

УДК 691.327:666.973.2

**ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ КЕРАМЗИТОПЕРЛИТОБЕТОНУ**

**ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМЗИТОПЕРЛИТОБЕТОНА**

**THE BASIC PROPERTIES OF LIGHT WEIGHT CONCRETE**

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

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

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

**Наведені данні експериментальних досліджень по підборі оптимальних складів, міцнісних і деформативних властивостей керамзитоперлітобетону на багатокомпонентному в'язучому та квацовому піску.**

**Приведены результаты экспериментальных исследований по подбору оптимальных составов, прочностных и деформативных свойств керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке.**

**Results of experimental researches on selection of optimum structures, durabilities and deformations properties light weight concrete on multicomponent knitting and quartz sand.**

**Ключові слова:**

Міцність, деформативність, конструкційно-теплоізоляційний, легкий бетон.  
Прочность, деформативность, конструкционно-теплоизоляционный, лёгкий бетон.

Durability, deformations, constructive insulating, light weight concrete.

**Введение.** Широкое применение перлитовый песок нашел в качестве мелкого заполнителя совместно с различными видами крупных пористых заполнителей — перлитовым щебнем, керамзитовым гравием,

аглопоритовым гравием и др. в конструктивно-теплоизоляционных бетонах для панелей наружных стен жилых и промышленных зданий.

Среди многочисленных отходов и побочных продуктов (отходы ГОК, металлургические шлаки и фосфорного производства, золы ТЭЦ и др.) наибольший интерес представляет использование зол ТЭЦ, обладающих сравнительно высокой гидравлической активностью. В настоящее время на Украине и зарубежной практике накоплен значительный опыт использования пылевидной золы-уноса при производстве бетонов и конструкций из них [1].

**Постановка проблемы.** Проблема использования легких бетонов является весьма актуальной задачей, поскольку предусматривает 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.

**Анализ последних достижений.** За последнее время накопилось много исследований прочности и деформаций легких бетонов и конструкций на их основе, приведены в работах М.А. Ахматова, Э.М. Бабича, В.Н. Вырового, Б.С. Комисаренко, Р.Л. Маиляна, Л.П. Ортглихера, Н.Я. Спивака, В.Г. Суханова, А.Б. Пирадова и др.

На современном уровне значительный вклад в развитие бетонов с использованием шлака и золы внесли Ш.Т. Бабаев, Е.В. Гончикова, С.А. Высоцкий, Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, А.Г. Зоткин, М.Ю. Лещинский, Н.Р. Рузиев, А.В. Каляскин, и др., но в основном ресурсосберегающие вопросы за счёт применения промышленных отходов при изготовлении пористых заполнителей и вяжущих рассматриваются для тяжелых бетонов.

**Основная цель статьи** заключается в исследовании прочностных и деформативных свойств керамзитоперлитобетона.

**Методика исследования.** 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;
- песок перлитовый ООО Перлит-Инвест – ГОСТ 10832-91;
- 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.

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<sub>1</sub>(300±100);
- 2 - расход извести, кг/м<sup>3</sup> – X<sub>2</sub>(125±25);
- 3 - агрегатно-структурный фактор γ – X<sub>3</sub>(0,4±0,1).

Обработка результатов эксперимента с целью выявления закономерностей влияния исследуемых факторов – X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> на плотность керамзитобетона ρ, кубиковую прочность R<sub>28</sub> позволили получить с 95% надёжностью квадратичные уравнения регрессии ρ, R<sub>28</sub>.

**Результаты исследования.** На основании полученных зависимостей, а также исходя из требований, предъявляемых к лёгким бетонам, производили назначение оптимальных составов керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке приведенные в табл.1.

Таблица 1

Проектная прочность, МПа	Агрегатно-структурный фактор, γ	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона							Вола, л.
		Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Известь, кг/м <sup>3</sup>	Зола, кг/м <sup>3</sup>	Керамзит, кг/м <sup>3</sup>	Песок перли	Песок кварцевый	С-3, %	
5,0	0,3	110	160	100	450	70	120	0,3	225
7,5	0,3	160	130	150	440	80	130	0,3	240
10,0	0,4	190	130	210	520	140	210	0,3	305
12,5	0,5	210	150	200	480	195	280	0,3	325

По результатам экспериментальных исследований прочности свойств керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем с 95% надёжностью получены квадратичные уравнения регрессии призмной прочности в возрасте t = 1 п.п., 28, 180 и 360 сутки. Уравнения по F – критерию Фишера адекватны ( F<sub>ад</sub> < F<sub>табл</sub>) и имеют информационную ценность (F<sub>инф</sub> > F<sub>табл</sub>).

$$f_{cd}(1. п. п.) = 5,11 + 3,7X_1 + 1,06X_2 - 0,71X_3 + 0,7X_1X_2 - 0,1X_2X_3 + 0,14X_1^2 + 0,54X_2^2$$

$$f_{cd}(28) = 5,87 + 4,27X_1 + 1,14X_2 - 0,93X_3 + 0,59X_1X_2 - 0,11X_1X_3 - 0,21X_2X_3 + 0,47X_1^2 + 0,42X_2^2$$

$$f_{cd}(180) = 7,47 + 4,52X_1 + 1,38X_2 - 0,79X_3 + 0,73X_1X_2 - 0,35X_2X_3 - 0,2X_1^2 + 0,8X_2^2 + 0,3X_3^2$$

$$f_{cd}(360) = 8,52 + 4,6X_1 + 1,38X_2 - 0,74X_3 + 0,59X_1X_2 + 0,21X_1X_3 - 0,54X_2X_3 - 0,3X_1^2 + 0,25X_2^2 + 0,5X_3^2$$

С увеличением возраста керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем (t > 28 сут.) характер влияния исследуемых факторов на

призмную прочность изменяется. Особенно ярко это выражено для бетона с большей концентрацией керамзитового гравия.

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии, была использована зависимость вида  $y = b_0 + b_1x$  при назначении аргумента “ $x$ ” исходили из необходимости учёта существенно влияющего на прочность, но не включенного в качестве фактора расхода воды. Окончательно аргументом назовем  $x = (B/MKB) + r$ , который можно принять в качестве обобщённого фактора состава. По результатам анализа установлено, что случайные величины  $x = (B/MKB) + r$  подчиняются закону нормального распределения. Нулевая гипотеза о равенстве нулю генерального 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  $f_{cd}(t)$  и  $(B/MKB) + r$  в каждом из принятых возрастов керамзитоперлитобетона. Это позволило, используя методику регрессионного анализа, для каждого из принятых возрастов керамзитоперлитобетона получить линейные уравнения регрессии вида:

$$\begin{aligned} f_{cd}(1. н. н.) &= 19,8 - 14,2[(B/MKB) + r]; \\ f_{cd}(28) &= 23,5 - 16,8[(B/MKB) + r]; \\ f_{cd}(180) &= 25,3 - 17,1[(B/MKB) + r]; \\ f_{cd}(360) &= 26,2 - 17,2[(B/MKB) + r]. \end{aligned}$$

В общем виде временная зависимость имеет структуру линейного уравнения:

$$f_{cd}(t, B/MKB, r) = k(t) - A(B/MKB + r).$$

Значение коэффициента  $A$  равно усреднённому по всем возрастам значению коэффициента регрессии при обобщённом факторе состава  $(B/MKB) + r$  в линейных уравнениях регрессии.

С учётом полученных коэффициентов временная зависимость прочности имеет вид:

$$f_{cd}(t, B/MKB, r) = (40,5 - 22,1e^{-0,00127t}) - 15,7(B/MKB + r).$$

Для установления коэффициента призмной прочности  $\varphi_b$  были использованы опытные значения контролируемых параметров  $f(28), f_{cd}(28)$ , что позволило методом наименьших квадратов получить зависимость вида:

$$\varphi_b = 0,95 - 0,001f.$$

Значения удельного расхода цемента и извести на единицу прочности  $((C + I)/f(28), \text{кг/МПа})$  в составах бетонов на многокомпонентном вяжущем ниже по сравнению с обычным керамзитобетоном на 18 – 27%.

Введение негашёной молотой извести и золы-уноса позволяет снизить в среднем расход цемента по сравнению с требованиями ДБН для лёгкого бетона на 23%.

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

$$E_{\text{сд}}(1. \text{ п. п.}) \times 10^{-3} = 5,82 + 1,63X_1 + 0,27X_2 - 1,38X_3 + 0,35X_1^2 - 0,34X_2^2 + 1,49X_3^2;$$

$$E_{\text{сд}}(28) \times 10^{-3} = 6,55 + 1,74X_1 + 0,33X_2 - 1,54X_3 - 0,15X_1X_2 + 0,17X_1^2 - 0,39X_2^2 + 1,69X_3^2;$$

$$E_{\text{сд}}(180) \times 10^{-3} = 7,33 + 1,86X_1 + 0,3X_2 - 1,66X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,18X_1X_3 + 0,11X_1^2 - 0,36X_2^2 + 1,99X_3^2;$$

$$E_{\text{сд}}(360) \times 10^{-3} = 7,92 + 1,88X_1 + 0,3X_2 - 1,61X_3 + 0,19X_1X_2 + 0,13X_1X_3 - 0,19X_2X_3 + 0,12X_1^2 - 0,55X_2^2 + 2,22X_3^2.$$

Из этих уравнений видно, что наибольшее влияние оказывает расход вяжущего ( $X_1$  и  $X_2$ ) по сравнению с  $X_3$ , 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:

$$E_{\text{сд}}(1. \text{ п. п.}) \times 10^{-3} = 19,4 - 12,5[(B/MKB) + r];$$

$$E_{\text{сд}}(28) \times 10^{-3} = 21,1 - 13,4[(B/MKB) + r];$$

$$E_{\text{сд}}(180) \times 10^{-3} = 23,2 - 14,5[(B/MKB) + r];$$

$$E_{cd}(360) \times 10^{-3} = 23,7 - 14,3[(B/MKB) + r].$$

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

Результаты статистических расчётов свидетельствуют о том, что нулевая гипотеза о равенстве дисперсий обобщённого фактора состава  $S_{x2}$ , и модуля упругости  $S_{y2}$  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  $E_c(1.п.п.) \dots E_c(360)$  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  $E_c(t)$ .

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

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

Для каждого состава керамзитобетона, обусловленного уравнениями варьирования факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  по опытными значениям  $E_b(t)$  были получены предельные значения  $E_b(t)$ , МПа = 13400...7100 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  $E_c(\infty)$  и  $\alpha$  можно использовать линейные выражения, имеющие вид:

$$E_c(\infty) = 14330 - 2781[(B/C) + r];$$

$$\alpha = 0,086 - 0,027[(B/C) + r].$$

Эти выражения с несколько меньшей точностью по сравнению с квадратичными уравнениями описывают параметры  $E_c(\infty)$  и  $\alpha$ , но удобны для практических расчетов.

Коэффициент Пуассона для керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем составил от 0,17 до 0,29.

Анализ результатов также показывает, что наблюдается тесная корреляция между величиной прочности на растяжение  $f_{ctd}$  и критическим коэффициентом интенсивности напряжений  $k_{1c}$ .

Для определения критического коэффициента интенсивности напряжений  $k_{1c}$  керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом

песке была получена зависимость:

$$K_{1c} = \alpha f_{ctd}.$$

где:  $\alpha = 0,255 \text{ м}^{1/2}$  - величина характеризующая угол наклона аппроксимирующей прямой.

#### **Выводы:**

1. Проведенные исследования показывают, что применение извести и активных минеральных добавок, а в частности золы-уноса позволяют снизить расход цемента.

2. Рецептурно-технологические факторы оказывают существенное влияние на формирование основных свойств керамзитоперлитобетона. Учёт влияния указанных факторов с достаточной для практики точностью рекомендуется осуществлять, используя квадратические уравнения регрессии и линейные уравнения.

3. Значения призмной прочности  $f_{ctd}$  и модуля упругости  $E_c$  отличаются от рекомендуемых ДБН. Поэтому величины  $f_{ctd}$  и  $E_c$  рекомендуется определять по полученным выражениям.

4. Для определения критического коэффициента интенсивности напряжения керамзитоперлитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке можно использовать полученную зависимость.

1. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. - Киев: "Вища школа", 1988. - 207с.
2. Высоцкий С.А., Смирнов В.П. Экономия портландцемента при изготовлении бетонов с добавкой золы ТЭС. // Бетон и железобетон. - 1987. - №1. 2. Опекунов В.В. Конструкционно-теплоизоляционные бетоны / В.В. Опекунов. - К.: Академ-периодика, 2002. - 270 с.
3. Кравченко С.А. Исследование конструкций из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем / С.А. Кравченко, А.А. Постернак, И.А. Столевич, А.И. Костюк // Науково-технічний збірник "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди". - Рівне, 2011. - вип.22. - С. 393 - 399.
4. Рекомендации по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке / НИЛЭП ОИСИ. - М.: Стройиздат, 1989. - 67с.