

УДК 691.327:666.973.6:69.001.5

**МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО  
КЕРАМЗИТОБЕТОНУ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНОМУ  
В'ЯЖУЧЕМУ**

**МОДУЛЬ УПРУГОСТІ КОНСТРУКЦИОННО –  
ТЕПЛОІЗОЛЯЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА  
МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ**

**MODULES OF ELASTICITY OF HEAT-INSULATION OF  
LIGHTWEIGHT CONCRETE ON MULTICOMPONENT ASTRINGENT**

**Кравченко С.А., к.т.н., Постернак О.О., к.т.н., доцент, Костюк А.І., к.т.н.,  
доцент, Столевич І.А., к.т.н., доцент (Одеська державна академія  
будівництва та архітектури, г. Одеса)**

**Кравченко С.А., к.т.н., Постернак А.А., к.т.н., доцент, Костюк А.И.,  
к.т.н., доцент, Столевич И.А., к.т.н., доцент (Одесская государственная  
академия строительства и архитектуры, г. Одесса)**

**Kravchenko S.A., candidate of technical sciences, Posternak A.A., candidate  
of technical sciences, docent, Kostyuk A.I., candidate of technical sciences,  
docent, Stolevic I.A., candidate of technical sciences, docent (Odessa state  
academy of civil engineering and architecture)**

**Наведені дані про змінення у часі модуля пружності конструкційно-  
теплоізоляційного керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучему.**

**Приведены данные о изменении во времени модуля упругости  
конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона на  
многокомпонентном вяжущем.**

**The data about change in time of elasticity module of construction-heat-  
insulating light weight concrete on multicomponent astringent are resulted.**

**Ключові слова:**

Модуль пружності, керамзитобетон, багатокомпонентне в'язуче.

Модуль упругости, керамзитобетон, многокомпонентное вяжущее.

Modules of elasticity, light weight concrete, multicomponent astringent.

**Введение.** В последние годы внимание сосредоточено на разработке и применении конструкций с использованием новых материалов и

компонентов, обладающих улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами. При рациональном проектировании конструктивных систем, зданий следует учитывать, что собственная масса несущих конструкций из лёгких бетонов благодаря их низкой плотности до 1,5 раз меньше, чем аналогичных конструкций из тяжёлых бетонов.

Лёгкий бетон на пористых заполнителях представляет собой универсальный строительный материал, позволяющий при его рациональном использовании решать многие актуальные задачи современного строительства и одновременно решать экологические, ресурсосберегающие и экономические проблемы за счёт технологических и техногенных отходов при применении и изготовлении местных пористых заполнителей и многокомпонентных вяжущих.

**Постановка проблемы.** Проведенные в последние годы исследования модуля упругости керамзитобетона [1,2] показывают, что изменению во времени этого свойства присущи некоторые важные особенности. Учитывая большую неоднородность физико-технических характеристик керамзитов, выпускаемых различными заводами, объём имеющихся сведений пока нельзя считать достаточным для надёжной оценки величины модуля упругости керамзитобетона в том или ином возрасте. Необходимость дальнейшего накопления опытных данных связана с определением меры ползучести и расчётом железобетонных элементов с учётом длительного действия нагрузки.

**Анализ последних достижений.** Прочность бетона, как композиционного материала, может достигать прочности матрицы (цементного раствора) в том случае, если прочность и жёсткость заполнителя не ниже прочности матрицы. В лёгких бетонах пористые заполнители, как правило уступают прочности и жёсткости матрицы. Поэтому приоритетность в обеспечении свойств бетона принадлежит прочности и деформативности пористого заполнителя. Для каждого вида пористого заполнителя существует свой предел прочности бетона.

Введение пористого заполнителя изменяет и деформативные свойства бетона. Пористая структура заполнителя обуславливает меньший модуль его упругости и большую деформативность, чем на плотном заполнителе.

Модуль упругости лёгкого бетона повышается с увеличением его прочности и средней плотности и зависит от прочности и модуля упругости крупного пористого заполнителя, его объёмной концентрации и модуля упругости растворной составляющей, вида песка, условий твердения и возраста бетона. При одинаковой прочности лёгкого бетона на плотных песках имеют модуль упругости больше на 20-30%, чем бетоны на пористых песках [3]. Модуль упругости пропаренного керамзитобетона меньше, чем нормального твердения в среднем на 10% [4].

Хотя модуль упругости в прямой степени зависит от прочности бетона, достигнуть одновременного и пропорционального повышения этих величин

не удаётся. В результате имеется серьёзное препятствие, если необходимо иметь лёгкий бетон не только высокой прочности, но и упругости [3]. Добиться повышения модуля упругости можно достижением более высокой прочности пористого заполнителя и применением цемента более высокой активности. Распространено мнение, что повышение объёма цементного теста в лёгких бетонах равносильно улучшению его конструктивных качеств. И.А. Ивановым отмечено [3], что такое положение в полной мере может быть обоснованным лишь в отношении прочности, в то время как упругие свойства изменяются проходя определённый экстремум, после которого излишек цементного теста только вредит упругим свойствам бетона.

Существенного влияния на модуль упругости можно достигнуть в результате варьированием крупного керамзита. Так например, с повышением крупности керамзитового гравия с 7,5 до 17,5 мм при прочих равных условиях наблюдалось снижение прочности и модуля упругости на 15% [3].

**Основная цель статьи** заключается в исследовании изменения величины модуля упругости керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем во времени в зависимости от параметров состава смеси и наличия термовлажностной обработки.

Методика исследования. Модуль упругости керамзитобетона определяли в соответствии с ГОСТ 24452-80. Для измерения деформаций использовали индикаторы часового типа (цена деления 0.001 мм) и тензодатчики с базой 50мм.

Материалы, использованные в исследованиях, имели следующие характеристики:

- керамзитовый гравий 5...10 мм, нефракционированный Кулиндоровского индустриального концерна “Инто-Строй”, марки по насыпной плотности М 600, условной прочностью в цилиндре, равной 2,8...3,0 МПа;
- песок кварцевый Кременчугского карьера;
- цемент М 400 Криворожского завода – ДСТУ Б В.2.7-112-2002;
- зола-унос Ладыжинской ТЭС – ГОСТ 25818-91;
- известь негашёная Кулиндоровского завода, содержание активной окиси кальция СаО-75%;
- гипс строительный – ДСТУ Б В.2.7-104-2000;
- суперпластификатор С-3–ТУ-2481-001-51831493-00.

Керамзитобетонную смесь укладывали в формы и уплотняли на вибростоле. После выдержки 2...4 ч. отформованные изделия с контрольными образцами (кубы, призмы) загружали в пропарочные камеры. Пропарку изделий производили при температуре 80°С. Из каждого состава керамзитобетона изготавливали по 6 кубов и 6 призм.

Анализ литературных источников в подобном ряду исследованиях, а также результаты проведенных предварительных опытов позволили выбрать следующие факторы и назначить уровни их варьирования:

- 1 - расход цементно-зольной смеси, соотношение 1:1, кг/м<sup>3</sup> –  $X_1(300\pm 100)$ ;

2 - расход извести, кг/м<sup>3</sup> –  $X_2(125 \pm 25)$ ;

3 - агрегатно-структурный фактор  $r$  –  $X_3(0,4 \pm 0,1)$ .

Обработка результатов эксперимента с целью выявления закономерностей влияния исследуемых факторов –  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  на модуль упругости керамзитобетона позволили получить с 95% надёжностью квадратичные уравнения регрессии.

**Результаты исследования.** По результатам экспериментальных исследований с 95% надёжностью получены квадратичные уравнения регрессии модуля упругости керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке в возрасте  $t = 1$  п.п., 28, 180 и 360 сутки. Уравнения по  $F$  – критерию Фишера адекватны ( $F_{ад} < F_{табл}$ ) и имеют информационную ценность ( $F_{инф} > F_{табл}$ ).

$$E_b(1. \text{ п. п.}) \times 10^{-3} = 8,1 + 1,42X_1 + 0,26X_2 - 1,1X_3 + 0,29X_1X_3 + 0,37X_1^2 - 0,15X_2^2 + 1,74X_3^2; \quad (1)$$

$$E_b(28) \times 10^{-3} = 8,84 + 1,6X_1 + 0,34X_2 - 1,3X_3 + 0,11X_1X_3 - 0,17X_2X_3 + 0,2X_1^2 - 0,19X_2^2 + 1,95X_3^2; \quad (2)$$

$$E_b(180) \times 10^{-3} = 9,82 + 1,7X_1 + 0,34X_2 - 1,45X_3 + 0,25X_1X_2 + 0,22X_1X_3 - 0,24X_2X_3 - 0,24X_2^2 + 2,2X_3^2; \quad (3)$$

$$E_b(360) \times 10^{-3} = 10,44 + 1,7X_1 + 0,26X_2 - 1,4X_3 + 0,21X_1X_2 + 0,35X_1X_3 - 0,26X_2X_3 + 2,3X_3^2. \quad (4)$$

Из этих уравнений видно, что наибольшее влияние оказывает расход вяжущего ( $X_1$  и  $X_2$ ) по сравнению с  $r$  ( $X_3$ ), хотя оба они в значительной степени влияют на указанную величину.

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии была использована зависимость для описания достаточно надёжной статической связи  $y = E_b(t)$  и  $x = (B/MKB) + r$  и был проведен математико-статистический анализ, в результате которого нулевая гипотеза о равенстве нулю коэффициента корреляции  $H_0: \rho_{xy} = 0$  отвергнута в пользу альтернативной  $H_0: \rho_{xy} \neq 0$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , что свидетельствует о наличии линейной связи между  $E_b(t)$  и  $(B/MKB) + r$  в каждом из принятых возрастов керамзитобетона.

В результате применения регрессионного анализа для каждого из принятых возрастов керамзитобетона получены линейные уравнения регрессии вида:

$$E_b(1. \text{ п. п.}) \times 10^{-3} = 19,6 - 11[(B/MKB) + r]; \quad (5)$$

$$E_b(28) \times 10^{-3} = 21,6 - 12,3[(B/MKB) + r]; \quad (6)$$

$$E_b(180) \times 10^{-3} = 23,9 - 13,7[(B/MKB) + r]; \quad (7)$$

$$E_b(360) \times 10^{-3} = 23,4 - 11,7[(B/MKB) + r]. \quad (8)$$

Статические расчёты показали, что характер влияния исследуемых факторов на модуль упругости не зависит статистически значимо от возраста керамзитобетона:  $F_{max}^{ад} < F_{max}^{табл}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Результаты статистических расчётов свидетельствуют о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий обобщённого фактора состава  $S_{x^2}$ , и модуля упругости  $S_{y^2}$  во всех возрастах керамзитобетона не отвергается. Однако гипотеза о незначимости различия между выборочными коэффициентами корреляции  $r_{xy}$  отвергнута:  $Z > Z_1 - \alpha/2$ . Следовательно, коэффициенты регрессии при обобщённом факторе состава  $(B/MKB) + r$  в линейных уравнениях  $E_b(1. п. п.) \dots E_b(360)$  не принадлежат единой генеральной совокупности. Из этого следует, что расход воды оказывает статистически значимое влияние на изменение модуля упругости во времени и этот факт необходимо учитывать при построении зависимостей для расчётов  $E_b(t)$ .

Основываясь на имеющихся рекомендациях, изменение модуля упругости во времени в наших исследованиях предложено описывать зависимостью вида:

$$E_b(t) = E_b(\infty)[1 - e^{-\alpha t}]. \quad (9)$$

Для каждого состава керамзитобетона, обусловленного уравнениями варьирования факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  по опытным значениям  $E_b(t)$  были получены предельные значения  $E_b(t)$ , МПа = 16100...8800 и коэффициент  $\alpha = 0,078 \dots 0,058$ .

В случае, если влиянием воды на изменение во времени характера модуля упругости не пренебрегать, то для определения значений параметров  $E_b(\infty)$  и  $\alpha$  можно использовать линейные выражения, имеющие вид:

$$E_b(\infty) = 16430 - 2984[(B/C) + r]; \quad (10)$$

$$\alpha = 0,089 - 0,028[(B/C) + r]. \quad (11)$$

Графическая интерпретация зависимости модуля упругости керамзитобетона от его возраста приведена на рис. 1.

Характерной особенностью графиков (рис. 1) является знакопеременный характер изменения модуля упругости во времени. По постоянству характера его изменения можно выделить две временных зоны:  $t = n.n. - 90$  суток рост  $t = 90 - 360$  суток некоторое снижение и стабильность.

Границы зон зависят от состава керамзитобетона: чем выше расход вяжущего и концентрация керамзитового гравия, тем раньше наступают изменения в характере  $E_b(t)$ . Однако как показано выше, эти факторы не оказывают статистически значимого влияния на характер изменения модуля упругости во времени. Причиной вызывающей такой характер изменения  $E_b(t)$  является продолжение гидратации компонентов вяжущего с увеличением возраста керамзитобетона.

Снижение  $E_b(t)$  может происходить по двум причинам:

- 1) с ростом прочности раствора увеличивается модуль упругости;
- 2) при увеличении растворной части бетона возрастает интенсивность предварительного обжаривания зёрен крупного заполнителя из-за усадки цементного камня, определяющее влияние на которую оказывает расход воды. Подтверждением тому является тот факт, что, как показали

статистические расчёты, приведённые выше, расход воды оказывает статистически значимое влияние на изменение модуля

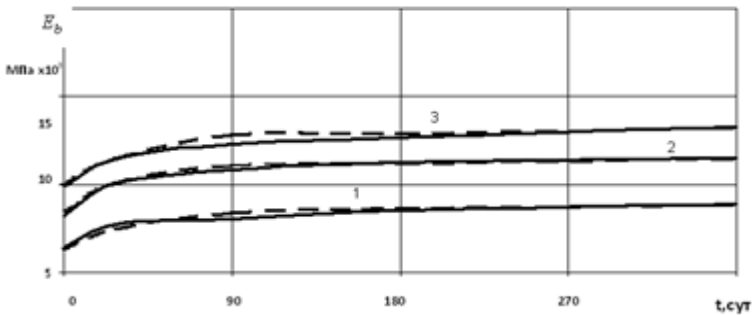
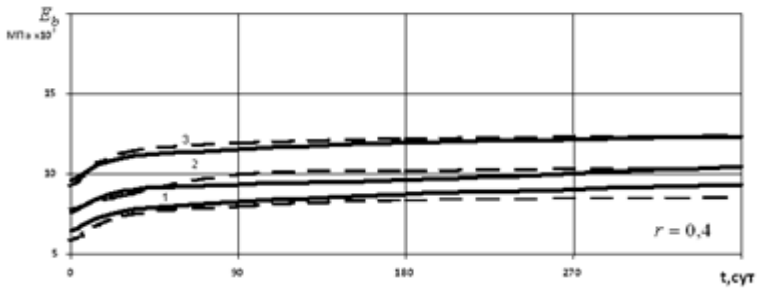
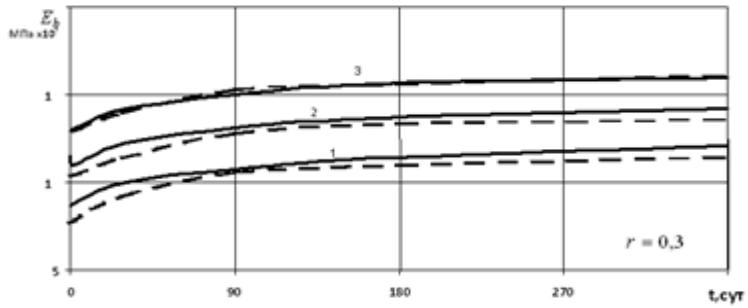


Рис. 1. Изменение во времени модуля упругости керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем при  $r = 0,3; 0,4$  и  $0,5$ .

1,2,3 – при расходе вяжущего 300; 425 и 550 кг/м<sup>3</sup>

————— опытные; - - - - - расчётные по зависимости (9).

упругости керамзитобетона во времени. Возрастание интенсивности предварительного обжаривания зёрен керамзита из-за усадки цементного камня

вызывает снижение его модуля упругости. А возникающая при этом концентрация напряжений приводит к снижению в пределах временных границ модуля упругости керамзитобетона  $E_b(t)$ .

**Выводы:**

1. Характер изменения с возрастом величины модуля упругости конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона тесно связан с составом смеси и меняется в зависимости от объёма растворной части бетона.
2. Значения модуля упругости керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем могут быть, с достаточной для практических целей точностью, вычислены по формулам (5 – 8).

1. Кудрявцев А.А. Модуль упругости и модуль деформаций конструктивного керамзитобетона. В сб.: Структура, прочность и деформация лёгкого бетона. М., Стройиздат, 1973. 2. Ямлеев У.А. О модуле упругости лёгких бетонов. В сб.: Всесоюзная конференция по лёгким бетонам. Минск, 1970. М., Стройиздат, 1970. 3. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. – 182с. 4. Мешкаускас Ю.И. Конструктивный керамзитобетон. – М.: Стройиздат, 1977. – 88с. 5. Рекомендации по производству и применению конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона на карбонатном песке: НИЛЭП ОИСИ. – М.: Стройиздат, 1988. – 64с. 6. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Изд-во стандарт, 1980.