

УДК 666.972.12

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ БЕТОНОВ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.С. Захаров, асп.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Приведен анализ факторов, влияющих на прочность бетонов при изгибе. Проведены расчеты коэффициента раздвижки зерен щебня растворной частью, при котором плотность упаковки частиц будет оптимальной. Показано влияние количества лежачих частиц, фибры и количества вовлеченного воздуха на прочность бетона при изгибе.

Ключевые слова: бетон, прочность при изгибе, прочность при сжатии, коэффициент раздвижки, лежачие частицы, водопоглощение бетона, фибра, вовлеченный воздух.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА МІЦНІСТЬ ПРИ ЗГІНІ БЕТОНУ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Д.С. Захаров, асп.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Наведено аналіз факторів, що впливають на міцність бетонів при згині. Проведено розрахунки коефіцієнта розсування зерен щебеню розчинною частиною, за якого щільність упаковки частинок буде оптимальною. Показано вплив кількості лежачих частинок, фібри та кількості залученого повітря на міцність бетону при згині.

Ключові слова: бетон, міцність при згині, міцність при стиску, коефіцієнт розсування, лежачі частки, водопоглинання бетону, фібра, залучене повітря.

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE STRENGTH OF ROAD CONCRETE BENDING

D. Zakharov, P. G.,
Kharkiv National Automobile und Highway University

Abstract. The article gives an analysis of the factors affecting the strength of concrete during bending. Calculations of the grains separation coefficient of gravel by the solution part at which the particle packing density would be optimal were performed. The influence of the number of bream particles, fiber and the amount of air entrained on the strength of concrete during bending is shown.

Key words: concrete, bending strength, compressive strength, spreading factor, bore particles, water absorption of concrete, fiber, entrained air.

Введение

Бетоны транспортного назначения разрушаются под действием растягивающих напряжений. Поэтому актуальным является исследование факторов, влияющих на прочность при изгибе.

Анализ публикаций

Исследования, проводимые многими учеными, показали, что рост интенсивности движения приводит к разрушению дорожного бетона [1–3]. Одной из причин разрушения является термический градиент температур. Если бетон находится в водонасыщенном

состоянии, то это приводит к возникновению внутренних растягивающих напряжений [2]. Последствием таких воздействий являются трещины и шелушения на поверхности покрытия, а также разрушение швов. В последние несколько десятилетий ученые мало внимания уделяют повышению прочности бетона на растяжение при изгибе.

Цель и постановка задачи

Целью исследований являлось выявление факторов, влияющих на прочность бетонов при изгибе, и оценка вклада каждого из факторов в изменение прочности бетонов при изгибе.

Влияние соотношения между крупным и мелким заполнителями на прочность бетонов при изгибе и расчет коэффициента раздвижки зерен щебня

На основании литературных данных было выявлено, что среди факторов, которые влияют на прочность монолитных дорожных и аэродромных бетонов при изгибе, можно выделить: соотношение между крупным и мелким заполнителем в составе бетонов, которое определяет плотность и, соответственно, прочность бетонов; влияние содержания лещадных частиц, влияние активности (марки) цемента, влияние дисперсного армирования. Поэтому в исследованиях проводили анализ влияния каждого из этих факторов на прочность бетонов при изгибе.

Важное значение для обеспечения прочности бетонов имеет плотность упаковки частиц минеральной части. Идеальный вариант упаковки – случай, когда частицы имеют правильную форму. Для математических моделей форму частиц принимают или кубовидную, или круглую, или пирамидальную. При этом считают, что для обеспечения наиболее плотной упаковки мелкие частицы должны заполнить пустоты между крупными частицами. Повышение плотности упаковки приводит к росту прочности бетона. При оценке влияния плотности упаковки частиц в бетонах и грунтах учитывали рост прочности при сжатии, а не при изгибе. В реальных условиях форма частиц различна, частицы песка заполняют пустоты между частицами щебня вместе с цементным тестом. Поэтому более правильными являются оценка влияния и оптимизация упаковки частиц запол-

нителей через коэффициент раздвижки зерен щебня растворной частью. Для разных заполнителей этот коэффициент будет оптимален с точки зрения прочности при изгибе.

Для расчета оптимального коэффициента $\alpha_{\text{опт}}$ используем формулы, предложенные А.Н. Плугиным [4, 5]

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

где d_n – средний размер зерен песка преобладающего частного остатка на сите (для нашего песка равен 0,47 мм); $d_{\text{щ}}$ – средний размер зерен щебня (для щебня 5–10 мм равен 7,5 мм).

Подставляя значения, получим

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{опт}} &= 2,1 \cdot \left(1 + \frac{d_n}{d_{\text{щ}}} \right)^3 - 1,1 = \\ &= 2,1 \cdot \left(1 + \frac{0,47}{7,5} \right)^3 - 1,1 = 1,42. \end{aligned}$$

При оптимальном коэффициенте раздвижки зерен $\alpha_{\text{опт}}$ между двумя зернами щебня должен располагаться один или два ряда зерен песка. Коэффициенты раздвижки зерен щебня для разных реальных материалов бетона, приведенных в табл. 1, определены по формуле (2)

$$\alpha = \frac{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{и}}^{\text{и}}} + \text{Ц} \times \frac{\text{В}}{\text{Ц}} + \frac{\text{П}}{\rho_{\text{и}}^{\text{п}}}}{\frac{\text{Щ} \times \text{Пуст}^{\text{щ}}}{\rho_{\text{нас}}^{\text{щ}}}}, \quad (2)$$

где Ц, П, Щ – расходы цемента, песка и щебня; $\rho_{\text{и}}^{\text{и}}$ – истинная плотность цемента, 3100 кг/м³; $\rho_{\text{и}}^{\text{п}}$ – истинная плотность песка, 2650 кг/м³; $\rho_{\text{нас}}^{\text{щ}}$ – насыпная плотность щебня, 1470 кг/м³; $\text{Пуст}^{\text{щ}}$ – пустотность щебня, 0,44; В/Ц – водоцементное отношение.

Расчеты показали, что наиболее близкими к оптимальному расчетному коэффициенту для данных материалов $\alpha_{\text{опт}} = 1,42$ являются коэффициенты $\alpha = 1,32$ (бетон без добавок) и $\alpha = 1,27$ (бетон с добавками). Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение прочности при изгибе (а также при сжатии) соответствует бетону состава 3 с $\alpha = 1,32$ и 1,27 (табл. 2, 3).

Таблица 1 Расчетные значения коэффициента раздвижки зерен щебня

№ п/п	Отношение песок : щебень	Добавка Sika Plast 2508	В/Ц	α
1	1000 : 900	без добавки	0,57	2,56
		с добавкой	0,49	2,46
2	800 : 1100	без добавки	0,54	1,83
		с добавкой	0,46	1,75
3	600 : 1300	без добавки	0,50	1,32
		с добавкой	0,44	1,27
4	400 : 1500	без добавки	0,46	0,95
		с добавкой	0,41	0,91

Таблица 2 Прочность бетонов при изгибе

№ состава	Прочность бетонов при изгибе, МПа, в возрасте, сут.					
	без добавки			с добавкой Sika Plast 2508		
	3 сут.	7 сут.	28 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.
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

Таблица 3 Прочность бетонов при сжатии

№ состава	Прочность бетонов при сжатии, МПа, в возрасте, сут.					
	без добавки			с добавкой Sika Plast 2508		
	3 сут.	7 сут.	28 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.
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

Можно отметить, что для каждого случая реальных заполнителей оптимальный коэффициент раздвижки зерен щебня растворной частью α будет разным.

Материалы, применяемые в исследованиях

В исследованиях влияния лещадных частиц на прочность бетона при изгибе применяли портландцемент Ивано-Франковского завода ПЦ I – 500 Н, щебень гранитный фракции 5–10 мм Кировоградского карьера, песок кварцевый с $M_{кр} = 1,3$. Добавки в состав бетона не вводили. Изготавливали образцы-балочки размером 4x4x16 см и кубы размером 7x7x7 см. Поскольку для бетона верхнего слоя покрытия рекомендовано содержание лещадных частиц не более 25 %, то эксперименты проводили в этом количественном диапазоне.

Экспериментальные исследования влияния различных факторов на прочность бетона при изгибе

Проводили исследования по определению влияния количества лещадных частиц в

щебне на прочность бетонов. Полученные данные (рис. 1) показали, что прочность образцов-половинок балочек при сжатии снижается при увеличении содержания лещадных частиц от 5 до 15 % на 5 %. При дальнейшем увеличении количества лещадных частиц снижения прочности при сжатии не происходит.

Прочность балочек при изгибе снижается на 19 % при изменении содержания лещадных частиц от 5 до 20 % (рис. 2). Наибольшее снижение (на 15,5 %) отмечено в интервале содержания лещадки 0–15 %.

При этом водопоглощение бетонов с разным количеством лещадных частиц практически неизменно (табл. 4). Это подтверждает то, что открытая пористость бетонов в исследованном количественном диапазоне содержания лещадных частиц одинакова. Для оценки влияния активности (марки) цемента на прочность бетонов при изгибе применяли цемент ПЦ II/A-III-400. Эксперимент показал, что при увеличении количества лещадных частиц от 5 до 15 % марочная прочность бетонов при сжатии снижается на 20 %, что больше, чем у бетонов на цементе ПЦ I –

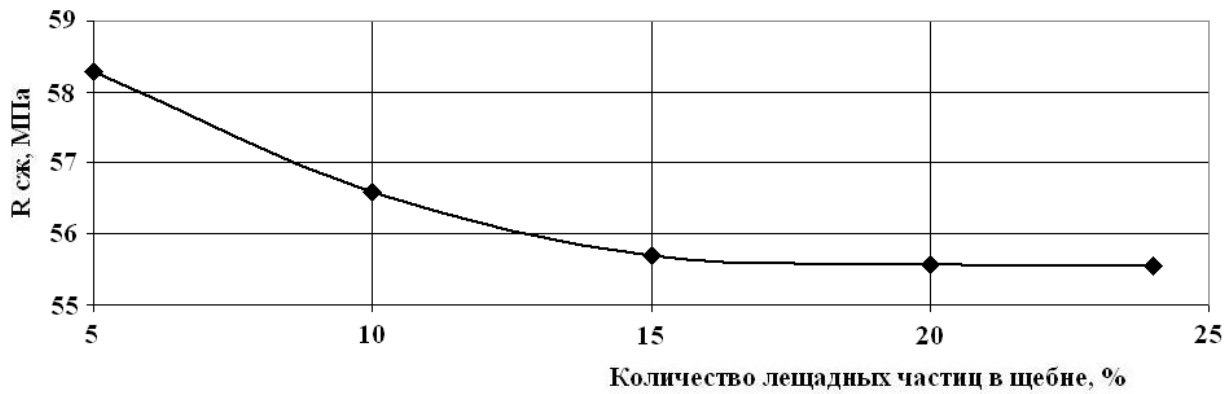


Рис. 1. Прочность при сжатии образцов-балочек с разным содержанием лещадных частиц



Рис. 2. Прочность при изгибе образцов-балочек с различным содержанием лещадных частиц

500 Н (рис. 3). Однако дальнейшее увеличение количества лещадки не приводит к изменению прочности при сжатии.

Прочность бетонов при изгибе при изменении содержания лещадки от 5 до 15 % снижается на 20 %, что сопоставимо с результатами на цементе ПЦ I – 500 Н (рис. 4).

Известно, что бетоны разрушаются по зоне контакта «затвердевшее цементное тесто – заполнитель», по заполнителю и по цементному камню (затвердевшему цементному тесту). Наиболее часто разрушение происходит по зоне контакта [6]. Уплотнить и упроч-

нить ее можно, если предварительно обработать заполнитель раствором соли, кислоты или щелочи. При этом или изменяется знак заряда поверхности заполнителя, или он усиливается [7]. Кинетика изменения прочности бетона на активированном заполнителе показывает, что при активации мелкого кварцевого песка 0,01 %-ным раствором $AlCl_3$ происходит интенсивное повышение прочности бетонов, особенно в начальный период твердения (до 7 суток) (табл. 5). Значительное повышение прочности мелкозернистых бетонов на активированном заполнителе при изгибе сохраняется не только в ранние сроки твердения, но и после 28 суток.

Таблица 4 Водопоглощение бетона с разным содержанием зерен лещадной формы

	Водопоглощение бетона, <i>W</i> , %, при разном содержании лещадных частиц		
	5 %	15 %	24 %
Образцы-кубы	1,76	1,71	1,74
Образцы-балочки	2,00	1,98	2,10

Таблица 5 Прочность бетонов на различных заполнителях

Состав	Прочность при сжатии / изгибе, МПа, в возрасте, сутки					
	3	7	14	28	90	180
Обычный заполнитель	7,5/1,4	12,4/1,9	20,2/2,9	25,8/3,6	26,7/3,9	27,1/4,1
Активированный заполнитель	16,9/2,2	23,2/3,1	30,1/4,3	33,6/4,9	34,9/5,4	35,5/5,7

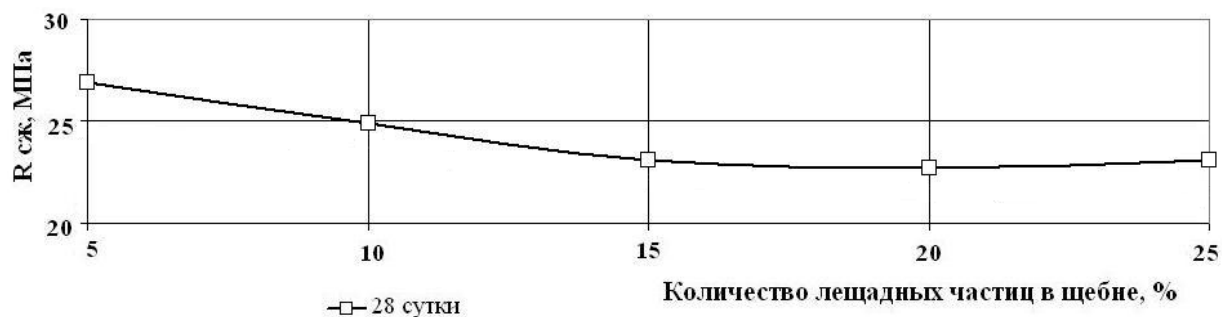


Рис. 3. Прочность образцов-балочек при сжатии с различным содержанием лещадных частиц

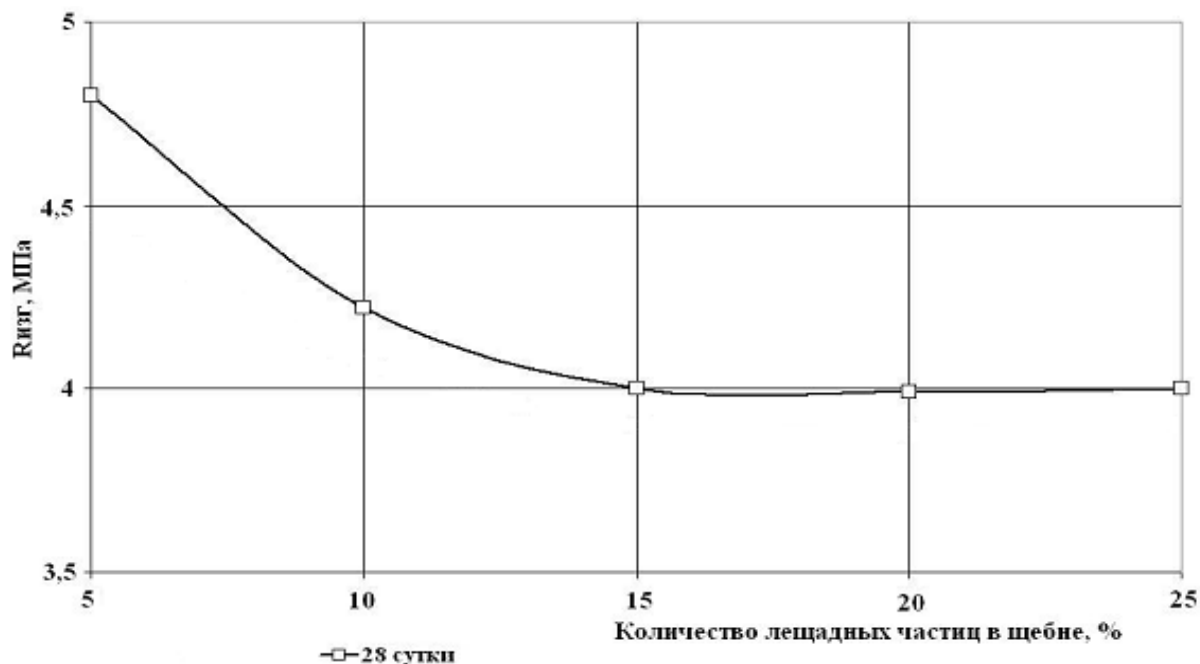


Рис. 4. Прочность образцов-балочек при изгибе с различным содержанием лещадки

В то время как разница в прочности при сжатии между бетонами на активированном и неактивированном заполнителе уменьшается после 28 суток твердения. Это можно объяснить улучшением зоны контакта между затвердевшим цементным тестом и заполнителем. Известно, что дисперсное армирование цементных бетонов, например, полипропиленовой фиброй, также способствует увеличению прочности бетонов.

Следует отметить, что мнения разных авторов по поводу влияния фибры на прочность бетонов при изгибе различны. В частности, существует устойчивое мнение о том, что введение фибры снижает прочность бетонов при сжатии. И хотя нет сомнения в том, что большинство характеристик фибробетонов превосходят свойства обычных бетонов, требует уточнения вопрос о том, насколько может увеличиться прочность бетона при изги-

бе при использовании фибры, в частности, полипропиленовой.

В исследованиях применяли отечественную полипропиленовую фибру (производство ООО «Спецснаб», г. Днепр) длиной 12 мм и диаметром 5 мкм. Состав бетона: цемент ПЦ I М500 – 380 кг/м³, щебень фракции 5 – 10 мм – 1280 кг/м³, песок кварцевый с $M_{кр} = 2,2 - 600$ кг/м³, суперпластификатор Fk 88 (фирма MC Bauchemie, Германия). Результаты свидетельствуют о повышении прочности бетонов при изгибе на 41 % и одновременном снижении коэффициента дефектности структуры ($K_{деф}$) (табл. 6). Для достижения наилучшего результата расход фибры составил 1 кг/м³ бетонной смеси.

Поскольку дорожные и аэродромные бетоны изготавливают с комплексом добавок (суперпластификатор + воздухововлекающая

добавка), то проводили исследования влияния количества вовлеченного воздуха на механические свойства бетонов (табл. 7).

Составы бетона: Ц–350 кг/м³; П–600 кг/м³, Мкр=1,7; Ш₅₋₁₀ – 1300 кг/м³. Во все составы вводили суперпластификатор поликарбоксилатного типа Sika 2508 в количестве 1 % от

массы цемента, а также воздухововлекающую добавку Sika Mix Plus, количество которой указано в таблицах (табл. 7, 8).

Исследования показали, что при увеличении содержания вовлеченного в бетонную смесь воздуха происходит снижение прочности бетонов.

Таблица 6 Свойства фибробетонов с полимерными фибрами

№ п/п	Состав бетона	Количество фибры, кг/м ³	Показатель прочности бетона, МПа, в возрасте 28 суток	
			$R_{изг}/R_{сж}$	$K_{деф}$
1	Без фибры	–	4,9/44,0	8,98
2	С фиброй	0,6	6,0/44,2	7,36
3	С фиброй	1,0	6,9/45,4	6,58
4	С фиброй	1,4	6,5/43,0	6,62

Таблица 7 Влияние количества вовлеченного воздуха на механические свойства бетонов на цементе ПЦ I 500 – Н Здолбуновского завода Ровенской области

Вид и количество добавки Sika Mix Plus, % от $m_{ц}$	Содержание воздуха, %	Прочность при изгибе в возрасте 28 сут., $R_{изг}$, МПа	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут., $R_{сж}$, МПа	Коэффициент дефектности структуры в возрасте, 28 сут., $R_{сж}/R_{изг}$
–	2,6	7,9	47,0	5,95
0,07	3,8	7,3	44,3	6,07
0,1	6,2	6,9	39,2	5,68
0,2	8,6	6,6	33,9	5,14

*В/Ц составов 0,44

Таблица 8 Влияние количества вовлеченного воздуха на механические свойства бетонов на цементе ПЦ II А/Ш - 500 – Н Здолбуновского завода Ровенской области

Количество добавки Sika Mix Plus, от $m_{ц}$	Содержание воздуха, %	Прочность при изгибе в возрасте 28 сут., $R_{изг}$, МПа	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут., $R_{сж}$, МПа	Коэффициент дефектности структуры в возрасте 28 сут., $R_{сж}/R_{изг}$
–	3,5	7,8	46,8	6,0
0,07	4,2	7,4	43,5	5,88
0,1	6,8	7,0	39,7	5,67
0,2	9	6,5	32,6	5,02

*В/Ц составов 0,46

Для бетонов на цементе ПЦ I 500 – Н прочность при сжатии при увеличении воздухововлечения от 2,6 до 3,8 % снижается на 6 %, далее при содержании воздуха 6,2 % – на 20 %, а при содержании воздуха 8,6 % – на 42 %. Для бетонов на цементе ПЦ II А/Ш – 500 – Н прочность при сжатии при увеличении воздухововлечения от 3,5 до 4,2 % снижается на 8 %, далее при содержании воздуха 6,8 % – на 18 %, а при содержании воздуха 9,0 % – на 44 %. В то же время,

прочность при изгибе бетонов на цементе ПЦ I 500 – Н снижается на 8, 14 и 20 % при соответственном увеличении воздухововлечения, а на цементе ПЦ II А/Ш-500 – снижается на 5, 11 и 20 % соответственно.

Следует отметить, что снижение прочности бетонов при сжатии более значительно, чем снижение прочности при изгибе. При этом коэффициент дефектности структуры бетонов при увеличении содержания вовлеченно-

го воздуха снижается. Это свидетельствует о том, что дополнительное воздухововлечение затрагивает межзерновое пространство бетонов, но мало влияет на зону контакта «затвердевшее цементное тесто – заполнитель».

Выводы

Расчетным путем установлен оптимальный коэффициент раздвижки зерен щебня растворной частью для реальных материалов, который для конкретных материалов будет разным.

Установлено, что при увеличении содержания лещадных частиц в щебне прочность при сжатии снижается в меньшей степени (на 5 %), чем при изгибе (на 20 %). Уменьшение активности (марки) цемента приводит к большему снижению прочности при сжатии (до 20 %), но не изменяет потери прочности при изгибе (остаётся снижение на 20 %).

Подтверждена эффективность влияния обработки мелкого заполнителя раствором хлорида алюминия на рост прочности бетонов преимущественно при изгибе в течение длительного времени.

Установлено, что дисперсное армирование бетонов полипропиленовой фиброй позволяет повысить их прочность при изгибе на 40 %.

Показано, что увеличение содержания вовлеченного в бетонную смесь воздуха приводит к значительному снижению прочности при сжатии, но мало влияет на качество зоны контакта «затвердевшее цементное тесто – заполнитель», и поэтому снижение прочности при изгибе в 2 раза меньше, чем при сжатии.

Литература

1. Грушко И.М. Довговічність бетону при спільній дії середовища та механічного навантаження / И.М. Грушко, Е.Б. Киреева // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1978. – № 23. – С. 64–68.
2. Лівша Р.Я. Сумісний вплив вологості й температури на поздовжню стійкість монолітних цементобетонних покриттів / Р. Лівша, М. Ольховик, Н. Васків // Автомобільні дороги й дорожнє будівництво. – 2004. – Вип. 72. – С. 47–52.
3. Usharov-Marshak A.V. DSK investigation and analysis of ice formation in capillary-porous materials / A.V. Usharov-Marshak, V.P. Sopov, O.A. Zlatkovski // Proc. ESTAC-7. – Balatonfured. Hungary. – 1998. – P. 158.
4. Плугин А.Н. Структура и долговременные свойства бетона / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин // Будівельні матеріали та вироби. – 2003. – № 4. – С. 17–22.
5. Плугин А.Н. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин и др. – Том 3. – К.: Наукова думка, 2012. – 288 с.
6. Грушко И.М. Прочность бетонов на растяжение / И.М. Грушко, А.Г. Ильин, С.Т. Рашевский. – Х.: Изд-во ХГУ, 1973. – 156 с.
7. Ольгинский А.Г. Регулирование прочности мелкозернистых цементных бетонов по электрокинетическому потенциалу заполнителя / А.Г. Ольгинский, А.А. Редкозубов // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 1996. – Вып. 3. – С. 42–45.

Рецензент: С.Н. Толмачёв, профессор, д.т.н., ХНАДУ.