

**ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ
НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА**

СЕМЕНЮК С. Д., РЖЕВУЦКАЯ В. А.

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Аннотация. При проектировании состава легкого бетона существует много различных формул определения его прочности при сжатии. Многие авторы считают, что решающим фактором при определении прочности бетона является активность цемента, прочность крупного заполнителя и водоцементное отношение. С этой целью были проведены экспериментальные и теоретические исследования прочности и деформативности образцов в виде кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное сжатие из керамзитобетона классов LC 8/10, LC 10/12, LC 16/18, CL25/28 и LC 30/33.

Введение. Легкий бетон широко применяется для наружных ограждений отапливаемых зданий, когда необходимо уменьшить вес конструкций, также он применяется в сельском хозяйстве, промышленном строительстве. Керамзитобетон используется и в гидротехническом строительстве, для наливных сооружений (танкеров).

Использование легкого бетона в строительстве снижает вес, стоимость и трудоемкость сооружений, решает проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании инженерных сооружений и зданий, а также повысить их долговечность, надежность и безопасность при эксплуатации, уменьшить нагрузки на основание фундамента.

В Белорусско-Российском университете проводятся исследования работы керамзитобетона, на основе которых принимаются модели его прочности. В результате исследований определены кубиковая, призмная и цилиндрическая прочности, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, а также пределы микротрещинообразования бетона.

Влияние компонентов крупного заполнителя на прочность бетона. Большинство исследователей считают, что при прочих равных факторах, определяющих состав бетона, и при одинаковых условиях твердения, его прочность определяется только водоцементным отношением (В/Ц).

Структура таких формул такая же, как и формула для подбора состава обычных бетонов и может быть выражена линейной зависимостью:

$$f_{c,cube}^G = K_0 \cdot R_u \cdot \left(\frac{Ц}{B} - A \right), \quad (1)$$

где $f_{c,cube}^G$ – прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток,

R_u – активность цемента;

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

K_0 и A – эмпирические коэффициенты, зависящие от заполнителей и технических факторов.

Н. А. Попов [1] предложил определять прочность легкого бетона в зависимости от расхода цемента Π и его активности R_y :

$$f_{c,cube}^G = K_0 \cdot R_y \cdot (\Pi - A), \quad (2)$$

где $f_{c,cube}^G$ – прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток,

R_y – активность цемента;

Π – расход цемента;

K_0 и A – эмпирические коэффициенты, зависящие от заполнителей и технических факторов.

Помимо этих данных, в формуле прочности легкого бетона И. Н. Ахвердов [2] учитывает также качество цемента путем ввода в формулу коэффициента нормальной густоты ($k_{н.г.}$).

$$R = \frac{R_y \cdot \sqrt{1 - \eta}}{\frac{1 + 1,65 \cdot k'_{н.г.}}{k'_{н.г.}} \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)' - 1,65 \cdot k'_{н.г.}}, \quad (3)$$

где $\eta = \frac{\beta \cdot Q_{II}}{\Pi}$;

$k'_{н.г.} = (1 - \eta) \cdot k_{н.г.} + \eta \cdot k_{н.г.}^0$;

β – доля содержания пылевидных фракций в песке;

B/Π – берется с учетом поглощенной заполнителем воды.

Имеются зависимости, которые учитывают прочности, объемы раствора и заполнителя в бетоне с их деформативными свойствами. Это формулы предложенные Б. Г. Скрамтаевым [3]:

$$R_{\sigma} = R_p \left(v_p + v_3 \cdot \frac{E_3}{E_p} \right), \quad (4)$$

где v_p и v_3 – доли раствора и заполнителя по объему;

E_3 и E_p – соответственно их модули упругости.

А.И. Ваганов [4] в зависимости от схемы разрушения предлагает зависимость:

$$R = E_p \cdot \varepsilon_c \text{ или } R = E_p \cdot \varepsilon_3, \quad (5)$$

где ε_c и ε_3 – предельные сжимаемости скелета и заполнителя.

Большая группа исследователей предлагает, помимо некоторых параметров, учитывать прочность заполнителя R_3 .

М.З. Симонов [5] предложил такую зависимость:

$$R_{\sigma} = \frac{R_u}{0,45} \cdot \delta^2 \cdot \mu_u + R_3 \cdot (1 - \mu_u), \quad (6)$$

где $\delta = \frac{c_k}{c+b+n}$ – плотность цементного камня в бетоне, равная отношению абсолютного объема затвердевшего цементного камня в бетоне c_k к сумме абсолютных объемов цемента c , воды b воздушных пор n в бетоне; μ – показатель отношения площади разрыва по цементному камню ко всей площади разрыва.

С.Е. Фрайфельд [6] предложил для керамзитобетона такую зависимость:

$$R_{\sigma} = \left[(1 - \varphi) \cdot \frac{E_p}{E_3} + \varphi \right] \cdot R_3, \quad (7)$$

где φ – объемная концентрация керамзита в бетоне.

Ю.Е. Корнилович [7] предлагал зависимость:

$$R_{\sigma} = \frac{R_k}{\alpha_k} \cdot S_k + R_3^{ουλ} \cdot (1 - S_k), \quad (8)$$

где α_k – коэффициент концентрации напряжений в цементном камне при наличии в нем макропор;

R_k – прочность цементного камня.

В. Г. Довжик и Л. А. Кайсер предполагали, что прочность бетона определяется в зависимости от прочности раствора, прочности керамзита в цилиндре и его объемной концентрации.

А. А. Новопащин и М. М. Крябин вывели формулу прочности керамзитобетона, в которую вошла величина прочности керамзита, испытанного в гипсокерамзитобетоне по их методике. Р. Л. Маилян предложил, помимо активности цемента и его удельного расхода, ввести в формулу прочности бетона показатель прочности заполнителя, который определяется по разработанной им методике путем раскола кубика из цементного теста с втопленным в него заполнителем. А.А. Аракелян устанавливает зависимость между прочностью бетона и структурой его пор.

Ю.Е. Корнилович, И.Н. Иванов – Дятлов, С.Е. Фрайфельд, М.З. Симонов предложили определять прочность бетона в функции от прочности раствора и крупного заполнителя:

$$f_{c,cube}^G = S_{раств.} \cdot R_{раств.} + R_3 \cdot (1 - S_{раств.}), \quad (9)$$

где $R_{раств.}$ – фактическая прочность при сжатии растворной части бетона;

R_3 – фактическая прочность при сжатии крупного пористого заполнителя в бетоне;

$S_{раств.}$ – расчетная относительная площадь раствора в сечении бетона;

$1 - S_{раств.}$ – расчетная относительная площадь крупного пористого заполнителя.

Пирадов А.Б. [8] исследовал в своих трудах прочность легкого бетона на сжатие в возрасте 28 суток на различных пористых заполнителях. Используя метод теории множественной корреляции, он получил зависимость прочности бетона от четырех переменных бетонной смеси. Эта зависимость выражается уравнением регрессии.

$$f_{c,cube}^G = 10,38 \frac{Ц}{B} + 0,0441 \cdot t + 0,215 R_{ц} + 1,19 R_3 - 27,95, \quad (10)$$

где $Ц/B$ – цементно-водное отношение;

t – расход цементного теста;

$R_{ц}$ – активность цемента;

R_3 – прочность крупного заполнителя по испытанию в стандартном цилиндре.

Мешкаускас Ю.Н. [9] аналогичную формулу получил для конструкционного керамзитобетона:

$$f_{c,cube}^G = 0,051m_2 - 20,67 \frac{B}{C} + 0,651R_s - 19,32 \quad (11)$$

где m_2 – масса керамзита в 1 м^3 бетона.

Влияние компонентов бетона на его деформативные характеристики. При изучении деформационных свойств бетона под нагрузкой обычно определяют средние относительные деформации на боковых гранях образца на участках, охватывающих как зерна заполнителя, так и прослойки цементного камня. Между тем одновременное определение при этом также относительных деформаций отдельных зерен заполнителя и цементного камня способствовало бы лучшему уяснению зависимости деформативных свойств бетона от свойств его компонентов.

Подобная методика изучения деформативных свойств бетона предложена А.С. Дмитриевым. В проведенных им исследованиях бетонные призмы размером $15 \times 15 \times 45$ см после 28-суточного твердения в нормальных условиях шлифовали (боковые поверхности) на специальном станке до обнажения крупного заполнителя. Затем на шлифованные боковые поверхности наклеивали отдельно на зерна крупного заполнителя, на растворную часть и на всю поверхность бетона в целом тензодатчики на базах соответственно 20; 5 и 100 мм. Бетонные призмы испытывали на сжатие при ступенчатом повышении нагрузки с выдержкой на каждой ступени нагрузки $R_{пр}$ в течение 5 минут. Деформацию бетона и его компонентов регистрировали автоматическими измерителями АИ-1. Во время нагружения определяли границу образования микротрещин в бетоне с помощью ультразвуковой импульсной установки УЗП-62.

После рассмотрения кривых, построенных на основе полученных результатов, было видно, что во всех случаях кривые продольных деформаций бетона находятся между кривыми аналогичных деформаций растворной части и щебня. При этом кривые продольных деформаций щебня располагаются левее кривых для бетона, а щебня из пористого известняка – левее.

Опыты показали, что при сжатии бетонных призм на гранитном щебне участки раствора над и под щебнем деформируются сильнее, чем участки, расположенные по боковым поверхностям щебня.

Напряжения в зернах щебня и в растворной части заметно отличаются от определяемых обычно средних напряжений в испытываемом под нагрузкой бетоне. В нагруженном бетонном образце на гранитном щебне гранит воспринимает большие напряжения, чем раствор. Средние напряжения, приходящиеся на гранит, выше, а на раствор – ниже средних напряжений в бетонном образце.

В работе Р.К. Житкевич, посвященной изучению распределения деформаций в компонентах легкого бетона и влияния его на трещинообразование высокопрочного керамзитобетона, делаются следующие выводы:

1. Конструктивные керамзитобетоны по своей структуре могут быть подобными тяжелым в том смысле, что прочность заполнителя может превышать прочность растворной части;

2. При разрушении бетона растворная часть и керамзитовый гравий разрушаются фактически одновременно;

3. В зависимости от соотношения свойств керамзита и раствора крупный заполнитель может оказать ослабляющее и армирующее влияние на бетон и, таким образом, играть существенную роль в трещинообразовании и разрушении.

Опытные данные в области изучения сжимаемости и растяжимости бетонов на плотных и пористых заполнителях, полученные М.З. Симоновым [5], позволяют сделать следующие выводы:

1. При изучении деформативных свойств бетонов целесообразно определять как общие, так и местные деформации (непосредственно на компонентах заполнителя), поскольку такие определения способствуют выявлению неоднородности напряженного состояния в сечении, точек концентрации напряжений и вероятных очагов начала разрушения бетона;

2. Чем выше прочность бетона, тем больше его сжимаемость и растяжимость;

3. Сжимаемость и растяжимость бетона при одной и той же прочности тем выше, чем ниже модуль упругости заполнителя;

4. С повышением пористости бетона, так же как и с переходом от жирных составов к тощим, сжимаемость и растяжимость должны увеличиваться, поскольку поры в бетоне можно рассматривать как зерна заполнителя с нулевым модулем упругости.

Исследования опытных образцов. Для изготовления легкого бетона СЛ 8/10 использовали в качестве крупного заполнителя керамзитовый гравий фракций 5–10, а также гравий фракций 10–20. Состав керамзитобетонной смеси: Ц : П : Г = 1 : 0,52 : 1,05 при водоцементном отношении В/Ц = 0,46. Подбор состава керамзитобетонных смесей подбирался в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов», подготовленных РУП «Институт БелНИИС». Плотность бетона в возрасте 28 суток – 950 кг/м³.

Бетонную смесь приготавливали вручную в лабораторных условиях. Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Экспериментальные образцы находились в естественных температурно-влажностных условиях ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность – 90–95 %, образцы были накрыты мешковиной, поливали образцы водой в течении 7 суток).

Проведенные нами исследования позволили установить такую зависимость, как «секущий модуль продольных деформаций - напряжение или уровень напряжений» при кратковременном центральном сжатии бетонных призм. Данная зависимость с достаточно большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью.

В ходе статистической обработки результатов данных исследовались поперечные, продольные и сдвиговые деформации. При помощи статистических методов линейной корреляции устанавливались численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей.

Определялся коэффициент корреляции r (12) и средняя ошибка коэффициента корреляции m_r (13):

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (12)$$

где $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ – отклонение отдельных вариант V_x , V_y от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y ;

n – число наблюдений.

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \cdot \quad (13)$$

Линейное корреляционное уравнение вычислялось по формуле:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x), \quad (14)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения.

Статистическая обработка линейных корреляционных зависимостей по усредненным показателям испытанных образцов показала, что достаточно высокой является достоверность линейности корреляционных зависимостей.

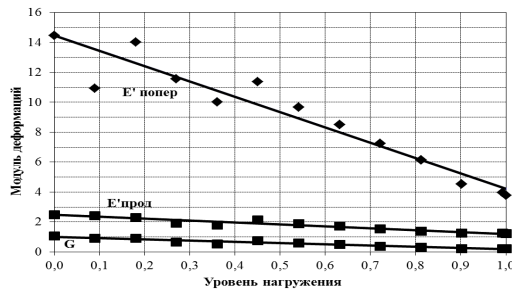


Рис. 1. Опытные и теоретические зависимости «Секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов из бетона класса LC 8/10

Важными характеристиками прочности и деформативности бетона являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. Верхний предел микротрещинообразования определялся по полученным результатам испытания образцов призм при помощи построения зависимости «уровень напряжений – объемная деформация» графическим методом по усредненным экспериментальным данным. Нижний предел микротрещинообразования также определялся графическим методом по полученным экспериментальным данным. Первоначально по опытным данным была построена зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона». Коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение продольного модуля деформаций к поперечному для каждой ступени нагружения.

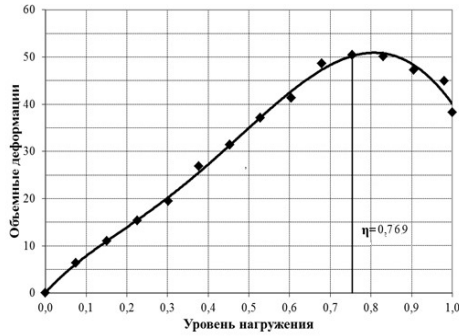


Рис. 2. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-объемные деформации» для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток.

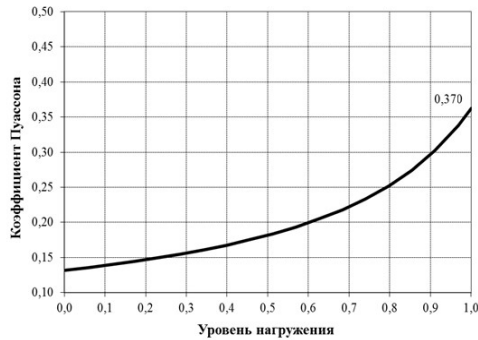


Рис. 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения-коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток

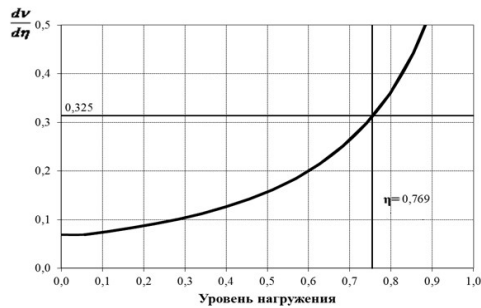


Рис. 4. Корреляционные зависимости (первая производная) для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток

Предел нижнего микротрещинообразования был определен, взяв вторую производную от коэффициента Пуассона.

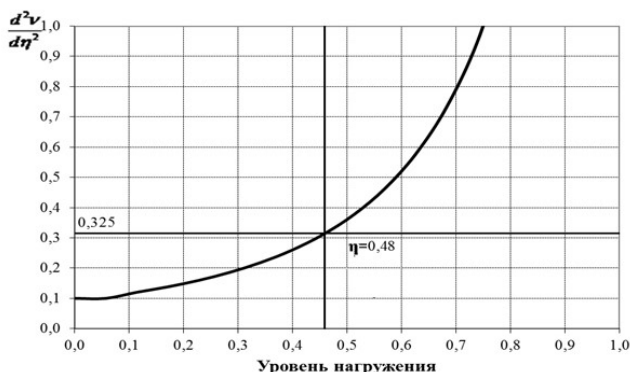


Рис. 5. Корреляционные зависимости (вторая производная) для образцов из бетона класса LC 8/10 в возрасте 28 суток

Заключение. В результате исследований определены кубиковая, призмная и цилиндрическая прочности, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, а также пределы микротрещинообразования бетона.

Пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования необходимы для назначения эксплуатационных нагрузок. До предела нижнего микротрещинообразования материал будет работать упруго. И деструктивные процессы в нем не происходят. При уровне загрузки больше или равному верхнему пределу микротрещинообразования происходит интенсивное развитие трещин и материал может разрушиться. Не целесообразно эксплуатационные нагрузки задавать выше, чем уровень верхнего микротрещинообразования.

Следует сделать вывод, что прочность бетона зависит не только от активности цемента, водоцементного отношения, прочности крупного заполнителя, но также и от ряда других факторов, которые необходимо принимать во внимание.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н.А. Новые виды легких бетонов / Н.А. Попов. – М.: Госстройиздат, 1959. – 83 с.

2. Ахвердов И. Н. Механика деформирования и разрушения бетона в свете новых исследований по структурообразованию цементного камня / И. Н. Ахвердов // Доклады на 4 конференции по бетону и железобетону –Рига, 1966. – 51–56 с.

3. Скромтаев Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси / Б.Г. Скромтаев. – Москва, 1936. – 222 с.

4. Ваганов А. И. Исследование свойств керамзитобетона / Ваганов А.И. – М.: Госстройиздат, 1960. – 65 с.

5. Симонов М. З. Основы технологии легких бетонов / Симонов М.З. – М.: Стройиздат, 1973. – 58 с.

6. Фрайфельд С.Е. Собственные напряжения в железобетоне / Фрайфельд С. Е. – М.: Госстройиздат, 1941. – 152 с.

7. Корнилович Ю. Е. О формуле прочности легких бетонов / Ю.Е. Корнилович, Ю. Д. Нациевский // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. под ред. Бужевича Г. А., Корнева Н. А. – М., 1966. – 90–98 с.

8. Пирадов А. Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона / Пирадов А.Б. – М.: Стройиздат, 1973. – 133 с.

9. Мешкаускас Ю. И. Конструктивный керамзитобетон / Мешкаускас Ю. И. – М.: Стройиздат, 1977. – 87 с.