes on artificial porous aggregates – Moscow, Stroyizdat, 1993. – 182 p. (in Russian)
2. Sukhanov V.G., Vyrovoy V.N., Korobko O.A. Structure of the material in the structure of the constructions – Odessa, Poligraf, 2016. – 244 p. (in Russian)
3. 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.
4. Gorin V.M., Tokareva S.A., Kabanova M.K. Expanded clay: experience and perspectives of production and application development – Building materials, 2004, № 8. – P. 19-20. (in Russian)
5. 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.
6. Aitcin P.-C. High performance concrete (Modern concrete technology). – E & FN Spon:2011 – 624 p.
7. Fitzpatrick J., Stenning D.G. Design and construction of Tarsiut island in the Canadian Beaufort Sea / J. Fitzpatrick, //15th Annual offshore technology conference, Houston, United States; Journal Volume: 2; 2-5 May, 1983, Paper No. OTC 4517 – P. 51-60.
8. 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.
9. 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.

10. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology – Science press, Beijing, China, 2017. – 280 p.
11. 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.
12. Mishutin V.A., Mishutin N.V., Yakovleva R.V. Application of lightweight shipbuilding concretes for construction of marine reinforced concrete vessels and floating docks – Technology of shipbuilding, 1986, №8. – P.23–25. (in Russian)
13. Mishutin A.V., Mishutin N.V. Increase of durability of concrete of marine reinforced concrete floating and stationary structures – Odessa, Even, 2011. – 292 p. (in Russian)
14. Slutsky N.G., Maloman V.F., Rashkovsky A.S. Construction of reinforced concrete floating structures in Ukraine / Fisheries of Ukraine. Special issue "Marine Technologies: Problems and Solutions - 2004", Kerch, 2004, № 7. – P. 23-26. (in Russian)
15. Verbetzky G.P. Strength and durability of concrete in an aquatic environment – Moscow, Stroyizdat, 1976. – 128 p. (in Russian)
16. Chekhovsky Yu.V. Reducing the permeability of concrete – Moscow, Energia, 1968 – 192 p. (in Russian)
17. Orentlicher L.P. Concretes on porous aggregates in prefabricated reinforced concrete structures – Moscow, Stroyizdat, 1988. – 136 p. (in Russian)
18. Kornilovich Yu.E. Investigation of the strength mortars and concretes. – Kiev. : Gosstroyizdat of the Ukrainian SSR, 1960. – 220 p. (in Russian)
19. Gladyshev B.M. Mechanical interaction of structural elements and strength of concrete. – Kharkov: Vishcha shkola, 1987. – 168 p. (in Russian)
20. Bulatov AI, Vidovsky A.L. Compression by cement stone aggregates in concrete – Concrete and reinforced concrete, 1985, №3. – P.24-26. (in Russian)
21. Vyrovoy V.N., Dorofeev V.S., Sukhanov V.G. Composite building materials and structures. Structure, self-organization, properties. – Odessa, TES, 2010. – 176 p. (in Russian)
22. Klochko B.G., Kushvid A.A. Cracking of concrete in the process of exploitation of structures / Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2004, Issue 3. – P. 124-126. (in Russian)
23. Tolypin N.M. Increase of corrosion resistance of concrete by rational choice of binder and fillers: the thesis of a Dr.Sci.Tech. : 05.23.05. – Belgorod, BSTU, 2014. – 354 p. (in Russian)
24. Grushko I.M., Ilyin A.G., Rashevsky S.T. Strength of concrete for tension – Kharkov, Kharkov University, 1973. – 155 p. (in Russian)
25. Zoshchuk N.I. Effect of aggregate size on the strength of concrete – Concrete and reinforced concrete, 1988, №1 – P.8-9 (in Russian)
26. Kucherenko A.A. On the mechanism of hydrophobization of concrete / Bulletin of the Odessa state academy of civil engineering and architecture. №35. – Odessa, Zovnisreklamservice, 2009. – P. 207-213. (in Russian)
27. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures / [A. Mishutin, S. Kroviakov, N. Mishutin, V. Bogutsky] // ICCS16. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability, held in Madrid, Spain on 13 - 15 June 2016 – P. 741-747
28. Mishutin A.V., Krovyakov S.O., Poltorapavlov A.O. Durability of concrete on limestone crushed stone treated with a cement slurry // Bulletin of the Odessa state academy of civil engineering and architecture, №67 – Odessa, OSACEA, 2017. – P. 89-95 (in Ukrainian)
29. Application of the methods of experiment planning in the study of the properties of expanded clay concrete / [Krovyakov S.O., Mishutin A.V., Pishchev O.V., Zavaloka M.V.] // Materials of the international scientific and technical seminar "Modeling and optimization of building composites" – Odessa, OSACEA, 2016. – P.65-67 (in Ukrainian)