

## ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СОСТАВА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ

Дорофеев В.С., Столевич И.А., Зинченко С.В., Кравченко С.А., Столевич А.С. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**Наводяться короткі відомості про результати комплексного підходу до оцінки оптимальних складів керамзитобетону на багатокомпонентному цементно-вапно-зольному в'язучому, його густина, міцнісні та деформативні властивості.**

Широкое применение лёгких бетонов для изготовления конструкций различного назначения определяется комплексом всесторонних научных исследований их и расширяющейся практикой строительства.

В ряде случаев основные технико-экономические преимущества лёгких бетонов на местных заполнителях настолько существенны, что их применение становится более целесообразным по сравнению с обычным тяжёлым бетоном и определяется только рассмотрением конкретных технологических вопросов.

Применение, в разных областях строительства, лёгких бетонов на пористых заполнителях вызывает большой интерес во многих странах. Вопросы совершенствования структуры и свойств лёгких бетонов, а также их особенности и преимущества на смешанных заполнителях и композиционных вяжущих нашли отражение во многих отечественных и зарубежных исследованиях. Наиболее общие правила конструирования лёгкого бетона как композиционного материала – это обоснованный выбор вяжущего с учётом предъявляемых требований к изделию, конструкции и сооружению, а также рациональный подбор отдельных составных компонентов с учётом минимальной их стоимости. Увеличить объём изготавливаемого бетона можно путём применения многокомпонентного вяжущего в состав, которого кроме уменьшенного количества портландцемента, входят негашеная известь, зола-унос ТЭЦ и химические добавки [1,5].

В настоящее время на Украине и в зарубежной практике накоплен значительный опыт использования пылевидных зол-уноса при производстве бетонов и конструкций из них. Введение в цементные системы золы, извести и химдобавок изменяют состав жидкой фазы, вызывают ее пересыщение относительно гидратных фаз, а от изменения этих параметров зависит кинетика образования и состав гидратных образований, размеры кристаллов, прочность их контакта срастания, что всё вместе определяет прочность затвердевшего цементно-компонентного вяжущего камня [2, 6].

С целью получить адекватные результаты при возможно минимальном количестве опытов, для изучения свойств керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем были использованы методы математического планирования эксперимента [3, 4]. В частности, был реализован пятифакторный план  $B_5$ . В такой матрице каждый из технологических факторов изменялся на трёх уровнях (-1; 0; +1), что позволило получить квадратичные математические модели выходных параметров: объёмной массы бетона; кубиковой и призмной прочности керамзитобетона в возрасте п.п., 28, 115, 180 и 360 суток, при подвижности керамзитобетонной смеси – осадка конуса составила  $OK = 2...4$  см.

Использованные материалы и их интервал:

$X_1 = 180 \pm 60$  кг/м<sup>3</sup>, портландцемент ОАО «Югцемент» марки 400;

$X_2 = 125 \pm 25$  кг/м<sup>3</sup>, известь молотая негашеная п.г.т. Кодыма, активностью по СаО – 58%;

$X_3 = 150 \pm 50$  кг/м<sup>3</sup>, зола-унос Ладыженской ТЭС;

$X_4 = 440 \pm 90$  кг/м<sup>3</sup>, керамзитовый гравий (Кулиндоровского промышленного концерна «Инто-Строй»)

фракций 5...10 и 10...20 мм в соотношении по объёму  $V_{5...10} / V_{10...20} = 1,5$  ;

$X_5 = 360 \pm 70$  кг/м<sup>3</sup>, песок речной кварцевый плотный «Тельмановский карьер» Кременчужский речной порт, модуль крупности 1,36.

Во все составы были введены пластификатор С-3 в количестве 0,6% от массы цемента и гипс – 25 кг/м<sup>3</sup>.

Количество воды колебалось  $260 \pm 10$  л/м<sup>3</sup> в зависимости от обеспечения пластичности смеси с осадкой конуса 2 – 4 см.

Обработка результатов эксперимента с целью выявления закономерностей влияния исследуемых факторов на водопотребность керамзитобетонных смесей – В, объём межзерновых пустот  $V_{II}$ , плотность керамзитобетонной смеси  $\rho_0$  - и плотность керамзитобетона  $\rho$  позволили получить с 95% надёжностью квадратичные уравнения регрессии, которые с учётом только значимых коэффициентов регрессии имеют вид:

$$B = 267,6 + 6,4X_1 + 6,9X_2 + 2,5X_3 + 3,12X_1X_3 + 2,25X_2X_3 - 9,26X_3^2 - 4X_3X_4 + 4,44X_4^2 - 2X_4X_5 + 5,94X_5^2; \quad (1)$$

$$V_{II} = 1,602 - 0,25X_1 - 0,2X_4 - 0,3X_1^2 + 0,25X_1X_2 + 0,27X_1X_5 + 0,58X_2^2 + 0,27X_3X_5 + 0,29X_4X_5; \quad (2)$$

$$\rho_0 = 1334 + 66,9X_1 + 24,7X_2 + 37,7X_3 + 132,2X_4 + 34,2X_5 + 12,51X_2^2 - 10,44X_3X_4; \quad (3)$$

$$\rho = 1436 + 71,3X_1 + 26,3X_2 + 41,7X_3 + 143,4X_4 + 37,1X_5 + 10,5X_2^2 - 11,5X_3^2 - 11,8X_3X_4 + 8,7X_1X_5. \quad (4)$$

Уравнения приведены только со статистически значимыми коэффициентами. Они адекватны по F - критерию Фишера ( $F_{ад} < F_{табл}$ ) и имеет информационную ценность ( $F_{инф} > F_{табл}$ ). На рис.1 показана зависимость плотности керамзитобетонной смеси и керамзитобетона от расхода (ЦИЗ) вяжущего и агрегатно-структурного фактора  $r$ .

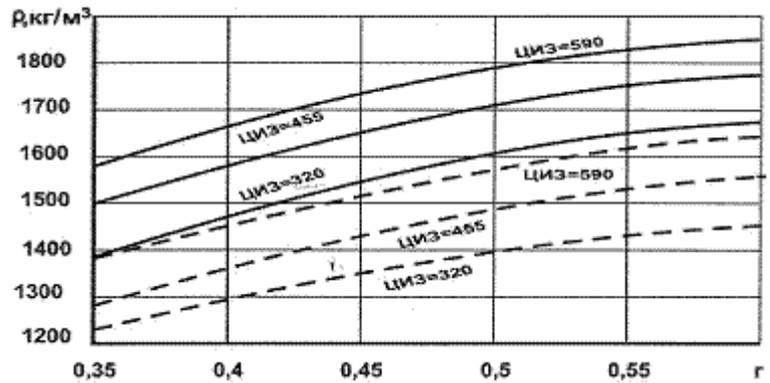


Рис. 1 Зависимость плотности керамзитобетонной смеси и керамзитобетона от расхода ЦИЗ вяжущего и агрегатно-структурного фактора  $r$ ,  
 \_\_\_\_\_ керамзитобетонная смесь, - - - - - керамзитобетона

Анализ уравнений регрессии показывает, что расход цемента, извести и золы в исследуемых диапазонах их изменениях и сочетаниях практически не очень влияет на водопотребность керамзитобетонной смеси. Водопотребность керамзитобетонных смесей в значительной мере зависит от содержания крупного и мелкого заполнителей.

По результатам экспериментальных исследований прочностных свойств пропаренного керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем с 95% надёжностью получены квадратические уравнения с учётом только значимых коэффициентов регрессии кубиковой прочности (5-8) в возрасте  $t = 1(н.н.) 28, 180, 360$  сут. Уравнения по F - критерию Фишера адекватны ( $F_{ад} < F_{табл}$ ) и имеет информационную ценность ( $F_{инф} > F_{табл}$ ).

$$R_{(н.н.)} = 17,97 + 3,85X_1 - 2,3X_2 + 2,65X_1^2 - 3,4X_2^2 \quad (5)$$

$$R_{(28)} = 21,6 + 4,35X_1 - 2,85X_2 + 2,31X_1^2 - 3,99X_2^2; \quad (6)$$

$$R_{(180)} = 28,17 + 5,33X_1 - 2,55X_2 + 1,2X_1^2 - 3,9X_2^2; \quad (7)$$

$$R_{(360)} = 29,07 + 5,5X_1 - 2,43X_2 + 1,34X_1^2 - 4,86X_2^2. \quad (8)$$

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии (5-8) с позиции математико-статистического анализа была исследована линейная зависимость. При назначении аргумента  $X$  исходили из необходимости учёта существенно влияющего на прочность, но не включенного в качестве фактора расхода воды. Окончательно аргументом назначен  $X = (B / \text{ЦИЗ}) + r$  [8], который можно принять в качестве обобщённого фактора состава.

Результаты анализа позволили установить, что случайные величины  $X = [(B / \text{ЦИЗ}) + r]$  подчиняются закону нормального распределения. Нулевая гипотеза о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции ( $H_0: \rho_{xy} = 0$ ) отвергнута в пользу альтернативной  $H_1: \rho_{xy} \neq 0$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , что свидетельствует о наличии линейной связи между  $R$  и  $(B / \text{ЦИЗ}) + r$  в каждом из принятых возрастов керамзитобетона. Это позволило, используя методику регрессионного анализа, для каждого из принятых возрастов керамзитобетона получить линейные уравнения вида:

$$R_{(н.н.)} = 49,11 - 31,35[(B / \text{ЦИЗ}) + r] \quad (9)$$

$$R_{(28)} = 55,17 - 34,37[(B / \text{ЦИЗ}) + r] \quad (10)$$

$$R_{(180)} = 62,13 - 37,24[(B / \text{ЦИЗ}) + r] \quad (11)$$

$$R_{(360)} = 64,92 - 38,70[(B / \text{ЦИЗ}) + r] \quad (12)$$

Проверка нулевой гипотезы об однородности дисперсий величин  $Y = R_{(н.н., 28, 180, 360 сут.)}$  и  $X = [(B/ЦИЗ) + r]$ , полученных в возрасте  $t = 1(н.н.), 28, 180, 360$  сут.,  $H_0 : (S_R^2)_{н.н.} = (S_R^2)_{28} = (S_R^2)_{180} = (S_R^2)_{360}$ , выполненная  $H_0 : (S_X^2)_{н.н.} = (S_X^2)_{28} = (S_X^2)_{180} = (S_X^2)_{360}$  по G – критерию Кохрена для независимых выборок одинакового объёма показала, что эта гипотеза может быть принята при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . На рис. 2 показана зависимость прочности керамзитобетона от обобщённого фактора состава на 28 сутки.

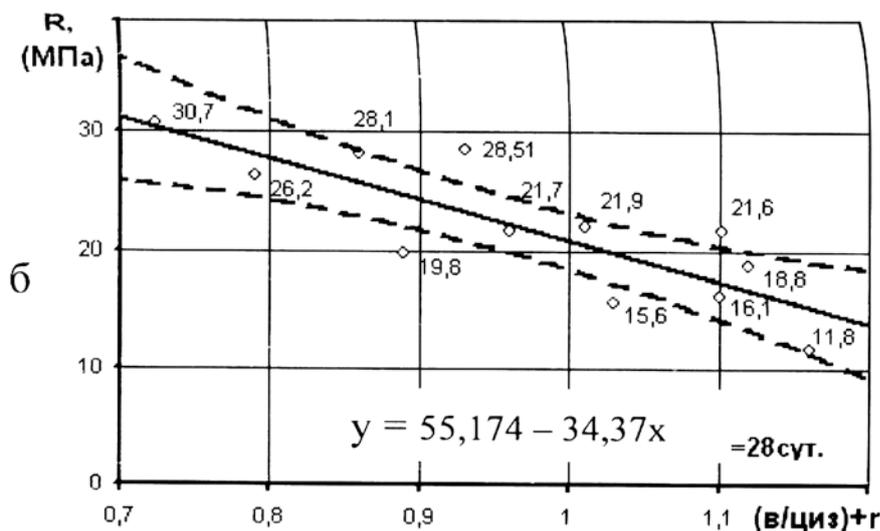


Рис. 2 Зависимость прочности керамзитобетона на ЦИЗ вяжущем от обобщённого фактора состава на 28 сут.

Следовательно, для описания зависимости прочности  $R$  от обобщённого фактора состава  $[(B/ЦИЗ) + r]$ , независимо от возраста, может быть использовано усреднённое линейное уравнение регрессии вида:

$$R_{(t)} = 57,83 - 35,42[(B/ЦИЗ) + r] \quad (13)$$

По результатам экспериментальных исследований прочностных свойств керамзитобетона с 95% надёжностью получены квадратичные уравнения регрессии призмной прочности (14-17). Уравнения по F – критерию Фишера адекватны ( $F_{ад} < F_{табл}$ ) и имеет информационную ценность ( $F_{инф} > F_{табл}$ ).

$$R_{\phi(н.н.)} = 16,26 + 3,56 X_1 - 2,0 X_2 + 2,38 X_1^2 - 3,19 X_2^2 \quad (14)$$

$$R_{\phi(28)} = 20,23 + 3,71 X_1 - 2,66 X_2 + 1,71 X_1^2 - 3,64 X_2^2; \quad (15)$$

$$R_{\phi(180)} = 25,43 + 5,14 X_1 - 1,98 X_2 + 0,83 X_1^2 - 4,67 X_2^2; \quad (16)$$

$$R_{\phi(360)} = 26,2 + 5,2 X_1 - 1,3 X_2 + 1,16 X_1^2 - 4,29 X_2^2. \quad (17)$$

Из уравнений регрессии кубиковой (5-8) и призмной (14-17) прочностей видно, что влияние расхода (ЦИЗ) – вяжущего ( $X_1$ ) и агрегатно-структурного фактора ( $X_2$ ) в возрасте  $t = 28$  суток на призмную прочность керамзитобетона качественно не отличается от их влияния на кубиковую прочность.

Для упрощения квадратичных уравнений регрессии (14-17) были получены линейные зависимости вида (18-21). Это позволило используя методику регрессионного анализа, для каждого из принятых возрастов керамзитобетона получить линейные уравнения регрессии вида:

$$R_{\phi(н.н.)} = 45,13 - 29,06[(B/ЦИЗ) + r] \quad (18)$$

$$R_{\phi(28)} = 49,24 - 30,28[(B/ЦИЗ) + r] \quad (19)$$

$$R_{\phi(180)} = 57,30 - 34,85[(B/ЦИЗ) + r] \quad (20)$$

$$R_{\phi(360)} = 60,32 - 36,90[(B/ЦИЗ) + r] \quad (21)$$

Результаты математико-статистических расчётов и статистические характеристики и результаты графического анализа позволяют сделать вывод о линейности кривых регрессий без дополнительной проверки значимости коэффициента регрессии.

Коэффициент призмной прочности  $\phi_{\phi} = R_{\phi} / R$  методом наименьших квадратов получено уравнение регрессии:

$$\varphi_{\delta} = 0,8262 + 0,0097 R - 0,0003 R^2. \quad (22)$$

С учётом полученных коэффициентов временная зависимость призмной прочности имеет вид:

$$R_{\delta}(t, B/\text{ЦИЗ}, r) = (59,2 - 16,7e^{-0,014t}) - 32,9[(B/\text{ЦИЗ}) + r]. \quad (23)$$

На рис. 3 показано изменение во времени призмной прочности.

По результатам экспериментальных исследований с 95% надёжностью получены квадратичные уравнения регрессии модуля упругости керамзитобетона на (ЦИЗ) вяжущем в возрасте  $t = 28, 180, 360$  сут. Уравнения по F – критерию Фишера адекватны ( $F_{\text{дл}} < F_{\text{табл}}$ ) и имеет информационную ценность ( $F_{\text{инф}} > F_{\text{табл}}$ ) и с учётом статистически значимых коэффициентов, приведены ниже, размерность в МПа.

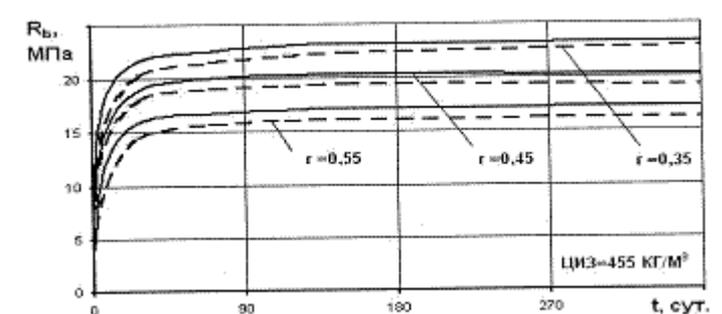


Рис.3. Изменение во времени призмной прочности керамзитобетона при расходе ЦИЗ вяжущего  $455 \text{ кг/м}^3$ ,  
 ————— опытные, ————— расчётные по зависимости (23)

$$E_{\delta(28)} \times 10^{-3} = 13,41 + 1,39 X_1 - 0,94 X_2 + 1,33 X_1^2 - 1,77 X_2^2, \quad (24)$$

$$E_{\delta(180)} \times 10^{-3} = 13,94 + 1,08 X_1 - 1,01 X_2 + 1,21 X_1^2 - 1,72 X_2^2, \quad (25)$$

$$E_{\delta(360)} \times 10^{-3} = 14,33 + 1,14 X_1 - 2,26 X_2 + 1,43 X_1^2 - 1,45 X_2^2. \quad (26)$$

Анализ влияния исследуемых факторов состава проводили по уравнению (24). Из этого уравнения видно, что «мощность» влияния расхода (ЦИЗ) вяжущего ( $X_1$ ) на модуль упругости несколько больше фактора  $r$  ( $X_2$ ), хотя они в значительной степени влияют на указанную величину.

Характер изменения модуля упругости при увеличении расхода комплексного вяжущего зависит от значений фактора  $r$  ( $X_2$ ). При изменении значений от 0,55 до 0,35 и увеличении расхода ЦИЗ вяжущего в принятом диапазоне варьирования величина растёт с затухающей интенсивностью. Интенсивность затухания увеличивается при уменьшении значения  $r$ .

Для описания достаточно надёжной статистической связи между  $y = E_{\delta}(t)$  и  $x = (B/\text{ЦИЗ}) + r$  был проведен математико-статистический анализ и использована методика регрессионного анализа, для каждого из принятых возрастов керамзитобетона, что позволило получить линейные уравнения регрессии вида:

$$E_{\delta(28)} \times 10^{-3} = 25,14 - 12,80[(B/\text{ЦИЗ}) + r] \quad (27)$$

$$E_{\delta(180)} \times 10^{-3} = 23,18 - 9,59[(B/\text{ЦИЗ}) + r]; \quad (28)$$

$$E_{\delta(360)} \times 10^{-3} = 24,85 - 10,53[(B/\text{ЦИЗ}) + r] \quad (29)$$

На рис. 4. показана зависимость модуля упругости от обобщённого фактора состава керамзитобетона на 28 сутки.

Основываясь на имеющихся рекомендациях [8] изменение модуля упругости во времени предложено описывать зависимостью вида:

$$E_{\delta}(t) = E_{\delta}(\infty)[1 - e^{-\alpha t}]. \quad (30)$$

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

$$E_{\delta}(\infty) = 17906 - 4024[(B/\text{ЦИЗ}) + r]; \quad (31)$$

$$\alpha = 0,85 - 0,33[(B/\text{ЦИЗ}) + r]. \quad (32)$$

Эти выражения с несколько меньшей точностью описывают параметры  $E_{\delta}(\infty)$  и  $\alpha$ , но удобны для практических расчётов.

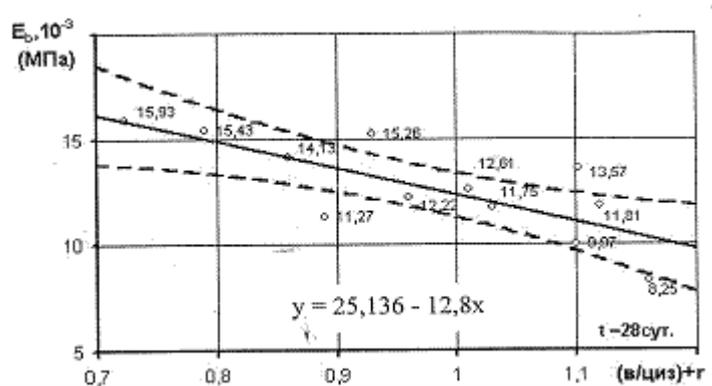


Рис. 4. Зависимость модуля упругости керамзитобетона от обобщенного фактора состава на 28 суток

Модуль упругости лёгких бетонов зависит не только от рецептурно-технологических факторов, но и от прочности и плотности. Учёт этого обстоятельства необходим и позволяет получать и прогнозировать значения модуля упругости с заданной надёжностью.

Для количественной оценки зависимостей параметрических точек  $R_{грс}^o$  и  $R_{грс}^y$  от исследуемых факторов состава – расхода ЦИЗ вяжущего ( $X_1$ ), агрегатно-структурного фактора ( $X_2$ ) в возрасте керамзитобетона  $t(X_3) - 1(н.н.), 28, 180$  сут. использовали квадратичные уравнения регрессии, которые с учётом статистически значимых коэффициентов имеют вид:

$$R_{грс}^o = 0,4767 + 0,0325X_1 - 0,028X_2 - 0,0225X_1X_3 + 0,0154X_2^2 + 0,0225X_2X_3 + 0,021X_3^2; \quad (33)$$

$$R_{грс}^y = 0,928 + 0,029X_1 - 0,027X_2 - 0,017X_2X_3 + 0,01X_2^2 + 0,018X_3^2. \quad (34)$$

Анализ уравнений (33-34) показывает, что увеличение расхода ЦИЗ вяжущего в диапазоне изменения этого фактора повышает границы микротрещинообразования  $R_{грс}^o$  и  $R_{грс}^y$  в среднем соответственно на 12% и 5%. Существуют также оптимальные расходы ЦИЗ вяжущего, зависящие от объёмной концентрации керамзитового гравия в смеси, при которых параметрическая точка  $R_{грс}^o$  принимает максимально возможные значения. Для параметрической точки  $R_{грс}^y$  такая закономерность не наблюдается. Увеличение расхода (ЦИЗ) вяжущего монотонно повышает верхнюю границу области микротрещинообразований.

Увеличение концентрации керамзитового гравия в смеси при постоянном расходе ЦИЗ вяжущего повышает как нижнюю, так и верхнюю границы области микротрещинообразований, что по-видимому, связано с увеличением прочности растворной составляющей керамзитобетона. Косвенным подтверждением этого является повышение границ области микротрещинообразования растворной составляющей керамзитобетона.

Проведенный математико-статистический анализ выявил возможность использования линейного выражения для описания достаточно надёжной статистической связи между  $y = R_{грс}$  и  $x = (B/ЦИЗ) + r$ : нулевая гипотеза о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции ( $H: \rho_{xy} = 0$ ) отвергнута в пользу альтернативной при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , что свидетельствует о наличии линейной связи между  $R_{грс}$  и  $X = (B/ЦИЗ) + r$  в каждом из принятых возрастов бетона.

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

$$R_{грс(н.н.)}^o = 0,6956 - 0,2207 [(B/ЦИЗ) + r] \quad (35)$$

$$R_{грс(28)}^o = 0,7893 - 0,3197 [(B/ЦИЗ) + r]; \quad (36)$$

$$R_{грс(180)}^o = 0,7155 - 0,2945 [(B/ЦИЗ) + r]; \quad (37)$$

$$R_{грс(н.н.)}^y = 0,9726 - 0,0457 [(B/ЦИЗ) + r] \quad (38)$$

$$R_{грс(28)}^y = 0,9841 - 0,0615 [(B/ЦИЗ) + r]; \quad (39)$$

$$R_{грс(180)}^y = 1,0249 - 0,0836 [(B/ЦИЗ) + r] \quad (40)$$

Используя опытные значения  $R_{грс}^o$ ,  $R_{грс}^y$  и  $R_b$  методом наименьших квадратов получены следующие зависимости:

$$R_{ср}^0 / R_{\phi} = 0,389 + 0,078 \rho_{\phi} R_{\phi}; \quad (41)$$

$$R_{ср}^v / R_{\phi} = 0,863 + 0,063 \rho_{\phi} R_{\phi}. \quad (42)$$

которые относительно просты и обладают существенным расчётным преимуществом.

Предельные деформации сжатия являются одним из определяющих факторов, характеризующих степень использования арматуры при совместной работе с бетоном. Для описания зависимости предельных деформаций сжатия  $\varepsilon_{\delta_{ж}}$  от факторов состава получено квадратичное уравнение регрессии, которое по F – критерию Фишера адекватно ( $F_{ад} < F_{табл}$ ) и имеет информационную ценность ( $F_{инф} > F_{табл}$ ) и с учётом только статистически значимых коэффициентов имеет вид:

$$\varepsilon_{\delta_{ж}} \times 10^5 = 354 - 19X_1 + 30X_2 - 24X_1X_2 - 76X_2^2 - 11,3X_2X_3 + 15X_3^2 \quad (43)$$

Проведенный регрессионный анализ позволил получить линейные уравнения вида:

$$\varepsilon_{\delta_{ж(10)}} = [61,518 + 266,7[(B/ЦИЗ) + r]] \times 10^{-5} \quad (44)$$

$$\varepsilon_{\delta_{ж(20)}} = [124,22 + 172,71[(B/ЦИЗ) + r]] \times 10^{-5}; \quad (45)$$

$$\varepsilon_{\delta_{ж(180)}} = [165,5 + 129,93[(B/ЦИЗ) + r]] \times 10^{-5} \quad (46)$$

Независимо от возраста керамзитобетона, может быть использовано усреднённое линейное уравнение регрессии вида:

$$\overline{\varepsilon_{\delta_{ж}}} = [117,1 + 189,8[(B/ЦИЗ) + r]] \times 10^{-5} \quad (47)$$

В табл. 1. приведены оптимальные составы керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем и кварцевом песке 10...25 МПа.

Таблица 1

Проектная прочность, МПа	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона,								Плотность бетона $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
	Цемент, кг	Известь, кг	Зола, кг	Керамзит, кг	Песок, кг	Гипс, кг	Хим. добавка С-3, %	Вода, л.	
10	100	150	100	460	200	25	0,3	260	1100
15	120	150	200	350	430	25	0,3	277	1425
20	180	125	150	440	360	25	0,3	272	1400
25	240	150	200	350	360	25	0,3	284	1450

## Выводы

1. Керамзитобетон на кварцевом песке и цементно-известе-зольном вяжущем прочностью 10,15,20,25 МПа может быть рекомендован как конструкционный материал для изготовления бетонных и железобетонных конструкций.

2. По результатам экспериментальных исследований керамзитобетона на кварцевом песке и цементно-известе-зольном (ЦИЗ) вяжущем с 95% надёжностью получены квадратичные и линейные уравнения регрессии: водопотребности керамзитобетонной смеси, объём межзерновых пустот, плотность смеси и бетона.

3. Проведенные исследования и полученные квадратичные зависимости плотности, кубиковой и призмной прочности, модуля упругости, параметрических точек и предельной сжимаемости для керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем.

4. Прочность, модуль упругости, параметрические точки, а также предельную сжимаемость керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем рекомендуется применять по упрощённым линейным уравнениям в возрастах 1(п.п.), 28, 180 и 360 сут.

5. Для определения границ микроразрушений в зависимости от прочности керамзитобетона рекомендуется использовать выражения (41) и (42).

## Литература

1. Бужевич Г.А., Корнев Н.А. Керамзитобетон. – М.: Госстройиздат, 1963. – 236с. 2. Мешкаускас Ю.И. Конструктивный керамзитобетон. – М.: Стройиздат 1977. – 88 с. 3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982 – 224 с. 4. Вознесенский В.А. Современные методы композиционных материалов. – Киев: “Будівельник”, 1983. – 144 с. 5. Высоцкий С.А., Смирнов В.П. Экономия портландцемента при изготовлении бетонов с добавкой золы ТЭС. // Бетон и железобетон – 1987. - №1. 6. Добавки в бетон. Справочное пособие. Под ред. С. Болдырева, В.С. Рагинова. – М.: Стройиздат, 1986. 7. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. – Киев. “Вища школа”, 1988. – 2007 с. 8. Суханов В.Г. Совершенствование крупнопанельных стен и перекрытий из керамзитобетона на карбонатном песке и особенности их расчета. Дис.... канд. техн. наук. – Одесса, - 1987. – 260 с.