

Кравченко С.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Столевич И.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Костюк А.И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Столевич О.И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ НА КАРБОНАТНОМ ПЕСКЕ

Досліджувалися властивості керамзитобетону на карбонатному піску, бетонні суміші та бетон. Наведена методика підбору оптимальних складів бетону для монолітних несучих і огороджувальних конструкцій житлових і громадських будівель і споруд.

Оптимізація структури легкого бетону складна, що пояснюється впливом багатьох факторів. Це відоме положення набуває особливого значення для сучасних матеріалів, від яких вимагається структура забезпечення комплексу заданих властивостей.

Враховуючи рекомендований в разі застосування легких бетонів принцип «від матеріалу до конструкції через технологію й економіку», для вдосконалення керамзитобетонних і керамзитозалізобетонних конструкцій при їх проектуванні доцільно використовувати комплексний підхід. Такий підхід включає в себе етап вивчення властивостей вихідних матеріалів; міцності та деформативних властивостей керамзитобетону при короточасній і тривалій діях навантаження; спільну роботу арматури та бетону; технологію виготовлення конструкцій на базі оптимальних складів; вивчення роботи конструктивних елементів та конструкцій і видачі рекомендацій щодо їх розрахунку.

Однак відмінність у властивостях заповнювачів, їх мінливість, вплив рецептурних факторів і технології виготовлення конструктивних елементів не дозволяє уніфікувати деякі розрахункові параметри легких бетонів. Це призводить до значних втрат ефективності їх використання, ускладнює масове впровадження легких бетонів у практику будівництва.

Ключові слова: бетон, властивості, карбонатний пісок, керамзитобетон, планований експеримент.

Постановка проблеми. В настоящее время одним из основных направлений развития строительства является снижение трудоемкости и материалоемкости при изготовлении строительных материалов и конструкций, уменьшение их энергоемкости и использование местных материалов.

Легкий бетон на пористых заполнителях представляет собой универсальный строительный материал, позволяющий при его рациональном использовании решать многие актуальные задачи современного строительства и экологические, ресурсосберегающие и экономические проблемы за счет технологических и техногенных отходов при применении и изготовлении местных пористых заполнителей. Дополнительный экономический эффект можно получить при использовании

для строительства зданий и сооружений легких бетонов на местных заполнителях юга Украины (керамзит, кералит, карбонатный песок) и конструкций на их основе.

Дефицит мелких заполнителей для бетонов многих регионов страны может быть восполнен путем широкого применения для их производства отходов камнепиления карбонатных пород (пористых известняков и известняков-ракушечников). Проведенные ранее исследования показали техническую возможность и экономическую целесообразность использования известнякового (карбонатного) песка в бетонах на искусственных пористых заполнителях и в керамзитобетоне, составляющем около 70% общего объема легких бетонов.

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

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, Н.Р. Гузиев, А.В. Каляскин, но в основном ресурсосберегающие вопросы за счёт применения промышленных отходов при изготовлении пористых и вяжущих заполнителей рассматриваются для тяжелых бетонов.

Постановка задачи. Всесторонний учет физико-технических свойств легкого бетона на пористых заполнителях дает возможность обоснованно назначить рациональные области его применения в изделиях и конструкциях. Для этого важно рассмотреть рекомендуемый в случае применения легких бетонов принцип «от материала к конструкции» и на основании предложенных методик доказать возможность применения керамзитобетона на карбонатном песке в монолитных несущих и ограждающих конструкциях и в железобетонных элементах и конструкциях.

Изложение основного материала исследования. Исследование керамзитобетона на карбонатном песке и конструкций на его основе проводились в лабораторных и производственных условиях.

В исследованиях использовали:

- 1) портландцемент марки 400;
- 2) керамзитовый гравий фракций 5-10 и 10-20 мм в соотношении по объему $V_{5-10}/V_{10-20} = 1,5$;
- 3) карбонатный песок, полученный из отходов камнепиления известняка-ракушечника.

В качестве мелкого заполнителя применяли карбонатный песок, полученный путем дробления и отсева отходов камнепиления и кусков низкопрочного известняка – ракушечника. Применение такого песка в качестве мелкого заполнителя для различных бетонов, в том числе и для легкого бетона, регламентировано ДСТУ Б В.2.7-27-95 [1] и подтверждено многочисленными исследованиями. Физико-механические характеристики керамзитового гравия приведены в Табл. 1.

Химический состав известняков-ракушечников указанного месторождения и усредненные данные по месторождениям Украины приведены в Табл. 2.

По химическому составу используемые в исследовании известняки-ракушечники Орловского месторождения можно отнести к чистым

Таблица 1

Физико-механические характеристики керамзитового гравия

Размер фракции, мм	Прочность (при сдавливании в цилиндре) $R_{ср}$, МПа	Насыпная плотность, г	Коэффициент конструктивного качества, ККК	Удельная плотность, г	Плотность в цементном тесте, г	Водопоглощение, w, %	Объем межзерновых пустот, $V^k_{мз}$, %	Марки гравия по насыпной плотности (ДСТУ Б.В.2.7-17-95)
5-10	2,8-4,67	504-583	559-801	2,31-2,48	955-1507	16,2-22,7	30-38,2	550-600
10-20	2,4-2,91	462-541	519-538	2,31-2,48	890-1493	20,8-24,9	38-41,1	500-550
смесь	2,5-3,96	474-569	429-696	2,31-2,48	946-1502	18,2-24,1	33-40,1	500-600

Таблица 2

Химический состав известняков-ракушечников, % по массе

Месторождение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Потери при прокаливании
Орловское	3,36	2,68	0,82	51,0	1,34	0,07	40,7
Главанское	4,2	2,82	0,9	50,2	1,0	0,06	41,8
Усредненное по Украине	1,7	1,21	1,21	53,3	0,92	0,67	42,4

известнякам. Полученные из них карбонатные пески не содержат вредных примесей: они чисты и годны к применению.

Сопоставление химических составов известняков-ракушечников месторождений Украины показывает их незначительное отличие. Учет этого обстоятельства в сочетании с имеющимися данными о мощности Орловского месторождения, а также реальными возможностями промышленной поставки карбонатного песка из этого месторождения обосновывает его использование при производстве керамзитобетона на его основе.

Как показывают исследования [2], карбонатный заполнитель не является инертным материалом, а вступает в активное физико-химическое взаимодействие с клинкерным цементом. Это положительное свойство карбонатных заполнителей дополняется их способностью создавать эффект самовакуумирования, что приводит к увеличению прочности в бетоне как самого песка, так и контактного слоя с цементным камнем. Кроме того, карбонатная пыль фракции (<0,14 мм) играет роль микрозаполнителя цемента, поскольку имеет с ним не только химическое сходство, но и близкие по размеру частицы. Учет этого обстоятельства позволяет снизить расход цемента в равнопрочных бетонах, способствует улучшению удобоукладываемости бетонной смеси и повышению водонепроницаемости бетона.

Основные физико-механические характеристики карбонатного песка определены по ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [3]. Перед испытанием отсеивалась фракция более 5 мм, содержание которой составляло в среднем 4% массы. Усредненные результаты испытаний партий карбонатного песка, приведенные в Табл. 3, показали, что такой

песок удовлетворяет требования стандартов [1, 3] и может быть использован для получения керамзитобетонной прочностью до 30 МПа.

Экспериментальные исследования основных свойств керамзитобетонных на карбонатном песке смесей и бетона проводили с использованием методики планированного эксперимента. Экспериментальные исследования состояли из двух этапов. На первом этапе исследовали влияние рецептурных (расхода цемента, агрегатно-структурного фактора) и технологических (удобоукладываемость, время перемешивания смеси в смесителе и время ее виброуплотнения) факторов на основные физико-механические свойства керамзитобетонной смеси (пористость, расслаиваемость, плотность) и бетона (прочность, плотность, однородность по прочности и плотности).

В качестве контролируемых параметров были выбраны:

1. Объем межзерновых пустот $V_{п}$, показатель расслаиваемости P_p и плотность керамзитобетонной смеси ρ_0 .
2. Расход воды для достижения заданной удобоукладываемости смеси.
3. Кубиковая прочность $f_{(28)}$ и плотность керамзитобетона в высушенном до постоянной массы состоянии ρ .
4. Дисперсия прочности S^2_R и плотности S^2_ρ керамзитобетона.

Помимо этого, на первом этапе проводили исследования влияния рецептурных факторов (расхода цемента и агрегатно-структурного фактора) на изменение подвижности смеси во времени. В качестве контролируемого параметра принята подвижность смеси через заданные промежутки времени после ее изготовления OK_t .

Таблица 3

Основные физико-механические характеристики карбонатного песка Орловского месторождения

Гранулометрический состав						Прочность исходной породы $R_{исх.п.}$, МПа	Прочность песка при сдавливании в цилиндре $R_{ц.п.}$, МПа	Насыпная плотность $\rho_{нас.}$, кг/м ³	Плотность в цементном тесте $\rho_{ц.т.}$, кг/м ³	Пустотность P , %	Водопоглощение W , %	Модуль крупности M_k	Удельная плотность $\rho_{уд.}$, г/см ³	Содерж. отдельно глинистых частиц, %
Частные остатки на контрольных ситах %														
2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	менее 0,14									
17,4	2,4	17,0	15,7	17,4	19,8	0,9	0,6	1160	2390	42	5,4	2,38	2,99	0,48

На втором этапе исследовали прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона на карбонатном песке при нагрузках различной длительности и интенсивности, сцепление арматуры с бетоном, а также работу сжатых бетонных и изгибаемых железобетонных конструкций, в том числе и предварительно напряженных. В экспериментальных исследованиях, проводимых по методике планированного эксперимента, в качестве основных контролируемых параметров были выбраны:

1. Кубиковая прочность $f_{(28)}$, призмная прочность $f_{сид}$ и модуль упругости $E_c(t)$ в возрасте 7, 28, 115, 300, 500 суток.
2. Предельные деформации сжатия $\varepsilon_{сж}$ керамзитобетона при загрузении кратковременной нагрузкой.
3. Параметрические уровни микротрещинообразования $R^o_{сж}$ и $R^v_{сж}$ при загрузении кратковременной нагрузкой.
4. Относительные деформации усадки $\varepsilon_{сж,у}$ (t, t_w). Начальный отсчет времени t_w соответствовал окончанию времени схватывания бетона.
5. Относительные деформации ползучести $\varepsilon_{сж,у}$ (σ, t, t_0) керамзитобетона, загруженного в возрастах $t_0 = 7, 28, 115$ суток, нагрузкой, равной $0,2f_{сд}S; 0,6f_{сд}S; 0,8f_{сд}S$.

Подбор оптимального состава конструкционных легких бетонов производился расчетно-экспериментальным методом. В отличие от обычного бетона, для легкого бетона, кроме требований по прочности бетона и удобоукладываемости смеси, необходимо обеспечить требование по заданной плотности бетона [4]. В результате реализации первого этапа экспериментальных исследований (испытание и анализ результатов испытаний) по разработанной методике получены оптимальные по заданным критериям технологические параметры для каждого исследуемого состава керамзитобетона на карбонатном песке, обусловленного рецептурными факторами и уровнем их варьирования.

Результаты проведенных авторами предварительных опытов позволили выбрать следующие факторы и назначить уровни их варьирования:

1. Расход цемента Π , $кг/м^3 - X_1$
Расход цемента на основном (О) уровне принят $\Pi = 375 кг/м^3$. Интервал варьирования $\pm 175 кг/м^3$.
2. Агрегатно-структурный фактор $r - X_2$
Значение агрегатно-структурного фактора r на основном (О) уровне было выбрано равным 0,65. Интервал варьирования $\pm 0,35$.
3. Удобоукладываемость смеси $- X_3$.

Значение показателя удобоукладываемости смеси на основном (О) уровне было выбрано равным $Ж = 35$ с. Интервал варьирования ± 31 с.

4. Время перемешивания керамзитобетонной смеси t_n , мин. $- X_4$.

Время перемешивания на основном (О) уровне принято равным $t_n = 5$ мин. Интервал варьирования ± 3 мин.

5. Время виброуплотнения керамзитобетонной смеси t_v , с $- X_5$.

Время вибрирования на основном (О) уровне принято равным $t_v = 105$ с. Интервал варьирования $** 75$ с.

Оптимальный состав конструкционного керамзитобетона должен обеспечить заданную прочность, минимально возможную плотность и минимально возможную стоимость. Очевидно, что два последних требования одновременно не могут быть обеспечены, поскольку снижение плотности керамзитобетона приводит к увеличению его стоимости и наоборот [5].

Для оптимизации керамзитобетона с учетом экономического критерия на базе экспериментальных данных по фактическим составам были рассчитаны их стоимости. Обработка результатов этих расчетов позволила получить с 95% надежностью квадратичное уравнение регрессии, связывающее стоимость $1 м^3$ керамзитобетона с расходами его компонентов. Полученное уравнение с учетом только статистически значимых коэффициентов имеет такой вид:

$$C = 128,6 + 13,2X_1 - 37,6X_2 + 5,2X_1X_2 - 3,1X_2^2, \quad (1)$$

Как видно из этого уравнения, агрегатно-структурный фактор $r (X_2)$ оказывает несколько большее влияние на стоимость, чем расход цемента (X_1).

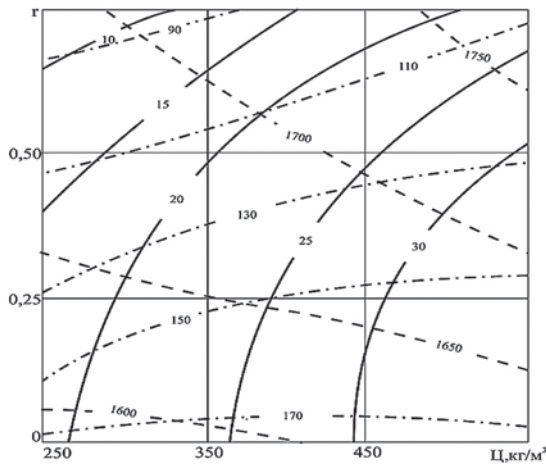
При наличии априорной информации о характере и мощности влияния факторов состава на основные эксплуатационные характеристики бетона наиболее целесообразно проводить подбор оптимальных составов по изолиниям, построенным для каждой из этих характеристик. Изолинии основных характеристик керамзитобетона $f_{(28)}$, ρ , C строили в осях « Π - r », используя соответствующие уравнения регрессии:

$$f_{(28)} = 26,9 + 14,3X_1 - 7,2X_2 + 3,7X_3 - 2,2X_1^2 - 3,3X_3^2 - 1,3X_1X_2 + 1,7X_4X_5, \quad (2)$$

$$\rho = 1740 + 57X_1 + 156X_2 + 11X_4 - 26X_2^2 - 23X_1X_2 + 8X_4X_5, \quad (3)$$

При этом значения факторов X_3 (удобоукладываемость смеси) принимали на нижнем уровне, соответствующем $OK = 6$ см, а значения факторов

$X_4(t_n)$ и $X_5(t_b)$ фиксировали на нулевых уровнях. Комплексная номограмма (Рис. 1) позволяет для заданной подвижности смеси ($OK = 6$ см) получать оптимальные составы керамзитобетона (за исключением расхода воды).



— изолинии прочности $f(28)$, МПа;
 - - - изолинии плотности ρ , кг/м³;
 - · - · изолинии стоимости C , руб/м³
Рис. 1. Номограмма для подбора оптимальных составов керамзитобетона на карбонатном песке

Методика подбора оптимальных составов включает такие этапы:

1. Вычисление значений прочности керамзитобетона $f_{(28)}$, соответствующих заданному классу бетона по прочности на сжатие с учетом конкретных условий производства (C_{VR}), по формуле:

$$f_{(28)} = B / (1 - 1,64C_{VR}), \quad (4)$$

2. По комплексной номограмме устанавливается группа составов (расходы цемента Ц и значения r), соответствующих прочности $f_{(28)}$.

3. По комплексной номограмме для каждого из составов, соответствующих прочности $f_{(28)}$, определяется плотность керамзитобетона ρ .

4. Для каждого из составов по полученным расходам цемента Ц и значениям r вычисляется предварительный расход воды по уравнению:

$$B = 259 + 5X_1 + 14X_2 - 19X_3 + 14X_2^2 + 9X_1X_2 + 9X_2X_3, \quad (5)$$

5. Для каждого состава по принятому расходу цемента Ц и значению r определяется стоимость бетона C .

6. Если плотность бетона не задана, то назначение оптимального состава производится выбором из установленной группы того состава, который обеспечивает минимальную стоимость бетона. В противном случае из установленной группы составов выбирается состав, соответствующий заданным прочности и плотности. Назначенный состав принимается в качестве исходного оптимального состава.

На основании полученных зависимостей и графиков, а также исходя из требований, предъявляемых к легким бетонам, производили назначение оптимальных составов керамзитобетона на карбонатном песке. Оптимальный состав конструкционного керамзитобетона должен обеспечить заданную прочность, минимально возможную плотность и минимально возможную стоимость. Оптимальные составы керамзитобетона на карбонатном песке прочностью 10-30 МПа приведены в Табл. 4.

Таблица 4

Оптимальные составы керамзитобетона на карбонатном песке

Проектная прочность, МПа	Расход материалов на 1м ³ бетона					Плотность бетона ρ , кг/м ³
	r	Цемент Ц, кг/л	Песок М, кг/л	Керамзит К, кг/л	Вода В, л	
10	1,85	$\frac{250}{80,6}$	$\frac{1194}{506}$	$\frac{211}{468}$	202	1685
15	0,75	$\frac{280}{90,3}$	$\frac{1025}{434}$	$\frac{342}{760}$	178	1675
20	0,75	$\frac{360}{116,1}$	$\frac{975}{413}$	$\frac{325}{722}$	192	1690
25	0,75	$\frac{455}{146,7}$	$\frac{919}{389}$	$\frac{306}{680}$	203	1710
30	0,75	$\frac{540}{174,2}$	$\frac{870}{368}$	$\frac{290}{644}$	210	1730

Из керамзитобетона на карбонатном песке были изготовлены и испытаны опытные партии стеновых камней, стеновых блоков, плит перекрытия и покрытий [6]. Результаты испытаний были такими:

1. Средняя прочность камней СКУ-1 составила 3,01 МПа, СКУ-2 – 3,08 МПа, контрольных кубов – 3,12 МПа, призм – 3,0 МПа, морозостойкость – F25.

2. Среднее значение прочности блоков – 8,3 МПа, кубов и призм – 10,6 и 9,7 МПа, модуля упругости – 7650 МПа, коэффициента Пуассона – 0,23, появления трещин при нагрузке – 0,92 $N_{разр.}$, плотность в высушенном до постоянного веса состоянии – 1140 кг/м³.

3. Плиты перекрытий и покрытий – предварительно-напряженные, по серии 1.141-1, вып. 63, марки П63.15-8Ат-Vл, сплошного сечения, из керамзитобетона, класса по прочности на сжатие – С12/15, плотностью D1600. Средние результаты испытаний: прочность кубиковая – $f = 16,3$ МПа, призмная – $f_{cd} = 14,2$ МПа, $E_c = 13630$ МПа, $\rho = 1570$ кг/м³. Контрольная разрушающая нагрузка – $q_p^k = 1310$ кг/м², опытная разрушающая нагрузка на девятом этаже составила $q_{разр.}^{om} = 1616$ кг/м², контрольный прогиб при контрольной нагрузке $q_f^k = 593$ кг/м² составил $f_k = 14,8$ мм. Фактический прогиб при контрольной нагрузке q_f^k составил $f_k^{om} = 7,95$ мм. Первые трещины появились при нагрузке $q^{om} = 1422$ кг/м². Результаты исследова-

ний доказали возможность применения керамзитобетона на карбонатном песке и в монолитных несущих и ограждающих конструкциях.

Выводы. 1. Экономическая эффективность применения керамзитобетона на карбонатном песке очевидна, поскольку сырьем для бетона служат бросовые отходы камнепиления известняков-ракушечников.

2. Легкие бетоны на местных пористых заполнителях юга Украины как крупных, так и мелких, могут быть рекомендованы для изготовления бетонных и железобетонных конструкций с прочностью бетона 5-30 МПа.

3. Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность легких бетонов на пористых заполнителях, значительную экономию портландцемента, целесообразность использования перечисленных ранее легких бетонов для сборных и монолитных конструкций жилых и общественных зданий.

4. Для оптимизации составов керамзитобетона на карбонатном песке рекомендуется использовать разработанную методику комплексного подхода, которая позволяет получить экономические по стоимости составы.

5. Исследования доказали возможность применения керамзитобетона на карбонатном песке в монолитных несущих и ограждающих конструкциях.

Список литературы:

1. ДСТУ Б В.2.7-27-95. Будівельні матеріали. Пісок із вапняків-черепашників для будівельних робіт. Технічні умови. Київ, 1996. 8 с.
2. Костюк А.И., Столевич А.С., Макаров С.В. Влияние структуры на прочностные и деформативные свойства керамзитобетона на карбонатном песке. Строительные конструкции : Респ. межведомств. науч.-техн. сб. Киев : Будівельник. 1991. С. 104–107.
3. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ, 2010. 43 с.
4. Шорт А. Легкие бетоны. Проектирование и технология / под редакцией Ярмановского В.Н. Москва : Стройиздат, 1981. 240 с.
5. Вознесенский В.А. Современные методы композиционных материалов. Киев : Будівельник, 1983. 144 с.
6. Столевич А.С., Макаров С.В., Столевич И.А., Мадии К.М., Кравченко С.А. Конструкционные легкие бетоны. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса : Зовнішрекламсервіс. 2005. Вип. 17. С. 246–255.

Kravchenko S.A., Stolevich I.A., Kostyuk A.I., Stolevich O.I. OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF EXPANDED CLAYDITE-CONCRETE MIXES AND CONCRETES ON CARBONATE SAND

Properties of expanded claydite-concrete on carbonate sand, concrete mixes and concrete were studied. The method of selecting optimal concrete compositions for monolithic load-bearing and enclosing structures of residential and public buildings and structures is given. Optimizing the structure of light concrete is difficult, due to the influence of many factors. This well-known position is particularly important for modern materials, which require a structure that provides a set of specified properties.

Taking into account the principle "from material to structure through technology and economy" recommended in the case of light concrete, it is advisable to use a comprehensive approach to improve the claydite-concrete

and claydite-reinforced concrete structures in their design. This approach includes the following stages: studying the properties of raw materials; strength and deformative properties of expanded clay concrete under short-term and long-term load action; joint work of reinforcement and concrete; technology for manufacturing structures based on optimal compositions; studying the work of structural elements and structures and issuing recommendations for their calculation.

However, the difference in the properties of aggregates, their variability, the influence of prescription factors and manufacturing technology of structural elements does not allow to unify some of the design parameters of light concretes. This leads to significant losses in the efficiency of their use, and makes it difficult to introduce lightweight concrete into construction practice on a large scale.

Key words: *concrete, properties, carbonate sand, claydite-concrete, planned experiment.*