

УДК 666.972.16

*О. Ю. Дорошенко, к.т.н., доцент
(доцент кафедри «Будівельні конструкції і споруди» Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)
Ю. М. Дорошенко, к.т.н., доцент
(професор кафедри «Будівельні матеріали і хімія» Національного транспортного університету, м. Київ)*

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

У статті розглянуті питання підвищення стійкості бетону транспортних конструкцій до дії заморожування й відтавання за рахунок зміни його структури з метою створення системи замкнутих пор малого діаметра при одночасному зниженні капілярної пористості. Додаткового підвищення морозостійкості можна домогтися за рахунок дисперсного армування.

Ключові слова: бетон, транспортні конструкції, структура, замкнуті пори, капілярна пористість.

В статье рассмотрены вопросы повышения стойкости бетона транспортных конструкций к действию замораживания и оттаивания за счет изменения его структуры с целью создания системы замкнутых пор малого диаметра при одновременном снижении капиллярной пористости. Дополнительного повышения морозостойкости можно добиться за счет дисперсного армирования.

Ключевые слова: бетон, транспортные конструкции, структура, замкнутые поры, капиллярная пористость.

Довговічність бетону, визначається в основному швидкістю корозійних процесів інтенсивності всіх видів корозії залежить від щільності й проникності бетону [1]. Проблеми підвищення водонепроникності бетонів присвячені роботи В. І. Бабушкіна, В. В. Стольникова й інших вчених. Основним структурним показником, що визначає проникність бетону в умовах напірної дії води, є його порово-капілярна структура. В. М. Москвін [1] розрізняв два типи структур у цементному камені: пори, розділені твердою фазою й ізольовані. Самі пори являють собою канали різного ступеня звивистості. В роботі [2] розрізняються пори гелеві, контракційні й капілярні. А. Е. Шейкін [3] вважає, що пори в цементному камені й бетоні представлені переважно у вигляді з'єднаних тонких каналів капілярів, які на більш пізніх стадіях твердіння бетону роз'єднуються цементним гелем. У гелі теж присутні пори, однак набагато менших розмірів.

© Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М., 2014

Відстань між поверхнями твердих фаз цементного гелю, тобто середній розмір гелієвих пор, становить усього $15...30 \times 10^{-8}$ см, однак Т. К. Пауерс [4] вважав, що через них може проникати рідина.

Залежно від розмірів і властивостей води, що заповнює пору, Ф. М. Іванов [1] розрізняв: ультрамікропори з діаметром менш 100 \AA , у яких є проміжки, близькі до розмірів молекул і в яких молекули води знаходяться під впливом дії поверхневих сил твердої фази і мають аномальні властивості; мікропори розміром $100 - 1000 \text{ \AA}$, у яких властивості води значною мірою обумовлюються впливом поверхні твердої фази, особливо з урахуванням неоднорідності перетину пор; макропори діаметром більше 1000 \AA , у яких властивості основної кількості води, крім її сорбційного шару, не відрізняються від властивостей вільної води. При цьому в дійсності пори мають досить складну неправильну форму змінного перетину, простір яких піддається дії молекулярних поверхневих сил.

В. М. Москвін і Г. І. Горчаков [1, 2] вважали основною умовою для непроникності бетону рідинами створення тонкопористої структури матеріалу з перевагою пор розміром менше 1 мікрона. Про значення розміру пор у керуванні водонепроникністю бетону йде мова у роботах [5], де засвідчено, що при однаковому загальному об'ємі пор проникність може відрізнятися в десятки разів залежно від їхнього розміру.

Ю. В. Чеховський [6] аналогічно стверджував, що по параметрах пористості бетону можна лише приблизно робити висновки про його проникність. Для матеріалу що має з'єднані капіляри змінного перетинання, водонепроникність визначається діаметром каналів, а не середнім розміром більших і малих пор. Оскільки пори з'єднуються саме капілярами, їхня характеристика є визначальною для проникності бетону. Ф. М. Іванов також довів, що проникність бетону залежить не від загальної або диференціальної пористості, а від наскрізної або ефективною [7].

Вплив виду великого заповнювача на морозостійкість вивчено у роботі [8]. Показано, що бетони на щебені за інших рівних умов мають у три рази більшу морозостійкість, ніж бетони на гравії. Це пояснювалося тим, що щебені за рахунок своєї шорсткуватої та кузоватої форми «створює більш щільну структуру заповнювачів», ніж гравій, а також має краще зчеплення із цементним каменем.

В. Б. Ратинів вказував [9], що при прогнозуванні довговічності бетону в сульфатомістких середовищах слід враховувати, з одного боку, кінетику утворення гідросульфоалюмінату кальцію, тобто хімічні аспекти сульфатостійкості, а з другого, умови передачі етрингітом кристалізаційного тиску на стінки пор. Можливості й шляхи зменшення внутрішніх напружень, що виникають при кристалізації гідросульфоалюмінату кальцію залежать від фізичних аспектів корозії.

Заповнювачі бетону можна вважати стійкими (інертними) до хімічних впливів, тобто довговічність у сульфатомістких середовищах забезпечується стійкістю цементного каменю. Серед двох найвідоміших методів підвищення сульфатостійкості бетону – застосування пуцоланових добавок і обмеження вмісту C_3A в клінкері, але пуцоланові добавки можуть негативно позначатися на проникності бетону й на величинах його набухання й усадки. Таким чином, для забезпечення довговічності бетону треба застосовувати сульфатостійкі цементи, у яких обмежений вміст трикальцієвого алюмінату. Крім того, зниження проникності бетону є додатковим чинником, що знижує інтенсивність всіх хімічних впливів. Н. К. Розенталь вказував [10], що з підвищенням водонепроникності бетону з марки W8

до W20 розрахунковий термін служби бетону в сульфатних середовищах збільшується в півтора – три рази.

В. Б. Ратинів і Т. І. Розенберг відзначали аналогію між деструктивними процесами, що проходять у бетоні при морозному руйнуванні або під дією сульфатів [5], при яких руйнування протікає через утворення й розвиток мікротріщин. Опираючись на такі висновки можна також стверджувати, що методи керування структурою, застосовувані з метою підвищення морозостійкості, також сприяють додатковому забезпеченню довговічності бетону в сульфатному середовищі.

У цілому, можна визнати, що для бетону швидкість хімічних реакцій набагато більше швидкості дифузії речовин у пористій структурі, а відповідно вирішальним фактором у більшості випадків є її проникність [10]. Тобто для зниження впливу солей і агресивних хімічних середовищ на структуру бетону необхідно максимально знизити його проникність. Для підвищення довговічності матеріалу в умовах корозії третього виду можна застосовувати методи, аналогічні методам підвищення водонепроникності й зниження капілярного підсмоктування.

Для зниження деструктивних дій усадки й набухання, як свідчать наукові дані, необхідно оптимізувати крупність (зерновий склад), кількість і співвідношення заповнювачів для бетону. Також домогтися значного ефекту в зниженні усадки матеріалу і його технологічного пошкодження дозволяє застосування тонкодисперсних наповнювачів. Бажано мінімізувати витрати цементу в бетоні, як основного джерела гелевої складової [11], однак дорожні бетони вимагають досить значних дозувань цементу для забезпечення потрібних властивостей, тобто даний метод практично не застосовуваний.

Основним показником якості, що визначає довговічність матеріалу в умовах динамічних впливів, є його ударостійкість. Для підвищення ударостійкості треба максимально знизити крихкість матриці матеріалу. Одним з відомих методів зниження крихкості є застосування часток, що демпфірують, [12] – керамзитового піску тощо

Розглядаючи дрібнозернистий бетон (МЗБ), можна зробити висновок про доцільність його застосування в дорожніх цементобетонних покриттях замість звичайного бетону. Це підтверджується численними дослідженнями в цьому напрямі [13]. При цьому встановлено, що властивості МЗБ визначаються тими самими факторами, що й звичайного бетону. Однак, МЗБ має деякі особливості, обумовлені його структурою, для якої характерні більша однорідність і дрібнозернистість, високий зміст цементного каменю, відсутність твердого кам'яного кістяка, підвищена пористість і питома поверхня твердої фази.

У роботі [14], показано, що міцність пористих матеріалів визначається кількістю числа контактів на одиницю поверхні й середньої міцності індивідуального контакту. При переході до МЗБ, зменшення розмірів часток і ущільнення їхнього упакування приводить до збільшення числа контактів. У цьому випадку збільшується й сумарна сила зчеплення між цементним каменем і заповнювачем, що відіграє важливу роль у сприйнятті напруг. Отже, відповідно до структурної теорії міцності бетону, це має впливати на якість МЗБ.

Вивчаючи механізм руйнування бетонів різної структури, автор [15] дійшов висновку про те, що для бетону дорожнього покриття, що сприймає більші змінні розтяжні навантаження, оптимальна крупність заповнювача не повинна бути більше 10 мм. У роботах [30 і ін.] відзначається можливість одержання бетону більш високої міцності на розтягування при зменшенні розміру міжзернових прошарків

цементного каменю й збільшенні до максимально можливої товщини прошарків розчинної складової. На думку [16], це пояснюється тим, що в МЗБ первинні активні тріщини зароджуються при більш високих середніх напругах, ніж у грубозернистого бетону. Крім того, коли активні тріщини зустрічають міцні зерна заповнювача, то вони припиняють свій розвиток і поруч утворюються нові тріщини, тобто має місце ефективне гальмування росту активних тріщин структурним кістяком. У зв'язку із цим, МЗБ відрізняються підвищеною міцністю на розтягання, більшою деформативністю й витривалістю. Це підтверджується й дослідженнями, наведеними в [17], де показано, що при підвищенні коефіцієнта розсунення зерен щебенів розчинної складової з 1,7 до 2,5, тобто при переході до більш дрібнозернистої структури з більшою контактною поверхнею міцність бетону на розтягання при вигині збільшується на 5...10%.

МЗБ краще сприяє напрузі розтягування [18]. Відношення $R_{\text{виг}}/R_{\text{ст}}$ у піщаного бетону дорівнює 0,15...0,25, а у звичайного бетону – 0,10...0,15. Міцність МЗБ на розтягання в порівнянні з рівномічним по стиску звичайним, важким бетоном може бути на 20...30% вище. Це пояснюється зниженням зі зменшенням крупності заповнювача ймовірності появи мікрodefектів, обумовлених усадкою й седиментаційними явищами при твердінні цементного клею, а також збільшенням однорідності бетону. Підвищена міцність МЗБ на розтягування повинна вплинути на забезпечення довговічної роботи цементобетону в дорожніх покриттях.

Встановлено, що МЗБ більш деформативний, ніж бетон з великим заповнювачем [19]. За даними вказаних дослідників граничні деформації при руйнуванні МЗБ трохи перевершують аналогічні деформації звичайного бетону. Модуль пружності МЗБ на 30...50% нижче, ніж у рівномічних звичайних бетонів. Відсутність у МЗБ твердого каркаса (відсутність великого заповнювача) і більш високий зміст цементного каменю є причиною його підвищеної деформативності, що на 20...25% більше, ніж у звичайного бетону. У роботі [19] при вивченні закономірності зміни міцності МЗБ в армоцементних конструкціях було виявлено також, що при $V/Ц = 0,30$ залежність міцності від витрати цементу пряmlinійна. Зменшення витрати цементу призводить до різкого зниження міцності бетону. А при $V/Ц = 0,40$ і вище найвища міцність бетону досягається при оптимальному співвідношенні між цементом і піском, при якому досягається максимальна щільність бетонної суміші. Отже, шляхом регулювання співвідношення між цементом і піском, а також $V/Ц$, можна одержати МЗБ із заданою міцністю. Ці особливості можна пояснити, розглядаючи структуру МЗБ при різних значеннях $Ц/П$ і $V/Ц$.

Витрати цементу й $V/Ц$ визначають якість і консистенцію цементного тіста й якість цементного каменю. Цементне тісто в бетоні витрачається на обмазку зерен заповнювача й заповнення міжзернових порожнеч. При недостатній кількості цементного тіста, його вистачає тільки на обмазку зерен і тому міжзернові порожнечі залишаються незаповненими, а при надлишку цементного тіста, воно заповнює всі міжзернові порожнечі й розсовує зерна заповнювача на певну відстань. Це значить, що за інших рівних умов відносний вміст піску ($Ц/П$) буде визначати структуру МЗБ.

У зв'язку із цим у роботах [20], виділяється два типи конгломератної структури МЗБ. Перший тип структури – це щільні МЗБ із мінімальним змістом затисненого повітря ($V_B < 3...5\%$). У них значна концентрація цементного каменю стосовно міжзернового обсягу порожнеч забезпечує поряд з обмазкою поверхні заповнювача й повне заповнення цього обсягу; структура бетону характеризується підви-

щеною умовною товщиною шару цементного каменю на одиницю поверхні заповнювача, що становить більше 20...25 мкм. Для цієї структури залежність $R_6 = f(V/C)$ практично не пов'язана з концентрацією цементного каменю.

Другий тип структури характеризується підвищеним змістом затисненого повітря ($V_B > 3...5\%$); менш значною концентрацією цементного каменю, що забезпечує обмазку зерен заповнювача, але неможливістю повністю заповнити міжзерновий обсяг; у цій структурі величина умовної товщини шару цементного каменю на одиницю поверхні заповнювача становить 16...19 мкм.

При переході до другого типу структури відзначається більше стабільна залежність міцності на розтягання при вигині від параметрів складу через підвищену роль цементного каменю як мінерального клею. На залежність $R_6 = f(V/C)$ впливають такі фактори, як концентрація цементного каменю, обсяг затисненого повітря в бетоні й т.п. При зближенні зерен заповнювача, тобто зменшенні товщини прошарків цементного каменю, структура цементного каменю значно зміцнюється за рахунок взаємного переплетення контактних шарів. У цьому випадку зростає структуроутворююча роль заповнювача й відносна частка зусилля, що припадає на нього при навантаженні. Вона виражається не тільки в зниженні вмісту цементного каменю й зменшенні усадочних деформацій, але й у фізико-хімічній взаємодії з новоутвореннями рідкої фази на різних етапах твердіння бетону, що приводить до утворення дифузійних структурованих оболонок у цементному камені навколо зерен заповнювача.

Перехід до структури другого типу викликає збільшення обсягу затисненого повітря, але при цьому характер пористості бетону теж змінюється. Зниження ступеня заповнення пор водою до $K_{нас} = 0,50...0,60$ (у структурі першого типу $K_{нас} = 0,70...0,75$) свідчить про утворення в бетоні систем умовно-зачинених пор [21]. Підвищений обсяг повітря в бетоні при його умовно-зачиненому характері в кількості 5...6 і навіть до 1% забезпечує бетону високу морозостійкість і довговічність. Однак, розмір повітряних пор повинен перебувати в певних межах, які вважаються найефективнішими. По даних певних дослідників, ефективний розмір пор коливається від 10 до 500 мкм [42], від 1...2 до 300... 500 мкм [15], від 50 до 250 мкм [1], від 25...350 мкм до 300 мкм [4]. А на думку [23], неефективними є повітряні пухирці діаметром більше 100 мкм, які знижують міцність бетону. Причини зниження міцностних показників автор пояснює як наявністю пухирців розміром 250...300 мкм, так і злиттям або утворенням скупчення маленьких пухирців навколо більших. Оптимальним вважається рівномірний розподіл залученого повітря в розчинній частині навколо зерен піску.

Крім вмісту повітряних пор і їхніх розмірів низці досліджень вказується й на перевагу середньої відстані між порами [22], або фактора відстані [4]. Воно в бетонах високої морозостійкості, якими повинні бути дорожні бетони не повинне перевищувати 0,20 і 0,25 мм [9, 42].

Структура МЗБ являє собою агрегати піску, усередині яких відсутнє цементне тісто. При цьому, розміри й кількість агрегатів залежать від витрати цементу. Міцностні властивості бетону залежать від міцності цементного каменю й критеріїв структури (розміру агрегату й ступеня агрегування). Тоді фізико-механічні властивості МЗБ будуть тим краще, чим більше в структурі бетону окремих зерен піску й агрегатів [44].

Останнім часом як загальну кількісну характеристику будови МЗБ автори роботи [25] використовують умовний критерій L , що являє собою відношення

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

об'ємної концентрації цементного каменю в бетоні при заданому значенні істинного водоцементного відношення до сумарної пористості бетону, що складається з пористості цементного каменю, пористості заповнювача й пористості, утвореної залученим повітрям:

$$L=C/P_0 = [C/\rho_c + (B/C)_{icm}C] / [B - 0,21 \alpha C + P_3 + P_{3n}] \quad (1.1)$$

де C – об'ємна концентрація цементного тіста в бетонній суміші наприкінці періоду формування структури, %;

C, B – витрати цементу й води, кг/м³;

ρ_c – густина цементу, кг/м³;

$(B/C)_{icm}$ – істинне водоцементне відношення;

P_0, P_3, P_{3n} – пористість сумарна, заповнювача й утворена залученим повітрям, %;

α – ступінь гідратації цементу.

У цій роботі важливе значення надається структурно-технологічним характеристикам C і $(B/C)_{icm}$. На думку авторів, використання їх дозволяє одержати уточнені залежності властивості бетонної суміші й бетону при значних коливаннях складу бетону й властивостей вихідних матеріалів.

До основних недоліків МЗБ належать: підвищена водопотреба і витрата цементу в порівнянні зі звичайним важким бетоном. У першу чергу – це негативний вплив на структурну пористість, деформативність, а також довговічність бетону, особливо, в агресивних середовищах. Таким чином, зниження витрати цементу не суперечить принципу створення оптимальної структури МЗБ і є найважливішим напрямком удосконалювання й розвитку технології МЗБ, що обумовлює його широке застосування, зокрема, у транспортному будівництві. На це ж спрямоване й зниження повітровтягування [26], що може бути забезпечено й іншими більше прогресивними методами.

Таким чином, МЗБ по своїй структурі й будівельно-технічним властивостям можуть бути ефективним матеріалом для будівництва транспортних споруджень.

У той же час аналіз експлуатаційної стійкості бетону, у т.ч. і МЗБ, показує на передчасне руйнування дорожніх цементобетонних покриттів [1].

Вимоги до бетонів для транспортного будівництва, у тому числі й дорожніх цементобетонних покриттів і специфіка виробництва бетонних робіт викликає необхідність застосування цілої низки заходів, що враховують вплив як матеріалознавських, так і технологічних факторів. При цьому одним з основних вимог пропонованих нормативно-технічною документацією до бетонів транспортних споруджень, включаючи й дорожні цементобетонні покриття, є забезпечення високої морозостійкості, у тому числі в розчинах антиожеледних солей і водонепроникності (марка по морозостійкості – не нижче F150 у солях, марка по водонепроникності W10...W16).

Це досягається за рахунок максимального зниження витрати води й утворення в бетонних сумішах диспергированої повітряної фази (5...7% по об'єму для дорожніх і аеродромних покриттів; фактор розшарування – 100...250 мкм) бажано при застосуванні бездобавочного портландцементу зі змістом C_3A не більше 7...8%, що важливо при бетонуванні конструкцій з більшим модулем поверхні, якими є дорожні покриття ($M > 5$). Це має сприяти підвищенню експлуатаційних властивостей бетонів, зокрема й МЗБ.

У цей час для підвищення експлуатаційних властивостей МЗБ використовують різні способи. Широке застосування одержало модифікування бетону й бе-

тонної суміші різними добавками, хімічними й мінеральними (зокрема й комплексними) [5].

За кордоном, починаючи з 1986 р., у світовій будівельній практиці намітилося широке застосування бетону, що одержав назву High Performance Concrete (HPC), «високоякісний бетон». Поява бетону HPC викликано прагненням усунути недостатню довговічність, що виявилася в ряді випадків, будинків і споруджень, у тому числі й транспортних, з бетону й залізобетону.

За даними журналу «International Construction» дорожнє будівництво в докризовий період нарощувалося в багатьох закордонних країнах (у США – ріст на 7...10 %, що потребує фінансування в 30 млрд доларів).

Все це вказує на те, що повинні проводитися прискореними темпами дослідження з одержання HPC для дорожнього будівництва. Дотепер ці дослідження в основному проводилися на звичайних важких бетонах і значно менше – на дрібнозернисті.

МЗБ по своїй структурі й будівельно-технічних властивостях можуть стати ефективним матеріалом для дорожнього будівництва. Недостатні дослідження з одержання HPC на МЗБ, показують, що дослідження в цьому напрямку є винятково актуальними.

Для підвищення довговічності бетону необхідно знизити рівень його внутрішнього напруженого стану до величини, що забезпечує його тривалу роботу (збереження розрахункової міцності) з обліком транспортних, кліматичних, експлуатаційних (боротьба з ожеледдю) й інших впливів.

Це можна забезпечити створенням спеціальної структури бетону, наприклад, шляхом модифікування різними шляхами, що дозволяє:

- створити систему повітряних умовно-зачинених пор, що виконують функції резервних, у які під впливом гідравлічного тиску віджимається льодом рідка фаза при дії морозу; у результаті будуть зменшені сумарні внутрішні напруги, що розтягують; обсяг таких умовно-замкнених пор повинен бути в межах 3...7%, і вони створюються за допомогою, наприклад, повітровтягуючих хімічних добавок;

- зменшити концентрацію великого заповнювача в бетоні, оскільки поверхня контакту щебенів з розчином є зоною виникнення внутрішніх напружень в умовах заморожування-відтавання; зі зменшенням вмісту щебенів (або його виключення) зростає позитивна роль контактних шарів цементного каменю, що володіють підвищеними щільністю й міцністю; збільшується інтегральна сила внутрішнього зчеплення; найбільший ступінь зчеплення модифікації відповідає повному виключенню щебенів зі складу бетону й переходу на дрібнозернисті структури;

- мінімізувати обсяг капілярних пор у бетоні, оскільки саме в цих порах при заморожуванні вода переходить у лід, руйнуючи міжпорові перегородки цементного каменю й бетону в цілому; обсяг капілярних пор прагне до нуля при В/Ц = 0,30...0,35 (ступінь гідратації цементу близько 0,6), що характерно для високоміцних бетонів; водопотребу бетонної суміші можна зменшити шляхом застосування найбільш ефективних пластифікуючих добавок, наприклад, суперпластифікаторів;

- збільшити обсяг низькоосновних гідросилікатів кальцію, від яких залежать міцність і довговічність цементного каменю, за рахунок взаємодії менш довговічних гідрооксидів кальцію з активним тонкодисперсним кремнеземом з питомою площею поверхні 10...30 м²/г;

- підвищити однорідність структурних елементів і знизити їхній розмір за

рахунок зменшення крупності зерен заповнювача при переході від грубозернистих до дрібнозернистих бетонів з відповідним підвищенням міцності на розтяг при вигині, граничній розтяжності і деформативності.

Таким чином, головним методом підвищення стійкості бетону транспортних конструкцій до дії заморожування й відтавання можна визнати цілеспрямовану зміну його структури з метою створення системи замкнутих пор малого діаметра при одночасному зниженні капілярної (наскрізної) пористості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузев Е. А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980. – 213 с.
2. Горчаков Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. – М.: Из – во литературы по строительству, 1965. – 195 с.
3. Шейкин А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – М. Стройиздат, 1979. – 344 с.
4. Пауэрс Т. К. Физические свойства цементного теста и камня / 4-й Международный конгресс по химии цемента. – М. Стройиздат, 1964. – С. 174 – 189.
5. Добролюбов Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. Добролюбов, В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1983. – 212 с.
6. Чеховский Ю. В. Железобетонные сооружения для хранения и транспортирования газов / Ю. В. Чеховский, А. Г. Грейфер. – М.: Стройиздат, 1979. – 97 с.
7. Иванов Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. – М.: Транспорт, 1968. – 207 с.
8. Мишутин В. А. Исследование судостроительных бетонов / В. А. Мишутин. – Л.: Судостроение, 1967. – 180 с.
9. Структурообразование и разрушение цементных бетонов // [В. В. Бабков, В. Н. Мохов, С. М. Капитовов, П. Г. Комохов.] – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
10. Розенталь Н. К. Проблемы коррозии бетона / Н. К. Розенталь // Мат-лы I Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона «Бетон на рубеже третьего тысячелетия», кн. 3. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – С. 1419 – 1430.
11. Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes. Effects of accelerated curing / [A. Bentur, N. V. Milestone, J. F. Young, S. Mindess] // Cem. and Concr. Res. –1979. – №2. – P.161–170.
12. Стружанов В. В. Определение усадочных напряжений в компонентах стохастически армированных композитов / В. В. Стружанов // М: Прикладная механика. – 1982. – №5. – С. 62 – 66.
13. Баженов Ю. М. Высококачественный тонкозернистый бетон // М: Строительные материалы. – 2000. – №2. – С. 10 – 11.
14. Ребиндер П. А., Щукин Е. А., Марголис Л. Я. О механической прочности пористых дисперсных тел. – Т. 154. – М: 1964. – 695 с.
15. Решетняк И. А. Исследование дорожных мелкозернистых цементных бетонов: Диссертация кандидата технических наук. – Харьков, 1968. – 290 с.
16. Полак А. Ф., Бабков В. В. К теории прочности пористых тел. – М.: Наука, 1966. – С. 67.
17. Соломатов В. И. Интенсивная технология бетонов – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.
18. Алтунов В. Д. Исследование процесса усталостного разрушения цементных бетонов при растяжении: Диссертация кандидата технических наук – Харьков, 1973. – 156 с.
19. Баженов Ю. М. Высокопрочный бетон для армоцементных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1963. – 56 с.
20. Шейнин А. М. Особенности структуры и свойства песчаного цементного бетона для дорожного и аэродромного строительства // СоюздорНИИ. – М., 1966. – 145 с.

21. *Зоткин А. Т.* Защемление воздуха в цементно-песчаных смесях // Мелкозернистые бетоны и конструкции из них. — М., 1985. — 45 с.
22. *Кунцевич О. В.* Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. — Л.: Стройиздат, 1983. — 131 с.
23. *Венюа М.* Цементы в строительстве / Под ред. Б. А. Крылова. — М.: Стройиздат, 1980. — 415 с.
24. *Брынзин В. А., Грибкова Т. Е., Гарашин В. Р.* Структурные характеристики песчаных бетонов и их связь с техническими свойствами // «Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов». — Харьков, 1989. — С. 143–144.
25. *Мелкозернистые бетоны* / Ю. М. Баженов, У. Х. Магдеев, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, Л. Б. Гольденберг. — М., 1998. — 148 с.
26. *Шейнин А. М.* Исследование свойств и технологии мелкозернистого цементного бетона для строительства автомобильных дорог: Автореферат диссертации кандидата технических наук — М., 1970. — 21 с.

Oleksandra Yu. Doroshenko, PhD (Technical Sciences), Associate Professor (Associate Professor of Building Constructions and Structures Chair, State University for Transport Economy and Technologies)

Yuriy M. Doroshenko, PhD (Technical Sciences), Associate Professor (Professor of Construction Materials and Chemistry Chair, National Transport University)

The article deals with the issue of increasing the stability of concrete structures for transport to the action of freezing and thawing by changing its structure to create a system of closed pores of small diameter while reducing capillary porosity. Additional increase frost resistance can be achieved by particulate reinforcement.

Keywords: concrete, transportation design, structure, closed pores, capillary porosity.

REFERENCES

1. *Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A.* Korozija betona i zhelezobetona, metody ikh zaschity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. — Moscow: Stroyizdat, 1980. — 213 p.
 2. *Gorchakov G. I.* Povyshenie morozostojkosti betona v konstruktivnykh promyshlennykh i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Increased frost resistance of concrete in the construction of industrial and hydraulic structures] G. I. Gorchakov, M. M. Kapkin, B. G. Skramtaev. — Moscow: Because in the literature for the construction, 1965. — 195 p.
 3. *Shejkin A. E.* Struktura i svojstva tsementnykh betonov [Structure and properties of cement concrete] A. E. Shejkin, JU. V. Chekhovskij, M. I. Brusser. — Moscow, Stroyizdat, 1979. — 344 p.
 4. *Pauehrs T. K.* Fizicheskie svojstva tsementnogo testa i kamnja [Physical properties of cement paste and stone] 4th International Congress on the Chemistry of Cement. — Moscow, Stroyizdat, 1964. — P. 174–189.
 5. *Dobroljubov G.* Prognozirovanie dolgovechnosti betona s dobavkami [Predicting the durability of concrete with additives] / G. Dobroljubov, V. B. Ratinov, T. I. Rozenberg. — М.: Stroyizdat, 1983. — 212 p.
 6. *Chekhovskij JU. V.* Zhelezobetonnye sooruzhenija dlja khraneniya i transportirovaniya gazov [Reinforced concrete structures for the storage and transportation of gas] / JU. V. Chekhovskij, A. G. Grejffer. Moscow Stroyizdat, 1979. — 97 p.
 7. *Ivanov F. M.* Zashchita zhelezobetonnykh transportnykh sooruzhenij ot korrozii [Protection of concrete transportation structures from corrosion]. — Moscow: Transport, 1968. — 207 p.
 8. *Mishutin V. A.* Issledovanie sudostroitel'nykh betonov [Research shipbuilding concrete] / V. A. Mishutin. Leningrad: Shipbuilding, 1967. — 180 p.
-

9. *Strukturoobrazovanie i razrushenie tsementnykh betonov* [Pattern formation and destruction of cement concrete] // [V. V. Babkov, V. N. Mokhov, S. M. Kapitovov, P. G. Komokhov.] Ufa: SUE «Ufa Polygraph», 2002. – 376 p.
10. *Rozental N. K. Problemy korrozii betona* [Problems of corrosion of concrete] / N. K. Rozental // Materials of the 1st All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete «Concrete at the turn of the third millennium», book 3 – Moscow: Association «reinforced concrete», 2001. – pp 1419-1430.
11. *Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes. Effects of accelerated curing* [Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes. Effects of accelerated curing] / [A. Bentur, N. B. Milestone, J. F. Young, S. Mindess] // Cem. and Concr. Res. –1979. – № 2. – P. 161-170.
12. *Struzhanov V. V. Opredelenie usadochnykh naprjazhenij v komponentakh stokhasticheski armirovannykh kompozitov* [Determination of shrinkage stresses in the components of stochastically reinforced composites] / V. V. Struzhanov // – Moscow: Journal of Applied Mechanics. – 1982. – № 5. – P. 62-66.
13. *Bazhenov JU. M. Vysokokachestvennyj tonkozernistyj beton* [High-quality fine-grained concrete] // – Moscow: Building Materials. – 2000. – №2. – P. 10 – 11.
14. *Rebinder P. A., Schukin E. A., Margolis L. J. O mekhanicheskoyj prochnosti poristykh dispersnykh tel* [On the mechanical strength of the porous dispersed bodies]. – V. 154. – Moscow, 1964. – 695 p.
15. *Reshetnjak I. A. Issledovanie dorozhnykh melkozernistykh tsementnykh betonov* [Investigation of fine cement concrete road]: Dissertation of the candidate of technical sciences. – Kharkov, 1968. – 290 p.
16. *Polak A. F., Babkov V. V. K teorii prochnosti poristykh tel* [On the theory of strength of porous bodies]. – Moscow: Nauka, 1966 p.
17. *Solomatov V. I. Intensivnaja tehnologija betonov* [Intensive Concrete Technology] – Moscow: Stroyizdat, 1989. – 264 p.
18. *Altunov V. D. Issledovanie protzessa ustalostnogo razrushenija tsementnykh betonov pri rastjazhenii* [Investigation of the process of fatigue failure of cement concrete in tension]: Dissertation of the candidate of technical sciences. – Kharkov, 1973. – 156 p.
19. *Bazhenov JU. M. Vysokoprochnyj beton dlja armozementnykh konstruktzij* [High-strength concrete for armozementnykh designs] – Moscow: Gosstroyizdat, 1963. – 56 p.
20. *Shejnin A. M. Osobnosti struktury i svojstva peschanogo tsementnogo betona dlja dorozhnogo i aehrodromnogo stroitel'stva* [Structure and properties of sand cement concrete for road and airfield construction] // Sojuzdornii. – Moscow, 1966. – 145 p.
21. *Zotkin A. T. Zaschemlenie vozdukh v tsementnojopeschanykh smesjakh* [Entrapment of air in the cement-sand mixture] // Melkozernistye betony i konstruktzii iz nikh. – Moscow, 1985. – 45 p.
22. *Kuntzevich O. V. Betony vysokoyj morozostojkosti dlja sooruzhenij Krajnjego Severa* [Concrete structures for high frost resistance of the Far North] Leningrad: Shipbuilding, 1983. – 131 p.
23. *Venjua M. Tzementy v stroitel'stve* [Cement in construction] / B.A.Krylova. – Moscow: Stroyizdat, 1980. – 415 p.
24. *Brynzin V. A., Gribkova T.E., Garashin V.R. Strukturnye kharakteristiki peschanykh betonov i ikh svjaz' s tekhnicheskimi svojstvami* [Structural characteristics of sandy concrete and their relationship with the technical properties] // Resource-saving technologies, the structure and properties of concrete road. – Kharkov, 1989. – P. 143 –144.
25. *Melkozernistye betony* [Fine concrete] / JU. M. Bazhenov, U. KH. Magdeev, L. A. Alimov, V. V. Voronin, L. B. Gol'denberg. – Moscow, 1998. – 148 p.
26. *Shejnin A. M. Issledovanie svojstv i tehnologii melkozernistogo tsementnogo betona dlja stroitel'stva avtomobil'nykh dorog* [Study of the properties and technology of fine cement concrete for road construction]: Author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences – Moscow, 1970. – 21 p.