

Семенюк Слава Денисович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» г. Могилев (Беларусь)

Кетнер Эрнест Александрович, магистр технических наук, аспирант, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» г. Могилев (Беларусь)

Slava Semeniuk, DSc in Engineering Science, Professor, Head of the department, Belarusian-Russian University, Mogilev (Belarus)

Ernest Ketner, Master of technical science, postgraduate student, Belarusian-Russian University, Mogilev (Belarus)

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ ЗАВОДОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF EXPANDED CLAY CONCRETE BASED ON RAW MATERIALS OF PLANTS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

АННОТАЦИЯ

К настоящему времени в Республике Беларусь нормативная база по проектированию легких бетонов на основе керамзита является недостаточно полной и требует доработки. Для соответствия нормативных документов Беларуси Еврокоду необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона, что актуально для Республики Беларусь.

В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона на основе сырья Новолукомльского завода керамзитового гравия, Лидского завода керамзитового гравия и Петриковского завода керамзитового щебня. Целью

работы является на основе экспериментальных данных получить зависимости, характеризующие пригодность конструкций из армированного и неармированного керамзитобетона при эксплуатации с заданными уровнями загрузки. Исследования проводились на образцах: кубах с размером ребра 100 и 150 мм, цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 300 мм, призмах размером 150x150x600 мм и 100x100x400 мм. Было испытано шесть серий образцов в возрасте 7, 14, 21, 28 и 60 суток. Исследуемые классы бетонов – LC8/10, LC10/12, LC12/15, LC16/18, LC25/28 и LC30/33; подбор составов бетонной смеси производился согласно Рекомендаций РУП «БелНИИС» по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитожелезобетонов. Данные проведенных испытаний позволили описать кинетику роста керамзитобетона гиперболической зависимостью. Оценка средних значений модуля продольных деформаций (секущего модуля), модуля поперечных деформаций, модуля сдвига, касательного модуля вытекает из экспериментальных исследований, которые можно описать линейной корреляционной зависимостью. Для каждого класса бетона в зависимости от уровня загрузки даны теоретические значения этих величин. Предложены зависимости «напряжения – относительные деформации» для расчета конструкций с параболически-прямоугольной диаграммой для бетона при сжатии и для билинейной зависимости между напряжением и относительной деформацией. Приведены значения сопротивления керамзитобетона при сжатии и растяжении, цилиндрическая, кубиковая и призмная прочности.

ABSTRACT

By now in the Republic of Belarus, the regulatory framework for the design of lightweight concrete based on expanded clay is insufficiently complete and requires further development. To comply with the normative documents of Belarus, Eurocode needs to clarify certain strength and deformation characteristics of expanded clay concrete, which is relevant for the Republic of Belarus.

The article presents the results of experimental and theoretical studies of strength and deformation characteristics of extended clay concrete on the basis of raw materials from the Novolukomlsky claydite gravel plant, the Lida Claydite Gravel Plant and the Petrykovsky claydite crushed stone plant. The aim of the work is to obtain, on the basis of experimental data, the dependencies characterizing the suitability of structures from reinforced and unreinforced expanded clay concrete in operation with predetermined loading levels. The studies were carried out on samples: cubes with rib size of 100 and 150 mm, cylinders with a diameter of 150mm and a height of 300mm, prisms measuring 150x150x600mm and 100x100x400mm. Six series of samples were tested at the age of 7, 14, 21, 28 and 60 days. The investigated classes of concrete are LC8 / 10, LC10 / 12, LC12 / 15, LC16 / 18, LC25 / 28 and LC30 / 33; the selection of the composition of the concrete mix was made in accordance with the recommendations of the RUE «BelNIIS» for the selection, manufacture and use of structural and thermal insulation and structural claydite-reinforced concrete. The data of the conducted tests allowed to describe kinetics of claydite-concrete growth by hyperbolic dependence. The estimation of the average values of the longitudinal strain module (secant module), the modulus of transverse deformations, the shear modulus, tangential modulus follows from experimental studies, which can be described by a linear correlation dependence. For each class of concrete, depending on the level of loading, theoretical values of these quantities are given. Dependences of «stresses – relative deformations» are proposed for calculating structures with a parabolic-rectangular diagram for concrete under compression and for a bilinear relationship between stress and relative deformation. The values of resistance to expanded clay concrete during compression and tension, cylindrical, cube and prismatic strength are given.

Ключевые слова: кинетика роста, статистика, коэффициент Пуассона, модуль деформаций, пределы микротрещинообразования.

Keywords: kinetics of growth, statistics, Poisson's ratio, modulus of deformations, limits of micro crack formation.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон и железобетон в различных его модификациях есть и в дальнейшем будет одним из основных строительных материалов. Одной из разновидностей бетона является керамзитобетон, относящийся к разряду легких бетонов при плотности 800–2000 кг/м³. [1]. Легкие бетоны средней прочности на основе керамзита широко применяются в промышленном, сельскохозяйственном и гражданском строительстве в странах Балтии, Польше, Российской Федерации, Украине и др. Находят они применение в гидротехническом строительстве и в наливных многоэтажных емкостях портовых сооружений. Керамзитобетонные конструкции позволяют улучшить теплотехнические и акустические свойства зданий, значительно снизить их массу. Его использование эффективно не только для наружных конструкций отапливаемых зданий, но и во всех случаях, когда необходимо уменьшить нагрузки, передаваемые на фундаменты и основания. 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 является актуальным для Республики Беларусь. В связи с этим были проведены экспериментально-теоретические исследования прочности и деформативности керамзитобетонов шести серий, классов LC8/10–30/33. Для каждой серии образцов проводилось испытание кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное сжатие в соответствии с [2, 3].

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНОВ

В исследованиях использовались материалы со следующими характеристиками, возможное изменение которых приводится дополнительно для конкретных экспериментов.

Вязущее – портландцемент марки М500, Белорусский цементный завод, активностью не менее 49,0 МПа, с показателем нормальной густоты (НГ) 25–28%.

Песок – природный с модулем упругости $M_{кр} = 1,8$; насыпной плотностью 1540 кг/м³.

Керамзитовый гравий фракций 5–10 мм насыпной массой 382 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа.

Керамзитовый гравий фракций 10–20 мм насыпной массой 326 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре 1,86 МПа.

Песок керамзитовый фракций 0–4 мм, насыпной массой 432 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре – 4,58 МПа.

Керамзит щебнеподобный фракций 5–10 мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» насыпной массой 585 кг/м³ с относительной прочностью в цилиндре 10,26 МПа.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является получение оптимальных составов керамзитобетонных классов плотности согласно EN206–1 при классах прочности LC8/10–LC30/33/

Для реализации этой цели решены следующие задачи: выявлена кинетика роста исследуемых бетонов во времени; найдены коэффициенты цилиндрической и призмочной прочности; коэффициенты упругости и пластичности; модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, касательный модуль продольных деформаций; объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

1. ПОДБОР СОСТАВОВ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

1.1 Получение керамзитобетона LC8/10

Для изготовления легкого бетона класса LC8/10 в качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 и 10–20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа и 1,86 МПа соответственно; в качестве мелкого заполнителя – песок керамзитовый фракции 0–4 мм ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». Вязущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки 500. Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса LC 8/10: Ц: П: Г = 1:0,52:1,05

при водоцементном отношении $V/C=0,63$. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 950 кг/м^3 .

1.2 Получение керамзитобетона LC10/12

Для изготовления легкого бетона класса LC10/12 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 500.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса CL 10/12: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении $V/C=0,51$. Осадка конуса после затворения смеси – 5 см. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1390 кг/м^3 .

1.3 Получение керамзитобетона LC12/15

В качестве крупного заполнителя для бетона класса LC12/15 использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа 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 LC16/18: Ц:П:Г=1:1,72:0,83 при водоцементном отношении $V/C=0,49$. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1490 кг/м^3 .

1.4 Получение керамзитобетона LC16/18

В качестве крупного заполнителя для бетона класса LC16/18 использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20 мм в равном весовом соотношении.

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 LC16/18: Ц:П:Г=1:1,84:0,78 при водоцементном отношении $V/C=0,46$. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1545 кг/м^3 .

1.5 Получение керамзитобетона LC25/28

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса СL 25/28: Ц:Щ:П = 1:1,89:0,74 при водоцементном отношении В/Ц=0,42. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1760 кг/м³.

Для изготовления легкого бетона класса LC25/28 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракцией 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 СL 25/28: Ц:П:Щ= 1:0,74:1,89 при водоцементном отношении В/Ц = 0,52. Плотность бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1780 кг/м³.

1.6 Получение керамзитобетона LC30/33

Для изготовления легкого бетона класса LC30/33 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракцией 5–10 мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК» с относительной прочностью в цилиндре 10,26 МПа. Мелким заполнителем служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр} = 1,8$.

Состав керамзитобетонной смеси для бетона класса СL 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.

Составы бетонных смесей подбирались в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов», подготовленных РУП «Институт БелНИИС» [4].

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ

Экспериментальные исследования проводились на стандартных образцах: кубах с размером ребра 100 и 150 мм, цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 300 мм; призмах размерами

150x150x600 мм и 100x100x400 мм. Изготовление образцов осуществлялось в сборно-разборных инвентарных металлических формах. Для каждой серии было изготовлено и испытано: 12 кубов с размером ребра 150 мм; 10 кубов с размером ребра 100 мм; 12 цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм; 12 призм размерами 150×150×600 мм; 10 призм размерами 100x100x400 мм. Испытание проводилось в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток для образцов класса LC8/10–LC25/28. Для образцов бетона серии LC30/33 испытания проводились в возрасте 14, 21, 28 и 60 суток. Испытание призм, кубов и цилиндров проводилось в полном соответствии с требованиями [2, 3]. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм на базе 370–375 мм, установленными вдоль оси по четырем сторонам образцов. 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 испытании цилиндрических образцов продольные и поперечные (радиальные) деформации замерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм. Их размещение на поверхности цилиндра было в строгом соответствии с патентом измерения деформаций в бетонных цилиндрах [5]. При отдельных отчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных данных исключались.

Опытные данные позволили описать кинетику роста исследуемых классов керамзитобетона во времени гиперболической зависимостью:

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

где t – возраст керамзитобетона в сутках;

f_{lc}^t – прочность керамзитобетона в возрасте t суток;

f_{lc}^{28} – прочность керамзитобетона в возрасте 28 суток.

Анализ исследований показал, что обеспеченность точности формулы (1) при отклонении теории от эксперимента в 15% составляет 98%. Коэффициент призмной прочности испытанных

серий образцов в возрасте 28 суток составил 0,81; для бетонов класса LC8/10–LC12/15 коэффициент цилиндрической прочности – 0,80; для бетонов класса LC16/18–LC30/33 – 0,90.

3. ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

Прочность керамзитобетона на растяжение определялась по методике [6], предложенной проф. Н. И. Ахвердовым. При этом отмечается, что прочность при растяжении примерно в 10–12 раз меньше, чем при осевом сжатии. Мешкауска Ю. Н. для бетона на кварцевом песке предлагает использовать формулу:

$$f_{lctm} = \frac{f_{lck,cube}}{0,2f_{lck,cube} + 7,9}, \quad (2)$$

где $f_{lck,cube}$ – гарантированная прочность керамзитобетона.

ТКП EN1992–1–1–2009 [1] рекомендует предел прочности легкого бетона при растяжении определять умножением предела прочности тяжелого бетона на коэффициент:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \frac{\rho}{2200}, \quad (3)$$

где ρ – предельное значение плотности легкого бетона соответствующего класса.

На основе анализа опытных данных авторами предложена зависимость, учитывающая плотность керамзитобетона ρ и его гарантированную прочность $f_{lck,cube}$.

$$f_{lctm} = 0,3 \cdot \frac{\rho}{2200} \cdot \sqrt[3]{f_{lc,cube}^2}. \quad (4)$$

Для бетонов класса LC10/12–LC30/33 среднее отклонение между ТКП EN1992 и формулой (4) не превышает 4% (3,96), а отклонение показателей по формуле (2) составляет 10% по абсолютной величине.

Данные прочности бетона при растяжении по ТКП EN1992-1-1-2009 и формулой (2) представлены в таблице 1.

Прочность керамзитобетона при растяжении в МПа

	LC8/10	LC10/12	LC12/15	LC16/18	LC25/28	LC30/33
по ТКП EN1992-1-1-2009	0,792	1,090	1,270	1,440	2,280	2,570
$f_{lcm} = 0,3 \cdot \frac{P}{2200} \cdot \sqrt[3]{f_{l.cube}^2}$	0,601	0,994	1,203	1,447	2,200	2,500
% расхождения	24,1	8,8	5,3	-0,5	3,5	2,7

Прочность керамзитобетона на сжатие исследовалась в возрасте 7, 14, 21, 28, 60 суток. Наилучшую сходимости с экспериментом в возрасте 28 суток дает формула, предложенная проф. Пирадовым А. В. в зависимости от четырех переменных бетонной смеси. Эта зависимость выражается уравнением регрессии.

$$f_{l.cube} = 10,38 \frac{C}{B} + 0,0441 \cdot t + 0,215R_u + 1,19R_3 - 27,95, \quad (5)$$

где $\frac{C}{B}$ – цементно-водное отношение;

t – расход цементного теста;

R_u – активность цемента;

R_3 – прочность крупного заполнителя по испытанию в стандартном цилиндре.

Мешкаускас Ю.Н. аналогичную формулу получил для конструкционного керамзитобетона:

$$f_{l.cube} = 0,051m_2 - 20,67 \frac{B}{C} + 0,651R_3 - 19,32 \quad (6)$$

где m_2 – масса керамзита в 1 м³ бетона.

Деформативные свойства керамзитобетона можно охарактеризовать модулем упругости, коэффициентом упругости, предельной сжимаемости и растяжимостью. В нормативной литературе за начальный модуль упругости принимается модуль упруго-пластичности бетона (секущий модуль) при $\sigma = 0,4f_{ck}$. Связь между секущим модулем продольных деформаций и уровнем напряжений при кратковременном центральном сжатии призм до разрушения

с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (7), а зависимость «уровень напряжений–деформация» зависимостью (8) гиперболического вида [7].

$$E'_{lcl(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{lcl(\sigma)}} = E'_{lcl(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{lcl(\sigma)} \cdot \eta], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{lcl(\sigma)} = \frac{\sigma}{E'_{lcl(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E'_{lcl(\sigma)} \cdot \left[1 - \lambda_{lcl(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}} \right]}, \quad (8)$$

где η – уровень напряжений;

$E'_{lcl(\sigma=0)}$ – мгновенный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$);

$\lambda_{lcl(\sigma)}$ – предельное значение коэффициента пластичности бетона $\sigma = f_{lck}$.

Как показали исследования, «секущие модули деформаций–напряжения или уровень напряжений» имеют место и для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{lcd(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{lcd(\sigma)}} = E_{lcd(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{lcl(\sigma)} \cdot \eta], \quad (9)$$

$$\varepsilon_{lcd(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{lcd(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{lcd(\sigma=0)} \cdot \left[1 - \lambda_{lcd(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}} \right]}, \quad (10)$$

$$G_{l(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2 \cdot [\varepsilon_{lcl(\sigma)} + \varepsilon_{lcd(\sigma)}]} = G_{l(\sigma=0)} \cdot \left[1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \frac{\sigma}{f_{lck}} \right], \quad (11)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_{l(\sigma)}} = \frac{\sigma}{G_{l(\sigma=0)} \cdot [1 - \lambda_{G(\sigma)} \cdot \eta]}. \quad (12)$$

В формулах (10) и (12)

$$\lambda_{lcl(\sigma)} = 1 - \frac{E'_{lcl(\sigma)}}{E'_{lcl(\sigma=0)}}, \quad \lambda_{G(\sigma)} = 1 - \frac{G_{l(\sigma)}}{G_{l(\sigma=0)}}. \quad (13)$$

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

$$E'_{lcl(\sigma)} = E'_{lcl(\sigma)} \cdot \nu = \frac{(E'_{lcl(\sigma)})^2}{E'_{lcl(\sigma=0)}}, \quad (14)$$

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

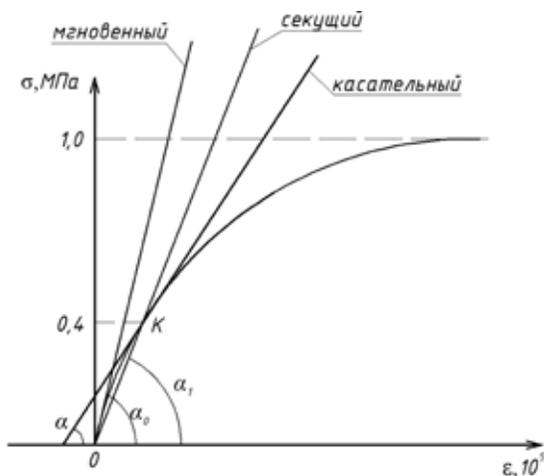


Рисунок 1. Модули упругости бетона
 $\text{tg}\alpha_0$ – мгновенный (динамический модуль);
 $\text{tg}\alpha$ – касательный модуль;
 $\text{tg}\alpha_1$ – секущий модуль

В соответствии с ТКП EN1992-1-1-2009 [1], значения секущего модуля $E'_{lcl(\sigma)}$ для легкого бетона могут быть получены умножением соответствующих значений для тяжелого бетона с обычной плотностью на коэффициент $\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$; ρ – плотность легкого бетона.

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (7), (9), (11) были установлены статистическим методом линейной корреляции [8] при обработке экспериментальных данных. Коэффициент корреляции во всех случаях был близок по абсолютной величине к 1, а его достоверность была доказана.

Для наглядности в таблице 2 и 3 представлены характеристики керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для классов LC16/18 и LC30/33. На рисунках 2 и 3 показаны опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из керамзитобетона класса LC16/18 и LC30/33 в возрасте 28 суток.

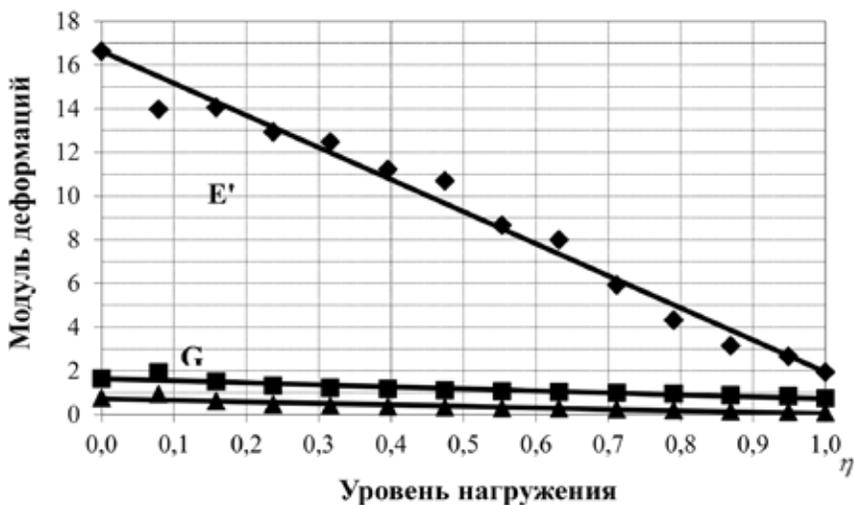


Рисунок 2. Опытные и теоретические зависимости «модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 28 суток из бетона класса LC16/18

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

Класс бетона	Возраст, сут.	$f_{с, кубов}$ МПа	$f_{дв}$ МПа	$f^v_{срc}$		$f^0_{срc}$		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m_1
				η	МПа	η	МПа				
16/18	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E'_{д(с)-\eta}$	$1,795(1-0,302\eta) \cdot 10^4$	-0,988	147,5
								$E_{д(с)-\eta}$	$17,580(1-0,957\eta) \cdot 10^4$	-0,792	7,36
								$G_c-\eta$	$0,808(1-0,446\eta) \cdot 10^4$	-0,976	70,18
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E'_{д(с)-\eta}$	$1,795(1-0,302\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,988	147,5
								$E'_{д(с)-\eta}$	$2,4884(1-0,514\eta) \cdot 10^4$	-0,952	42,16
								$E_{д(с)-\eta}$	$14,474(1-0,705\eta) \cdot 10^4$	-0,948	37,71
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$G_c-\eta$	$1,066(1-0,558\eta) \cdot 10^4$	-0,960	50,77
								$E_{д(с)-\eta}$	$2,488(1-0,514\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,952	42,16
								$E'_{д(с)-\eta}$	$1,687(1-0,227\eta) \cdot 10^4$	-0,940	43,77
	60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E'_{д(с)-\eta}$	$16,224(1-0,811\eta) \cdot 10^4$	-0,936	60,2
								$G_c-\eta$	$0,843(1-0,421\eta) \cdot 10^4$	-0,987	162,3
								$E_{д(с)-\eta}$	$1,687(1-0,227\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,940	43,77
							$E'_{д(с)-\eta}$	$1,749(1-0,246\eta) \cdot 10^4$	-0,946	39,11	
							$E_{д(с)-\eta}$	$13,264(1-0,72\eta) \cdot 10^4$	-0,848	13,15	
							$G_c-\eta$	$1,205(1-0,386\eta) \cdot 10^4$	-0,975	84,26	
							$E_{д(с)-\eta}$	$1,749(1-0,246\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,946	39,11	

Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса LC30/33

Класс бетона	Возраст, сут.	$f_{c, куб}$, МПа	$f_{сж}$, МПа	$f^v_{сж}$		$f^0_{сж}$		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m
				η	МПа	η	МПа				
30/33	14	24,60	21,37	0,874	18,677	0,648	13,47	$E'_{d(e)}-\eta$	$4,137(1-0,754\eta) \cdot 10^4$	-0,894	13,36
								$E_{d(e)}-\eta$	$43,43(1-0,936\eta) \cdot 10^4$	-0,937	23,16
								$G_c-\eta$	$1,893(1-0,979\eta) \cdot 10^4$	-0,941	24,74
	21	30,86	27,24	0,849	23,11	0,633	17,23	$E_{d(e)}-\eta$	$4,137(1-0,754\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,894	13,36
								$E'_{d(e)}-\eta$	$2,473(1-0,558\eta) \cdot 10^4$	-0,997	508,6
								$E_{d(e)}-\eta$	$45,5(1-\eta) \cdot 10^4$	-0,950	30,91
	28	33,63	28,99	0,903	26,178	0,645	18,699	$G_c-\eta$	$1,205(1-0,661\eta) \cdot 10^4$	-0,997	576,8
								$E_{d(e)}-\eta$	$2,473(1-0,558\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,997	508,6
								$E'_{d(e)}-\eta$	$5,495(1-0,791\eta) \cdot 10^4$	-0,979	72,1
	60	34,07	29,86	0,795	23,739	0,642	19,17	$E_{d(e)}-\eta$	$91,062(1-998\eta) \cdot 10^4$	-0,985	99,7
								$G_c-\eta$	$2,609(1-0,822\eta) \cdot 10^4$	-0,985	97,16
								$E_{d(e)}-\eta$	$5,495(1-0,791\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,979	72,1
							$E'_{d(e)}-\eta$	$5,095(1-0,694\eta) \cdot 10^4$	-0,931	21,07	
							$E_{d(e)}-\eta$	$54,83(1-0,889\eta) \cdot 10^4$	-0,896	13,68	
							$G_c-\eta$	$12,348(1-0,696\eta) \cdot 10^4$	-0,935	23,3	
							$E_{d(e)}-\eta$	$5,095(1-0,694\eta)^2 \cdot 10^4$	-0,931	21,01	

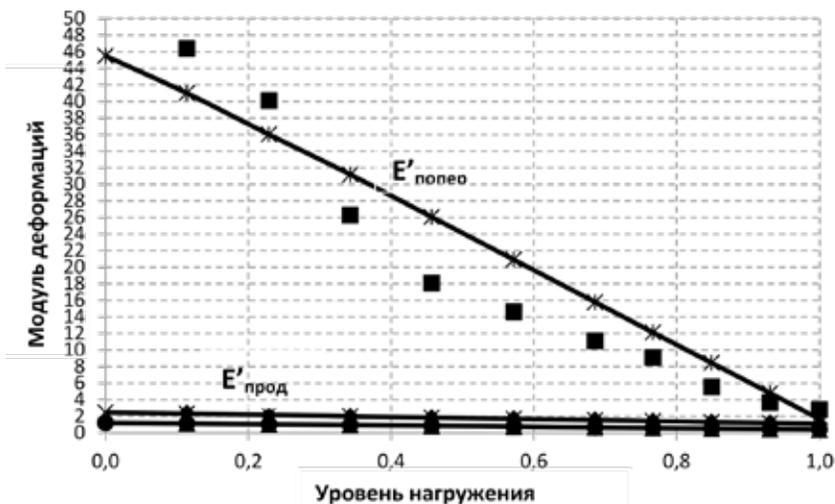


Рисунок 3. Опытные и теоретические зависимости «модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 21 суток из бетона класса LC30/33

Для назначения на конструкцию эксплуатационных нагрузок необходимо знать пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования бетона. Верхний предел микротрещинообразования находился графическим методом по усредненным экспериментальным данным двух призм путем построения зависимости «уровень нагружения – объемная относительная деформация». Объемная деформация вычислялась по формуле:

$$\varepsilon^v = \varepsilon_{lcl(\sigma)} - 2 \cdot \varepsilon_{lcl(\sigma)}. \quad (15)$$

По пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v - \eta$ находили верхний предел микротрещинообразования f_{cr}^v керамзитобетона (см. рис. 4 и рис. 5).

Нижний предел микротрещинообразования f_{cr}^0 также находился экспериментальным путем. При этом была построена зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» (см. рис. 6 и рис. 7). Взяв первую и вторую производную от коэффициента Пуассона графическим путем, нашли предел нижнего микротрещинообразования.

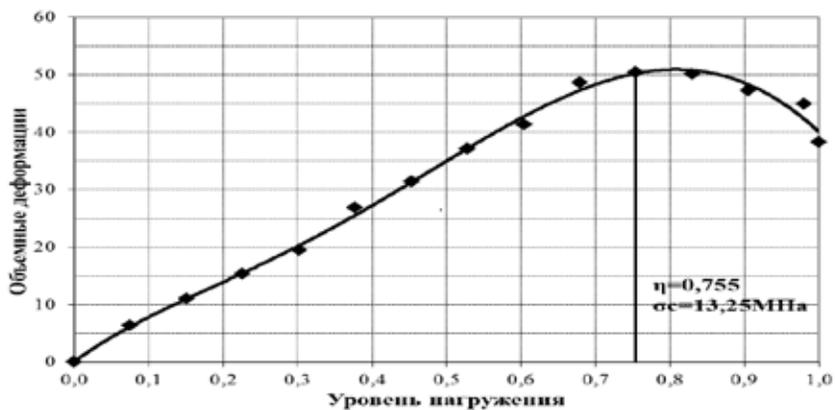


Рисунок 4. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – объемные деформации» для образцов из бетона класса 16/18 в возрасте 28 суток

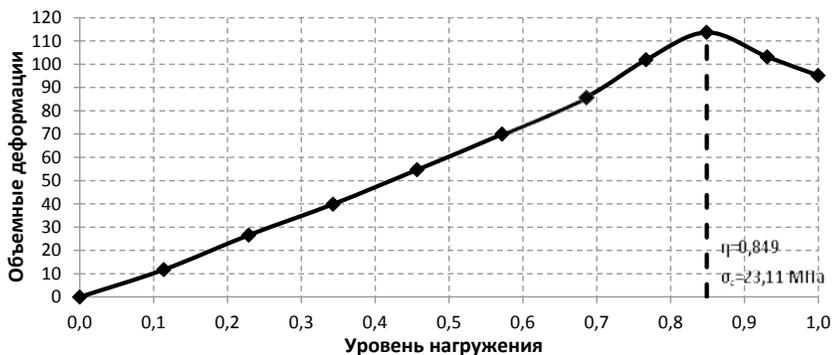


Рисунок 5. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – объемные деформации» для образцов из бетона класса LC30/33 в возрасте 21 суток

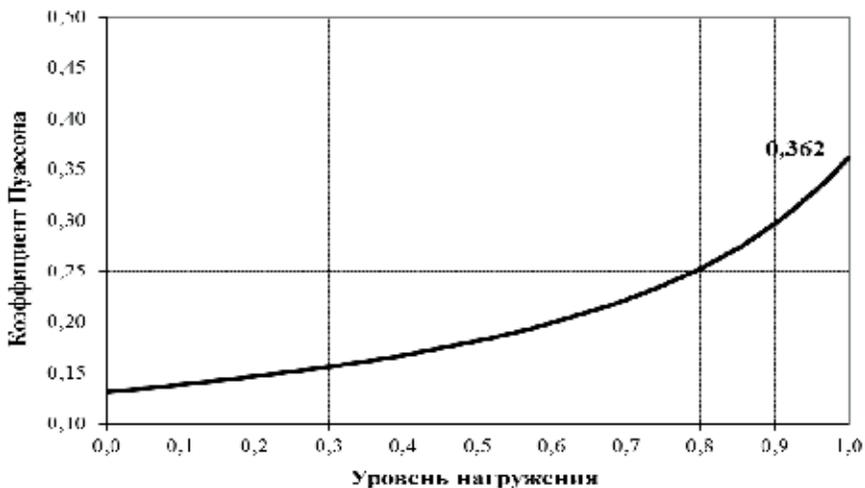


Рисунок 6. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса LC16/18 в возрасте 28 суток



Рисунок 7. Корреляционная зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса LC30/33 в возрасте 21 суток

Характеристики прочности и деформаций испытанных классов керамзитобетона приведены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики прочности и деформативности керамзитобетона проведенных испытаний (возраст 28 суток)

Классы прочности керамзитобетона						
$f_{тек}, МПа$	8/8,36	10/9,89	12	16/16,7	25	30/28,99
$f_{тек, кубе}, МПа$	10/9,86	12/11,96	15	18/19,08	28	33/33,63
$f_{lcm}, МПа$	14	16	19	23	33	38
$f_{lcm}, МПа$	0,8	1,1	1,3	1,5	1,61	1,82
$f_{тек0,05}, МПа$	1,04	1,43	1,69	1,95	2,99	3,38
$E'_{lcl, m}, ГПа$	9,1	10,4	14,5	15,4	23,9	30,5
$E'_{lcl, d}, ГПа$	54	60,2	83,3	109,6	120,7	157,0
$G_{lcm}, ГПа$	3,8	4,4	6,3	7,1	10,4	13,5
$E_{lcm}, ГПа$	6,3	8,6	11,4	13,9	19,0	22,5
V при $\eta=0,4/0,8$	0,169/0,275	0,173/0,288	0,174/0,267	0,141/0,242	0,198/0,256	0,194/0,270
$f_{cre}^0, МПа/\eta$	4,33/0,518	4,72/0,477	6,18/0,505	8,18/0,505	15,53/0,691	17,50/0,604
$f_{cre}^v, МПа/\eta$	6,43/0,769	7,70/0,779	9,40/0,783	12,58/0,776	19,71/0,788	23,18/0,800
ν при $\eta=0,4/0,8$	0,686/0,372	0,830/0,66	0,713/0,428	0,910/0,818	0,740/0,530	0,682/0,367
$\epsilon_{lcl}, \%$	1,60	1,65	1,70	1,85	2,10	2,20
$\epsilon_{lcl1}, \%$	1,60	2,65	1,70	1,85	2,10	2,20
$\epsilon_{lcl2}, \%$	2,0					
$\epsilon_{lcl3}, \%$	2,31	2,73	2,78	2,88	3,07	3,10
n	2,0					
$\epsilon_{lcl3}, \%$	1,75					
$\epsilon_{lcl3}, \%$	2,31	2,73	2,78	2,88	3,07	3,10

где $E'_{lcl, m}$ – секущий модуль продольных деформаций; $E_{lcl, m}$ – касательный модуль деформаций; $E_{lcl, d}$ – модуль поперечных деформаций; G_{lcm} – модуль сдвига; V – коэффициент Пуассона; f_{cre}^0 – предел нижнего микротрещинообразования; f_{cre}^v – предел верхнего микротрещинообразования; ν – коэффициент упругости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ опытных данных испытанных шести серий керамзитобетона позволил описать кинетику роста керамзитобетона во

времени гиперболической зависимостью, реально отвечающей эксперименту. Коэффициент призмной прочности в среднем можно принять равным 0,8. Коэффициент цилиндрической прочности для керамзитобетонных классов LC8/10–LC12/15–0,8; а для классов керамзитобетона LC16/18–LC30/33–0,9. Методом линейного корреляционного анализа вычислены модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций; представлена их аналитическая зависимость от прочности бетона и его уровня загрузки. Представлен касательный модуль продольных деформаций в зависимости от секущего модуля керамзитобетона. Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы бетонных и армированных керамзитобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТКП EN 1992 -1-1-2009 Еврокод 2 Проектирование железобетонных конструкций Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Министерство архитектуры и строительства. – Минск, 2010.
2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – Госкомитет СССР по делам строительства. – М., 1981. – 20 с.
3. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Министерство архитектуры и строительства. – Минск, 2012. – 40 с.
4. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонных/ РУП «Институт БелНИИС» – Минск, 2013. – 38 с.
5. Патент на полезную модель при измерении деформаций в бетонных цилиндрах
6. Методика проведения испытания кубов на раскалывание для определения прочности керамзитобетона на растяжение.

7. Семенюк, С. Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно-деформированном основании: монография / С. Д. Семенюк. – Могилев: Белорус.-Рос. ун., 2003. – 269 с.
8. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман – М.: Высш. школа, 1977.– 479 с.

REFERENCES

1. ТКР EN 1992 -1-1-2009 Evrokod 2 *Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij Chast' 1-1. Obshhie pravila i pravila dlja zdanij* [Design of reinforced concrete structures Part 1-1. General rules and rules for buildings]. Minsk, 2010. (rus)
2. GOST 24452-80. *Betony. Metody opredelenija prizmennoj prochnosti, modulja uprugosti i kojefficienta Puassona* [Concretes. Methods for determining the prismatic strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio]. Moscow, 1981. 20 p. (rus)
3. GOST 10180-2012 *Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam* [Concrete. Methods for determining the strength of control samples]. Minsk, 2012 40 p. (rus)
4. *Rekomendacii po podboru sostavov, izgotovleniju i primeneniju modifizirovannyh himicheskimi i mineral'nymi dobavkami konstrukcionno-teploizoljacionnogo i konstrukcionnogo keramzitobetona* [Recommendations for the selection of the composition, manufacture and use of modified chemical and mineral additives of structural and thermal insulation and structural claydite-concrete]/ RUP «Institut BelNIIS». Minsk, 2013. 38 p. (rus)
5. Semenjuk Ya. D., Ketner E. A. *Patent na poleznuju model' pri izmerenii deformacij v betonnyh cilindrah* [Patent for a utility model for measuring deformations in concrete cylinders]. (rus)
6. *Metodika provedenija ispytaniya kubov na raskalyvanie dlja opredelenija prochnosti keramzitobetona na rastjazhenie* [Method of testing cubes for splitting to determine the strength of claydite-concrete for tension] (rus)
7. Semenjuk S. D. *Zhelezobetonnye prostranstvennye fundamenty zhilyh i grazhdanskih zdanij na neravnomerno-deformirovannom*

osnovanii: monografija [Reinforced concrete spatial foundations of residential and civil buildings on a nonuniformly deformed base: the monograph]. Mogilev: Belorus.-Ros. un., 2003. 269 s. (rus)

8. Gmurman V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow: Vyssh. shkola, 1977. 479 p. (rus)

Статья поступила в редколлегию 06.12.2017.