

**ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА
КЕРАМЗИТОБЕТОНА**

С.Д. Семенюк, д.т.н., профессор,
skzs@bru.by

Ю.Г. Москалькова, к.т.н., доцент,
julia43@tut.by, ORCID: 0000-0002-4107-2452

В.А. Ржевуцкая, аспирант
valeriarzhevuckaya@gmail.com
Белорусско-Российский университет

Аннотация. Для выявления влияния компонентов заполнителя на прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона в Белорусско-Российском университете были проведены экспериментальные исследования на стандартных образцах в виде кубов, призм и цилиндров. Опытные образцы изготавливались из керамзитобетона классов LC 8/10 – LC 30/33 и испытывались на кратковременное осевое сжатие. В результате для каждого исследованного класса бетона были определены призмная и цилиндрическая прочности, продольный, поперечный и сдвиговой модули деформаций, коэффициент Пуассона, верхний и нижний пределы микротрещинообразования, коэффициент цилиндрической и призмной прочности.

Ключевые слова: керамзитобетон, легкий бетон, заполнитель, прочность, деформация, модуль деформаций.

Введение. Повышение требований к эксплуатационным и физико-механическим свойствам строительных конструкций обусловлено необходимостью поиска эффективных материалов для производства конструкций. Сегодня становится актуальным применение конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов. Решающим фактором при определении прочности бетона является активность цемента, прочность крупного заполнителя и водоцементное отношение.

Выбор керамзита в качестве крупного заполнителя обоснован тем фактом, что на его долю приходится наибольший процент от всего производства пористых заполнителей в Республике Беларусь. К положительным характеристикам данного материала можно отнести относительно высокую прочность (по сравнению с другими пористыми заполнителями) и достаточно большое количество замкнутых пор.

Необходимо принять во внимание, что керамзит – неоднородный материал, поэтому изменение технологии производственного процесса может повлечь за собой значительные изменения прочности, а также средней плотности отдельных гранул (это справедливо для всех природных заполнителей). Легкие бетоны, в том числе керамзитобетоны, широко применяются при возведении промышленных, сельскохозяйственных, гражданских зданий и сооружений, в гидротехническом строительстве, в тех случаях, когда необходимо уменьшить удельный вес конструкций и/или снизить давление на грунты. Легкие бетоны также обладают более высокой огнестойкостью по сравнению с тяжелым бетоном.

Однако, на сегодняшний день основная сфера использования легких бетонов – изготовление наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий. В связи с этим перспективным является разработка составов для производства конструкционного и конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона, применимого для изготовления несущих конструкций, а также корректировка расчетных положений по определению его прочностных и деформативных характеристик.

Анализ последних исследований и публикаций. Большое разнообразие легких заполнителей с существенно различными свойствами предопределяет отличие прочностных свойств легких бетонов от аналогичных свойств, принятых для обычного бетона. Эмпирически установлено [1, 2], что при использовании пористых заполнителей, добываемых и изготавливаемых в разных регионах, прочностные и деформативные характеристики бетонов на их основе могут довольно сильно отличаться. В связи с этим для каждого конкретного региона необходимо методом пробных замесов производить подбор оптимального состава бетонной смеси. Эта особенность отмечена также исследованиями [3], отметившими существенные различия в свойствах керамзитовых заполнителей, изготовленных на разных предприятиях Беларуси (Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК», ЗАО «Лидский керамзитовый завод», ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль»).

Основным фактором, влияющим на прочностные свойства керамзитобетона, являются прочность и жесткость заполнителей. Более слабые частицы заполнителя требуют более прочных растворов и, следовательно, более высокого содержания цемента. Хорошая связь частиц пористого заполнителя с цементной матрицей и сходство модулей заполнителя и матрицы обеспечивают их эффективную совместную работу вплоть до разрушения [4].

Плотность уплотненного бетона в основном зависит от плотности заполнителя, которая связана с пористостью частиц и, следовательно, с прочностью частиц. Таким образом, заполнители разной плотности приведут к разным прочностям бетона, также как и плотности [4]. Однако плотность и прочность керамзитобетона не связаны линейной зависимостью: при низкой плотности бетон может обладать довольно высокой прочностью на осевое сжатие.

На процесс образования микро и макротрещин положительно влияет отсутствие четко выраженной границы по контакту крупного заполнителя и цементной матрицы [1]. В [5] экспериментально подтверждено, что отсутствие в бетоне жесткого крупного заполнителя повышает уровень образования микротрещин (нижнюю границу микротрещинообразования) на 10–12 %, а увеличение пористости цементного камня снижает указанные показатели.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что для получения конструкционных легких бетонов необходимо использовать плотный мелкий заполнитель (песок, желательнее кварцевый, речной), поскольку применение пористых мелких заполнителей существенно снижает прочность бетонной матрицы, что подтверждается исследованиями [1, 4–7]. В Беларуси рекомендации по подбору состава керамзитобетона были разработаны институтом БелНИИС [3]. В них отмечено, что керамзит щебнеподобный по сравнению с керамзитовым гравием обладает более высокими прочностью, межзерновой пустотностью и водопоглощением в бетоне, а при использовании керамзитового гравия больше вероятность расслоения бетонной смеси ввиду всплытия зерен заполнителя.

Водоцементное отношение оказывает такое же влияние на прочность, как и для обычного бетона, и обычно в расчете состава бетонной смеси используется тот же коэффициент водоцементного отношения. Однако снижение эффективного водоцементного отношения за счет поглощения воды легким заполнителем трудно предсказать, и поэтому определение эффективного соотношения водоцементного отношения для смесей нецелесообразно, поскольку его трудно измерить и проверить. Содержание свободной воды такое же, как и для тяжелого бетона (180–2000 л на м³), но для поглощения заполнителя требуется более высокое общее содержание воды (250–3000 л на м³) [4]. Ситуация лучше для бетона на легком заполнителе, чем для обычного бетона благодаря резерву воды, доступной в порах заполнителя. Таким образом, бетон на легком заполнителе более терпим к плохому уходу за бетоном, чем обычный бетон [8].

Принято считать, что при равных факторах, определяющих состав бетона, и при одинаковых условиях твердения его прочность может определяться только водоцементным отношением (В/Ц). Однако по результатам эмпирических исследований, представленным графически на рис. 1 в работе [4], видно, что изменение водоцементного отношения для легкого

бетона на пористых заполнителях оказывает менее существенное влияние на прочность по сравнению с обычным бетоном на плотных заполнителях.

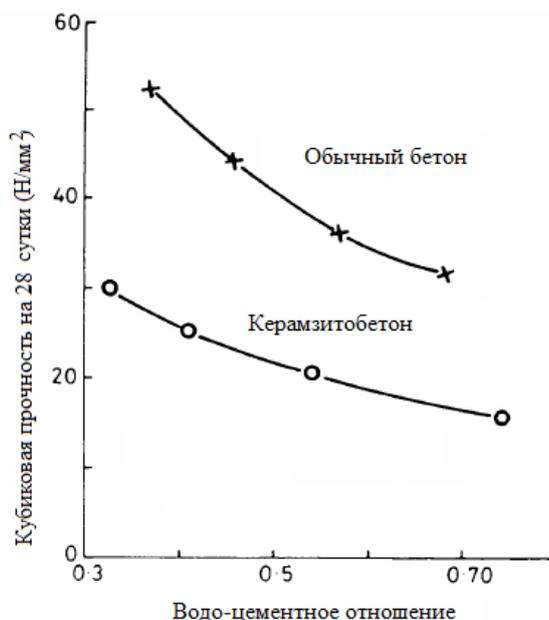


Рис. 1. Кубікова міцність на 28 днів – водоцементне відношення для керамзитобетону та звичайного бетону [4]

Содержание и марка цемента традиционно играют определяющую роль. Для бетона на легком заполнителе более важно связывать прочность с содержанием цемента и маркой цемента [1]. Для требуемой удобоукладываемости легкого бетона прочность увеличивается с содержанием цемента, но в тоже время прочность увеличивается в зависимости от типа используемых заполнителей. Как правило, требуется большее содержание цемента для легкого бетона, чем для обычного (при увеличении содержания цемента на 10 % прочность легкого бетона повышается примерно на 5 %) [4].

Цель исследования. Определить основные факторы, влияющие на прочностные и деформативные свойства керамзитобетона. Анализировать полученные результаты исследований и сравнить их с положениями Еврокода 2 [9, раздел 11] в части легких бетонов.

Материалы и методика исследования. Для приготовления бетонной смеси использовались следующие материалы:

- керамзитовый гравий производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль», фракций 5–10 мм с насыпной плотностью 382 кг/м^3 , относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа; фракций 10–20 мм с насыпной плотностью 326 кг/м^3 , относительной прочностью в цилиндре 1,86 МПа;

- керамзит щебенеподобный производства Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» фракций 5–10 мм с насыпной плотностью 585 кг/м^3 , относительной прочностью в цилиндре 10,26 МПа;

- керамзитовый песок производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль», фракций 0–4 мм с насыпной плотностью 432 кг/м^3 , относительной прочностью в цилиндре 4,58 МПа;

- карьерный песок с насыпной плотностью 1580 кг/м^3 ;

- портландцемент производства ОАО «Белорусский цементный завод» марки М500 с активностью 49,0 МПа, с показателем нормальной густоты 25–28 %.

В табл. 1 и 2 приведены основные характеристики испытанных опытных образцов.

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Таблиця 1 – Характеристики опытных керамзитобетонных образцов

Класс керамзитобетона		Материалы для приготовления бетонной смеси			Фактический состав бетонной смеси		Плотность керамзитобетона в возрасте 28 сут, $\rho_{оп}^v$, кг/м ³	Класс плотности согласно [9, 10]
Прогнозируемый	Фактически полученный	Крупный заполнитель (керамзитовый)	Мелкий заполнитель (песок)	Вяжущее	Г(Щ) : П : Ц	В/Ц		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
LC 8/10	LC 8,4/10,3	Гравий	Керамзитовый	Портландцемент марки М500	1:0,52:1,05	0,63	950	1,0
LC 10/12	LC 9,9/11,8	Гравий	Плотный		1:2,41:1,37	0,51	1390	1,4
LC 16/18	LC 16,2/20,6	Гравий	Плотный		1:1,84:0,79	0,46	1545	1,4
LC 25/28	LC 23,7/29,5	Щебень	Плотный		1:1,89:0,74	0,42	1760	1,8
LC 30/33	LC 29,0/33,6	Щебень	Плотный		1:1,84:0,79	0,40	1780	1,8

Таблиця 2 – Основные прочностные характеристики керамзитобетона по результатам испытаний

Класс керамзитобетона	Возраст, сут	Прочность, МПа		Пределы трещинообразования				Отношение $\eta^0_{кр} / \eta^v_{кр}$
		f_{lc}	$f_{lc,cube}$	Нижний		Верхний		
				$f^0_{кр},$ МПа	$\eta^0_{кр}$	$f^v_{кр},$ МПа	$\eta^v_{кр}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
LC 8,4/10,3	7	6,4	8,06	2,87	0,448	4,49	0,701	0,64
	14	6,88	8,64	2,92	0,424	4,89	0,711	0,60
	28	8,36	10,30	4,33	0,518	6,43	0,769	0,67
LC 9,9/11,8	14	7,12	8,92	3,35	0,470	5,34	0,750	0,63
	21	8,27	10,11	3,97	0,480	6,28	0,759	0,63
	28	9,89	11,82	4,72	0,477	7,7	0,779	0,61
LC 16,2/20,6	60	11,17	13,61	5,74	0,514	8,84	0,791	0,65
	7	13,11	16,04	7,05	0,538	11,24	0,857	0,63
	14	14,68	18,10	7,8	0,531	11,92	0,812	0,65
LC 23,7/29,5	28	16,21	20,56	8,19	0,505	12,58	0,776	0,65
	60	17,56	21,47	9,83	0,560	13,26	0,755	0,74
	14	19,34	26,67	9,44	0,488	14,6	0,755	0,65
LC 29,0/33,6	21	21,19	28,72	10,62	0,501	16,34	0,771	0,65
	28	23,67	29,53	12,19	0,515	18,65	0,788	0,65
	60	24,69	31,04	13,21	0,535	19,63	0,795	0,67
LC 29,0/33,6	14	21,37	24,60	13,85	0,648	18,68	0,874	0,74
	21	27,24	30,86	17,24	0,633	23,13	0,849	0,75
	28	28,99	33,63	18,7	0,645	26,18	0,903	0,71
	60	29,86	34,07	19,17	0,642	26,72	0,895	0,72

Как видно из таблицы 2, величина отношения $\eta^0_{\text{сгс}} / \eta^v_{\text{сгс}}$ для керамзитобетона не остается постоянной, как для бетонов на плотных заполнителях [11]. Вероятно, она зависит от плотности легкого бетона. Предполагаемое значение поправочного коэффициента, равное 1,2 [12], не было подтверждено полученными позднее опытными данными.

К настоящему времени по результатам проведенных испытаний выведен эмпирический коэффициент k_{c1} , устанавливающий взаимосвязь между расчетной плотностью керамзитобетона и значениями относительных нагрузок, соответствующих пределам трещинообразования. Расчетная плотность бетона принимается согласно классу плотности по [9, 10]. Корректность предложенной формулы проверяется дополнительными экспериментальными исследованиями.

Деформативные свойства керамзитобетона можно охарактеризовать модулем упругости, коэффициентом упругости, предельной сжимаемостью и растяжимостью.

В нормативной литературе за средний модуль упругости принимается модуль упругопластичности бетона (секущий модуль деформаций) при уровне нагружения $\eta = 0,4$ ($\sigma_{lc} = 0,4f_{lck}$). Связь между секущим модулем продольных деформаций $E'_{lc,c}$ и уровнем напряжений η при кратковременном осевом сжатии призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с достаточной достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью [13]:

$$E'_{lc,c(\sigma)} = \frac{\sigma_{lc}}{\varepsilon_{lc,c(\sigma)}} = E'_{lc,c(\sigma=0)} [1 - \lambda_{lc,c(\sigma)} \eta], \quad (1)$$

где η – уровень напряжений;

$E'_{lc,c(\sigma=0)}$ – мгновенный модуль упругости керамзитобетона (секущий модуль деформаций при $\sigma_{lc} = 0$);

$\lambda_{lc,c(\sigma)}$ – предельное значение коэффициента пластичности керамзитобетона при $\sigma_{lc} = f_{lck}$.

Как показали исследования, зависимости такого типа справедливы также поперечных и сдвиговых модулей и деформаций:

– секущий модуль поперечных деформаций $E'_{lc,v}$ и поперечные деформации $\varepsilon_{lc,v}$ могут быть определены по формулам:

$$E'_{lc,v(\sigma)} = \frac{\sigma_{lc}}{\varepsilon_{lc,v(\sigma)}} = E'_{lc,v(\sigma=0)} [1 - \lambda_{lc,v(\sigma)} \eta], \quad (2)$$

где $E'_{lc,v(\sigma=0)}$ – мгновенный модуль упругости керамзитобетона;

$\lambda_{lc,v(\sigma)}$ – предельное значение коэффициента пластичности при $\sigma_{lc} = f_{lck}$.

– модуль сдвиговых деформаций G_{lc} и сдвиговые деформации ε_G могут быть определены по формулам:

$$G_{lc(\sigma)} = \frac{\sigma_{lc}}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma_{lc}}{2[\varepsilon_{lc,c(\sigma)} + \varepsilon_{lc,v(\sigma)}]} = G_{lc(\sigma=0)} [1 - \lambda_{G(\sigma)} \eta]. \quad (3)$$

Касательный модуль продольных деформаций $E_{lc,c}$ определяется в зависимости от величины секущего модуля продольных деформаций $E'_{lc,c}$:

$$E_{lc,c(\sigma)} = E'_{lc,c(\sigma=0)} \cdot (1 - \lambda_{lc,c}) = E'_{lc,c0} \cdot \nu_{lc,c} = \frac{(E'_{lc,c(\sigma)})^2}{E'_{lc,c(\sigma=0)}}, \quad (4)$$

где $\nu_{lc,c}$ – коэффициент упругости керамзитобетона.

Коэффициент Пуассона ν_c может быть вычислен как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение продольного модуля деформаций к поперечному для каждой ступени нагружения.

Как правило, эмпирическое значение коэффициента Пуассона находится в пределах 0,11–0,2. В расчетах для всех видов бетона принимается величина 0,2. Однако для керамзитобетона данное значение завышено, что подтверждается результатами проведенных исследований [13].

Модуль упругости легкого бетона значительно ниже, чем обычного бетона (в 1,5–2,5 раза при одинаковой прочности) [14–16]. Данная особенность учтена в Eurocode 2 применением понижающего коэффициента, величина которого зависит от расчетной плотности легкого бетона. Согласно EN 1992 [9] значения секущего модуля $E'_{lc,c(\sigma)}$ для легкого бетона могут быть получены умножением соответствующих значений для тяжелого бетона с обычной плотностью на поправочный коэффициент для расчета модуля упругости η_E :

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2, \quad (5)$$

где ρ – плотность легкого бетона, в кг/м³.

В этом случае среднее значение модуля деформация для легкого бетона:

$$E_{lcm} = \eta_E \cdot E_{cm} = \eta_E \cdot 22[0,1f_{lcm}]^{0,3} = \eta_E \cdot 22[0,1(f_{lck} + 8)]^{0,3}, \quad (6)$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона, в МПа.

В работе [17] экспериментально обосновано применение данной методики для расчета железобетонных балок, выполненных их легкого бетона.

Результаты исследований. Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей были установлены статистическим методом линейной корреляции, при обработке экспериментальных данных. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Модули деформаций керамзитобетона

Класс керамзитобетона	Возраст, сут.	Призменная прочность керамзитобетона f_{lc} , МПа	Модули деформаций			Примечание		
			Эмпирическая зависимость для расчета, $E - \eta$, ГПа	Коэффициент детерминации	Среднее значение модуля при $\eta = 0,4$, ГПа	Коэффициент η_E	Расчетное значение среднего модуля продольных деформаций E_{lcm} , ГПа	Отклонение расчетных значений E_{lcm} от опытных, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
LC 8,4/10,3	7	6,4	$E'_{lc,c} = 8,62(1-0,594\eta)$	0,95	6,57	0,228	5,59	14,9
			$E'_{lc,v} = 102,91(1-0,936\eta)$	0,94	64,38			
			$G_{lc} = 5,12(1-0,88\eta)$	0,97	3,32			
			$E_{lc,c} = 8,62(1-0,594\eta)^2$	0,95	5,01			
	14	6,88	$E'_{lc,c} = 8,19(1-0,537\eta)$	0,93	6,43	0,228	5,65	12,2
			$E'_{lc,v} = 117,73(1-0,936\eta)$	0,77	73,65			
			$G_{lc} = 5,38(1-0,624\eta)$	0,97	4,04			
			$E_{lc,c} = 8,19(1-0,537\eta)^2$	0,95	5,05			
	28	8,36	$E'_{lc,c} = 8,62(1-0,545\eta)$	0,96	6,74	0,228	5,81	13,8
			$E'_{lc,v} = 146,76(1-0,9982\eta)$	0,95	88,16			
			$G_{lc} = 9,51(1-0,841\eta)$	0,97	6,31			
			$E_{lc,c} = 8,62(1-0,545\eta)^2$	0,97	5,27			
LC 9,9/11,8	14	7,12	$E'_{lc,c} = 12,64(1-0,3916\eta)$	0,75	10,66	0,434	11,38	-6,8
			$E'_{lc,v} = 70,26(1-0,8188\eta)$	0,93	47,25			
			$G_{lc} = 4,30(1-0,4984\eta)$	0,84	3,44			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			$E_{lc,c} = 12,64(1-0,3916\eta)^2$	0,75	8,99			
	21	8,27	$E'_{lc,c} = 13,15(1-0,4218\eta)$	0,92	10,93	0,434	11,38	-4,1
			$E'_{lc,v} = 74,20(1-0,819\eta)$	0,85	49,90			
			$G_{lc} = 6,04(1-0,5127\eta)$	0,96	5,09			
			$E_{lc,c} = 13,15(1-0,4218\eta)^2$	0,92	9,09			
	28	9,89	$E'_{lc,c} = 12,51(1-0,4253\eta)$	0,95	10,38	0,434	11,38	-9,6
			$E'_{lc,v} = 91,80(1-0,8604\eta)$	0,92	60,21			
			$G_{lc} = 5,60(1-0,5429\eta)$	0,97	4,38			
			$E_{lc,c} = 12,51(1-0,4253\eta)^2$	0,95	8,62			
	60	11,17	$E'_{lc,c} = 16,43(1-0,5697\eta)$	0,84	12,69	0,434	11,38	10,3
			$E'_{lc,v} = 166,3(1-0,8824\eta)$	0,97	62,31			
			$G_{lc} = 7,62(1-0,6255\eta)$	0,92	5,71			
			$E_{lc,c} = 16,43(1-0,5697\eta)^2$	0,84	9,80			
LC 16,2/20,6	7	13,11	$E'_{lc,c} = 15,95(1-0,402\eta)$	0,98	13,39	0,434	12,46	6,9
			$E'_{lc,v} = 95,80(1-0,957\eta)$	0,63	59,13			
			$G_{lc} = 8,08(1-0,446\eta)$	0,95	6,64			
			$E_{lc,c} = 15,95(1-0,402\eta)^2$	0,98	11,23			
	14	14,68	$E'_{lc,c} = 14,884(1-0,514\eta)$	0,91	11,82	0,434	12,46	-5,4
			$E'_{lc,v} = 94,74(1-0,705\eta)$	0,90	68,02			
			$G_{lc} = 10,66(1-0,558\eta)$	0,92	8,28			
			$E_{lc,c} = 14,884(1-0,514\eta)^2$	0,91	9,39			
	28	16,21	$E'_{lc,c} = 16,87(1-0,227\eta)$	0,88	11,40	0,434	12,46	-9,3
			$E'_{lc,v} = 102,24(1-0,811\eta)$	0,88	85,02			
			$G_{lc} = 8,43(1-0,421\eta)$	0,97	15,34			
			$E_{lc,c} = 16,87(1-0,227\eta)^2$	0,88	7,70			
	60	17,56	$E'_{lc,c} = 17,49(1-0,546\eta)$	0,89	13,67	0,434	12,46	8,9
			$E'_{lc,v} = 102,64(1-0,72\eta)$	0,72	73,08			
			$G_{lc} = 12,05(1-0,386\eta)$	0,95	10,19			
			$E_{lc,c} = 17,49(1-0,546\eta)^2$	0,89	10,68			
LC 23,7/29,5	14	19,34	$E'_{lc,c} = 28,18(1-0,6382\eta)$	1,00	20,99	0,707	21,99	-4,8
			$E'_{lc,v} = 168,8(1-0,9981\eta)$	0,80	101,41			
			$G_{lc} = 10,11(1-0,9999\eta)$	0,91	6,07			
			$E_{lc,c} = 28,18(1-0,6382\eta)^2$	1,00	15,63			
	21	21,19	$E'_{lc,c} = 29,18(1-0,6535\eta)$	0,87	21,55	0,707	21,99	-2,0
			$E'_{lc,v} = 152,2(1-0,9987\eta)$	0,85	91,40			
			$G_{lc} = 10,87(1-0,9996\eta)$	0,94	6,52			
			$E_{lc,c} = 29,18(1-0,6535\eta)^2$	0,87	15,92			
	28	23,67	$E'_{lc,c} = 30,14(1-0,6048\eta)$	0,89	22,85	0,707	21,99	3,8
			$E'_{lc,v} = 182,21(1-0,9550\eta)$	0,83	112,61			
			$G_{lc} = 10,91(1-0,5207\eta)$	1,00	8,64			
			$E_{lc,c} = 30,14(1-0,6048\eta)^2$	0,89	17,32			
	60	24,69	$E'_{lc,c} = 29,49(1-0,5432\eta)$	0,85	23,08	0,707	21,99	4,7
			$E'_{lc,v} = 189,22(1-0,8891\eta)$	0,79	121,93			
			$G_{lc} = 12,28(1-0,9968\eta)$	0,98	7,38			
			$E_{lc,c} = 29,49(1-0,5432\eta)^2$	0,85	18,07			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
LC 29,0/33,6	14	21,37	$E'_{lc,c} = 31,37(1-0,754\eta)$	0,80	21,91	0,707	23,03	-5,1
			$E'_{lc,v} = 184,3(1-0,936\eta)$	0,88	115,30			
			$G_{lc} = 18,93(1-0,979\eta)$	0,89	11,52			
			$E_{lc,c} = 31,37(1-0,754\eta)^2$	0,80	15,30			
	21	27,24	$E'_{lc,c} = 34,73(1-0,658\eta)$	0,99	25,59	0,707	23,03	10,0
			$E'_{lc,v} = 155(1-0,9998\eta)$	0,90	93,01			
			$G_{lc} = 12,05(1-0,661\eta)$	0,99	8,86			
			$E_{lc,c} = 34,73(1-0,558\eta)^2$	0,99	18,85			
	28	28,99	$E'_{lc,c} = 27,359(1-0,436\eta)$	0,99	22,59	0,707	23,03	-2,0
			$E'_{lc,v} = 170,77(1-0,766\eta)$	0,97	118,45			
			$G_{lc} = 26,09(1-0,822\eta)$	0,97	17,51			
			$E_{lc,c} = 27,359(1-0,436\eta)^2$	0,96	18,65			
60	29,86	$E'_{lc,c} = 30,95(1-0,694\eta)$	0,87	22,36	0,707	23,03	-3,0	
		$E'_{lc,v} = 148,3(1-0,889\eta)$	0,80	95,56				
		$G_{lc} = 12,348(1-0,696\eta)$	0,87	8,91				
		$E_{lc,c} = 30,95(1-0,694\eta)^2$	0,87	16,15				
Примечание – Среднее отклонение по абсолютной величине расчетных значений E_{lcm} от опытных составляет 6,3 %.								

Таким образом, методика определения среднего модуля деформаций для легкого бетона E_{lcm} , приведенная в [9], обеспечивает удовлетворительную сходимость с опытными данными.

Выводы. Положения Еврокода 2 в части легких бетонов [9, раздел 11] справедливы для керамзитобетона, изготовленного на основе белорусского сырья, однако некоторые параметры могут быть скорректированы. В частности, уточнения требуют значения коэффициента поперечных деформаций, значения границ трещинообразования.

Корректировка указанных характеристик может быть проведена путем накопления достаточного количества результатов экспериментальных исследований с их последующей обработкой методами математической статистики. Предлагаемая корректировка должна быть гармонизирована с положениями [9].

Литература

1. Chandra S. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / Satish Chandra, Leif Berntsson. – Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2002. – 407 p.
2. Dehn F. Fracture mechanical behaviour of lightweight aggregate concrete / Frank Dehn. – Электронная публикация. Режим доступа: <http://framcos.org/FraMCoS-5/Dehn.Fracture.pdf>.
3. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов / РУП «Институт БелНИИС». – Минск, 2013. – 38 с.
4. Clarke John L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / John L. Clarke. – Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
5. Ахмедов А. И. Влияние микроразрушений бетона на эксплуатационные качества строительных конструкций / А.И. Ахмедов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Московский институт коммунального хозяйства и строительства. – М., 2006. – 22 с.
6. Зінченко С.В. Міцність та деформативність конструкцій із цементно-зольного керамзитобетону: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / С.В. Зінченко; Одеська держ. академія будівництва та архітектури. – Одеса, 2010. – 21 с.

7. Gunasekaran Mr.M. Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete / Mr.M. Gunasekaran, G. Saranya, L. Elamaran, P. Sakthivel, P. Suresh // IJRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology. – Vol. 2, Issue 11. – 2016. – pp. 518–522.
8. Moravia W.G. Efficiency Factor and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Expanded Clay Aggregate / W.G. Moravia, A.G. Gumieri, W.L. Vasconcel // Ibracon structures and materials journal. – Brazil, 2010. – 195 p.
9. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1: Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250). Еврокод 2. – Переиздание (июнь 2015 г.) с Изменением № 1 (введено в действие с 01.04.2015): введ. 01.01.2010. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2015. – 205 с.
10. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings: prEN 1992-1 (Final draft). English version. – European Committee for Standardization, 2001. – 230 p.
11. Москалькова Ю.Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении / Ю.Г. Москалькова: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2013. – 199 с.
12. Moskalkova Yu.N. Behavior of claydite at the stage of microcrack formation / Yu.N. Moskalkova // Наука та будівництво. – Киев, 2017. – № 3 (13). – С. 40–43.
13. Семенюк С.Д. К определению коэффициента Пуассона и модуля деформаций керамзитобетона / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Москалькова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць / НУВГП ; редкол.: Є.М. Бабич [та інш.]. – Рівне, 2018. – Вип. 35. – С. 111–122.
14. Byard B.E. Cracking tendency of lightweight concrete. Submitted to The Expanded Shale, Clay, and Slate Institute. Research Report / Benjamin E., Anton K. Schindler. – Harbert Engineering Center Auburn University. – 2010. – 93 p.
15. Fenyvesi O. Affect of lightweight aggregate to early age cracking in concrete / Oliver Fenyvesi // Periodica Polytechnica. Civil Engineering. – No 55/1. – 2011. – pp. 63–71.
16. Wang X.F. Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete / X. F. Wang, C. Fang, W.Q. Kuang, D.W. Li, N.X. Han, F. Xing // Construction and Building Materials. – Vol. 136, 2017. – pp. 173–183.
17. Tomičić I. Analysis of lightweight aggregate concrete beams / Ivan Tomičić // Građevinar. – No 64 (10). – 2012. – pp. 817–824.

References

- [1] S. Chandra, B. Leif, *Lightweight aggregate concrete*. Science, Technology, and Applications. Norwich, New York, U.S.A. 2002.
- [2] F. Dehn, Fracture mechanical behaviour of lightweight aggregate concrete. Access mode: <http://framcos.org/FraMCoS-5/Dehn.Fracture.pdf>.
- [3] Rekomendatsii po podboru sostavov, izgotovleniyu i primeniyu modifitsirovannykh khimicheskimi i mineral'nymi dobavkami konstruktsionno-teploizolyatsionnogo i konstruktsionnogo keramzitobetonov. RUP Institut BelNIIS, Minsk, 2013.
- [4] John L. Clarke, *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Glasgow, UK, 2005.
- [5] A.I. Akhmedov, "Vliyaniye mikrorazrusheniy betona na ekspluatatsionnyye kachestva stroitel'nykh konstruktsiy", avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01; Moskovskij institut kommunal'nogo hozyajstva i stroitel'stva., M., 2006.
- [6] S.V. Zinchenko, "Mitsnist' ta deformatyvnist' konstruktsiy iz tsementno-zol'noho keramzytobetonu", avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01; Odes'ka derzh. akademiya budivnytstva ta arkhitektury, Odesa, 2010.
- [7] Mr.M. Gunasekaran, G. Saranya, L. Elamaran, P. Sakthivel, P. Suresh, "Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete", *International Journal for In-*

- novative Research in Science & Technology*, Vol. 2, Issue 11, pp. 518–522, 2016.
- [8] W.G. Moravia, A.G. Gumieri, W.L. Vasconcel, *Efficiency Factor and Modulus of Elasticity of Lightweight Concrete with Expanded Clay Aggregate*. Ibracon structures and materials journal, Brazil, 2010.
- [9] *Proyektirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy. Chast' 1-1: Obshchiye pravila i pravila dlya zdaniy: TKP EN 1992-1-1-2009* (02250). Yevrokod 2. Pereizdaniye (iyun' 2015 g.) s Izmeneniyem № 1 (vvedeno v deystviye s 01.04.2015): vved. 01.01.2010*. Minsk: M-vo arkhitektury i str-va RB, 2015.
- [10] Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings: prEN 1992-1 (Final draft). English version. European Committee for Standardization, 2001.
- [11] Yu.G. Moskal'kova, "Prochnost' i deformativnost' izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh narashchivaniyem szhatoy zony, pri staticheskom i malotsiklovom nagruzheniyakh", dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01; Belarus.-Ros. un-t. Mogilev, 2013.
- [12] Yu. G. Moskalkova, "Behavior of claydite at the stage of microcrack formation". *Nauka ta budivnytstvo*, Kyev, Vol 3 (13), pp. 40–43, 2017.
- [13] S.D. Semenyuk, Yu. G. Moskal'kova, "K opredelenyyu koэфfitysyenta Puassona y modulya deformatsyy keramzytobetona", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*: zb. nauk. prats, Rivne, Vol. 35, pp. 111–122, 2018.
- [14] B.E. Byard, E. Benjamin, Anton K. Schindler, *Cracking tendency of lightweight concrete*. Submitted to The Expanded Shale, Clay, and Slate Institute. Research Report. Harbert Engineering Center Auburn University, 2010.
- [15] O. Fenyvesi, "Affect of lightweight aggregate to early age cracking in concrete", *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, no 55/1, pp. 63–71, 2011.
- [16] X. F. Wang, C. Fang, W.Q. Kuang, D.W. Li, N.X. Han, F. Xing, "Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 136, pp. 173–183, 2017.
- [17] I. Tomichich, "Analysis of lightweight aggregate concrete beams", *Grayevinar*, no 64 (10), pp. 817–824, 2012.

ВПЛИВ КОМПОНЕНТІВ ЗАПОВНЮВАЧІВ НА ВЛАСТИВОСТІ КЕРАМЗИТОБЕТОНУ

С.Д. Семенюк, д.т.н., професор,
skzs@bru.by

Ю.Г. Москалькова, к.т.н., доцент,
julia43@tut.by, ORCID: 0000-0002-4107-2452

В.А. Ржевущкая, аспірант
valeriarzhevuckaya@gmail.com
Білорусько-Російський університет

Анотація. Підвищення вимог до експлуатаційних і фізико-механічних властивостей будівельних конструкцій обумовлено необхідністю пошуку ефективних матеріалів для виробництва конструкцій. Сьогодні стає актуальним застосування конструкційних і конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів. Вирішальним фактором при визначенні міцності бетону є активність цементу, міцність крупного заповнювача і водо-цементне відношення. Однак на сьогоднішній день основна сфера використання легких бетонів – виготовлення зовнішніх огорожувальних конструкцій опалювальних будівель. У зв'язку з цим перспективним є розробка складів для виробництва конструкційного і конструкційно-теплоізоляційного керамзитобетону, який застосовується для виготовлення несучих конструкцій, а також коригування розрахункових положень щодо визначення його міцності і деформаційних характеристик.

Вибір керамзиту, як крупного заповнювача, обґрунтовано тим фактом, що на його частку припадає найбільший відсоток від усього виробництва пористих заповнювачів в Республіці Білорусь. До позитивних якостей даного матеріалу можна віднести відносно високу міцність (в порівнянні з іншими пористими заповнювачами) і досить велика кількість замкнутих пор.

Для виявлення впливу компонентів заповнювача на міцнісні і деформативні характеристики керамзитобетону в Білорусько-Російському університеті були проведені експериментальні дослідження на стандартних зразках у вигляді кубів, призм і циліндрів. Дослідні зразки виготовлялися з керамзитобетону класів LC 8/10 - LC 30/33 і випробовувалися на короточасний осьовий стиск. В результаті для кожного дослідженого класу бетону були визначені призмове і циліндрична міцності, поздовжній, поперечний і здвиговий модулі деформацій, коефіцієнт Пуассона, верхні і нижні границі мікротріщиноутворення, коефіцієнт циліндричної і призмової міцності.

Ключові слова: керамзитобетон, легкий бетон, заповнювач, міцність, деформація, модуль деформацій.

THE INFLUENCE OF AGGREGATE COMPONENTS ON THE PROPERTIES OF CLAYDITE CONCRETE

S.D. Semenyuk, Doctor of Engineering, Professor,
skzs@bru.by

Yu.G. Moskalkova, PhD., Assistant Professor,
julia43@tut.by, ORCID: 0000-0002-4107-2452

V.A. Rzhhevutskaya, Postgraduate student
valeriarzhhevuckaya@gmail.com
Belarusian-Russian University

Abstract. The search for effective materials for the production of structures is due to increasing requirements for the operational and physical-mechanical properties of building structures. Nowadays it is relevant to use structural and thermal insulation lightweight concrete. The controlling factors in determining the strength of concrete are cement activity, coarse aggregate strength, and water/cement ratio. However, the main area of application of lightweight concrete is the manufacture of external envelope structures of heated buildings. In this connection, it is available to design compositions for the production of structural and structural thermal insulating claydite concrete, which are used for the manufacture of load-bearing structures. It is available to design the correction of the structural analysis for determining its strength and deformation characteristics.

The choice of claydite as a coarse aggregate is justified by the fact that it amounts the largest percentage of the total production of porous aggregates in the Republic of Belarus. The advantage of this material is relatively high strength (compared to other porous aggregates) and a sufficiently large quantity of closed pores.

Experimental studies at the Belarussian-Russian University were conducted in order to identify the influence of aggregate components on the strength and deformation characteristics of claydite concrete. Samples of different standard geometric shape (cubes, prisms and cylinders) were used for the purpose of the experiment. Test specimens were made of claydite concrete (strength classes LC 8/10 – LC 30/33). As a result, a short-term axial compression test determined prismatic and cylindrical compressive strengths, longitudinal, transverse and shear secant modulus of elasticity, Poisson's ratio, upper and lower limits of microcrack formation.

Keywords: claydite concrete, lightweight concrete, aggregate, strength, deformation, modulus of elasticity.

Стаття надійшла 5.03.2019