



ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online

СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2012, ТОМ 8, НОМЕР 1, 27–35

УДК 666.973.6:620.17

ВЗАЄМНИЙ ЗВ'ЯЗОК МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗАВТОКЛАВНОГО ПІНОБЕТОНУ

В. Б. Верба, І. Б. Горніковська, Х. Б. Демчина, В. В. Волоцюга, П. О. Голик

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013.

E-mail: verba.v@gmail.com

Отримана 20 лютого 2012; прийнята 23 березня 2012.

Анотація. Стаття присвячена дослідженню міцності та деформативності безавтоклавного пінобетону на основі аналізу літературних джерел, нормативних документів та власних експериментів, у результаті яких встановлено взаємозв'язок між фізико-механічними характеристиками безавтоклавного пінобетону та запропоновані емпіричні залежності, що об'єднують між собою марку пінобетону за густиною, клас за міцністю на стиск, призмову міцність пінобетону на стиск, міцність на центральний розтяг та модуль пружності.

Ключові слова: безавтоклавний пінобетон, фізико-механічні характеристики, міцність, модуль пружності.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА

В. Б. Верба, И. Б. Горниковская, К. Б. Демчина, П. А. Голик, В. В. Волоцюга

Национальный университет «Львовская политехника»,

ул. Ст. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013.

E-mail: verba.v@gmail.com

Получена 20 февраля 2012; принята 23 марта 2012.

Аннотация. Статья посвящена исследованиям прочности и деформативности безавтоклавного пенобетона на основании анализа литературных источников, нормативных документов и личных экспериментов, в результате которых установлена взаимосвязь между физико-механическими характеристиками безавтоклавного пенобетона и предложены эмпирические зависимости, что объединяют между собой марку пенобетона по плотности, класс по прочности на сжатие, призменную прочность пенобетона на сжатие, прочность на центральное растяжение и модуль упругости.

Ключевые слова: безавтоклавный пенобетон, физико-механические характеристики, прочность, модуль упругости.

INTERRELATION BETWEEN STRENGTH AND DEFORMATIVE CHARACTERISTICS OF NONAUTOCLAVED FOAM CONCRETE

Volodymyr Verba, Iryna Hornikovska, Khrystyna Demchyna, Petro Holyk,
Volodymyr Volotsiuga

Lviv Polytechnic National University,
12, St. Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79013.
E-mail: verba.v@gmail.com

Received 20 February 2012; accepted 23 March 2012.

Abstract. The article is devoted to the investigations of strength and deformative characteristics of nonautoclaved foam concrete on the basis of the literature and standards analysis and on the own experimental researches. As a result there are determined the interrelations between physical-mechanical properties of nonautoclaved foam concrete and proposed empirical equations that correlate such characteristics as: grade of concrete by density, grade of concrete by compressive strength, prism compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity.

Keywords: nonautoclaved foam concrete, physical-mechanical characteristics, strength, modulus of elasticity.

Постановка проблеми

На сьогодні в Україні нарощуються обсяги виробництва пінобетону безавтоклавного тверднення. Українські виробники газо- і пінобетону в 2010 році демонстрували річне зростання галузі на 10,4 %. За існуючими оцінками, виробничі потужності повинні забезпечити щороку випуск ніздрюватих бетонів обсягом не менше 100 куб. метрів на 1 000 українців, що становить 4,6 млн куб. метрів виробів на рік [1]. Таке зростання обумовлене привабливістю пінобетону як ефективного конструкційного матеріалу з високими тепло- та звукоізолювальними властивостями.

Використання будь-якого матеріалу, зокрема пінобетону, у будівництві нерозривно пов'язане з дослідженнями його фізико-механічних характеристик. Для оцінки конструкційних якостей пінобетону використовують різні величини, серед яких: марку пінобетону за густиною (D), клас пінобетону $LC(B)$ за міцністю на стиск, який признається за характеристичним значенням кубикової міцності $f_{ck,cube}(R)$, призмову міцність пінобетону на стиск $f_{ck,prism}(R_{bn})$ та його міцність на розтяг $f_{ctk,prism}(R_{bntn})$, початковий модуль пружності пінобетону $E_c(E_b)$.

В інженерній практиці найчастіше контролюють лише перші два параметри (марку за густиною D та клас за міцністю $LC(B)$), а інші прий-

маються з норм проектування або за емпіричними залежностями, оскільки відомо, що існує взаємозв'язок міцнісних характеристик бетонів між собою. Однак на практиці такі залежності є справедливими для кожного конкретного типу пінобетону, який визначається рецептурою його складу та технологією виготовлення. Практичний інтерес викликає виведення таких залежностей для безавтоклавного пінобетону, що виготовляється за класичною схемою отримання пінобетону за допомогою піноутворювальних добавок SK 100 / SK 120 фірми MC-Bauchemie (Німеччина).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні фізико-механічні характеристики ніздрюватих бетонів регламентовані в стандарті ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови» [2]. Подамо їх у табл. 1, доповнивши її колонками даних із старих стандартів та норм проектування бетонних та залізобетонних конструкцій.

У табл. 2 представлено міцнісні характеристики пінобетону за СНиП [3] та посібником з проектування, розробленим у його розвиток [4]. Числові дані з табл. 2 нанесемо на координатну площину $f_{ck,prism} - B$ та з'єднаємо плавною лінією (рис. 1). На цьому ж графіку зображені прямі

Таблиця 1. Фізико-механічні показники бетонів

Вид безавтоклавного пінобетону	Марка за середньою густиною		Клас за міцністю на стиск		
	ГОСТ 25485-89	За ДСТУ [2]	ГОСТ 25485-89	За СНиП [3]	За ДСТУ [2]
Теплоізоляційний	-	D200	-	-	B 0,35 B 0,5 B 0,75
	-	D250	-	-	
	D300	D300	-	-	
	D350	D350	-	-	
	D400	-	B 0,5; B 0,75	-	
D500	-	B 0,75; B 1	-		
Конструкційно-теплоізоляційний	-	D400	-	-	B1
	D500	D500	-	-	B 1,5 B2
	D600	D600	B1; B2	B1; B1,5	B 1,5
	D700	D700	B1,5; B2; B2,5	B1,5; B2; B2,5	B 2 B 2,5
D800	D800	B2; B2,5; B3,5	B2; B2,5; B3,5	B 2	
D900	D900	B2,5; B3,5; B5	B3,5; B5	B 2,5 B 3,5 B 5	
Конструкційний	D1000	D1000	B5; B7,5	B5; B7,5	B 5
	D1100	D1100	B7,5; B10	B7,5; B10	B 7,5 B 10 B 12,5
	D1200	-	B10; B12,5	B10; B12,5	-

Таблиця 2. Міцнісні характеристики пінобетону [3, 4]

Напружений стан	Нормативні опори пінобетону на стиск $f_{ck,prism} (R_{bn})$ і розтяг $f_{ctk,prism} (R_{btm})$, МПа (кгс/см ²), при класі бетону за міцністю на стиск									
	B1	B1,5	B2	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5	B15
Осьовий стиск (призмova міцність) $f_{ck,prism} (R_{bn} \text{ і } R_{b,ser})$	<u>0,95</u> 9,69	<u>1,40</u> 14,3	<u>1,90</u> 19,4	<u>2,4</u> 24,5	<u>3,3</u> 33,7	<u>4,60</u> 46,9	<u>6,9</u> 70,4	<u>9,0</u> 91,8	<u>10,5</u> 107	<u>11,5</u> 117
Осьовий розтяг $f_{ctk,prism} (R_{btm} \text{ і } R_{bt,ser})$	<u>0,14</u> 1,43	<u>0,22</u> 2,24	<u>0,26</u> 2,65	<u>0,31</u> 3,16	<u>0,41</u> 4,18	<u>0,55</u> 5,61	<u>0,63</u> 6,42	<u>0,89</u> 9,08	<u>1,00</u> 10,2	<u>1,05</u> 10,7

регресії, побудовані за методом найменших квадратів, та їхній аналітичний вираз. Проведене наближення показало високу збіжність ($R^2 > 0,97$).

Валор (Valore R. C.) [5] оцінює відношення міцності на розтяг до міцності на стиск пінобетону на рівні 0,15–0,35, Легацкі (Legatski L. A.) [6] прогнозує це відношення на рівні 0,10–0,15. Такі відмінності в прогнозах спричинені тим, що існують різні методики визначення міцності бетону

на розтяг, які більш чутливі до умов проведення експерименту, ніж у випадку стиску. До цих методик відносяться методики визначення міцності на центральний розтяг на «вісімках» та призмах, на розтяг при згині та розтяг при розколюванні. Окрім цього, на усі ці параметри суттєвий вплив має вологість пінобетону. Більшість відомих формул для визначення модуля пружності іздрюватих бетонів є функціями від міцності

на стиск [5, 7, 8]. Емпіричні рівняння, що визначають модуль пружності ніздрюватих бетонів, наведені в табл. 3. На основі нормативних джерел [3, 4] нами виведені емпіричні залежності (8) та (9) для пінобетону безавтоклавного тверднення.

Постановка завдання

Встановлення взаємозв'язку між фізико-механічними характеристиками пінобетону безавто-

клавного тверднення на основі аналізу нормативних і літературних джерел та власних експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу

На кафедрі будівельних конструкцій та мостів НУ «Львівська політехніка» було випробувано 10 серій експериментальних зразків-кубиків з безавтоклавного пінобетону проектних марок за густиною від D600 до D1200. Результати цих

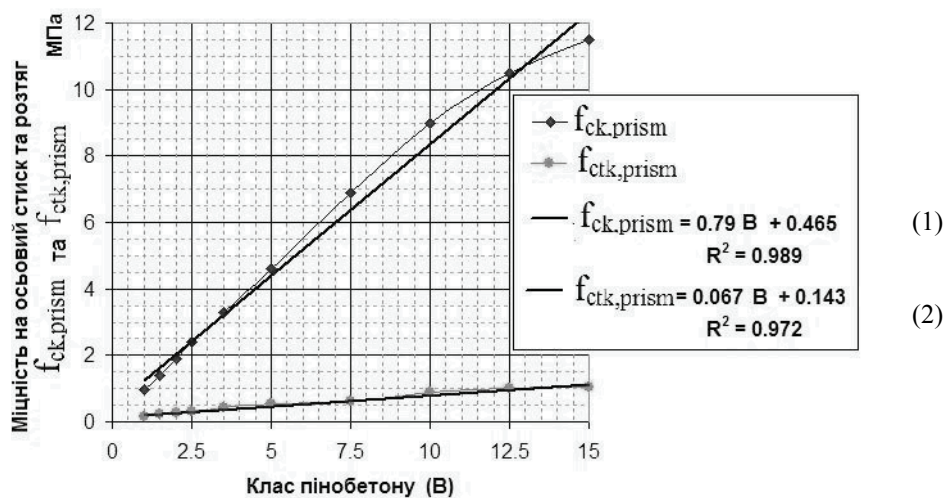


Рисунок 1. Залежність призмових міцностей пінобетону на стиск та розтяг від класу В.

Таблиця 3. Емпіричні рівняння визначення модуля пружності ніздрюватих бетонів

Формула	Тлумачення позначень	№
$E_c = 6000 (a)^{1,5} S$ [5]	a – густина в сухому стані г/см^3 , S – кубикова міцність на стиск в кг/см^2 , E_c в кг/см^2	(3)
$E_c = 1550 S^{0,7}$ [5]	S – кубикова міцність на стиск в кг/см^2 , E_c в кг/см^2	(4)
$E_c = 3000 S_p$ [73]	S_p – призмova міцність в кг/см^2 , E_c в кг/см^2	(5)
$E_c = k \gamma_{dry} (f_c)^{1,5}$ [8]	γ_{dry} – густина в сухому стані в кг/м^3 , f_c – стискальне напруження в МПа, k – константа в межах 1,5...2,0	(6)
$E_c = c_1 (p - c_2)$ [8]	c_1 і c_2 – константи, p – густина в сухому стані в кг/м^3 , E в МПа	(7)
$E_c = 0,8 \cdot 1246 \cdot B^{0,767}$	B – клас пінобетону за міцністю на стиск; 0,8 – коефіцієнт для безавтоклавного пінобетону; E_c в МПа	(8)
$E_c = 0,8 \cdot 2,45 \cdot D \cdot B^{0,441}$	B – клас пінобетону за міцністю на стиск; D – марка за густиною; 0,8 – коефіцієнт для безавтоклавного пінобетону; E_c в МПа	(9)

випробувань подано на рис. 2, за якими виведено залежність між кубиковою міцністю та густиною за методом лінійної регресії.

Згрупувавши зразки по трьох марках пінобетону за густиною (D600, D800, D1000), було виведено фактичні коефіцієнти варіації V_c для прийнятої технології та рецептури пінобетону, які склали 13,9; 50,1 та 26,7 % відповідно (в середньому 30,2 %). На основі середнього коефіцієнта варіації та рівняння (10) визначили характеристичну кубикову міцність пінобетону $f_{ck,cube}$ для призначення класу пінобетону B та його залежності від марки пінобетону за густиною (12):

$$f_{ck,cube} = f_{c,cube} (1 - 1,64V_c). \quad (11)$$

Другий етап досліджень було присвячено дослідженню міцності пінобетону на центральний розтяг на зразках-призмах та «вісімках». Форма, номінальні розміри зразків та методика дослідження відповідала ДСТУ Б В.2.7.-214:2009 «Методи визначення міцності за контрольними зразками» [9]. Поперечний переріз зразків становив 150×150 мм та 100×100 мм. Середня вологість зразків під час випробувань складала 7 %. Результати випробувань представлені на рис. 3. Отримане рівняння регресії вважаємо справедливим для пінобетону з марками за густиною в діапазоні D600–D1400.

Після випробування дослідних зразків на розтяг з тих частин, які залишилися неушкодженими, були вирізані від 2-х до 4-х кубиків з

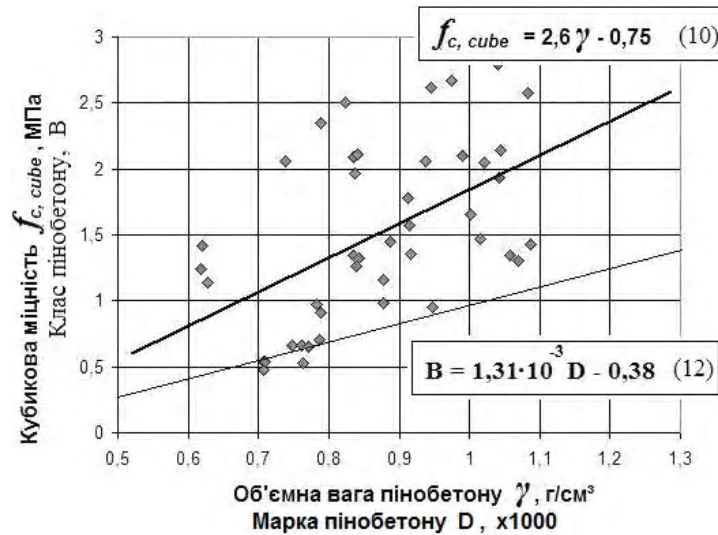


Рисунок 2. Зв'язок між густиною та кубиковою міцністю безавтоклавного пінобетону.

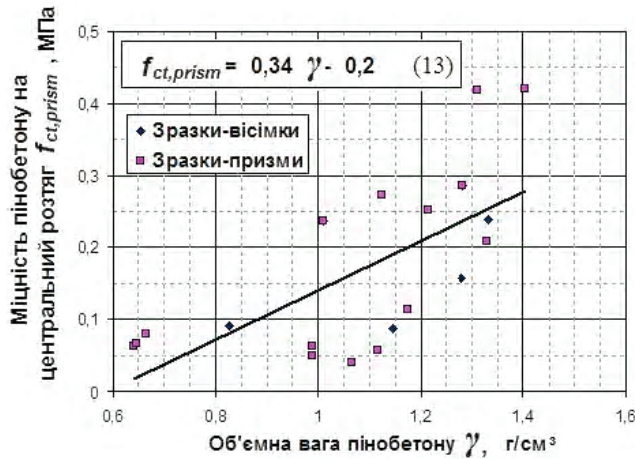


Рисунок 3. Міцність пінобетону на розтяг залежно від його густини.

метою встановлення кубикової міцності пінобетону на стиск та визначення його класу за міцністю. Випробування зразків кубиків проводилося відповідно до ДСТУ Б В.2.7.-214:2009. Для кубиків розміром $100 \times 100 \times 100$ мм застосовувався масштабний коефіцієнт $\alpha = 0,95$.

Окрім визначення середньої кубикової міцності пінобетону $f_{cm,cube}$, визначався фактичний коефіцієнт варіації та характеристична кубикова міцність пінобетону $f_{ck,cube}$ залежно від V_c за формулою (11).

Результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4. Визначення міцності на стиск пінобетону дослідних зразків

Маркування зразка	Об'ємна вага, кг/м ³	f_{ct} , МПа	$f_{c,cube}$, МПа	$f_{cm,cube}$, МПа	σ^2	V_c	$f_{ck,cube}$, МПа	B
B1.15.8	0,831	0,092	0,624	0,614	0,001	0,041	0,573	B 0,5
			0,639					
			0,580					
B2.15.8	1,144	0,087	0,536	0,503	0,001	0,066	0,448	B0,35
			0,469					
B1.15.12	1,293	0,286	2,750	2,479	0,033	0,074	2,179	B2
			2,385					
			2,302					
B2.15.12	1,131	0,236	1,913	1,774	0,019	0,078	1,545	B1,5
			1,634					
B1.10.8	1,395	0,156	1,617	2,129	0,263	0,241	1,289	B1
			2,642					
B2.10.8	1,464	0,239	1,908	1,986	0,006	0,039	1,859	B1,5
			2,063					
B1.10.12	1,608	0,79	5,008	6,059	2,392	0,255	3,523	B3,5
			4,924					
			8,246					
B2.10.12	1,551	0,7	5,949	7,323	1,355	0,159	5,414	B5
			8,241					
			6,414					
			8,687					
П1.10.12	1,407	0,418	7,234	7,437	0,041	0,027	7,104	B5
			7,640					
П1.10.10	1,161	0,113	1,875	2,068	0,037	0,093	1,751	B1,5
			2,262					
П2.10.10	1,395	0,273	2,142	2,102	0,002	0,019	2,038	B2
			2,063					

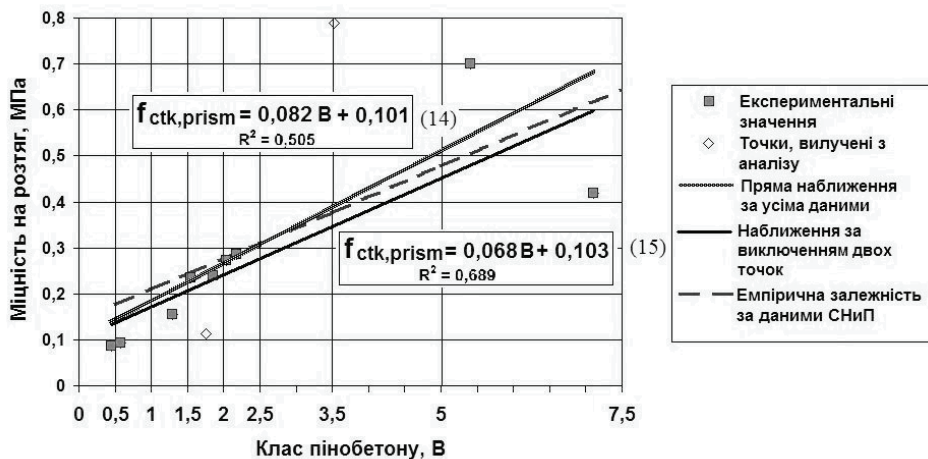


Рисунок 4. Залежність між класом пінобетону та міцністю на розтяг.

На рис. 4 зображена залежність між характеристичною кубиковою міцністю безавтоклавного пінобетону (класом пінобетону В) та його міцністю на розтяг.

Провівши наближення двома лініями регресії: з врахуванням усіх експериментальних точок та з виключенням двох найвіддаленіших точок на початку та в кінці діапазону значень, встановлено, що отримані залежності незначно відрізняються від залежності, запропонованої заданими СНиП [3] (для залежності (15) до 20% при В 0,5 та до 5% при В 7,5).

Також були проведені випробування пінобетону на стандартних призмах $150 \times 150 \times 600$ мм та $100 \times 100 \times 400$ мм з метою визначення його характеристичної призмової міцності на стиск $f_{ck,prism}$ та початкового модуля пружності E_c . На рис. 5 подано отриману залежність, що пов'язує об'ємну вагу, призмову міцність та модуль пружності безавтоклавного пінобетону. Графік побудовано на основі нелінійного наближення за заданою моделлю функції у програмному комплексі STATISTICA. За основу бралися результати випробувань 18-ти дослідних призм. Отримане наближення показало високу збіжність з даними експериментів ($R^2 = 0,907$).

Висновки

За проведеними теоретичними та експериментальними дослідженнями можна зробити висновки, що між фізико-механічними характери-

Литература

1. Ніздрюваті бетони: вчора, сьогодні, завтра [Електронний ресурс] // Комітет екологічного порятунку України. – Режим доступу : http://eco-ua.org/index.php?d_id=5&item=articles&sub=4830.
2. Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови [Текст] : ДСТУ Б В.2.7-45-2010. – На заміну ДСТУ Б В.2.7-45-96 (зі скасуванням в Україні ГОСТ 12852.0-77, ГОСТ 12852.5-77) ; чинний від 2010-11-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 41 с. – (Національний стандарт України).
3. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст] : СНиП 2.03.01-84*. – Являється переизданием СНиП 2.03.01-84 с изменениями, утвержденными постановлениями Госстроя СССР от 8 июля 1988 г. № 132 и от 25 августа 1988 г. № 169. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.

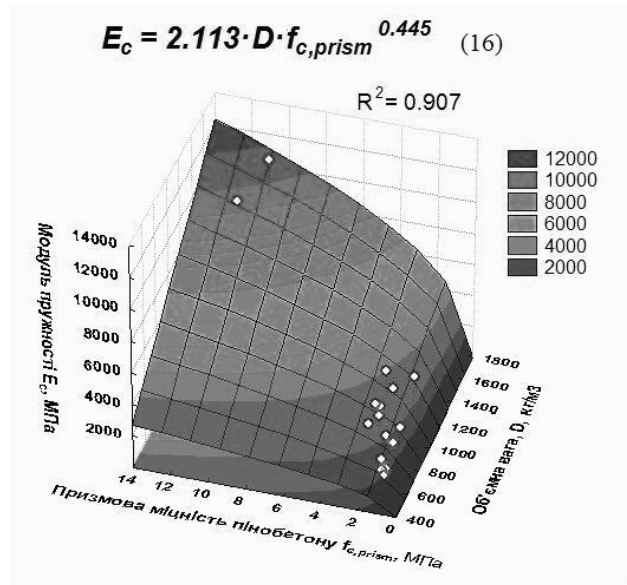


Рисунок 5. Залежність між призмовою міцністю на стиск, об'ємною вагою та модулем пружності безавтоклавного пінобетону.

стиками безавтоклавного пінобетону простежується чіткий зв'язок. Авторами статті запропоновані емпіричні залежності, які пов'язали основні фізико-механічні характеристики пінобетону між собою, а саме: марку пінобетону за густиною (D), клас пінобетону LC (B) за міцністю на стиск, призмову міцність пінобетону на стиск $f_{ck,prism}$ (R_{bn}) та розтяг $f_{ctk,prism}$ (R_{bnt}), початковий модуль пружності пінобетону E_c (E_b) (формули 1, 2, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16).

References

1. Foamed concrete: yesterday, today, tomorrow. Accessed at: http://eco-ua.org/index.php?d_id=5&item=articles&sub=4830. (in Ukrainian)
2. DSTU B B.2.7-45-2010. Building materials. Cellular concretes. General specifications. Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2010. 41 p. (in Ukrainian)
3. SNiP 2.03.01-84*. Concrete and reinforced concrete constructions. Moscow: TsITP Gosstroia USSR, 1989. 80 p. (in Russian)
4. Textbook in design of concrete and reinforced concrete constructions from foamed concrete (to SNiP 2.03.01-84. Concrete and reinforced concrete constructions). Moscow: TsITP Gosstroia USSR, 1986. 94 p. (in Russian)
5. Valore, R. C. Cellular concretes – physical properties. In: *J. Am. Concr. Inst.*, 1954, 25, p. 817–836.

4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов (к СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции) [Текст] / НИИЖБ, ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 94 с.
5. Valore, R. C. Cellular concretes – physical properties [Text] / R. C. Valore // J. Am. Concr. Inst. – 1954. – 25. – P. 817–836.
6. Legatski, L. A. Cellular Concret [Text] / L. A. Legatski // Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials (Report No. ASTM STP 169C. American Society for Testing and Materials) / P. Klieger and J. F. Lamond, Eds. – West Conshohocken, 1994. – P. 533–539.
7. Rudnai, G. Light weight concretes [Text] / G. Rudnai. – Budapest : Akademi Kiado, 1963. – 271 p.
8. Ramamurthy, K. A classification of studies on properties of foam concrete [Text] / K. Ramamurthy, E. K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani // Cement & Concrete Composites. – 2009. – 31. – P. 388–396.
9. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Текст] : ДСТУ Б В.2.7-214:2009. – На зміну ГОСТ 10180-90 ; чинний від 2010-09-01. – К. : Мінірегіонбуд України, 2010. – 36 с.
6. Legatski, L. A. Cellular Concret. In: *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials (Report No. ASTM STP 169C. American Society for Testing and Materials)*, P. Klieger and J. F. Lamond, Eds. West Conshohocken, 1994, p. 533–539.
7. Rudnai, G. Light weight concretes. Budapest: Akademi Kiado, 1963. 271 p.
8. Ramamurthy, K.; Kunhanandan Nambiar, E. K.; Indu Siva Ranjani, G. A classification of studies on properties of foam concrete. In: *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31, p. 388–396.
9. DSTU B В.2.7-214:2009. Building material. Concretes. Methods of strength test according to check samples. Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2010. 36 p. (in Ukrainian)

Верба Володимир Богданович – асистент кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: дослідження армованих конструкцій із безавтоклавного пінобетону.

Горніковська Ірина Богданівна – асистент кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: фізико-технічні та експлуатаційні властивості безавтоклавного пінобетону.

Демчина Христина Богданівна – асистент кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: міцність на продавлювання плит з пінобетону.

Волоцюга Володимир Володимирович – магістрант Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: дослідження міцнісних характеристик пінобетону; методи розрахунку конструкцій з врахуванням фізичної нелінійності.

Голик Петро Олександрович – магістр кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Наукові інтереси: дослідження міцнісних характеристик пінобетону.

Верба Владимир Богданович – ассистент кафедры строительных конструкций и мостов Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: исследования армированных конструкций из пенобетона.

Горниковская Ирина Богдановна – ассистент кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: физико-технические и эксплуатационные свойства безавтоклавного пенобетона.

Демчина Кристина Богдановна – ассистент кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: прочность на продавливание плит из пенобетона.

Волоцюга Владимир Владимирович – магистрант Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: исследования прочностных характеристик пенобетона, методы расчета конструкций с учетом физической нелинейности.

Голик Петр Александрович – магистр кафедры строительных конструкций и мостов Национального университета «Львовская политехника». Научные интересы: исследования прочностных характеристик пенобетона.

Volodymyr Verba – an assistant; Department of Building Constructions and Bridges, Lviv Polytechnic National University. Research interests: reinforced nonautoclaved foam concrete structures.

Iryna Hornikovska – an assistant; Department of Building Production, Lviv Polytechnic National University. Research interests: technical and service properties of nonautoclaved foam concrete.

Khrystyna Demchyna – an assistant; Department of Building Production, Lviv Polytechnic National University. Research interests: punching shear strength of foam concrete slabs.

Petro Holyk – master; Department of Building Constructions and Bridges, Lviv Polytechnic National University. Research interests: the study of strength characteristics of foam concrete.

Volodymyr Volotsiuga – undergraduate; Lviv Polytechnic National University. Research interests: the study of strength characteristics of foam concrete, methods of calculation constructions taking into account physical non-linearity.