

УДК 691.032.33

д.т.н., профессор Семенюк С.Д., Мельянцова И.И.,
Дивакова Г. А., Мамочкина М. Г.,
Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ КЛАССОВ 8/10-16/20 НА ОСНОВЕ КЕРАМЗИТОВОГО ГРАВИЯ НОВОЛУКОМЛЬСКОГО ЗАВОДА

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований прочностных и деформативных свойств керамзитобетонов класса 8/10, 10/12,5 и 16/20 на основе керамзитового гравия Новолукомльского завода. Определены кубиковая и призмная прочностности, найдены модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, пределы микротрещинообразования бетонов.

Ключевые слова: *класс бетона, керамзитобетон, модуль упругости, призма, продольные и поперечные деформации, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, линейная корреляция, статистика, пределы микротрещинообразования бетонов.*

Введение. Легкие бетоны на основе керамзитового гравия широко применяются в промышленном, сельскохозяйственном и гражданском строительстве. Керамзитобетонные конструкции позволяют улучшить теплотехнические и акустические свойства зданий, значительно снизить их массу. Комплексное использование легких бетонов позволяет решить проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и сооружений, повысить их ресурс и безопасность при эксплуатации. Однако для соответствия белорусских нормативных документов с Еврокодом необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой целью были проведены экспериментальные исследования прочности и деформативности образцов из легкого бетона класса 8/10, 10/12,5 и 16/20 в виде кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452-80*.

Материалы и методика испытания. Для определения прочностных и деформативных характеристик легких бетонов на основе керамзитового гравия были исследованы 3 серии опытных образцов из бетона классов 8/10, 10/12,5 и 16/20. В каждой серии экспериментальных исследований было заформовано и испытано 12 кубов с размером ребра 150мм, 8 кубов с размером ребра 100мм, 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300мм и 12 призм размерами

150×150×600мм. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток. В каждом возрасте испытывалось по 3 куба с размерами ребра 150мм, 2 куба с размерами ребра 100мм, 3 призмы размерами 150×150×600мм и 3 цилиндра диаметром 150 мм и высотой 300мм.

В качестве крупного заполнителя для бетона класса 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 мм и 10-20мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68МПа и 1,86 МПа соответственно. Для изготовления легкого бетона класса 10/12,5 применялся только керамзит фракции 10-20 мм. Для изготовления легкого бетона класса 8/10 в качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 и 10-20 мм; в качестве мелкого заполнителя – песок керамзитовый фракции 0-4 мм ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» Мелким заполнителем для бетонов класса 16/20 и 10/12,5 служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$, вяжущим для всех серий служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса 16/20: Ц:П:Г=1:1,84:0,79 при водоцементном отношении В/Ц=0,46. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1545 кг/м³. Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса 10/12,5: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении В/Ц=0,51. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1390 кг/м³. Составы бетонных смесей подбирались в соответствии с «рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционных и конструкционного керамзитобетонов», подготовленных РУП «Институт БелНИИС» [1].

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [2]. При испытании продольные деформации замерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 370...375 мм, установленными вдоль оси по четырём граням призм. Поперечные деформации замерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 100...115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырёх приборов механического действия) усреднялись.

Проведенные исследования позволили описать кинетику роста керамзитобетона во времени в виде гиперболической зависимости:

$$f_c^t = f_c^{28} \frac{t}{0,85t + 4,2}, \quad (1)$$

где t – возраст бетона в сутках

f_c^t – прочность бетона в возрасте t суток

f_c^{28} – прочность бетона в возрасте 28 суток

Анализ этих исследований показал, что среднее отношение фактической прочности бетона к теоретической равно 1.03; среднее квадратическое отклонение – 0,065; коэффициент вариации – 6,3%; обеспеченность точности формулы при отклонении теории от эксперимента в 15% составляет 98%. Коэффициент призмной прочности керамзитобетона в возрасте 7 суток составил 0,8; 14 и 28 суток – 0,81; 60 суток – 0,82.

Экспериментально-статистическая оценка деформативных характеристик бетона исследуемых классов. В [2, 3] показано, что зависимость «секущий модуль продольных деформаций – напряжение или уровень напряжений» ($E_{c(\sigma)}$, ($E_{c(\eta)}$) при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из неё зависимость «напряжение – деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

$$E_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{c(\sigma)}} = E_{c(0)} [1 - \lambda_{\sigma} \cdot \eta], \quad (2)$$

$$\varepsilon_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{fc}} = \frac{\sigma}{E_{c(0)} \left[1 - \lambda_{fc} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}, \quad (3)$$

где η – уровень напряжений $\eta = \frac{\sigma}{fc}$;

$E_{c(0)}$ – секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$;

λ_{fc} – предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = fc$.

Проведенная статистическая обработка результатов испытаний керамзитобетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место для поперечных (4) и сдвиговых (6) деформаций:

$$E_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{v(\sigma)}} = E_{v(0)} [\lambda_{v(fc)} \cdot \eta]; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{v(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \left[1 - \lambda_{v(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}; \quad (5)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)}]} = G_0 \left[1 - \lambda_{G(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_{\sigma}} = \frac{\sigma}{G_0 \left[1 - G_{v(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}, \quad (7)$$

В формулах (5) и (7):

$$\lambda_{v(fc)} = \frac{E_{v(0)} - E_{v(fc)}}{E_{v(0)}}; \quad \lambda_{G(fc)} = \frac{G_0 - G_{fc}}{G_0}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = 2 \left[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)} \right]. \quad (9)$$

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (2), (4), (6) устанавливаются статистически методами линейной корреляции [5].

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является коэффициент корреляции. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами.

Коэффициент корреляции r вычисляют по формуле:

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (10)$$

где $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ – отклонений отдельных вариантов V_x , V_y от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y ;

n – число наблюдений.

Средняя ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \pm \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \quad (11)$$

Достоверность коэффициента корреляции (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается отношением коэффициента корреляции r к его средней ошибке m_r . Если это отношение равно 4 или больше, то коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами доказано, в противном случае – нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами.

Линейное корреляционное уравнение представлено следующей формулой:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x), \quad (12)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения.

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усреднённым показателям для испытанных призм показала, что достоверность линейности корреляционных зависимостей довольно высока (коэффициент корреляции r_x близок к единице, а его достоверность r/m_r значительно больше четырёх).

Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса CL16/20 в возрасте 14 суток представлены на рисунке 1; для образцов из бетона класса CL10/12,5 в возрасте 60 суток – на рисунке 2; для образцов из бетона класса CL8/10 в возрасте 28 суток – на рисунке 3.

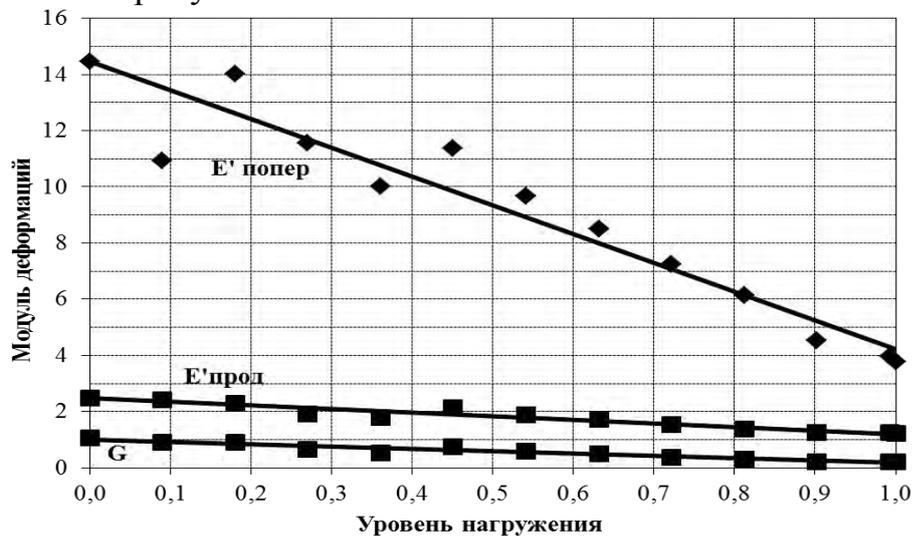


Рис. 1. Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 14 суток

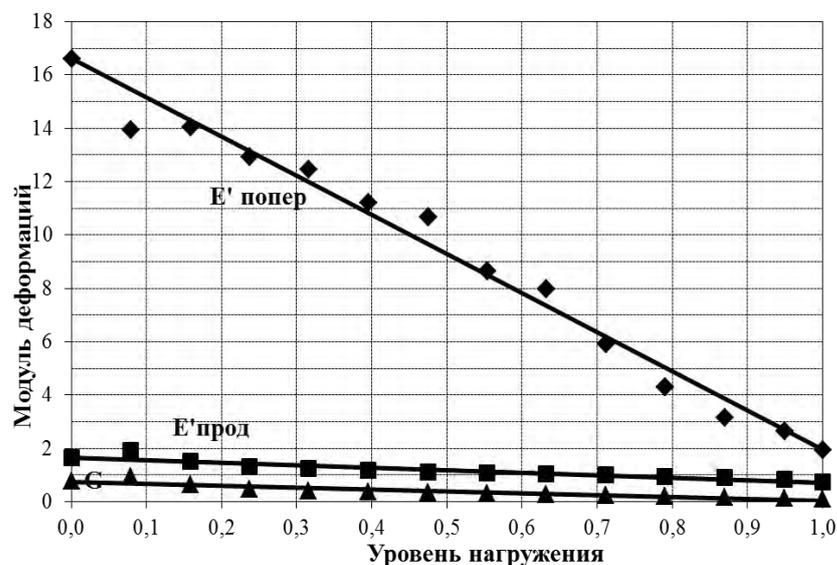


Рис. 2. Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 10/12,5 в возрасте 60 суток

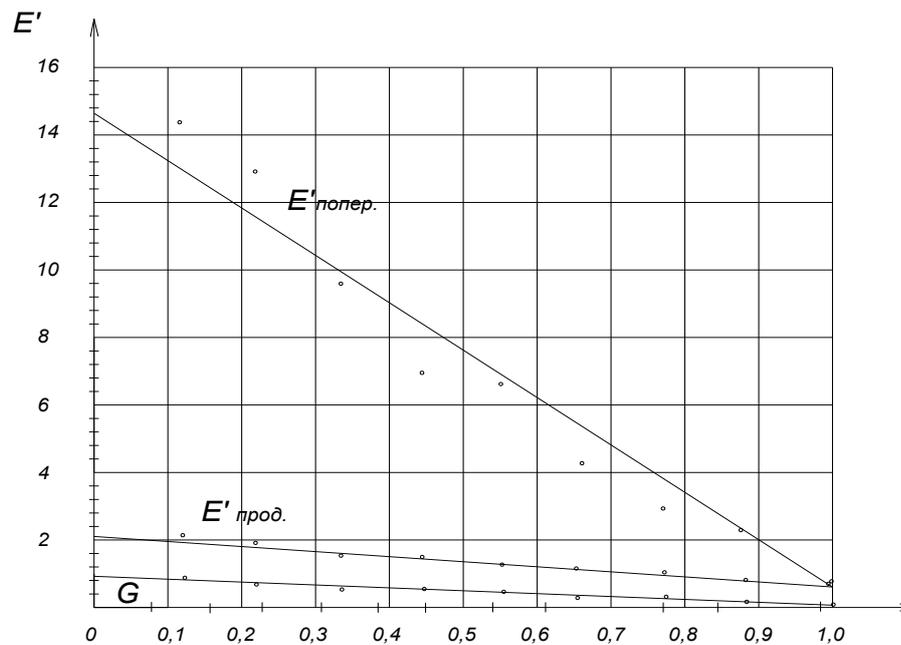


Рис. 3. Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 8/10 в возрасте 28 суток

Характеристики бетонов трёх серий испытанных образцов различного возраста и статистика их линейных корреляционных зависимостей отражены в таблицах 1 - 3.

Таблица 1

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 16/20

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{с, cube}^G$, МПа	$f_{с,к}^G$, МПа	$f_{с,гс}^V$		$f_{с,гс}^0$		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m _r
				η	МПа	η	МПа				
16/20	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E_{c(\sigma)-\eta}$	1,795(1-0,023 σ)	-0,9883	147,5
								$E_{v(\sigma)-\eta}$	17,580(1-0,073 σ)	-0,7921	7,36
								$G_c-\eta$	0,808 (1-0,034 σ)	-0,9756	70,18
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E_{c(\sigma)-\eta}$	2,4884(1-0,035 σ)	-0,9523	42,16
								$E_{v(\sigma)-\eta}$	14,474(1-0,048 σ)	-0,9482	37,71
								$G_c-\eta$	1,066(1-0,038 σ)	-0,9602	50,77
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$E_{c(\sigma)-\eta}$	1,687 (1-0,014 σ)	-0,9397	43,77
								$E_{v(\sigma)-\eta}$	16,224(1-0,05 σ)	-0,9357	60,2
								$G_c-\eta$	0,843(1-0,026 σ)	-0,9874	162,3
	60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E_{c(\sigma)-\eta}$	1,749(1-0,014 σ)	-0,9458	39,11
								$E_{v(\sigma)-\eta}$	13,264(1-0,041 σ)	-0,8479	13,15
								$G_c-\eta$	1,205(1-0,022 σ)	-0,9751	84,26

Важной характеристикой для бетонных и железобетонных изделий являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования бетона, позволяющие правильно назначить на конструкции эксплуатационные нагрузки.

Верхний предел микротрещинообразования f^v_{crc} (т. н. «критическая» граница, при достижении которой наблюдается активный прирост пластических деформаций) находился графическим методом по усреднённым экспериментальным данным для двух призм, испытанных кратковременным нагружением по стандартной методике – путём построения зависимости «уровень нагружения – объёмная деформация». Объёмные деформации при этом определялись по формуле:

$$\varepsilon^v = \varepsilon_{c(\sigma)} - 2\varepsilon_{v(\sigma)} \quad (13)$$

Таблица 2

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 10/12,5

Класс бетона	Возраст, сут	f^G_c , cube, МПа	f_{ck} , МПа	f^v_{crc}		f^0_{crc}		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m _r
				η	МПа	η	МПа				
10/12,5	7	8,92	7,12	0,75	5,34	0,495	3,52	$E_{c(\sigma)}-\eta$	0,964(1-0,055 σ)	-0,8647	16,069
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	7,026(1-0,115 σ)	-0,9632	62,588
								$G_c-\eta$	0,430(1-0,07 σ)	-0,9167	26,961
	14	10,11	8,27	0,789	6,53	0,492	4,07	$E_{c(\sigma)}-\eta$	1,315(1-0,051 σ)	-0,9570	128,11
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	13,420(1-0,099 σ)	-0,9242	26,77
								$G_c-\eta$	0,604(1-0,062 σ)	-0,9804	52,46
	28	11,82	9,89	0,779	7,70	0,477	4,72	$E_{c(\sigma)}-\eta$	1,251(1-0,043 σ)	-0,9757	81,418
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	9,180(1-0,087 σ)	-0,9572	45,76
								$G_c-\eta$	0,560(1-0,055 σ)	-0,9835	120,45
	60	13,61	11,17	0,791	8,84	0,514	5,74	$E_{c(\sigma)}-\eta$	1,643(1-0,051 σ)	-0,9146	23,72
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	16,63(1-0,079 σ)	-0,9860	150,08
								$G_c-\eta$	0,762(1-0,056 σ)	-0,9600	52,00

Таблица 3

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 8/10

Класс бетона	Возраст, сут	f^G_c , cube, МПа	f_{ck} , МПа	f^v_{crc}		f^0_{crc}		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m _r
				η	МПа	η	МПа				
8/10	7	8,06	6,4	0,701	2,84	0,448	0,81	$E_{c(\sigma)}-\eta$	1,262(1-0,0929 σ)	-0,9757	64,29
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	10,291(1-0,149 σ)	-0,9701	52,03
								$G_c-\eta$	0,312(1-0,0125 σ)	-0,9841	196,8
	14	8,64	6,88	0,711	3,2	0,424	0,97	$E_{c(\sigma)}-\eta$	1,119(1-0,078 σ)	-0,9639	43,02
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	17,773(1-0,136 σ)	-0,8777	12,09
								$G_c-\eta$	0,538(1-0,0907 σ)	-0,9858	110,8
	28	10,3	8,36	0,769	3,95	0,512	1,34	$E_{c(\sigma)}-\eta$	2,162(1-0,0938 σ)	-0,9799	78,03
								$E_{v(\sigma)}-\eta$	14,676(1-0,120 σ)	-0,9772	68,67
								$G_c-\eta$	0,951(1-0,1006 σ)	-0,9838	97,12

По пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v-\eta$ находился верхний предел микротрещинообразования бетона – f^v_{crc} . на рисунке 4 показан пример нахождения f^v_{crc} для керамзитобетона CL16/20 в возрасте 60 суток.

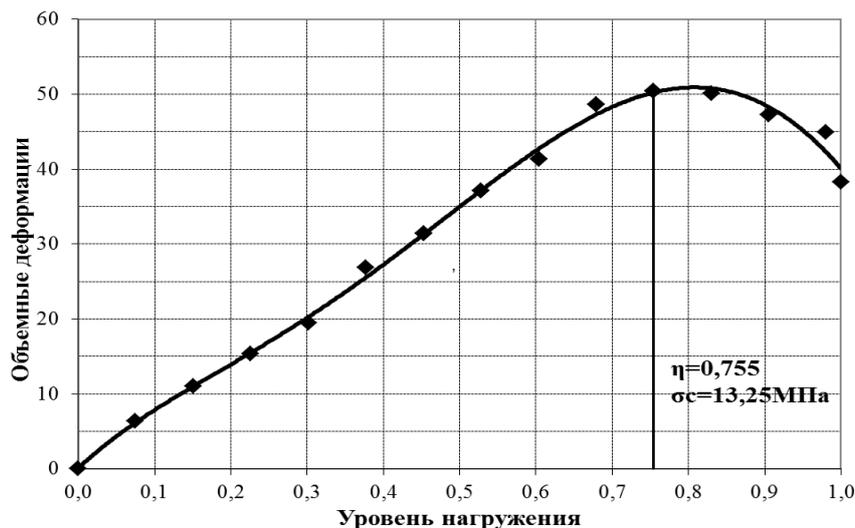


Рис. 4. Корреляционные зависимости «уровень нагружения - объемные деформации» для образцов из керамзитобетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Определение нижнего предела микротрещинообразования f_{cr}^0 также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала по опытным данным была построена зависимость «уровень нагружения η - коэффициент Пуассона ν », при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение продольного модуля деформаций к поперечному - для каждой ступени нагружения (рисунок 5).

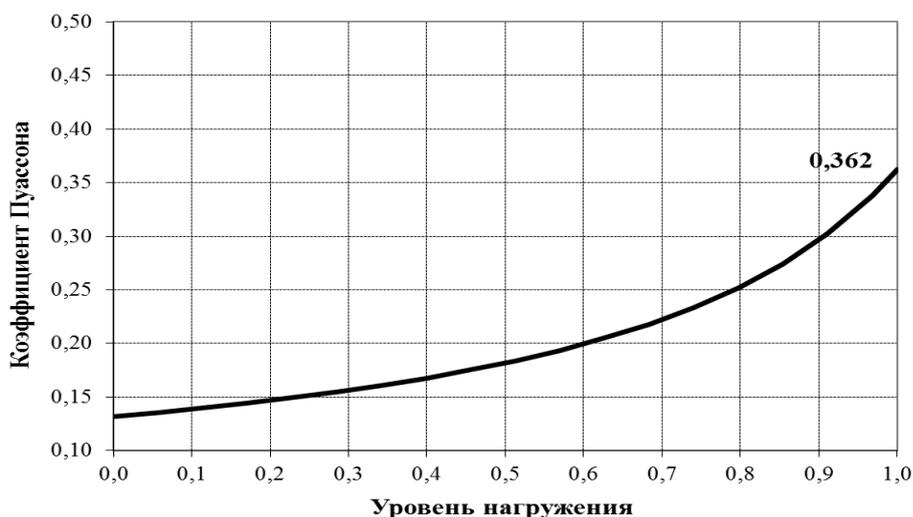


Рис. 5. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Путём нахождения первой $\frac{d\nu}{d\eta}$ и второй $\frac{d\nu^2}{d\eta^2}$ производных был графически определён предел нижнего микротрещинообразования бетона (рис. 6 и 7).

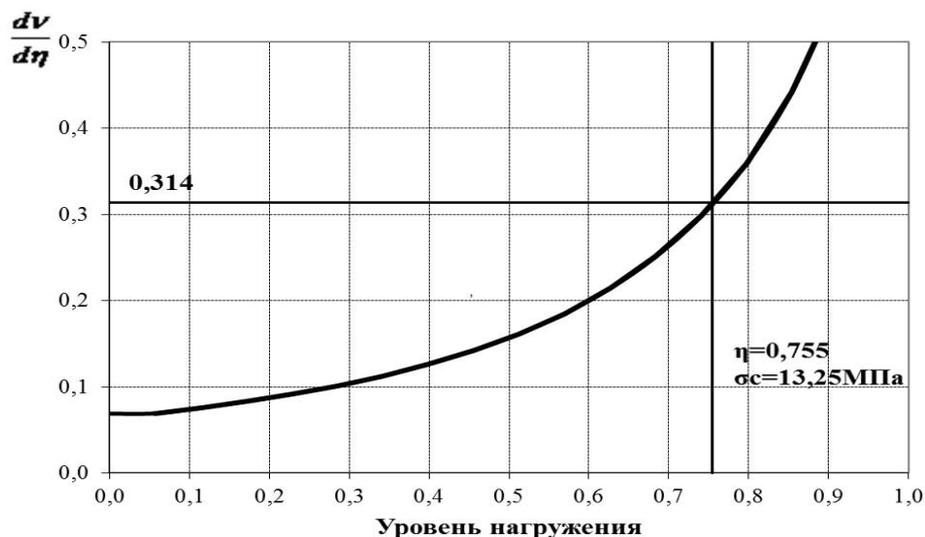


Рис. 6. Корреляционные зависимости (первая производная) для керамзитобетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

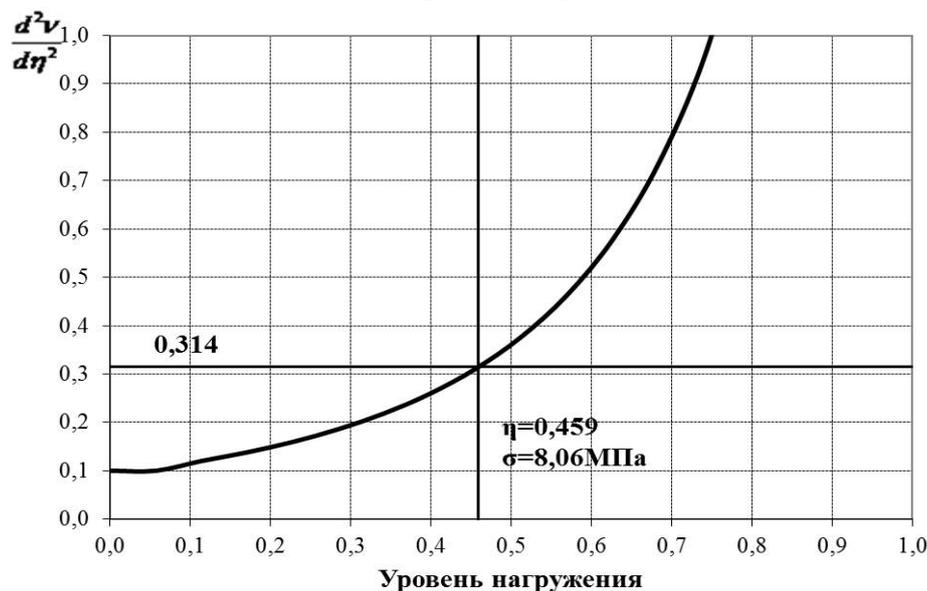


Рис. 7. Корреляционные зависимости (вторая производная) для керамзитобетона класса 16/20 в возрасте 60 суток

Заключение. На основе экспериментальных данных получена зависимость, описывающая кинетику роста керамзитобетона во времени в виде гиперболической зависимости, позволяющей прогнозировать прочностные характеристики возводимых конструкций зданий и сооружений. При этом полученные данные можно использовать для конструкций, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования. В этой связи для образцов из керамзитобетона класса 8/10...16/20 были определены следующие характеристики: кубиковая и призмная прочности, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

Список использованных источников

1. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов / РУП «Институт БелНИИС» - Минск, 2013. – 38с.
2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.– Госкомитет СССР по делам строительства. -М., 1981– 20с.
3. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – №1. – С.40–44.
4. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С.Д.Семенюк – Могилёв: Беларус.-Рос. ун, 2003. – 269с.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е.Гмурман – М.: Высш. шк., 1977. – 479с.

ABSTRACT

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the strength and deformation properties of ceramsite concretes CL 8/10, 10/12,5 and 16/20 based on expanded clay gravel of Novolukoml factory. It were determined block and prism strength, was found modules of longitudinal and transverse deformations, and the limits of concrete microcracking formation.

Keywords: class of concrete, concrete cement, elastic modulus, prism, longitudinal and transverse strain shear modulus, Poisson's ratio, linear correlation statistics.

АНОТАЦІЯ

У статті наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень міцності та деформаційних властивостей керамзитобетонів класу 8/10, 10 / 12,5 і 16/20 на основі керамзитового гравію Новолукомльського заводу. Визначена кубикова і призмочна міцності, знайдені модулі поздовжніх і поперечних деформацій, модуль зсуву, межі мікротріщиноутворення бетонів.

Ключові слова: клас бетону, керамзитобетон, модуль пружності, призма, поздовжні і поперечні деформації, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона, лінійна кореляція, статистика.