

УДК 691.32 -033.33

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ЛЕГКОГО БЕТОНА НА
ОСНОВЕ КЕРАМЗИТОВОГО ЩЕБНЯ ПЕТРИКОВСКОГО ЗАВОДА
БЕЛАРУСИ**

**STRENGTH AND DEFORMABILITY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE
BASED ON EXPANED CLAY GRAVEL OF THE PLANT PETRIKOV OF
BELARUS**

**Семенюк С.Д., д.т.н., проф., Кузьмина А.А., м.т.н., Подголин А.Г.,
магистрант (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика
Беларусь)**

**Semeniuk S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuzmina A.A.,
Master of Technical Sciences, Podgolin A.G., Master student (Belorussian-
Russian University, Mogilev, Republic of Belarus.**

**В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических
исследований прочностных и деформативных свойств легкого бетона CL
25/30 на основе керамзитового щебня Петриковского завода при
кратковременном центральном сжатии.**

**The article presents the results of experimental and theoretical studies of
strength and deformation properties of lightweight concrete CL 25/30 on the
basis of expanded clay gravel of the Petricov Central plant under short-term
central compression.**

Ключевые слова: прочность, деформативность, кинетика роста, корреляция,
зависимость, статистика, модуль упругости, уровень напряжений, пределы
микротрещинообразования.
Strength, deformability, growth kinetics, correlation, dependence, statistics,
modulus of elasticity, the stress level, the limits of microcracking.

Введение. Легкие бетоны на основе керамзита 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
энергосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и
сооружений, повысить их ресурс и безопасность при эксплуатации. Однако
для соответствия белорусских нормативных документов Еврокоду
необходимо уточнение некоторых прочностных и деформативных

характеристик легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой целью были проведены экспериментальные исследования прочности и деформативности образцов из легкого бетона класса CL 25/30 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 бетона CL 25/30 на керамзитовом щебне было заформовано и испытано 12 кубов с размером ребра 150 мм, 8 кубов с размером ребра 100 мм, 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм и 12 призм размером 150x150x600 мм. Испытания проводились в возрасте 14, 21, 28 и 60 суток. В каждом возрасте испытывалось по 3 куба с размерами ребра 150 мм, 2 куба с размерами ребра 100 мм, 3 призмы размерами 150x150x600 мм и 3 цилиндра диаметром 150 мм и высотой 300 мм.

В качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый щебень фракций 5-10 мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» с относительной прочностью в цилиндре 3,25 МПа. Мелким заполнителем служил кварцевый песок с модулем крупности $M_{кр}=1,8$, вяжущим - портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона CL 25/30: Ц:П:Щ=1:1,84:0,79 при В/Ц=0,4. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1780 кг/м³. Состав смеси подбирался в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструктивно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетон», разработанных РУП «Институт БелНИИС» [1].

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

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие производилось в полном соответствии с требованиями [2]. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 355...365 мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 100...115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись.

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.

Экспериментально-статистическая оценка деформативных характеристик бетона CL 25/30.

В [3,4] показано, что 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:

$$E'_{cl(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{cl(\sigma)}} = E'_{cl(\sigma=0)} \cdot \left[1 - \lambda_{cl(\sigma)} \cdot \eta \right]; \quad (2)$$

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

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 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):

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

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

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 $\nu = \frac{E'_{cl(\sigma)}}{E'_{cl(\sigma=0)}}$

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (2), (4), (6) устанавливаются статистическими 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:

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (11)$$

где $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ - 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 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).

Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций - уровень нагружения» в возрасте 21 суток представлены на рисунке 1.

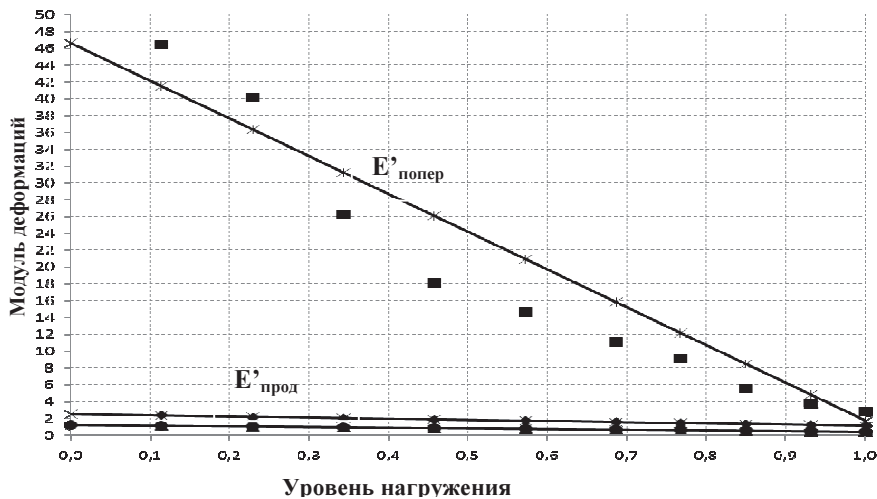


Рис.1. Опытные и теоретические зависимости «модуль деформаций - уровень нагружения» для образцов в возрасте 21 суток из бетона класса 25/30; 1 - ($E'_{\text{прод}} - \eta$), 2 - ($E'_{\text{попер}} - \eta$), 3 - ($G - \eta$)

Характеристика бетона испытанных образцов различного возраста и статистика их корреляционных зависимостей представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 25/30

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c, cube}^G$, МПа	f_{ck} , МПа	f_{cre}^V		f_{cre}^0		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m _r
				η	МПа	η	МПа				
25/30	14	24,60	21,37	0,874	18,677	0,648	13,47	$E'_{cl(\sigma)} - \eta$	4,1367(1-0,754 η)	-0,894	13,36
								$E'_{ld(\sigma)} - \eta$	43,43(1-0,936 η)	-0,937	23,16
								$G_c - \eta$	1,893(1-0,979 η)	-0,941	24,74
								$E_{cl(\sigma)} - \eta$	4,1367(1-0,754 η) ²	-0,894	13,36
	21	30,86	27,24	0,849	23,11	0,633	17,23	$E'_{cl(\sigma)} - \eta$	2,4728(1-0,558 η)	-0,997	508,6
								$E'_{ld(\sigma)} - \eta$	45,5(1- η)	-0,950	30,91
								$G_c - \eta$	1,2047(1-0,661 η)	-0,997	576,8
								$E_{cl(\sigma)} - \eta$	2,4728(1-0,558 η) ²	-0,997	508,6
	28	33,63	28,99	0,903	26,178	0,645	18,699	$E'_{cl(\sigma)} - \eta$	5,4949(1-0,791 η)	-0,979	72,1
								$E'_{ld(\sigma)} - \eta$	91,062(1-998 η)	-0,985	99,7
								$G_c - \eta$	2,6091(1-0,822 η)	-0,985	97,16
								$E_{cl(\sigma)} - \eta$	5,4949(1-0,791 η) ²	-0,979	72,1
60	34,07	29,86	0,795	23,739	0,642	19,17	$E'_{cl(\sigma)} - \eta$	5,0948(1-0,694 η)	-0,931	21,07	
							$E'_{ld(\sigma)} - \eta$	54,826(1-0,889 η)	-0,896	13,68	
							$G_c - \eta$	2,3475(1-0,696 η)	-0,935	23,3	
							$E_{cl(\sigma)} - \eta$	5,0948(1-0,694 η) ²	-0,931	21,01	

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_{crc}^v (т.н. «критическая» граница, при достижении которой наблюдается активный прирост пластических деформаций) находился графическим методом по усредненным экспериментальным данным для двух призм, испытанных кратковременным нагружением по стандартной методике - путем построения зависимости «уровень нагружения - объемная деформация». Объемные деформации при этом определялись по формуле:

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

На пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v - \eta$ находился верхний предел микротрещинообразования бетона - f_{crc}^v . На рисунке 2 показан пример нахождения f_{crc}^v для керамзитобетона CL 25/30 в возрасте 21 суток.



Рис. 2. Корреляционные зависимости «уровень нагружения - объемные деформации» для образцов из бетона класса 25/30 в возрасте 21 суток

Определение нижнего предела микротрещинообразования f_{crc}^0 так же производился графическим методом по экспериментальным данным. Сначала 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.

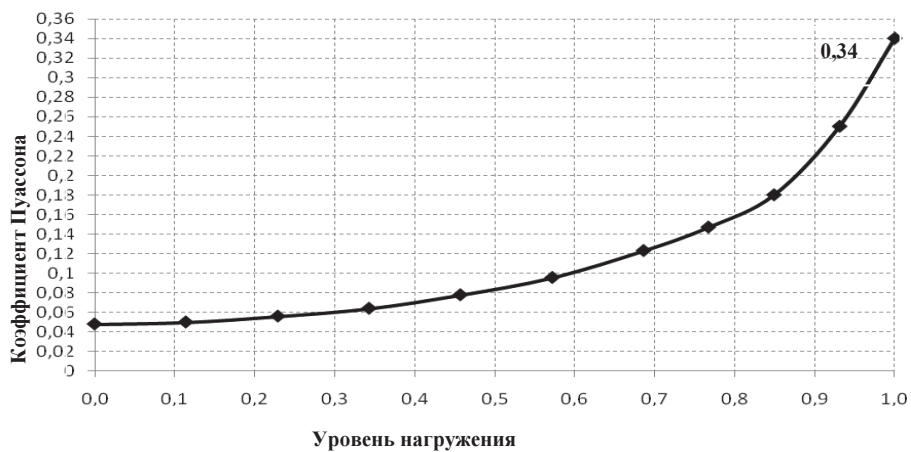


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения - коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 25/30 в возрасте 21 суток

Путем нахождения первой $\frac{d\nu}{d\eta}$ и второй $\frac{d\nu^2}{d\eta^2}$ производных был графически определен предел нижнего микротрещинообразования бетона.

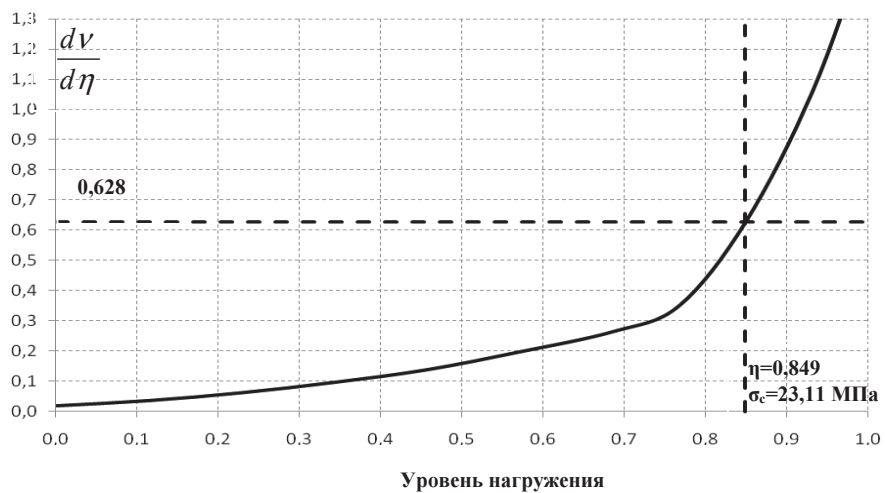


Рис. 4. Корреляционные зависимости первая производная для образцов из бетона класса 25/30 в возрасте 21 суток

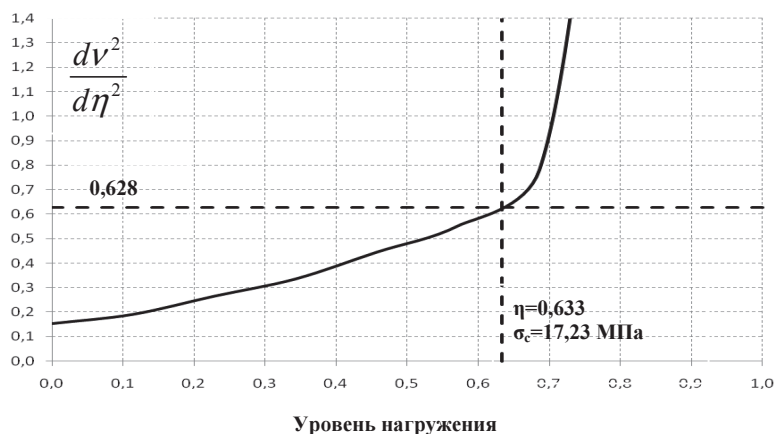


Рис. 5. Корреляционные зависимости вторая производная для образцов из бетона класса 25/30 в возрасте 21 суток

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 25/30 были определены следующие характеристики: кубиковая и призмная прочности, модули продольных и поперечных деформаций, касательный модуль и модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

1. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов/ РУП «Институт БелНИИС» - Минск, 2013. - 38 с. **2.** ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. - Госкомитет СССР по делам строительства. - М., 1981 - 20 с. **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-деформированном основании: монография / С.Д. Семенюк - Могилев: Беларус.-Рос. ун., 2003. - 269 с. **5.** Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математической статистики / В.Е. Гмурман - М.: Высш. шк., 1977. - 479 с.