

УДК 666.972

**ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА РОЗСУНЕННЯ ЗЕРЕН ЩЕБЕНЮ РОЗЧИНОМ НА МІЦНІСТЬ ЦЕМЕНТНИХ БЕТОНІВ ПРИ ЗГІНІ**

Аспіранти Д. С. Захаров, О. В. Палант,  
доктори техн. наук С. М. Толмачов, Д. А. Плугін, студент П. Е. Моїсеєва

**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗДВИЖКИ ЗЕРЕН ЩЕБНЯ РАСТВОРОМ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ ПРИ ИЗГИБЕ**

Аспиранты Д. С. Захаров, Е. В. Палант,  
доктора техн. наук С. Н. Толмачев, Д. А. Плугин, студент П. Э. Моисеева

**INFLUENCE OF COEFFICIENT OF EXPANSION THE GRAINS OF RUBBLE BY A SOLUTION ON CEMENT CONCRETE FLEXURAL STRENGTH**

Postgraduate students D. S. Zakharov, O. V. Palant, D.Sc. S.M. Tolmachov, D. A. Plugin,  
student P. E. Moiseeva

*Одним з важливих чинників, що впливають на міцність цементних бетонів при згині, є щільність упакування частинок або співвідношення між великим і дрібним заповнювачем. Встановлено, що для дорожніх бетонів існує свій оптимум цього співвідношення, при якому щільність упакування частинок максимальна, його можна виразити як коефіцієнт розсування зерен щебеню розчиною сумішшю. Визначено значення цього коефіцієнта для конкретних заповнювачів і встановлено, що щільність бетону, його міцність при стисканні і згині досягає максимуму при оптимальному значенні коефіцієнта розсування.*

**Ключові слова:** міцність при вигині, щільність упакування, коефіцієнт розсування зерен щебеню розчином, щільність бетону, міцність бетону при вигині, міцність бетону при стисканні.

*Одним из важных факторов, влияющих на прочность цементных бетонов при изгибе, является плотность упаковки частиц или соотношение между крупным и мелким заполнителем. Установлено, что для дорожных бетонов существует свой оптимум этого соотношения, при котором плотность упаковки частиц максимальна, его можно выразить как коэффициент раздвижки зерен щебня растворной смесью. Определено значение этого коэффициента для конкретных заполнителей и установлено, что плотность бетона, его прочность при сжатии и изгибе достигают максимума при оптимальном значении коэффициента раздвижки.*

**Ключевые слова:** прочность при изгибе, плотность упаковки, коэффициент раздвижки зерен щебня раствором, плотность бетона, прочность бетона при изгибе, прочность бетона при сжатии.

*It is shown that one of the important factors affecting on the flexural strength of cement concrete is a packing density, or the ratio between the large and small filler. The article shows that different aggregates has its own optimum relationship between large and small aggregates in which the packing density is maximum. This relationship can be expressed as expansion coefficient of grains rubble by mortar. It determines the value of this coefficient for specific performers. It is shown that the density of the concrete, the concrete compressive strength and flexural strength of concrete reaches a maximum at the optimum expansion coefficient of grains rubble by mortar.*

**Keywords:** flexural strength, packing density, expansion coefficient of grains rubble by mortar, density of concrete, flexural strength of concrete, concrete compressive strength.

**Вступ.** Виходячи з особливостей роботи дорожніх цементних бетонів у покритті, основним для них є здатність сприймати розтягувальні напруги. Тому важливою умовою їх довговічності є підвищення міцності при розтягуванні, зокрема розтягуванні при згині, оскільки цей показник можна легко і швидко визначати (на відміну від «чистого» розтягування).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Очевидно, що на міцність при згині впливає ряд чинників. Один з них – співвідношення між великим (щебенем) і дрібним (піском) заповнювачами. Це співвідношення можна оцінити коефіцієнтом розсунення зерен щебеню розчинною частиною –  $\alpha$ . У свою чергу коефіцієнт розсунення пов'язаний зі щільністю упакування частинок заповнювача. Розробленням теорії упакування і прийомів, що дозволяють збільшити щільність упакування, займалися багато дослідників [1-11]. Відомо, що для створення оптимально щільного упакування частинки повинні бути підібрані так, щоб дрібні частинки заповнювали порожнечі між великими, з тим щоб отримати щільну і жорстку структуру матриці. Однак на сьогодні ця проблема остаточно не вирішена, оскільки реальні заповнювачі сильно відрізняються від тих ідеальних моделей, які використовують для розроблення математичних моделей упакування. В основному розглядають дві традиційні моделі.

1. Об'ємна частка великих частинок значно більше від об'ємної частки дрібніших частинок ( $r_b \gg r_{др}$ ). У цьому випадку останні займають усі порожнечі між великими частинками і щільність повинна підвищуватися.

2. Об'ємна частка дрібних частинок значно більше від об'ємної частки великих частинок ( $r_{др} \gg r_b$ ). Однак фізично неможливо, маючи велику об'ємну частку

дрібних частинок, одночасно вмістити всі дрібні частинки в порожнечу між великими частинками. У цьому випадку щільність упакування буде обмежена.

Важливим є і те, що при компонуванні частинок можуть проявлятися два ефекти:

– пристінний ефект – ефект впливу великих частинок на щільність упакування дрібних частинок. Він може проявлятися поряд з вертикальною поверхнею або поруч з великою частинкою. У таких обмежених умовах дрібні частинки не можуть бути максимально щільно упаковані;

– ефект розпушення – ефект впливу дрібних частинок на упакування великих частинок. Цей ефект проявляється, коли кількість дрібних частинок дуже велика, щоб поміститися в порожнечах між великими частинками. Порушення упакування великих частинок дрібними називається ефектом розпушення.

**Мета та задачі дослідження.** Враховуючи складність створення і аналізу геометричних моделей щільного упакування, нами запропоновано оптимізувати не само упакування частинок заповнювача, а кількісне співвідношення між великим і дрібним заповнювачем. Контрольованим параметром буде міцність бетону при згині, що є основним показником якості дорожнього цементного бетону.

**Основна частина досліджень.** Для експериментальних досліджень використовували портландцемент ПЦ І – 500 Н Івано-Франківського цементного заводу, пісок кварцовий з модулем крупності  $M_{кр} = 1,9$ , а також щебінь гранітний фракції 5÷10 мм. Співвідношення між великим і дрібним заповнювачами змінювали (табл. 1). До складу бетонної суміші вводили суперпластифікатор Sika Plast 2508 полікарбоксилатного типу швейцарської фірми Sika. Рухомість бетонних сумішей відповідала показнику S1 ( $OK = 1 \div 4$  см).

Таблиця 1

## Склади бетону

Номер складу	Склад бетону, кг/м <sup>3</sup>	Вид і кількість добавки	R <sub>в</sub> / r <sub>др</sub>	В/Ц
1	Ц – 350; П – 1000; Щ <sub>5-10</sub> – 900	без добавки	0,9	0,57
		Sika Plast 2508 – 1 % від m <sub>ц</sub>	0,9	0,49
2	Ц – 350; П – 800; Щ <sub>5-10</sub> – 1100	без добавки	1,375	0,54
		Sika Plast 2508 – 1 % від m <sub>ц</sub>	1,375	0,46
3	Ц – 350; П – 600; Щ <sub>5-10</sub> – 1300	без добавки	2,167	0,5
		Sika Plast 2508 – 1 % від m <sub>ц</sub>	2,167	0,44
4	Ц – 350; П – 400; Щ <sub>5-10</sub> – 1500	без добавки	3,75	0,46
		Sika Plast 2508 – 1 % від m <sub>ц</sub>	3,75	0,41

Для розрахунку оптимального коефіцієнта  $\alpha_{opt}$  використовуємо формулу, запропоновану проф. А. М. Пługніним із співавторами [6, 13],

$$\alpha_{opt} = 2,1 \cdot \left( 1 + \frac{d_n}{d_{ц}} \right)^3 - 1,1, \quad (1)$$

де  $d_n$  – середній розмір зерен піску переважаючого часткового залишку на ситі;

$d_{ц}$  – середній розмір зерен щебеню.

Оскільки в дослідженнях застосовували щебінь фракції 5÷10 мм, то його середній розмір дорівнює 7,5 мм. Найбільш представницький частковий залишок піску знаходиться на ситі 0,315 мм, отже середній розмір зерен піску дорівнює 0,47 мм ( $0,315 + 0,63/2 = 0,47$ ). Підставляючи числові значення в формулу (1), отримаємо

$$\alpha_{opt} = 2,1 \cdot \left( 1 + \frac{d_n}{d_{ц}} \right)^3 - 1,1 = 2,1 \cdot \left( 1 + \frac{0,47}{7,5} \right)^3 - 1,1 = 1,42.$$

Для перевірки правильності визначення оптимального коефіцієнта  $\alpha_{opt}$  виготовлені і випробувані бетонні зразки чотирьох складів при однаковій рухомості бетонної суміші з добавкою-суперпластифікатором і без з різними коефіцієнтами розсунення зерен щебеню (табл. 1).

Аналіз ефективності добавки-суперпластифікатора за водозниженням (зниження витрати води) показує, що при підвищенні вмісту дрібного заповнювача (піску) по відношенню до щебеню (зрос-

тання показника  $r_v / r_{др}$ ) його ефективність знижується з 17 % водозниження (склади 1, 2) до 14 % (склад 3) і 12 % (склад 4).

Це обумовлено тим, що при збільшенні витрати піску потрібно більшу кількість води на його змочування, тобто утворення шару води, у якому вона міцно зв'язана і не бере участі в рухомості суміші. Відповідно на цю величину потрібно більше води для забезпечення однакової кількості вільної води, що забезпечує рухомість суміші.

При оптимальному коефіцієнті розсунення зерен  $\alpha_{opt}$  між двома зернами щебеню повинен розташовуватися один або два ряди зерен піску. Прийmemo один ряд. Як зазначалося, така упаковка частинок забезпечує максимальну щільність заповнювачів у бетоні (при оптимальних коефіцієнті розсунення зерен піску  $\mu_{opt}$  і водоцементному відношенні  $(B/C)_{opt}$ ). Підвищення щільності бетону призводить до відповідного підвищення його міцності.

Коефіцієнти розсунення зерен щебеню  $\alpha$  для різних складів бетону, наведених у табл. 1, визначені за формулою [12]

$$\alpha = \frac{\frac{C}{\rho_u^u} + C \cdot \frac{B}{C} + \frac{P}{\rho_u^n}}{\frac{Ш \cdot Пор^ш}{\rho_{нас}^ш}}, \quad (2)$$

де  $C, P, Ш$  – витрати цементу, піску і щебеню;

$\rho_u^u$  – істинна густина цементу (3100 кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_u^n$  – істинна густина піску (2650 кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_{нас}^ш$  – насипна густина щебеню (1470 кг/м<sup>3</sup>);

$Пор$  – порожнистість щебеню (0,44);

$B/C$  – водоцементне відношення.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Розрахункові значення цих коефіцієнтів показують, що найближчими до оптимального розрахункового коефіцієнта для даних матеріалів  $\alpha_{opt} = 1,42$  є коефіцієнти  $\alpha = 1,32$  і  $\alpha = 1,27$ . Вони визначені для складів бетонів без добавки і з добавкою при співвідношенні пісок : щебінь = 600 : 1300.

Таблиця 2

Розрахункові значення коефіцієнта розсунення зерен щебеню

Номер складу	Співвідношення пісок : щебінь, кг : кг	Добавка Sika Plast 2508	В/Ц	$\alpha$
1	1000 : 900	без добавки	0,57	2,56
		з добавкою	0,49	2,46
2	800 : 1100	без добавки	0,54	1,83
		з добавкою	0,46	1,75
3	600 : 1300	без добавки	0,50	1,32
		з добавкою	0,44	1,27
4	400 : 1500	без добавки	0,46	0,95
		з добавкою	0,41	0,91

Загальна кількість піску і щебеню в бетонній суміші для дорожнього бетону зазвичай становить 1900 кг/м<sup>3</sup>. Перерахунок за формулою (2) дозволяє визначити, що для досягнення оптимального коефіцієнта розсунення зерен щебеню в бетоні без добавок (при усередненому  $B/C = 0,52$ ) витрата піску повинна бути 642 кг/м<sup>3</sup>, а витрата щебеню – 1258 кг/м<sup>3</sup>. Аналогічно для бетону з добавками витрати

піску і щебеню для оптимального коефіцієнта розсунення повинні бути: пісок – 671 кг/м<sup>3</sup>, щебінь – 1229 кг/м<sup>3</sup>. Слід зазначити, що це співвідношення між піском і щебенем є розрахунковим для розмірів зерен піску 0,47 мм, а зерен щебеню – 7,5 мм. Тому на практиці можливі відхилення від розрахункового складу як в бік зменшення, так і в бік збільшення цього співвідношення. При незначній зміні  $\alpha$

міцність при стисканні майже не змінюється, на відміну від міцності при згині.

Будь-яка зміна співвідношення між заповнювачами призводить до зміни середньої щільності бетону (табл. 3). Незважаючи на те, що зміни щільності не перевищують 2,5 %, очевидна наявність максимуму для складу 3, що підтверджує наші припущення про краще упакування частинок заповнювача в разі наближення співвідношення наповнювачів до оптимального коефіцієнта розсушення зерен щебеню розчинною частиною.

Експериментальні дослідження міцності бетонів з різними  $\alpha$  показали, що існує екстремальна залежність  $R = f(\alpha)$  (табл. 4-5).

За табл. 4, максимальне значення міцності при згині відповідає бетону складу 3 з  $\alpha = 1,32$  і  $1,27$ .

Менша експериментальна величина  $\alpha_{opt}$  (приблизно 1,3) порівняно з розрахунковою (1,42) обумовлена, імовірно, більшою часткою дрібної фракції піску, що змістило середній розмір його зерен до величини 0,37 мм:

$$\alpha_{opt} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{0,37}{7,5}\right)^3 - 1,1 = 2,1 \cdot 1,15 - 1,1 = 1,32.$$

Таблиця 3

Густина бетонів при різних  $\alpha$  і співвідношеннях пісок : щебінь

Номер складу	Співвідношення пісок : щебінь, кг : кг	$\alpha$	Вид і кількість добавки, % від маси цементу ( $m_c$ )	В/Ц	Густина бетону у віці 28 діб, кг/м <sup>3</sup>
1	П – 1000; Щ <sub>5-10</sub> – 900;	2,56	без добавки	0,57	2483
		2,46	Sika Plast 2508 – 1%	0,49	2469
2	П – 800; Щ <sub>5-10</sub> – 1100;	1,83	без добавки	0,54	2520
		1,75	Sika Plast 2508 – 1%	0,46	2473
3	П – 600; Щ <sub>5-10</sub> – 1300;	1,32	без добавки	0,50	2548
		1,27	Sika Plast 2508 – 1%	0,44	2505
4	П – 400; Щ <sub>5-10</sub> – 1500;	0,95	без добавки	0,46	2540
		0,91	Sika Plast 2508 – 1%	0,41	2510

Таблиця 4

Міцність бетонів при згині, МПа

Номер складу	Без добавки			З добавкою Sika Plast 2508		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
1	4,8	5,6	6,2	5,5	6,6	7,2
2	5,6	6,2	6,8	6,4	7,2	7,9
3	6,3	7,0	7,5	7,4	8,5	9,3
4	5,4	6,1	6,6	6,2	7,0	7,6

Таблиця 5

Міцність бетонів при стисканні, МПа

Номер складу	Без добавки			З добавкою Sika Plast 2508		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
1	23,2	30,0	40,3	29,3	38,2	49,4
2	38,1	48,0	54,0	42,2	51,3	62,1
3	37,4	47,5	53,8	47,3	59,4	69,0
4	33,8	42,1	49,4	39,0	49,7	60,3

Аналіз графічних залежностей впливу коефіцієнта розсунення зерен щебеню розчинною частиною, побудованих за даними табл. 4 і 5, показує, що максимальна міцність бетону при згині забезпечується при коефіцієнті розсунення  $\alpha \approx 1,3$  (рис. 1-4), який і є оптимальним.

При цьому важливим є те, що збільшення коефіцієнта розсунення  $\alpha$  більше від оптимального призводить до плавного зниження міцності бетону. Раніше вважалося, що збільшення частки піску в бетонній суміші до  $700 \div 750 \text{ кг/м}^3$  має підвищувати міцність дорожніх бетонів при згині.

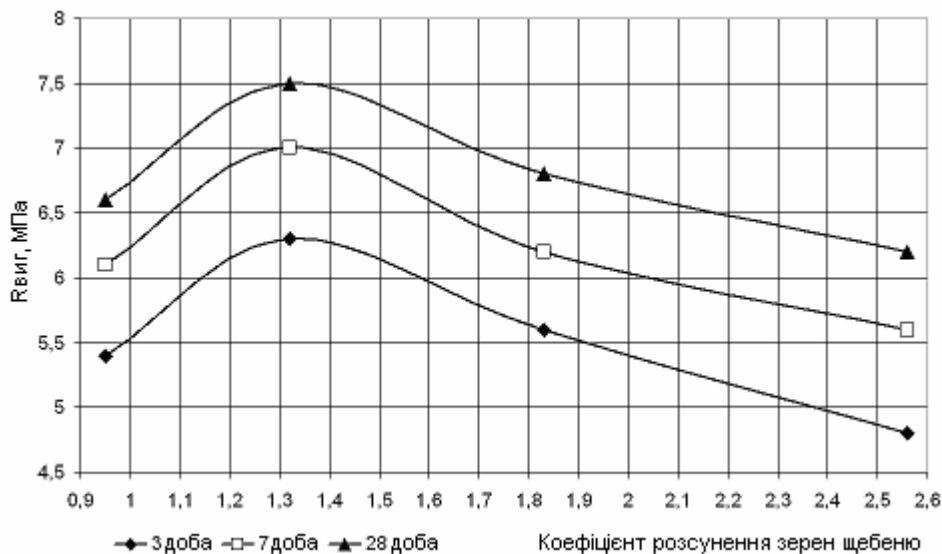


Рис. 1. Залежність міцності при згині від коефіцієнта розсунення зерен щебеню без добавки

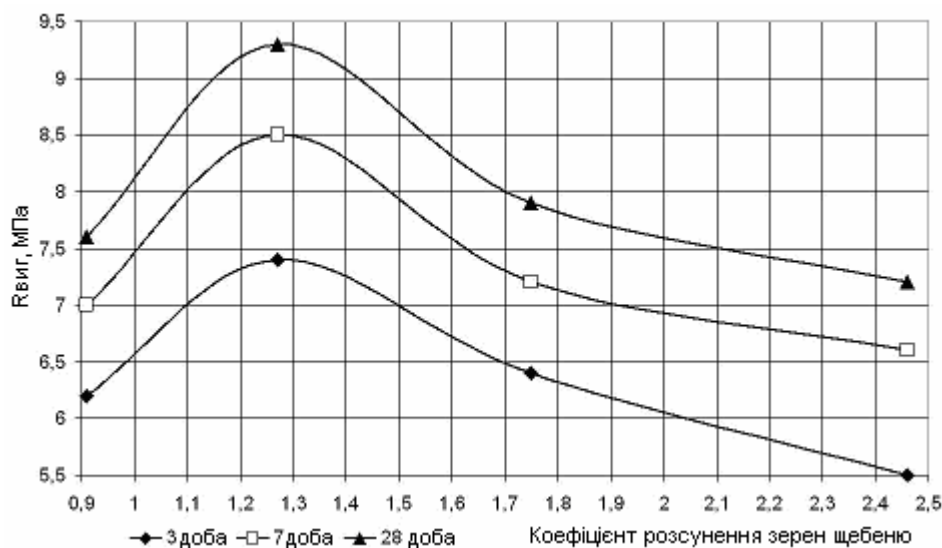


Рис. 2. Залежність міцності при згині від коефіцієнта розсунення зерен щебеню з добавкою

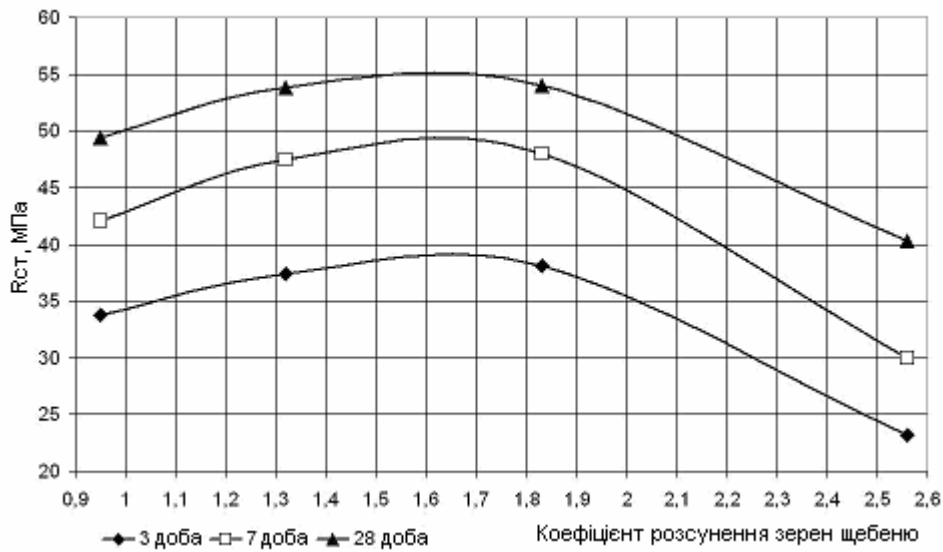


Рис. 3. Залежність міцності при стисканні від коефіцієнта розсунення зерен щебеню без добавки

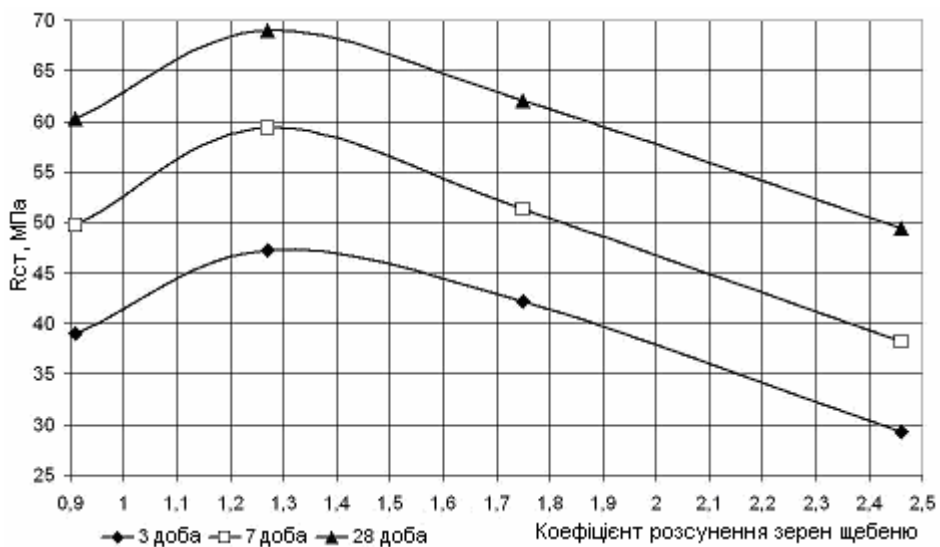


Рис. 4. Залежність міцності при стисканні від коефіцієнта розсунення зерен щебеню з добавкою

**Висновки.** Показано, що зміна співвідношення між великим (крупність 5÷10 мм) і дрібним заповнювачем у складі бетону призводить до зміни щільності упакування заповнювачів, змінює коефіцієнт розсунення зерен щебеню розчинною частиною і середню густину бетону.

Для кожного випадку застосовуваних заповнювачів можна визначити оптимальний коефіцієнт розсунення зерен щебеню розрахунково.

Визначено величину оптимального коефіцієнта розсунення зерен щебеню  $\alpha_{\text{опт}} = 1,3$ , якій відповідає відношення щебінь : пісок, що дорівнює  $1300 : 600 \text{ кг/м}^3$ .

*Список використаних джерел*

1. Виноградов, Б. Н. Влияние заполнителей на свойства бетона [Текст] / Б.Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1979. – 224 с.
2. Гордон, С. С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях [Текст] / С. С. Гордон. – М.: Стройиздат, 1969. – 151 с.
3. Нетеса, Н. И. Эффективность бетонных смесей с рациональным зерновым составом [Текст] / Н.И. Нетеса, В.Г. Кирияш // Вісн. Придніпр. держ. акад. буд-ва та архіт. – 2001. – № 5. – С. 41 – 46.
4. Пунагін, В. М. Керування властивостями бетону [Текст] / В. Пунагін, Л. Савін, О. Шишкін. – Кривий Ріг: Мінерал, 2001. – 155 с.
5. Сизов, В. П. Проектирование составов тяжелого бетона [Текст] / В.П. Сизов. – М.: Стройиздат, 1979. – 144 с.
6. Плугин, А. Н. Структура и долговременные свойства бетона [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин // Будівельні матеріали та виробн. – 2003. – № 4. – С. 17-22.
7. Шейнин, А. М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны с суперпластификатором С-3 для дорожного строительства [Текст] / А.М. Шейнин, М.Я. Яковсон // Бетон и железобетон. – 1993. – № 10. – С. 8-11.
8. Толмачев, С. Н. Некоторые особенности подбора состава бетонов по методу прерывистой гранулометрии [Текст] / С.Н. Толмачев, И.Г. Кондратьева [и др.] // Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд: матеріали міжнар. конф., Харків, ХДТУБА / Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2003. – № 23. – С. 251-254.
9. S.A.A.M. Fennis Optimizing the particle packing for the design of ecological concrete [Text] / S.A.A.M. Fennis, J.C. Walraven, J.A. den Uijl // 16 Internationale Baustofftagung. – 2006. – Weimar Bundesrepublik Deutschland. – Band 1. – P. 1313 – 1320.
10. P. Stroeven Dynamic computer simulation of concrete on different levels of the microstructure [Електронний ресурс] / P. Stroeven, M. Stroeven // Image Analysis and Stereology. – Vol. 22 (1). – 2003, P. 1 – 10.
11. M. Kolonko A hierarchical approach to simulate the packing density of particle mixtures on a computer [Електронний ресурс] / M. Kolonko, S. Raschdorf, D. Wäsch // Granular Matter. – Vol. 12, Iss. 6. – 2010, P. 629 – 643.
12. Плугин, А. Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин [и др.]– К.: Наукова думка, 2012. – Т. 3. – 287 с.
13. Способ определения состава бетонной смеси [Текст]: А. с. SU 1787972 А 1 С 04 В 28/00 / А.Н. Плугин, О.А. Калинин, А.И. Бирюков, Ю.П. Либенко, А.И. Моисеев, Ю.М. Скородумов; заявитель и патентообладатель Харьковский инст-т. инж. железнодорож. тр-та. – № 4854506/33; заявл. 26.06.1990; опубл. 15.01.1993, Бюл. №2. – 4 с.

---

Захаров Денис Сергійович, аспірант кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: +38 057 707 37 42. E-mail: zaharov.denis.vsp@gmail.com.

Палант Олена Валентинівна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (066) 538-05-41. E-mail: elyakina.elena@rambler.ru.

Толмачов Сергій Миколайович, д-р техн. наук, професор, професор кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: +38 057 707 37 42. E-mail: tolmach\_serg@mail.ru.

---



Плугін Дмитро Артурович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +38 057 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Моїсеева Поліна Едуардівна, студентка дорожньо-будівельного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: +38 057 707 37 42. E-mail: tolmach\_serg@mail.ru.

Denis Zakharov, graduate student of Technology Road-building Materials and chemistry Department Kharkov National Automobile and Highway University. Tel.: +38 057 707 37 42. E-mail: zaharov.denis.vsp@gmail.com.

Olena Palant, graduate student of Building Materials, Constructions and Buildings Department Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (066) 538-05-41. E-mail: elyakina.elena@rambler.ru.

Sergiy M. Tolmachov, D.Sc. Professor, Professor of Technology Road-building Materials and chemistry Department Kharkov National Automobile and Highway University. Tel.: +38 057 707 37 42. E-mail: tolmach\_serg@mail.ru.

Dmytro A. Plugin, D.Sc. Associated Professor, Professor of Building Materials, Constructions and Buildings Department Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 057 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Polina E. Moisyeeva, student of Road Construction Faculty Kharkov National Automobile and Highway University. Tel.: +38 057 707 37 42. E-mail: tolmach\_serg@mail.ru.

Стаття прийнята 06.04.2017 р.