

испытаний арматуры позволяет получить диаграммы деформирования при монотонно возрастающей многократном нагружении и трансформированные диаграммы деформирования стали при малоцикловых нагрузках, а также выявить явление упрочнения арматурных стержней, т.е. проанализировать явление наклепа. Предлагаемая программа и методика испытания опытных балок позволит на базе результата экспериментальных исследований учесть влияние на прочность, жесткость и деформативность режима нагружения и малоциклового характер нагрузки в предистории нагружения.

УДК 691.32-033.33

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ ЗАВОДОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СЕМЕНЮК С. Д., КЕТНЕР Э. А.

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона классов LC 9/10, LC 10/12, LC 16/18 и LC 30/33 при кратковременном центральном сжатию в возрасте 7, 14, 21, 28 и 60 суток, описана кинетика роста прочности этих бетонов, проведена экспериментально-статическая оценка методом линейного корреляционного анализа.

Введение. Бетон и железобетон в различных его модификациях есть и в перспективе будет одним из основных строительных материалов. Легкие бетоны средней прочности на основе керамзита широко применяются в промышленном и гражданском строительстве в Российской Федерации, Украине, Польше и др. Применение легкого бетона значительно расширяется, т.к. его использование эффективно не только для наружных ограждений отапливаемых зданий, но и во всех случаях, когда необходимо уменьшить вес конструкций. Особое значение легкий бетон имеет

при возведении многоэтажных монолитных зданий и сооружений, а также при строительстве зданий из крупных панелей и блоков; использование его существенно снижает трудоемкость, вес и стоимость объектов. Для соответствия белорусских нормативных документов Еврокоду необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой целью были проведены экспериментальные и теоретические исследования прочности и деформативности образцов из керамзитобетона классов LC 9/10, LC 10/12, LC 16/18 и LC 30/33 в виде кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452-80*.

Цели и задачи. На основе экспериментальных данных получить зависимость, описывающая кинетику роста керамзитобетона во времени с целью прогнозирования прочностных характеристик возводимых конструкций зданий и сооружений. В этой связи для образцов из керамзитобетона класса 9/10...30/33 определить следующие характеристики: кубиковую, призмную и цилиндрическую прочности, коэффициенты призмной и цилиндрической прочности, модули продольных и поперечных деформаций, коэффициент упругости, касательный модуль и модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

Получение керамзитобетона LC 9/10. Для изготовления легкого бетона класса LC 9/10 в качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 и 10-20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68МПа и 1,86 МПа соответственно; в качестве мелкого заполнителя – песок керамзитовый фракции 0-4 мм ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». Вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500. Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса LC 9/10: Ц:П:Г=1:0,52:1,05 при водоцементном отношении В/Ц=0,63. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 950 кг/м³.

Составы бетонных смесей подбирались в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкци-

онно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов», подготовленных РУП «Институт БелНИИС».

Бетонную смесь приготавливали в лабораторных условиях вручную. Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Распалубливание проводилось на шестые сутки. В дальнейшем, экспериментальные образцы находились в естественных температурно-влажностных условиях цеха испытания конструкций, где и проводилось их испытание на кратковременное действие нагрузки.

Получение керамзитобетона LC 10/12. Для изготовления легкого бетона класса LC 10/12 применялся только керамзитовый гравий фракции 10-20 мм с относительной прочностью в цилиндре 1,86 МПа. Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$. Вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 10/12: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении В/Ц=0,51. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1390 кг/м³. Осадка конуса – 5 см.

Получение керамзитобетона LC 16/18. В качестве крупного заполнителя для бетона класса LC 16/18 использовался керамзитовый гравий фракций 5-10 мм и 10-20мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68МПа и 1,86 МПа соответственно.

Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$. Вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса LC 16/18: Ц:П:Г=1:1,84:0,79 при водоцементном отношении В/Ц=0,46. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1545 кг/м³.

Получение керамзитобетона LC 30/33. Для изготовления легкого бетона класса LC 30/33 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракций 5-10 мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК». Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}=1,8$.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 30/33: Ц:П:Щ= 1:1,84:0,79 при водоцементном отношении В/Ц=0,52. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1780 кг/м³.

Методика проведения испытания образцов из керамзитобетона LC 9/10, LC 10/12, LC 16/18, и LC 30/33. Испытание призм и кубов на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями ГОСТ 24452–80*. Нагружение призмённых образцов до их разрушения производилось с постоянной скоростью роста напряжений ($0,6 \pm 0,2$ МПа/с) ступенями, равными 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени отсчеты по приборам снимались дважды: сразу же после приложения нагрузки и после 4-5 минутной выдержки, чтобы проследить развитие пластических деформаций. При нагрузке 0,8...0,85 от разрушающей величину ступени уменьшали до 50% от первоначальной и далее проводили испытания по предыдущим режимам вплоть до разрушения образца. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм на базе 370...375мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001мм на базе 110 – 115мм. 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.

Таблица 1

Расход инертных для керамзитобетона испытанных серий образцов

№ серии	Класс бетона	Расход на 1 м ³ смеси, кг						Плотность, кг/м ³	
		Цемент	Керамзитовый щебень	Керамзитовый гравий		Песок			Вода, л
				5-10	10-20	керамзитовый	кварцевый		
1	LC9/10	312,5	-	164,1	164,1	162,5	-	196,9	950
2	LC10/12	264,65	-	-	362,57	-	637,8	134,97	1390
3	LC16/18	378	-	147,31	147,31	-	695,61	174	1545
4	LC30/33	442,9	349,9	-	-	-	815	177,16	1780

Таблица 2

Прочностные характеристики кермзитобетона класса LC 16/18

Маркировка образца	Размеры, см			Площадь, см ²	Разруш. нагрузка, кН	Прочность, МПа	Средняя прочность, МПа	Масса, кг
	a	b	h					
<u>Возраст 7 суток</u>								
К-1	15,16	15	15	227,4	361,0	15,88	15,38	
К-2	15,1	15	15	226,5	337,1	14,88		
К-3	9,8	10	10	98	101,8	9,87	11,24	
К-4	10	10	10	100	132,8	12,62		
Ц2-1	Ø14,8		30	171,95	196,9	13,74	15,51	
Ц2-2	Ø14,8		30	171,95	247,6	17,28		
ПД2-1	15,1	15	15	226,5	295,7	13,06	13,06	
<u>Возраст 14 суток</u>								
К-5	15,2	15	15	228	388,2	17,03	17,90	
К-6	15,3	15	15	229,5	430,7	18,77		
К-7	9,9	10	10	99	168,3	16,15	15,46	
К-8	10	10	10	100	155,4	14,76		
Ц2-3	Ø14,8		30	171,95	234,8	16,39	16,03	
Ц2-4	Ø14,8		30	171,95	224,5	15,67		
ПД2-2	15,1	15	60	226,5	332,4	14,68	14,68	
<u>Возраст 28 суток</u>								
К-9	15	15	15	225	458,5	20,38	19,08	
К-10	15,03	15	15	225,45	401,1	17,79		
К-11	9,9	10	10	99	241,7	23,19	20,65	
К-12	9,9	10	10	99	188,7	18,11		
Ц2-5	Ø14,9		31	174,27	277,9	19,13	18,55	
Ц2-6	Ø14,8		31	171,95	257,5	17,97		
ПД2-3	15,1	15	60	226,5	358,6	15,83	16,70	
ПД2-4	15,1	15	60	226,5	397,7	17,56		
<u>Возраст 60 суток</u>								
К-13	15,03	15	15	225,45	466,1	20,67	20,54	
К-14	14,9	15	15	223,5	455,9	20,40		
К-15	10	10	10	100	220,4	20,94	21,37	
К-16	10	10	10	100	229,5	21,80		
Ц2-7	Ø14,8		31	171,95	293,5	20,48	20,23	
Ц2-8	Ø14,8		31	171,95	286,2	19,97		
ПД2-5	15,1	15	60	226,5	375,5	16,58	16,58	

Коэффициент призмной прочности в возрасте 28 суток 0,87, а цилиндрической 0,97.

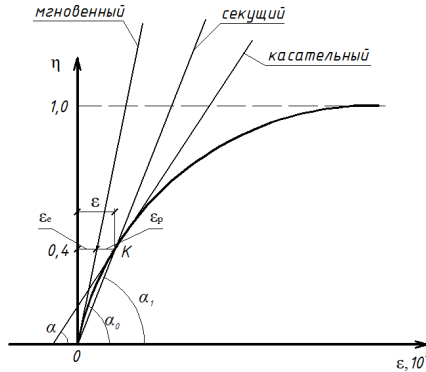


Рис. 1. Модули упругости

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

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

где: t - возраст бетона в сутках;

f_{cl}^t - прочность бетона в возрасте t суток;

f_{cl}^{28} - прочность бетона в возрасте 28 суток.

Зависимость, секущий модуль продольных деформаций - напряжение или уровень напряжений ($E_{cl} - \sigma$), ($E_{cl} - \eta$) при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (2), а непосредственно вытекающая из нее зависимость «напряжение - деформация» корреляционной зависимостью (3) гиперболического вида:

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

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

где η - уровень напряжений;

$E_{cl(\sigma=0)}$ - мгновенный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma=0$),

$\lambda_{cl(\sigma)}$ - предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = f_c$.

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

$$E_{ld(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ld(\sigma)}} = E_{ld(\sigma=0)} \cdot \left[1 - \lambda_{ld(\sigma)} \cdot \eta \right], \quad (4)$$

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

$$G_\sigma = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2 \left[\varepsilon_{cl(\sigma)} + \varepsilon_{ld(\sigma)} \right]} = G_{\sigma=0} \left[1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_\sigma} = \frac{\sigma}{G_{(\sigma=0)} \cdot \left[1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right]} \quad (7)$$

В формулах (5) и (7):

$$\lambda_{ld(\sigma)} = \frac{E_{ld(\sigma=0)} - E_{ld(\sigma=f_c)}}{E_{ld(\sigma=0)}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = 2 \left[\varepsilon_{cl(\sigma)} - \varepsilon_{ld(\sigma)} \right] \quad (9)$$

Касательный модуль продольных деформаций определяется в зависимости от секущего модуля продольных деформаций

$$E_{cl(\sigma)} = E'_{cl(\sigma)} \cdot \nu = \frac{(E'_{cl(\sigma)})^2}{E'_{cl(\sigma=0)}} \quad (10)$$

где $\nu = \frac{E'_{cl(\sigma)}}{E'_{cl(\sigma=0)}}$ – коэффициент упругости бетона

В соответствии с ТКП EN 1992-1-1-2009 значения секущего модуля E для легкого бетона могут быть получены умножением соответствующих значений для бетона с обычной плотностью на следующий коэффициент:

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

Расхождение полученных результатов с нормативными составило не более 4%.

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (2), (4), (6) устанавливаются статистическими методами линейной корреляции.

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:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_c^2 \cdot Y_c^2}} \quad (11)$$

где $\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)$ – отклонение отдельных вариант V_x, V_y от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y ;

n – число наблюдений.

Средняя ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

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:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x) \quad (13)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения.

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усредненным показателям для всех серий 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 четырех).

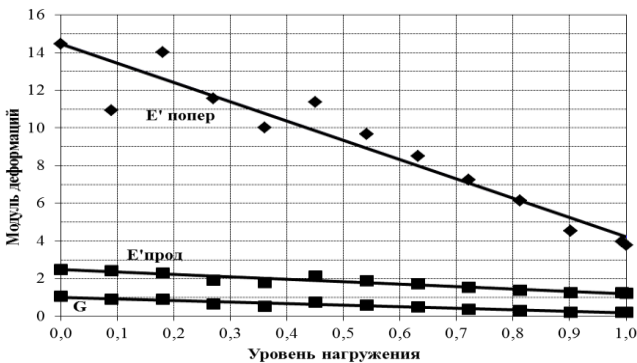


Рис. 2. Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса LC 16/18.

Таблица 3.2.

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов
и статистика их линейных корреляционных зависимостей
для класса LC 16/18

Класс бето- на	Воз- раст, сут	$f_{c, cube}^G$, МПа	f_{ck} , МПа	f_{cr}^v		f_{cr}^0		Зависи- мость	Уравнение, МПа	r	r/m _r
				η	МПа	η	МПа				
16/18	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E'_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,795(1-0,302\eta) \cdot 10^4$	-0,988	147,5
								$E_{ld(\sigma)-\eta}$	$17,580(1-0,957\eta) \cdot 10^4$	-0,792	7,36
								$G_c-\eta$	$0,808(1-0,446\eta) \cdot 10^4$	-0,976	70,18
								$E_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,795(1-0,302\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,988	147,5
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E'_{cl(\sigma)-\eta}$	$2,4884(1-0,514\eta) \cdot 10^4$	-0,952	42,16
								$E_{ld(\sigma)-\eta}$	$14,474(1-0,705\eta) \cdot 10^4$	-0,948	37,71
								$G_c-\eta$	$1,066(1-0,558\eta) \cdot 10^4$	-0,960	50,77
								$E_{cl(\sigma)-\eta}$	$2,488(1-0,514\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,952	42,16
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$E'_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,687(1-0,227\eta) \cdot 10^4$	-0,940	43,77
								$E_{ld(\sigma)-\eta}$	$16,224(1-0,811\eta) \cdot 10^4$	-0,936	60,2
								$G_c-\eta$	$0,843(1-0,421\eta) \cdot 10^4$	-0,987	162,3
								$E_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,687(1-0,227\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,940	43,77
60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E'_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,749(1-0,246\eta) \cdot 10^4$	-0,946	39,11	
							$E_{ld(\sigma)-\eta}$	$13,264(1-0,72\eta) \cdot 10^4$	-0,848	13,15	
							$G_c-\eta$	$1,205(1-0,386\eta) \cdot 10^4$	-0,975	84,26	
							$E_{cl(\sigma)-\eta}$	$1,749(1-0,246\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,946	39,11	

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

Важной характеристикой для бетонных и железобетонных изделий являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования бетона, позволяющие правильно назначать для конструкции эксплуатационные нагрузки. Верхний предел микротрещинообразования f_{cr}^v находился графическим методом по усредненным экспериментальным данным для двух призм путем построения зависимости «уровень нагружения - объемная деформация», объемная деформация при этом определялась по формуле:

$$\varepsilon^V = \varepsilon_{c(\sigma)} - 2\varepsilon_{v(\sigma)}. \quad (14)$$

На пиковой точке $\varepsilon^V - \eta$ находился верхний предел микротрещинообразования бетона - f_{cr}^V . На рис. 3 показан пример нахождения f_{cr}^V для керамзитобетона класса 16/18 в возрасте 60 суток.

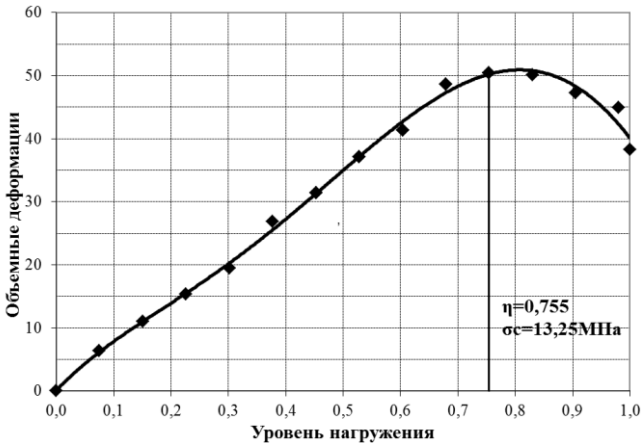


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-объемные деформации» для образцов из бетона класса 16/18 в возрасте 60 суток

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 (рис. 4).

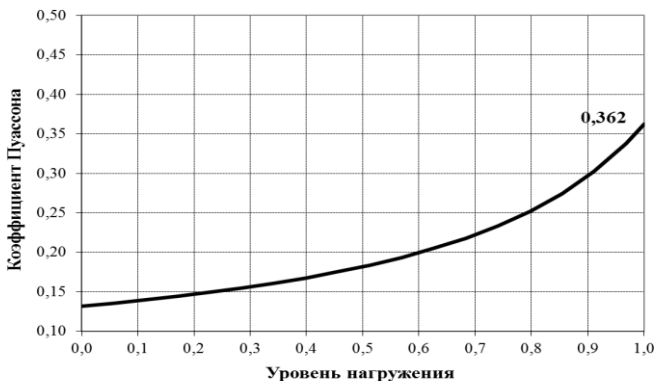


Рис. 4. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса LC 16/18 в возрасте 60 суток

По корреляционным кривым зависимостей « $\frac{dv}{d\eta} - \eta$ » и « $\frac{d^2v}{d\eta^2} - \eta$ »

были определены соответственно верхняя $\eta_{\text{срс}}^v$ и нижняя $\eta_{\text{срс}}^0$

границы образования и развития продольных микротрещин отрыва при кратковременном сжатии бетона (рисунки 5, 6).

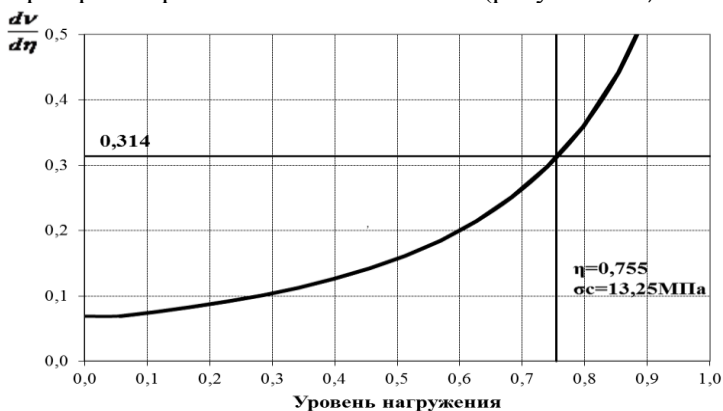


Рис. 5. Корреляционные зависимости первая производная для образцов из бетона класса LC 16/18 в возрасте 60 суток

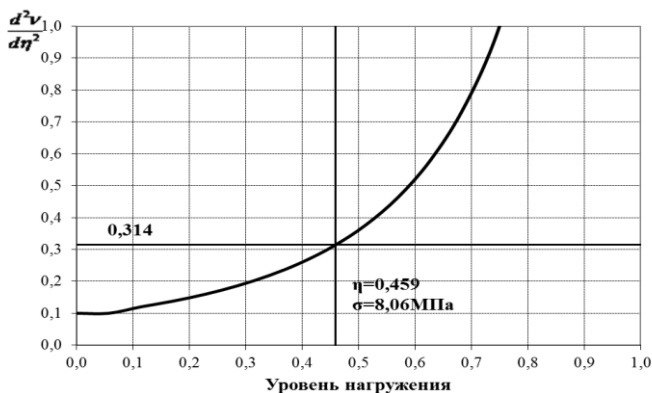


Рис. 6. Корреляционные зависимости вторая производная для образцов из бетона класса 16/18 в возрасте 60 суток

Заключение. На основе экспериментальных данных получена зависимость, описывающая кинетику роста прочности керамзитобетона во времени в виде гиперболической зависимости, позволяющей прогнозировать прочностные характеристики возводимых конструкций зданий и сооружений. В этой связи для образцов из керамзитобетона класса 9/10...30/33 были определены следующие характеристики: кубиковая, призмная и цилиндрическая прочности, коэффициенты призмной и цилиндрической прочности, модули продольных и поперечных деформаций, коэффициент упругости, касательный модуль и модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы керамзитобетонных конструкций, зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования.