

струнобетонних прольотних будов та ефективні способи їх розширення і підсилення // Ресурсо-економні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 16, ч. I. – С. 351–362.

7. Научно-технический отчет УкрдортрансНИИ «Предварительно напряженные пролетные строения пролетом 10-30 м» / Отчет по теме № 06-61. – К.: УкрдортрансНИИ, 1960. – 381 с.

8. Рачкевич В.С., Кваша В.Г. Експлуатаційний стан та ефективні системи відновлення збірних залізобетонних прольотних будов з багаторядовою каркасною арматурою // Ресурсо-економні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. 18. – С. 521–533.

9. Салійчук Л.В., Кваша В.Г. Зсувостійкі клеєстержневі анкери в з'єднаннях залізобетонних конструкцій // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008. – № 627: Теорія і практика будівництва. – С. 186–191.

10. Технический отчет «Обследование и испытание моста через р. Церем в с. Пилиповичи на км 240+084 автомобильной дороги М-06 Киев–Чоп (правая полоса)». – К.: Укрголовмостоекспертиза, 2010. – 53 с.

11. Штильман Е.И., Корсунский В.С. Предварительно напряженные мостовые конструкции с проволочным армированием // Бетон и железобетон. – М.: Стройиздат, 1962. – № 10. – С. 466–469.

УДК 691.328

І.І. Кіракевич, О.Р.Позняк, У.Д. Марущак  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автомобільних шляхів

## САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ БЕТОНИ З ВИСОКИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

© Кіракевич І.І., Позняк О.Р., Марущак У.Д., 2011

Встановлено закономірності формування мезоструктури самоущільнювальних бетонів, що містять добавку полікарбоксилату та мікронаповнювачі і характеризуються покращеними експлуатаційними властивостями, зокрема високою марочною міцністю, низькими показниками усадки в повітряно-сухих умовах тверднення, підвищеною водонепроникністю та корозійною стійкістю.

**Ключові слова:** мезоструктура, самоущільнювальний бетон, полікарбоксилат, мікронаповнювач, рухливість, міцність, деформації зсідання.

**The principles of methostructure formation of self-compacting concretes with polycarboxylate admixtures and microfillers, which are characterized by improved exploitive properties such as high strength, corrosion resistance and decreasing shrinkage in air condition of hardening were stated.**

**Key words:** methostructure, self-compacting concrete, polycarboxylates, microfiller, flowability, strength, shrinkage.

**Вступ.** Самоущільнювальний бетон – Self-Compacting Concrete (SCC) – матеріал, який здатний ущільнюватися, вивільняти захоплене повітря і повністю заповнювати форму без механічного впливу під дією власної ваги, навіть у густоармованих конструкціях. Поєднання високих фізико-механічних та експлуатаційних характеристик таких бетонів – підвищеної легковкладальності та міцності, низької газо- та водонепроникності, підвищеної корозійної стійкості і довговічності, забезпечують високу надійність конструкцій у різних умовах експлуатації. Такі бетони перспективні для України не тільки у зв'язку із зменшенням затрат за рахунок покращення умов укладання високорухливої суміші, скорочення термінів будівництва, а й за рахунок можливості

максимального зменшення витрати цементу – одного із найбільш енергозатратних промислових продуктів внаслідок хімічного модифікування бетонної суміші.

**Постановка проблеми.** Передумовою виникнення самоущільнювальних бетонів є дослідження, напрямлені на покращення експлуатаційних властивостей, зокрема технологічності сумішей, їх однорідності, високих ранньої та марочної міцностей, довговічності [1]. Сучасні технології виробництва бетонів нового покоління ґрунтуються на глибокому вивченні процесів, що відбуваються на всіх рівнях структури бетону, з яких виділяють три основні: мікро-, мезо- і макроструктуру. При цьому мезоструктурі бетонів належить визначальна роль у забезпеченні рухливості та однорідності самоущільнювальних бетонних сумішей, стійкості затверділого бетону до дії механічних навантажень та негативного впливу навколишнього середовища [2, 3]. Одержання високоякісного самоущільнювального бетону, що характеризується підвищеною легковкладальністю, високою марочною міцністю, низькими показниками усадки, підвищеною водонепроникністю та корозійною стійкістю, вимагає дослідження впливу хімічних та мінеральних добавок, мікронаповнювачів на формування його мезоструктури.

Постановка завдання та формулювання основних положень і висновків проводились під керівництвом наукового керівника, д. т. н., проф. М.А. Саницького.

**Аналіз останніх джерел і публікацій.** Фундаментальною проблемою розроблення та впровадження самоущільнювальних бетонів є забезпечення їх високої технологічності, що передбачає максимальне уникнення трудомістких операцій вкладання та ущільнення бетонних сумішей і забезпечення будівельно-технічних властивостей, які визначають довговічність затверділого композиту [3].

Концепція одержання самоущільнювальних бетонів полягає в отриманні матеріалу з максимальною щільністю та мінімальними дефектами в структурі: мікротріщинами й порами. Для зменшення неоднорідностей і дефектів як основної умови оптимізації структури бетону, яка є визначальним чинником його основних фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, необхідно підвищити дисперсність твердої фази; зменшити товщину прошарків, що склеюють частинки за рахунок оптимального вмісту в'язучих у дисперсійному середовищі; понизити до мінімуму пористість, перевівши пори в мікро- і ультрамікропори [4, 5]. У зв'язку з цим основні принципи технології самоущільнювальних бетонів полягають у підвищенні однорідності бетону шляхом зменшення максимального розміру частинок (виключення грубого заповнювача); введенні до складу бетону суперпластифікаторів для максимального розрідження бетонної суміші; створенні максимальної щільності за рахунок використання мікронаповнювачів; використанні необхідного В/Ц в бетоні; забезпеченні оптимальних умов тверднення бетону [6].

Самоущільнювальний бетон є матеріалом поліструктурної будови, що передбачає багаторівневу організацію, за якої структура будь-якого нижчого рівня є складовим елементом вищого рівня структурних неоднорідностей за принципом „композит в композиті” [4]. При цьому формування структури бетону як полідисперсної системи, що складається з різних за величиною і агрегатним станом структурних елементів, розглядають на макро-, мезо- та мікрорівні. Головне навантаження у формуванні властивостей модифікованих бетонів нового покоління несе цементуюча матриця та дрібний заповнювач, що визначають рівень мезоструктури бетону [1, 3]. Властивості бетону на мезоструктурному рівні визначаються такими параметрами, як зерновий склад дрібного заповнювача та дисперсність наповнювачів, природа цих матеріалів, їх кількість у системі, вміст води при замішуванні.

Застосування мінеральних добавок та мікронаповнювачів дає змогу уникнути водовідділення, сегрегації фаз при транспортуванні та формуванні, значно збільшити пластичність і в'язкість бетонних сумішей, а також підвищити щільність структури бетону, його міцність та довговічність. Слід зазначити при цьому роль поліфракційних заповнювачів, їх внесок у довговічність бетону та процеси раннього структуроутворення. Високі фізико-механічні характеристики бетонів нового покоління з органо-мінеральними добавками забезпечують покращені експлуатаційні характеристики та надійність конструкцій у різних умовах експлуатації. Виявлення нових властивостей складових самоущільнювального бетону на мезорівні дасть змогу встановити закономірності тверд-

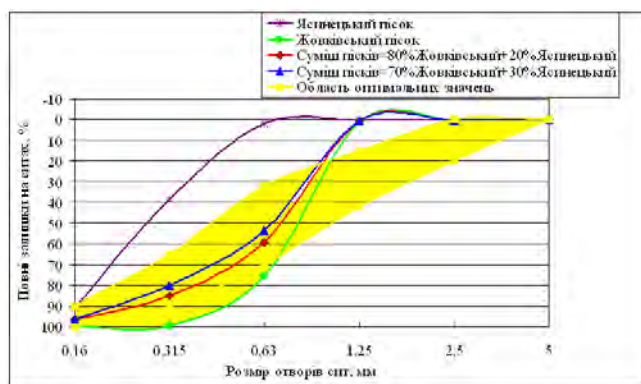
нення цементуючих систем будівельного композиту з врахуванням можливостей їх модифікування у напрямку забезпечення високих будівельно-технічних та експлуатаційних властивостей.

**Метою роботи** є встановлення закономірностей формування мезоструктури самоущільнювальних бетонів, що містять суперпластифікатор полікарбоксилатного типу та мікронаповнювачі і характеризуються високими експлуатаційними властивостями, зокрема високою марочною міцністю, низькими показниками усадки в повітряно-сухих умовах тверднення, підвищеною водонепроникністю та корозійною стійкістю.

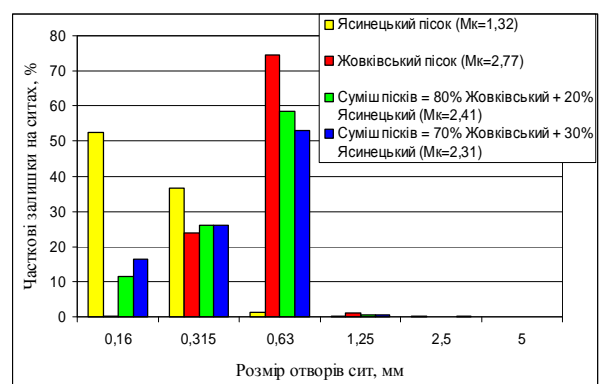
**Методи досліджень і матеріали.** При проведенні експериментальних досліджень використовували портландцемент ПЦ І-500 ВАТ “Івано-Франківськцемент” з такими показниками: питома поверхня  $S_{\text{шт}}=325 \text{ м}^2/\text{кг}$ , залишок на ситі № 008 – 1,2 мас. %, початок тужавіння – 1 год 10 хв, кінець – 4 год 10 хв, границя міцності при стиску через 2; 7 та 28 діб – 18,5; 29,1 та 52,5 МПа відповідно. Як дрібний заповнювач до бетону використовували кварцові піски Ясинецького (модуль крупності  $M_{\text{кр}}=1,32$ ) та Жовківського (модуль крупності  $M_{\text{кр}}=2,77$ ) родовищ Львівської області. Показники якості кварцових пісків обох родовищ відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 для важких бетонів. З метою надання бетонним сумішам високих показників рухливості та її збереження в часі до їх складу вводили суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі (ПКС) та мікронаповнювач – вапнякове борошно. Як мінеральні добавки використано золу-виносення Бурштинської ТЕС та метакаолін.

Деформаційні процеси самоущільнювальних бетонів, що тверднули в повітряно-сухих умовах, досліджували на приладі з індикатором годинникового типу ИП-40 з ціною поділки 0,01 мм. Корозійну стійкість самоущільнювальних бетонів визначали за зміною міцності зразків, що тверднули 28 діб у нормальних умовах, при подальшому їх зберіганні в агресивному середовищі (5 %-й розчин  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

**Результати досліджень.** Покращення показників якості бетону досягається за умови поліфракційності заповнювачів та оптимального їх розподілу у структурі матеріалу [6]. Результати визначення фракційних складів дрібних заповнювачів ситовим аналізом показали, що крива розсіювання піску Ясинецького родовища не входить в область пісків, що допускаються для бетону (рис. 1, а). Аналіз отриманих часткових залишків на ситах для піску Ясинецького родовища свідчить про те, що цей заповнювач характеризується високим вмістом дрібних фракцій розміром 0,16–0,63 мм і належить до групи дуже дрібних (рис. 1, б), що вимагає введення крупних фракцій. З цією метою використано пісок Жовківського родовища з основним вмістом зерен 0,315–1,25 мм та модулем крупності 2,77. Встановлено, що для забезпечення максимальної щільності упаковки зерен та одержання неперервної кривої розсіювання оптимальний вміст піску Ясинецького родовища в суміші заповнювачів становить 30 мас.%, решта – пісок Жовківського родовища.



а



б

Рис. 1. Криві розсіювання (а) та часткові залишки на ситах (б) дрібних заповнювачів

Основною характеристикою самоущільнювальної бетонної суміші є її висока текучість без сегрегації фаз при транспортуванні та формуванні, механізмом для контролю яких є присутність суперпластифікатора, якість цементного тіста і хімія поверхні частинок дрібнозернистої фракції (портланд-цементу, мікронаповнювачів, мінеральних добавок). Рухливість дрібнозернистих бетонних сумішей оцінювали за розпливом циліндра Сутгарда [1, 3]. Введення полікарбоксилатного пластифікатора в кількості 2,0 мас. % до дрібнозернистої бетонної суміші при сталому водовмісті ( $V/C=0,27$ ) забезпечує збільшення діаметра розпливу до 190 мм, тоді як розплив суміші без добавок – 50 мм (рис. 2).

Введення вапнякового мікронаповнювача та мінеральних добавок, що характеризуються розвинутою питомою поверхнею, змінює фізико-хімічні та фізико-механічні взаємодії між частинками в високорухливих системах з виявленням синергетичного ефекту. Так, використання 2,0 мас. % ПКС та метакаоліну призводить до зростання діаметра розпливу дрібнозернистої бетонної суміші до 200 мм, а бетонна суміш з використанням як мікронаповнювача вапнякового борошна характеризується найбільшою рухливістю ( $P=230$  мм), що пов'язано із забезпеченням оптимального розподілу твердих частинок у системі, внаслідок чого вода розташовується не в порожнинах, а між зернами матеріалу, відіграючи роль змазки, що створює сприятливі умови для ковзання частинок, мінімізації внутрішнього тертя і збільшення рухливості при однаковому водоцементному відношенні. Слід зазначити, що для отримання високопластичної бетонної суміші без добавок ( $P=170$  мм) необхідно збільшувати водоцементне відношення до 0,46.

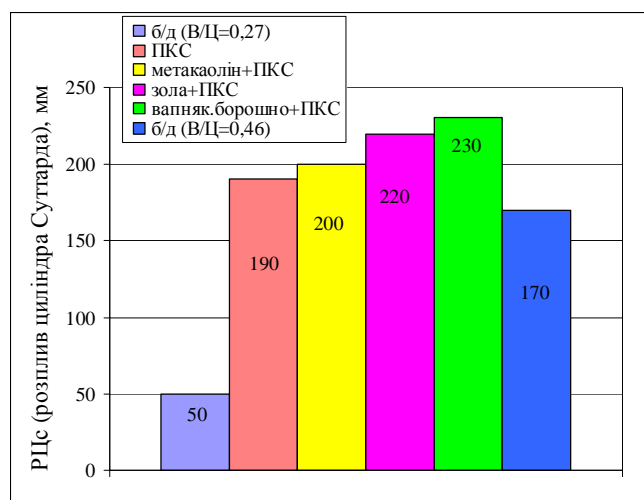


Рис. 2. Вплив ПКС та мінеральних добавок на рухливість дрібнозернистої бетонної суміші

Аналіз результатів випробування міцності дрібнозернистого бетону свідчить (рис. 3), що введення 2 мас. % ПКС не спричиняє зниження його міцності при підвищеній рухливості порівняно зі складом без модифікаторів ( $V/C=0,27$ ) в усі терміни тверднення. Мінеральні добавки та вапняковий мікронаповнювач прискорюють процеси тверднення, сприяють ущільненню каменю за рахунок ефекту „дрібних порошоків” та відіграють активну структуротвірну роль при твердненні самоущільнювальних бетонів, створюючи можливість утворення гідратних фаз, що характеризуються в'язучими властивостями в мінеральній неклінкерній частині композицій, зокрема низькоосновних гідросилікатів типу CSH(B) та структурно-активних  $AF_m$ -фаз – гідрогеленіту, гідрокарбоалюмінату кальцію [7].

Введення органо-мінеральних добавок на основі 2 мас. % ПКС та мікронаповнювачів різних типів забезпечує приріст міцності дрібнозернистого бетону на 20–35 % порівняно із складом без добавок при однаковому водоцементному відношенні ( $V/C=0,27$ ) в усі терміни тверднення. Найбільший приріст міцності спостерігається при введенні в якості мікронаповнювача вапнякового борошна. Так, міцність через 2; 7 та 28 діб становить відповідно 71; 82 та 95 МПа порівняно з 58,8;

68,5 та 71,4 МПа для дрібнозернистого бетону без добавок ( $V/C=0,27$ ), що дає змогу зарахувати ці бетони до високоміцних (клас за міцністю B60 і вище). Через 56 діб тверднення у нормальних умовах відбувається подальше зростання міцнісних характеристик дрібнозернистих бетонів, і для складу з вапняковим борошном границя міцності на стиск становить 106,7 МПа.

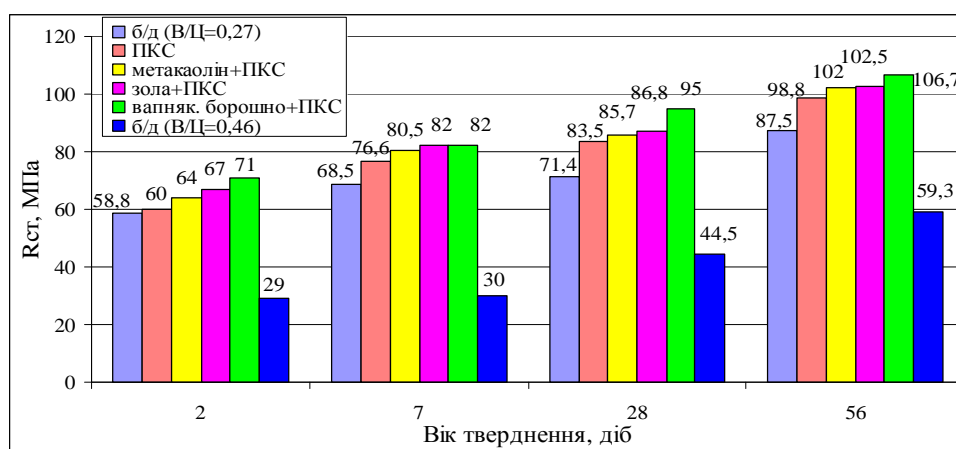


Рис. 3. Міцність самоущільнювальних дрібнозернистих бетонів

Слід зазначити, що дрібнозернисті бетони без модифікаторів з рівнорухливих сумішей ( $V/C=0,46$ ) характеризуються зниженням міцності в усі терміни тверднення в 1,6–2,3 рази. Разом з тим, використання оптимальної гранулометрії дрібного заповнювача із забезпеченням максимально щільної упаковки зерен дає змогу отримувати у високорухливих складах без добавок міцність через 28 та 56 діб 44,5 та 59,3 МПа відповідно.

Необхідною умовою для тверднення бетону є наявність вологи і сприятливої температури. Свіжовкладений бетон містить більше води, ніж необхідно для повної гідратації цементу, проте в більшості випадків у виробничих умовах значна кількість води витрачається в зв'язку з випаровуванням, що призводить до збільшення пористості та погіршення експлуатаційних характеристик будівельного матеріалу. Внаслідок нерівномірного розподілу вологісних та температурних деформацій за об'ємом, а також через обмеження деформацій зовнішніми зв'язками, їх поява супроводжується розвитком напружень. Процес тверднення бетону супроводжується зміною його об'єму. Найбільш значною є зміна об'єму при твердненні в атмосферних умовах або за недостатньої вологості середовища. Зсідання бетону викликано фізико-хімічними процесами, які проходять в бетоні при твердненні та зміні його вологості. Залежно від виду конструкцій висуваються такі вимоги щодо величини усадки: в неармованих конструкціях вона не повинна перевищувати 0,3 мм/м, в армованих – 0,2 мм/м [5].

У зв'язку з цим досліджено вплив модифікаторів на деформації самоущільнювального дрібнозернистого бетону в повітряно-сухих умовах тверднення (рис. 4, а). Значно впливає на зсідання бетону водоцементне відношення. Чим вище  $V/C$ , тим нижча міцність цементного каменю в бетоні та більша його пористість, що зумовлює інтенсивніший вологообмін з навколишнім середовищем. Значна кількість пор у цементному камені з високим  $V/C$  зумовлює розвиток поверхні, на якій відбувається вологообмін з навколишнім середовищем, у результаті цього вологовіддача проходить інтенсивніше. Це призводить до швидшого висихання поверхневих шарів, розвитку великих градієнтів вологості і зростання напружень зсідання. Так, зростання водоцементного відношення дрібнозернистого бетону від  $V/C=0,27$  до 0,46 для забезпечення такої самої рухливості бетонної суміші, як і з використанням модифікатора ( $R_K=170$  мм), призводить до збільшення зсідання дрібнозернистого бетону через 28 діб до 0,407 мм/м, тоді як величина деформацій зсідання бетону з  $V/C=0,27$  становить 0,092 мм/м.

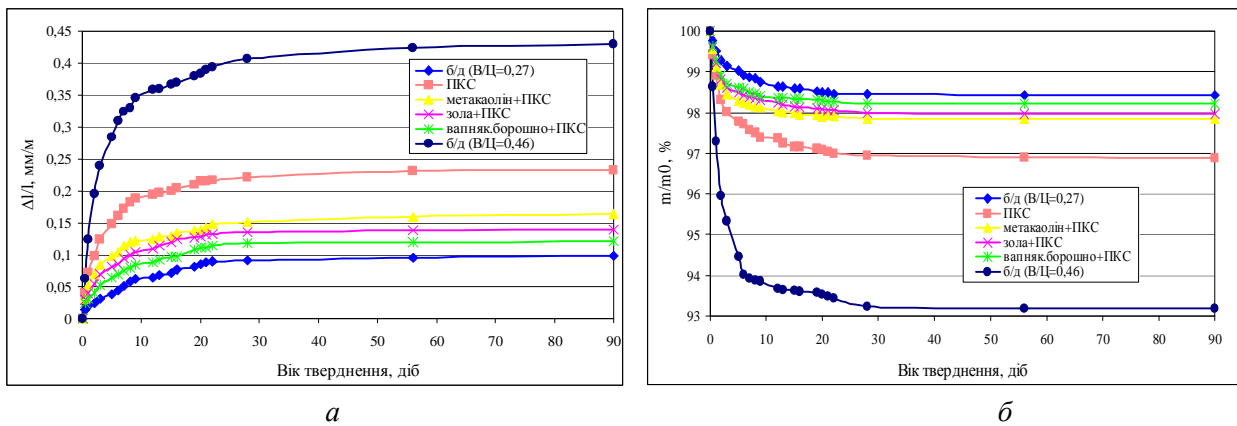


Рис. 4. Деформації зсідання (а) та зміна маси (б) дрібнозернистого самоущільнювального бетону в повітряно-сухих умовах тверднення

Паралельно зміні деформацій балочок 4x4x16 см визначали зміну маси зразків (рис. 4, б). У повітряно-сухих умовах відбувається постійне зменшення маси зразків у зв'язку з їх висиханням. Це надалі може спричинити утворення тріщин та недобори міцності. Слід зауважити, що інтенсивна втрата води в бетонах відбувається в перші 7 дб тверднення. При цьому найбільше зменшення вологовмісту до 6,1 % спостерігається у зразках бетону з підвищеним водоцементним відношенням (В/Ц=0,46).

У вологообміні бетону активну участь бере механічно зв'язана вода, у результаті випаровування якої з капілярів та моношарів розвиваються сили капілярного стискання та бетон зазнає зсідання. Введення модифікатора полікарбоксилатного типу забезпечує збільшення рухливості дрібнозернистої суміші за рахунок адсорбції молекул полікарбоксилату на поверхні частинок в'язучого, переводячи воду з адсорбційно зв'язаної на механічно зв'язану, сили зв'язку якої є меншими і, така вода швидко випаровується. Зниження водовмісту системи в період до 7 дб становить 2,8 %, до 28 дб – 3,1 %, що зумовлює значні деформації зсідання 0,23 мм/м у віці 28 дб.

Введення мінеральних добавок сприяє водоутримувальній здатності цементного каменю, що забезпечує помірне протікання процесів гідратації портландцементу в нормальних та повітряно-сухих умовах і усуває виникнення деформацій, що пов'язані з втратою вологовмісту в початковий період. У результаті цього певна кількість води замішування активно бере участь у формуванні новоутворень і міцно зв'язується в гідрати, внаслідок чого втрата вологовмісту дрібнозернистих бетонів з вапняковим мікронаповнювачем становить близько 1,4 %. Слід зазначити, що дрібнозернистий самоущільнювальний бетон з вапняковим борошном (РК=230 мм) у віці 7 дб характеризується деформаціями зсідання в 4,3 рази меншими, ніж бездобавочний рівнорухливий бетон (В/Ц=0,46, Р=170 мм).

Корозійну стійкість самоущільнювальних бетонів визначали після 6 місяців зберігання зразків в сульфатному агресивному середовищі (5 %-й розчин  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Значення коефіцієнта стійкості  $\text{KС}_6=1,1-1,5$  для самоущільнювальних бетонів вказує на збільшення стійкості бетону до дії агресивних середовищ. Випробування на водонепроникність розроблених самоущільнювальних бетонів показали, що ці матеріали належать до марки W20.

**Висновок.** Використання закономірностей структурної теорії та фізико-хімічного модифікування комплексними органо-мінеральними добавками забезпечує напрямлене формування мезоструктури самоущільнювальних бетонів з покращеними реологічними властивостями та заданими експлуатаційними характеристиками. Застосуванням поліфракційних дрібних заповнювачів, мікронаповнювачів та мінеральних добавок досягають найвищого ступеня заповнення порової структури самоущільнювальних бетонів, підвищуючи їх щільність, визначають відсутність розшарування при високій рухливості бетонних сумішей, забезпечують направлене регулювання параметрів цементної системи, створюючи можливість утворення гідратних фаз, які характеризуються в'язучими властивостями, в мінеральній неклінкерній частині композицій, що дає змогу отримувати бетонні композити з

високою марочною міцністю, низькими показниками усадки в повітряно-сухих умовах тверднення, підвищеною водонепроникністю та корозійною стійкістю.

1. Зайченко Н.М. *Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой* / Зайченко Николай Михайлович. – [монографія]. – Макеевка: ДонНАСА, 2009. – 207 с. 2. Рунова Р.Ф. *Формування мезоструктури високоміцних бетонів* / Р.Ф. Рунова, В.В. Троян, В.В. Товстони́с // *Науково-технічний збірник „Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка”*. – Вип. 35. – 2010. – С. 25–29. 3. Paschmann H. *Self compacting concrete – practical advice* // *Concrete Plant + Precast Technology*. – 1999. – № 11. – Р. 34–42. 4. *Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво* / Р.Ф. Рунова, В.І. Гоц, М.А. Саницький та ін. – К.: УВПК „ЕксОб”, 2008. – 360 с. 5. Ушеров-Маршак А.В. *Современный товарный бетон* // *Материали I Междунар. науч.-практ. конф. „Товарный бетон. Новые возможности в строительных технологиях”*: Материали конференції. – Харьков, 2008. – С. 8–15. 6. *Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates* / M. Shoya, S. Sugita, Y. Tsukinada [at el] // *Creating with Concrete: International Conf., 1999: Proc. – Dundee (Scotland), 1999. – P. 121–130*. 7. Позняк О.Р. *Физико-химические особенности процессов гидратации модифицированных цементирующих систем* / О.Р. Позняк, У.Д. Марущак, И.И. Киракевич // *Сб. докл. 3-го (XI) Междунар. совещания по химии и технологии цемента*. – М.: Экспоцентр, 2009. – С. 174–178.

УДК 624.132.3:621.879

Я.Й. Коцій

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра будівельного виробництва

## ВИБІР ОБМЕЖЕНЬ КРИТЕРІЮ ОПТИМАЛЬНОСТІ ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБЛЕННЯ КОТЛОВАНІВ

© Коцій Я.Й., 2011

Проаналізовано фактори, що визначають потрібний рівень якості робіт при влаштуванні котлованів і запропоновано обмеження критерію оптимальності економіко-математичного моделювання процесів влаштування різних за складністю геометрій котлованів.

**Ключові слова:** економіко-математичного моделювання, котлован.

**In the articles analysed factors which determine the necessary level of quality of works at arranging of foundation pits and limitations of criterion of economic and mathematical design of processes of arranging of different after complication of geometry foundation pits are offered.**

**Keywords:** ekonomiko mathematical design, foundation pit.

**Вступ.** На розв’язок задачі з обґрунтування області раціонального використання різних комплексів машин значно впливає оцінка можливості досягнення даним комплексом потрібного рівня якості споруди, при чому виконання вимог нормативних документів повинно бути досягнуто з максимальною продуктивністю і найкращими техніко-економічними показниками.