

УДК 691.32-033.33

С. Д. Семенюк, И. И. Мельянцова, М. Г. Мамочкина, Г. А. Дивакова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ
КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ КЛАССОВ 10/12,5 И 16/20 ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ
ДАНЫМ**

UDC 691.32-033.33

S. D. Semeniuk, I. I. Melyantsova, M. G. Mamochkina, G. A. Divakova

**STUDIES OF STRENGTH AND DEFORMABILITY OF EXPANDED CLAY
LIGHTWEIGHT CONCRETE OF 10/12,5 AND 16/20 GRADES BY
EXPERIMENTAL FACTS**

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований прочностных и деформативных свойств лёгких бетонов на основе керамзитового гравия при кратковременном центральном сжатии. Определены кубиковая и призмная прочности, 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.

Abstract

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the strength and deformation properties of expanded clay lightweight concrete at short central compression. According to tests of four series of samples were determined block and prism strength, was found modules of longitudinal and transverse deformations, and the limits of concrete microcracking formation.

Key words:

grade concrete, expanded clay lightweight concrete modulus, prism, longitudinal and transverse deformations, Poisson's ratio, the linear correlation, statistics, the limits of concrete microcracking formation.

Введение

Легкие бетоны на основе керамзитового гравия широко применяются в промышленном и гражданском строительстве. Керамзитобетонные конструкции позволяют улучшить теплотехнические и акустические свойства зданий, значительно снизить их массу. Комплексное использование легких бетонов дает возможность решить проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и инженерных сооруже-

ний, повысить их надежность, долговечность 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 классов 10/12,5 и 16/20 в виде кубов, цилиндров и призм на кратко-

временное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452-80*.

Характеристики опытных образцов и методика экспериментальных исследований

Для определения прочностных и деформативных характеристик легких бетонов на основе керамзитового гравия были исследованы две серии опытных образцов из бетона классов 10/12,5 и 16/20. В каждой серии экспериментальных исследований было заформовано и испытано 12 кубов с размерами ребра 150 мм, восемь кубов с размерами ребра 100 мм, 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм и 12 призм размерами 150×150×600 мм. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 сут. В каждом возрасте испытывалось по три куба с размерами ребра 150 мм, два куба с размерами ребра 100 мм, три призмы размерами 150×150×600 мм и три цилиндра диаметром 150 мм и высотой 300 мм.

В качестве крупного заполнителя для бетона класса 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5...10 и 10...20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 и 1,86 МПа соответственно. Для изготовления легкого бетона класса 10/12,5 применялся только керамзит фракции 10...20 мм. Для обеих серий в качестве мелкого заполнителя служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр} = 1,8$, вяжущим – 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 легкого бетона в возрасте 28 сут 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 легкого бетона в возрасте 28 сут оказалась равной 1390 кг/м³.

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [1]. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 370...375 мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 110...115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отсчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отсчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Средняя кубиковая прочность образцов в возрасте 7 сут составила 16,04 МПа; 14 сут – 18,1 МПа; 28 сут – 20,56 МПа; 60 сут – 21,47 МПа.

Средняя призмная прочность исследуемых образцов в возрасте 7 сут составила 13,11 МПа; 14 сут – 14,68 МПа; 28 сут – 16,21 МПа; 60 сут – 17,56 МПа, а коэффициенты призмной прочности – 0,82; 0,81; 0,79; 0,82 соответственно.

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:

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

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

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

$E_{c(0)}$ – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$); λ_{fc} – предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = fc$.

Приведенная статистическая обработка результатов испытаний бетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{v(\sigma)}} = E_{v(0)} [\lambda_{v(fc)} \cdot \eta]; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{v(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \left[1 - \lambda_{v(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}; \quad (4)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2 [\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)}]} = G_0 \left[1 - \lambda_{G(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]; \quad (5)$$

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

где $E_{v(\sigma)}, G_{\sigma}$ – секущие модули поперечных упругопластичных деформаций и деформаций сдвига; $\varepsilon_{v(\sigma)}, \varepsilon_{G(\sigma)}$ – соответствующие вышеуказанным секущим модулям деформаций упругопла-

стические поперечные деформации и деформации сдвига при сжатии; $E_{v(0)}, G_0$ – испытанные значения модулей упругих поперечных и сдвиговых деформаций; $\lambda_{v(fc)}, \lambda_{G(fc)}$ – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении $\sigma = fc$.

$$\lambda_{v(fc)} = \frac{E_{v(0)} - E_{v(fc)}}{E_{v(0)}}; \quad (7)$$

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

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

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистически методами линейной корреляции [4].

Наиболее простым способом первичного определения связи между двумя свойствами является способ графического изображения результатов вычислений. Откладывая по оси абсцисс данные одного свойства (напряжения), а по оси ординат соответствующие им значения другого свойства (относительные деформации ε и E'), получаем группу точек (рис. 1 и 2).

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 $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ – сумма отклонений отдельных вариант V_x, V_y от соответ-

ствующих им средних арифметических M_x и M_y ; n – число наблюдений.

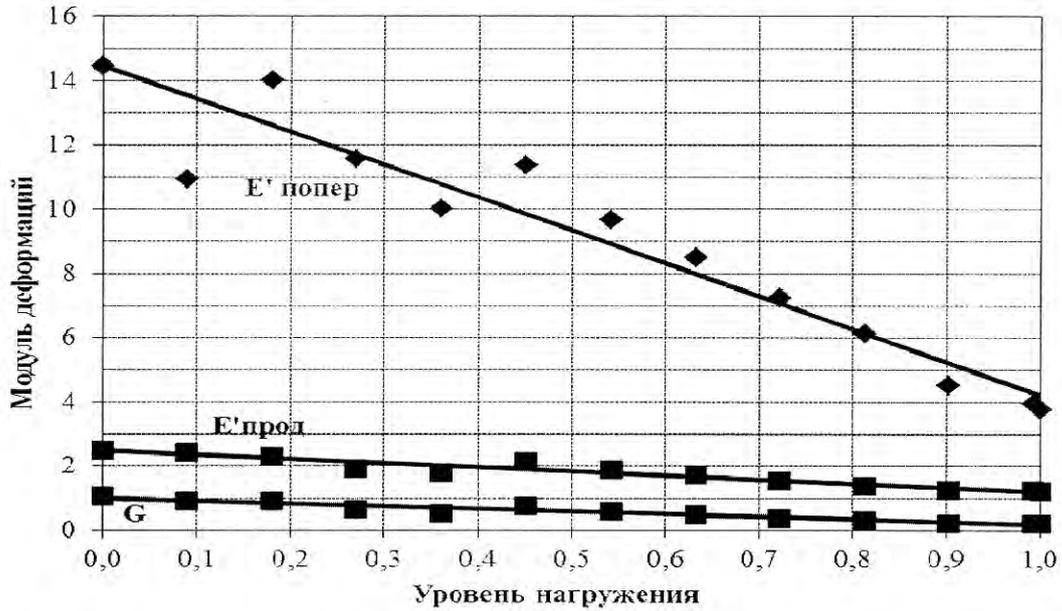


Рис. 1. Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 16/20

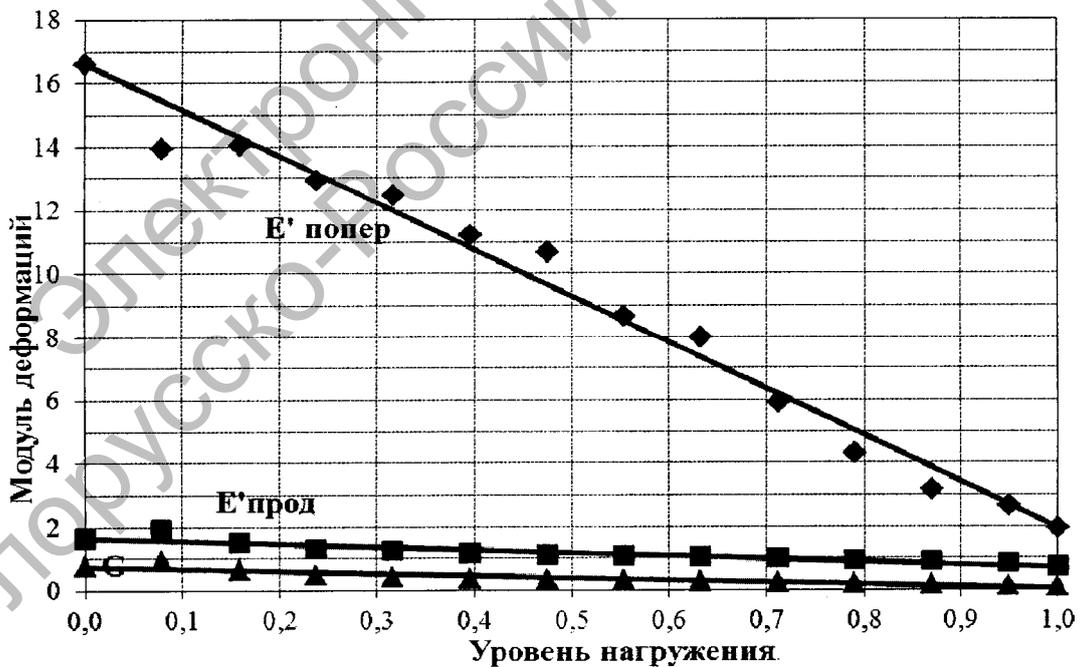


Рис. 2. Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса 10/12,5

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).

Результаты проведенных исследований отражены в табл. 1 и 2.

При нагружении бетонного образца длительным напряжением, меньшим либо равным нижней границе микротрещинообразования, в бетоне не возникает микроразрушения. При действии напряжений в пределах границ нижнего и верхнего микротрещинообразования в бетоне возникают микроразрушения, но их количество не приводит к разрушению материала.

Табл. 1. Характеристика бетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 16/20

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

Табл. 2. Характеристика бетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 10/12,5

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

Если длительное напряжение больше верхней границы микротрещинообразования, в бетоне происходит накопление и развитие микроразрушений вплоть до его полного разрушения. Поэтому за предел прочности при длительном сжатии принимают напряжение несколько ниже верхней границы микротрещинообразования (рис. 3).

Верхний предел микротрещинообразования f_{cr}^v (так называемая «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

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

где $\varepsilon_{c(\sigma)}$ – продольные относительные

деформации; $\varepsilon_{v(\sigma)}$ – поперечные относительные деформации.

По пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v - \eta$ находился верхний предел микротрещинообразования бетона – f_{cr}^v .

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 поперечного модуля деформаций к продольному для каждой ступени нагружения (рис. 4).

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. 5 и 6).

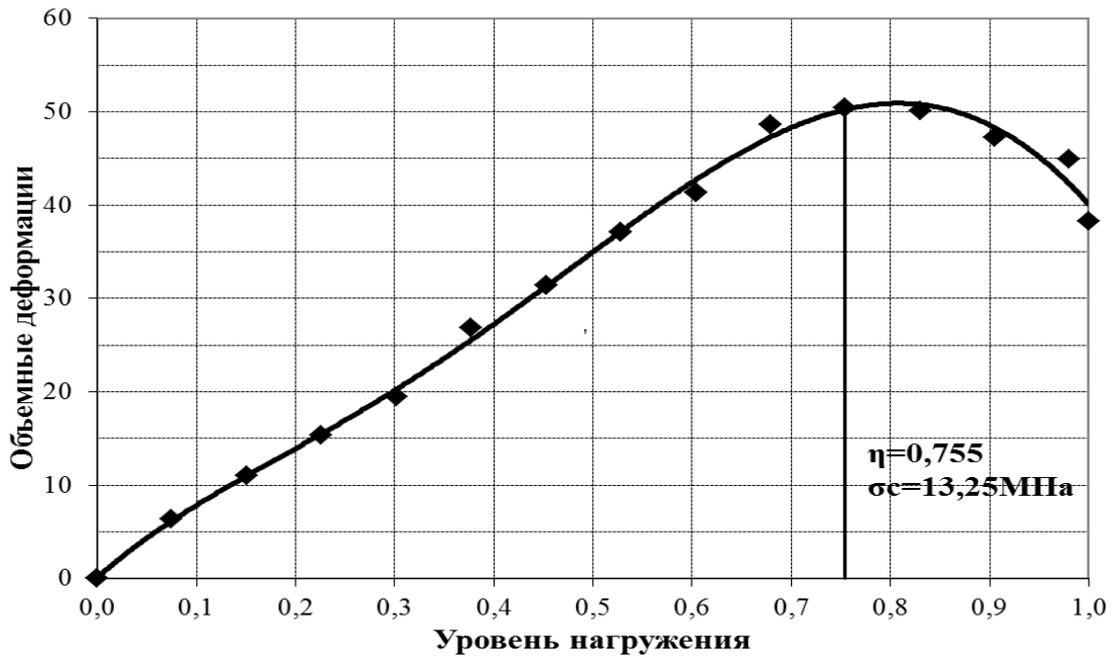


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – объемные деформации» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 сут

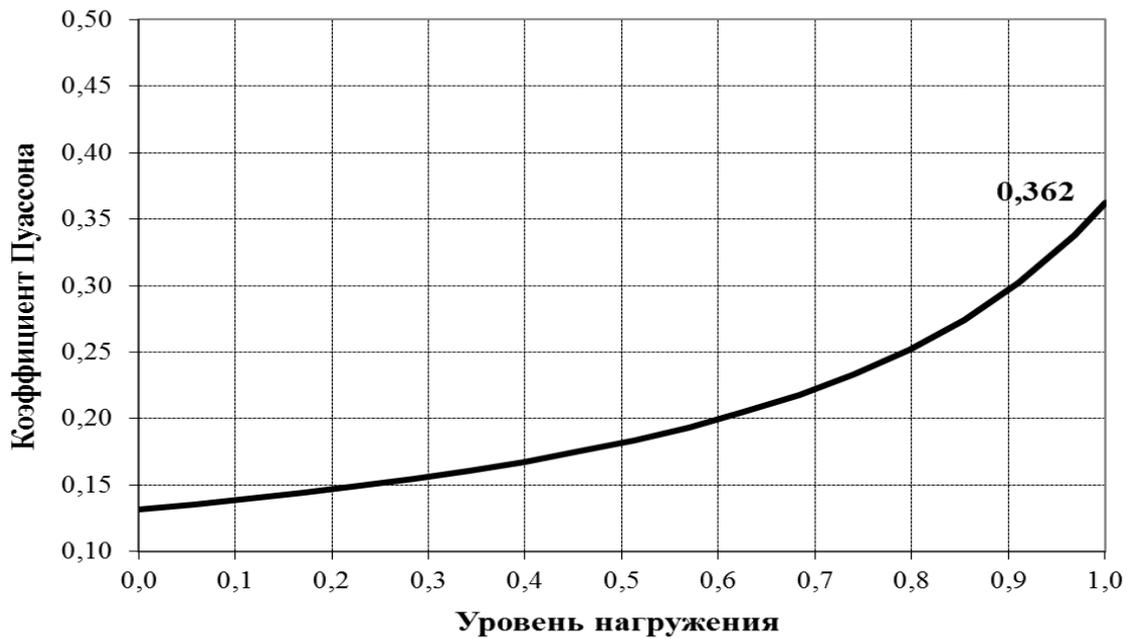


Рис. 4. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 сут

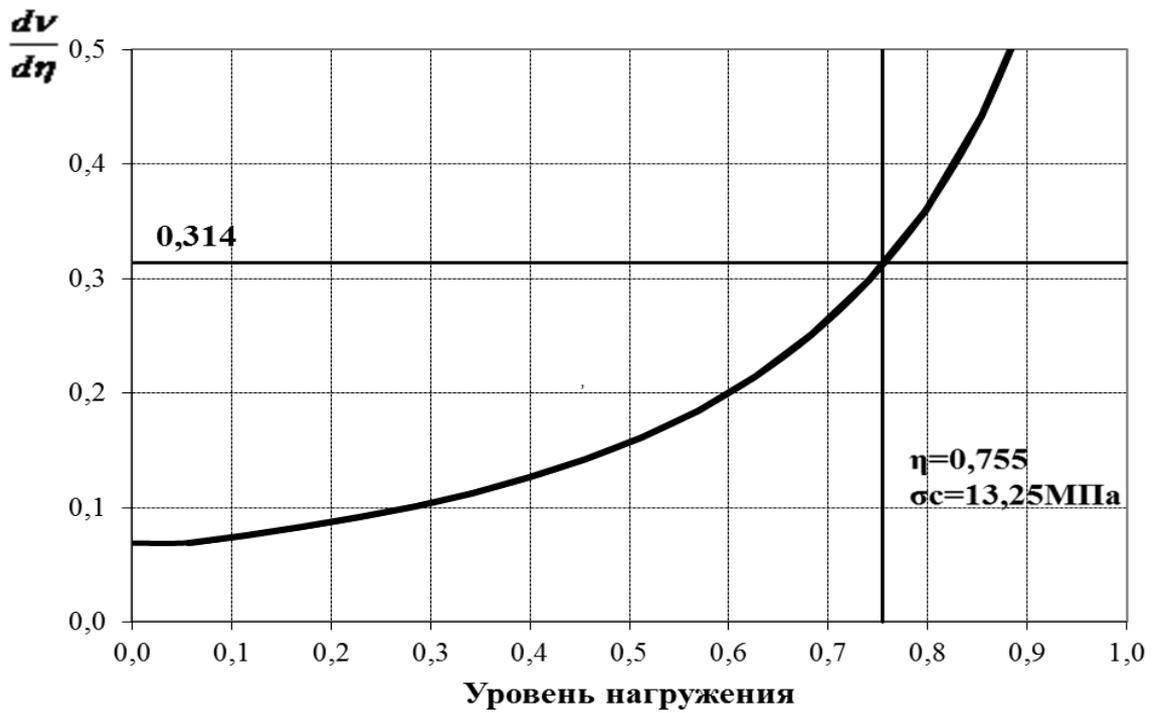


Рис. 5. Корреляционные зависимости (первая производная) для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 сут

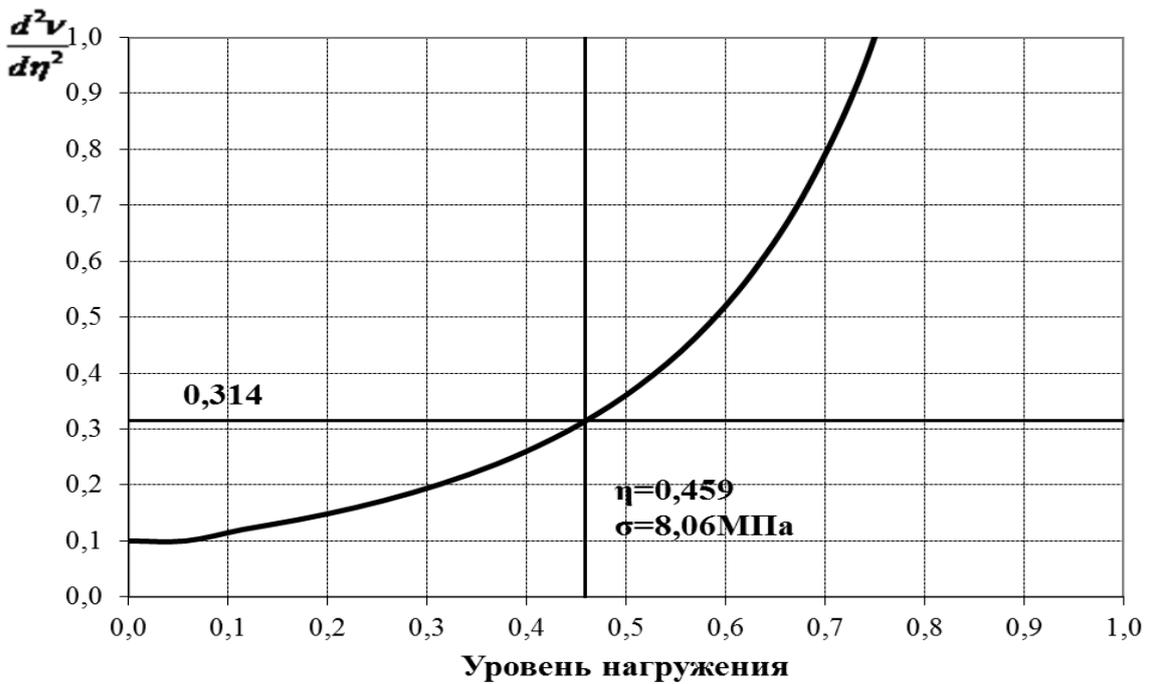


Рис. 6. Корреляционные зависимости (вторая производная) для образцов из бетона класса 16/20 в возрасте 60 сут

Выводы

Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций, зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования. В этой связи для образцов из керамзитобетона клас-

сов 16/20 и 10/12,5 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М. : Госкомитет СССР по делам строительства, 1981. – 20 с.
2. Семенюк, С. Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии / С. Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – № 1. – С. 40–44.
3. Семенюк, С. Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С. Д. Семенюк. – Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
4. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 1977. – 479 с.

Статья сдана в редакцию 17 июня 2014 года

Славик Денисович Семенюк, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-27-37-43.

Ирина Игоревна Мельянцова, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-48-07-07.

Мария Геннадьевна Мамочкина, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-447-45-54-00.

Галина Анатольевна Дивакова, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-43-35-37.

Slavik Denisovich Semeniuk, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-27-37-43.

Irina Igorevna Melyantsova, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-297-48-07-07.

Mariya Gennadyevna Mamochkina, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-447-45-54-00.

Galina Anatolyevna Divakova, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-297-43-35-37.