

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А. О. ЕПОЯН

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ  
 НА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ ПРИ МНОГОКРАТНО  
 ПОВТОРНОЙ НАГРУЗКЕ\*

С о о б щ е н и е 1

1. В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования прочности и деформаций легких бетонов на природных заполнителях с пределом прочности на сжатие 200—500 кг/см<sup>2</sup> при статической нагрузке. В следующем сообщении автора будут приведены данные по прочности и деформации тех же бетонов под многократно повторной нагрузкой.

Исследования проводилось над бетонными образцами на литондиопемзовом заполнителе Лусаванского и перлиговом заполнителе Арагвского месторождений. Применялся портландцемент Арагатского завода активностью 500 кг/см<sup>2</sup> (образцы 1962 г.) и 623 кг/см<sup>2</sup> (образцы 1963 г.).

Испытывались бетонные призмы размерами 10×10×40 см и кубы 10×10×10 см. В табл. 1 приведены расходы материалов испытанных составов бетонов.

Таблица 1

Наименование бетона	Марка состава	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона (кг)				Объемный вес бетона (кг/м <sup>3</sup> )	
		цемент	вода	песок	щебень, крупн. 5-20 мм	на 28 суток	высуш. до постоянного веса
Парантобетон . . . . .	П-5-1	550	245	265	820	1950	1870
	П-4-1	350	240	380	850	1930	1820
	П-3-1	250	240	440	855	1890	1770
	П-2-1	180	230	470	860	1770	1690
Литондиопемзобетон . . . . .	Л-3-4	505	260	450	480	1850	1740
	Л-3-2	505	260	450	480	1840	1740
	Л-2.5-1	260	275	487	692	1670	1600
	Л-2-1	160	260	528	696	1660	1550

Перед испытанием торцы бетонных образцов тщательно выдвигались наждачным камнем на специальном станке. Бетонные кубы центрировались под нагрузкой по геометрическому центру

\* Работа выполнена под руководством проф. В. В. Пинаджяна.

и загружались со скоростью  $2,5 \text{ кг/см}^2$  в секунду вплоть до разрушения. Призмы центрировались по физическому центру с помощью мессур установленных на четырех гранях образца под нагрузкой равной  $0,2-0,3$  от разрушающей. Образцы загружались ступенями и порядке  $0,1$  от разрушающей нагрузки с трехминутной выдержкой под нагрузкой.

Испытания образцов производились на прецизионном 100-тонном гидрпрессе „Рейли“ (рис. 1).

Продольные и поперечные деформации бетонных призм измерялись двухмикроными мессурами, а также тензодатчиками сопротивления с базой  $50 \text{ м.м.}$  с помощью автоматического измерителя деформаций АИ — 1. Кроме того с помощью ультразвукового прибора типа ПИК—7 изме-

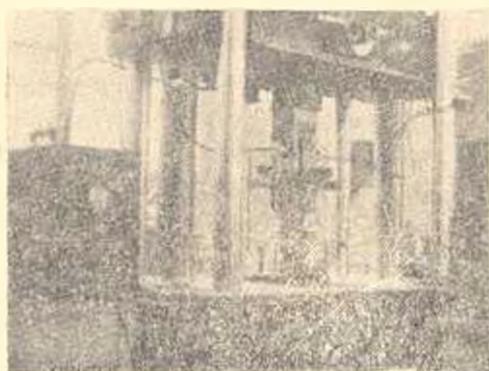


Рис. 1. Испытание бетонной призмы на сжатие.

рялось изменение времени прохождения ультразвуковых волн через бетонные кубы и призмы в процессе их загрузки.

В статье обработаны результаты опытов автора и ряда других исследователей над 60 призмами и 50 кубами из легкого бетона.

Опыты некоторых исследователей [3, 4] показали, что в бетонах, уплотненных вибрированием, масштабный фактор почти не влияет на прочностные характеристики бетона.

По-видимому здесь немаловажную роль играет вибрация, позволяющая получить более однородную структуру бетона. Полученные результаты испытаний существенно зависят от состояния поверхностей образцов и центрирования нагрузки. Даже небольшая внецентренность нагрузки влияет на призмную прочность [4]. Поэтому призмы должны быть тщательно центрированы по продольным деформациям, желательно по четырем граням, поскольку при измерении деформаций по двум граням не может быть выявлена центральность приложения нагрузки по другой оси.

Прочность и деформативность бетонов при наличии большого сцепления между заполнителем и раствором определяется в основном механическими свойствами заполнителя [4]. Кубиковая прочность отличается от призмной в основном от эффекта обоймы. Отношение

$\frac{R_{пр}}{R_{куб}}$  зависит также от водоцементного отношения, количества крупного

заполнителя и других факторов.

На рис. 2 приведена зависимость призмной прочности от кубиковой при размере кубов  $10 \times 10 \times 10 \text{ см.}$  Обработкой результатов

методом математической статистики эта зависимость может быть выражена формулой:

$$R_{пр.} = AR_{куб.} + B. \quad (1)$$

В частности для литондиопемзобетона и перлитового бетонов прочностью  $150 \text{ кг/см}^2$  и выше  $A = 0,77$ ;  $B = 31$ . Для туфобетона  $A = 1,13$ ;  $B = -78$ .

Анализ приведенных результатов показывает, что с увеличением кубиковой прочности отношение  $R_{пр.}/R_{куб.}$  для перлитобетона и литондиопемзобетона уменьшается, а для туфобетона - увеличивается. Это отношение при одинаковой прочности легких бетонов больше чем для тяжелого бетона, что отчасти можно объяснить повышенной растяжимостью легких бетонов.

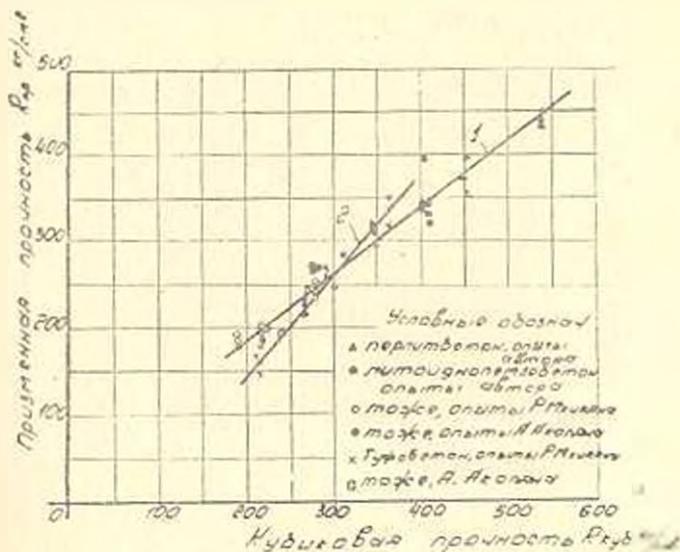


Рис. 2 Зависимость между призмочной и кубиковой прочностью легких бетонов. 1 — перлитобетон и литондиопемзобетон; 2 — туфобетон.

2. Прозольные деформации тяжелого бетона при напряжениях до  $(0,4-0,5) R_{пр.}$  находятся почти в линейной зависимости от напряжений. С повышением прочности бетона линейная зависимость сохраняется при более высоких напряжениях. Иначе говоря, чем больше прочность бетона, тем выше его предел пропорциональности. При этом установлена также линейная зависимость между деформациями и напряжениями бетонов различной прочности, т. е. при одинаковых долях от призмочной прочности для различных марок бетона деформации изменяются пропорционально. Так, при  $\sigma = 0,2 R_{пр.}$  зависимость  $\sigma - \epsilon$  выражается формулой  $\sigma_{0,2} R_{пр.} = 3,2 \times 10^{-5} \epsilon$  или  $R_{пр.} = 16 \times 10^5 \epsilon$  [4].

Для легких бетонов наблюдается аналогичное явление. Автором была изучена зависимость между относительными продольными деформациями и соответствующими напряжениями перлитобетона и литондиопемзобетона с призмочной прочностью  $R_{пр.} = 200 - 450 \text{ кг/см}^2$ .

При обработке были использованы также результаты исследований М. З. Симонова, Р. Р. Саркисян, А. В. Акопяна, А. М. Мхикяна выполненных в ЛИСМ. На рис. 3 приведены зависимости продольных относительных деформаций от прочности бетона при напряжениях  $0,2 R_{пр.}$ ,  $0,5 R_{пр.}$ ,  $0,8 R_{пр.}$ . Эта зависимость при  $\sigma = 0,2 R_{пр.}$  может быть выражена следующими формулами

$$\sigma = 0,2 R_{пр.} = C \varepsilon_{прод} - D; R_{пр.} = C_1 \varepsilon_{прод} - D_1. \quad (2)$$

В частности, для перлитобетона прочностью  $200-150 \text{ кг/см}^2$   $C = 2,45 \times 10^5$ ,  $D = 6,4$ ;  $C_1 = 12,2 \times 10^5$ ,  $D_1 = 32$ ; для лигондиопемзобетона  $C = 2,37 \times 10^5$ ,  $D = 11,5$ ;  $C_1 = 11,8 \times 10^5$ ,  $D_1 = 57,5$ . Экспериментальные значения деформаций отклоняются от прямых (2) в пределах  $3-4\%$  и в отдельных случаях до  $10\%$ .

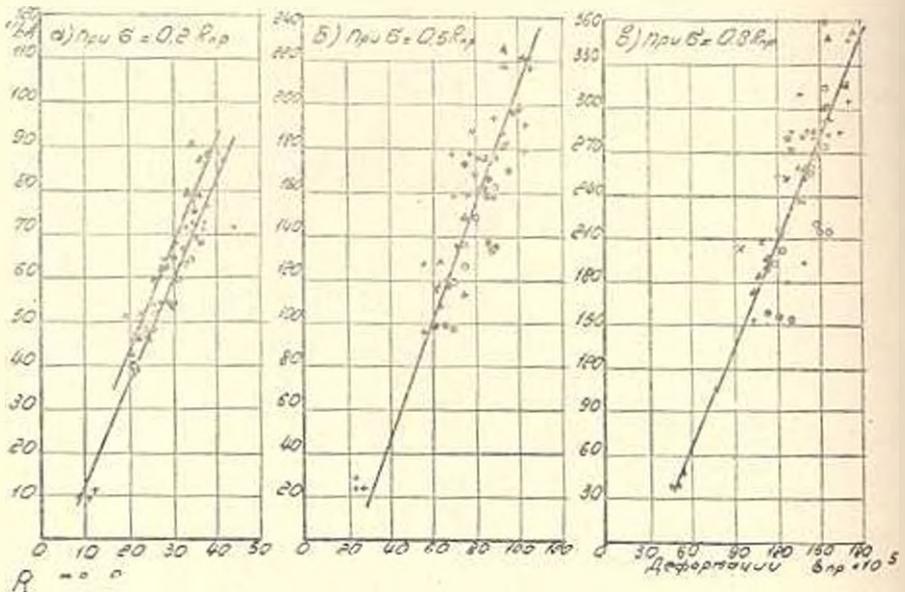


Рис. 3. Зависимости относительных продольных упругих деформаций легких бетонов от сжимающих напряжений.

Модуль упругости легких бетонов может быть выражен формулой

$$E_s = \frac{U}{1 + \frac{V}{R_{пр.}}}. \quad (3)$$

В частности, для перлитобетона при  $\sigma = 0,2 R_{пр.}$ ,  $U = 245000$ ,  $V = 32$ ; для лигондиопемзобетона  $U = 237000$ ,  $V = 58$ .

На рис. 4 приведены зависимости модуля упругости легких бетонов по СНиП-у [7] и по экспериментальным исследованиям, которые в основном предложены для бетонов прочностью до  $200 \text{ кг/см}^2$  при напряжениях  $(0,4-0,5) R_{пр.}$  и дают заниженные значения, поэтому не могут быть применены для бетонов прочностью выше  $200 \text{ кг/см}^2$

при напряжении  $0,2 R_{пр}$ . Для легких бетонов призмочной прочностью  $200 \text{ кг/см}^2$  и выше при напряжениях  $\sigma = 0,2 R_{пр}$  модуль упругости может быть выражен зависимостью (3) при  $l/l_0 = 240000$ ,  $V = 45$ .

При повышении прочности легких бетонов от  $200 \text{ кг/см}^2$  до  $500 \text{ кг/см}^2$  модуль упругости возрастает всего на  $15\%$  (рис. 4), что отчасти объясняется структурными особенностями и относительно большой деформативностью легких вулканических заполнителей.

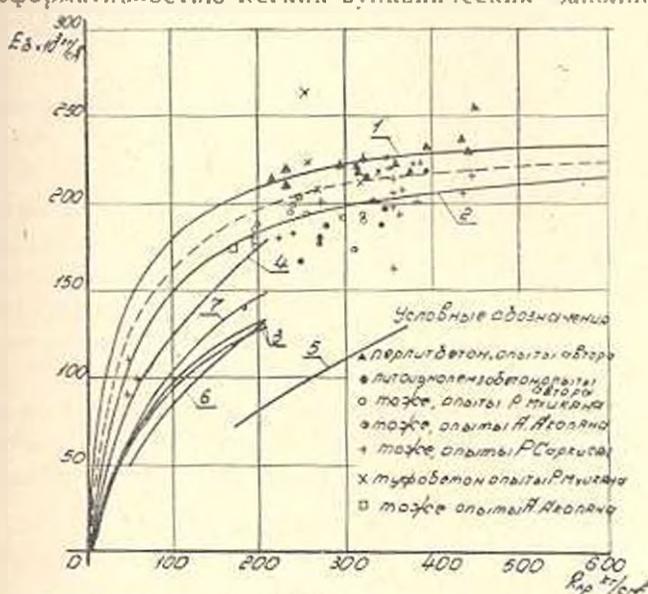


Рис. 4. Зависимость модуля упругости легкого бетона от призмочной прочности при напряжении  $\sigma = 0,2 R_{пр}$ . 1—перлитбетон, по формуле автора; 2—литоизопемзобетон по формуле автора; 3—по формуле М. З. Симонова и по СНиПу для легких бетонов на естественных заполнителях с объемным весом  $\gamma > 700 \text{ кг/м}^3$ ; 4—по СНиПу для легких бетонов на искусственных заполнителях с объемным весом  $\gamma < 700 \text{ кг/м}^3$ ; 5—для легкого бетона по формуле Г. Д. Цискрели для состава автора; 6—по данным С. А. Шагниана для литоизопемзобетона; 7—по данным М. А. Якубича для пемзобетона.

Линейная зависимость относительных продольных упругих деформаций от напряжений в некоторой степени сохраняется также при напряжениях порядка до  $0,8 R_{пр}$  (рис. 3).

На рис. 5. приведена зависимость модуля упругости бетона от относительных напряжений. Характер кривых тяжелого и легкого бетонов разный. При  $\frac{\sigma}{R_{пр}} > 0,6 - 0,8$  модуль упругости тяжелого бетона резко уменьшается, а для легкого бетона наблюдается резкое уменьшение модуля упругости с начала его загрузки и стабилизация величины модуля упругости при  $\frac{\sigma}{R_{пр}} > 0,6 - 0,8$ . Вследствие

этого модуль упругости легких высокопрочных бетонов при напряжениях, близких к разрушающим больше, чем у тяжелого бетона той же прочности. Вероятно в начале загрузки легких бетонов в основном работает осто́в цементного камня, а затем включается в работу также заполнитель.

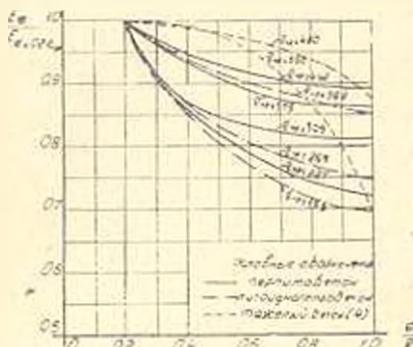


Рис. 5. Зависимость модуля упругости бетона от напряжения при сжатии

Прямыми измерениями поперечных и продольных деформаций одновременно с помощью тензодатчиков и двухмикронных мессур установлено, что в литондиоцементобетоне и перлитобетоне величина  $\mu$  при первых стадиях нагружения образца убывает, а при напряжениях  $\sigma > (0,2 \div 0,4) R$  начинает резко возрастать. Это можно объяснить уплотнением легкого бетона при первых ступенях его нагружения и образованием микротрещин при дальнейшем возрастании нагрузки.

Напряжения, которые соответствуют значению  $\mu = 0,5$  О. Я. Бергом [1, 2] были охарактеризованы началом образования микротрещин в бетоне. Впоследствии, им же на основании тщательных экспериментальных работ было установлено, что микротрещины в бетоне образуются при напряжениях, соответствующих интенсивному росту  $\mu$ . Автором было установлено, что для легких бетонов значение коэффициента  $\mu = 0,5$  достигается только при высоких напряжениях порядка  $(0,7 \div 0,95) R_{пр}$ . Наблюдается, что в начале загрузки время прохождения ультразвуковых волн несколько уменьшается в связи с некоторым уплотнением бетона и на определенной степени загрузки увеличивается вследствие образования микротрещин. Дальнейшее трещинообразование приводит к более медленному прохождению ультразвуковых волн.

3. Опыты с тяжелым бетоном показывают, что поперечные деформации призмы на некоторой степени загрузки начинают интенсивно расти, при этом, кривые коэффициента поперечного расширения  $\mu$  (отношение приращений упругих поперечных и продольных деформаций) в тяжелом бетоне имеют в общем возрастающий характер [4].

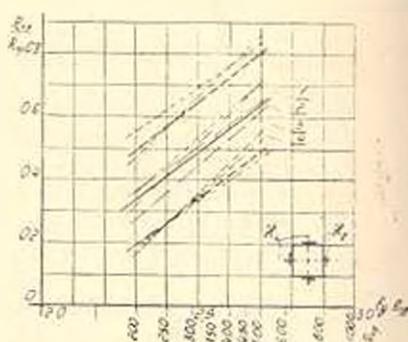


Рис. 6. Зависимость напряжений микротрещинообразования  $R_{тр}$  от призмочной прочности легких бетонов на литондиоцементовом и перлитовом заполнителях. 1 — по показаниям мессур, установленных на середине высоты призмы; 2 — по показаниям тензодатчиков, прикрепленных на поверхности бетона; 3 — по скорости прохождения ультразвуковых волн через образец; 4 — по средним значениям.

Границы напряжений микротрещинообразования для легких бетонов на перлитовом и литондиопемзовом заполнителях можно выразить формулой:

$$R_{тр.} = R_{пр.} (a \lg R_{пр.} - b \pm c), \quad (4)$$

где третий член в скобках со знаком плюс соответствует верхней границе, а со знаком минус — нижней границе трещинообразования. Опытные величины коэффициентов формулы (4) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метод измерения деформации	Коэффициенты формулы (4)		
	a	b	c
Ультразвуковой (по скорости прохождения ультразвуковых волн) . . . . .	0,86	1,75	0,09
Электротензометрический (по показаниям датчиков, прикрепленных на поверхности бетона) . . . . .	0,70	1,23	0,18
Механический (мессурами, установленными на средине высоты призм) . . . . .	0,97	1,92	0,15
Средние . . . . .	0,75	1,40	0,15

Из табл. 2 видно, что наименьшие значения напряжений трещинообразования соответствуют ультразвуковому методу измерений деформаций. Судя по результатам опытов этот метод позволяет более точно улавливать начало микротрещинообразования в бетоне. В отличие от тяжелого бетона, в легком бетоне с повышением его прочности наблюдается существенное повышение отношения  $R_{тр.}/R_{пр.}$ , что по-видимому в некоторой степени связано с резким повышением прочности цементного камня. Кроме того, при одинаковой прочности легкого и тяжелого высокомарочных бетонов объем цементного камня в легком бетоне значительно больше. Ультразвуковым методом микротрещинообразование исследовалось также в кубах из легкого бетона. Было обнаружено, что в кубах и опорных участках призм, имеющих одинаковое поперечное сечение, на напряжения трещинообразования одинаковые. Для средней зоны призм (по высоте) нижняя граница напряжений трещинообразования расположена выше аналогичной величины для опорных участков призм.

4. При загрузении призм изучались упругие и пластические деформации легкого бетона. С этой целью на каждой ступени загрузки, равной примерно 0,1 от разрушающей нагрузки, при трехминутной выдержке под нагрузкой измерялись полные и упругие деформации. Было установлено, что коэффициент упругости, представляющий собой отношение упругой деформации к полной для легкого бетона на перлитовом и литондиопемзовом заполнителях вплоть до напряжений  $(0,8-0,9) R$  находится почти в прямолинейной зависимости от напряжений. При напряжениях, близких к разрушающим, от-

мечалось резкое уменьшение величины коэффициента упругости. Для бетонов в четырехмесячном возрасте с пределом прочности на сжатие  $200-450 \text{ кг/см}^2$  при напряжениях, близких к разрушающим, коэффициент упругости по данным прямых измерений колебался в пределах  $0,55-0,70$ . С ростом возраста бетона величина коэффициента упругости увеличилась, что в основном объясняется повышением упругости цементного камня со временем.

5. Предельные продольные деформации при сжатии призм из тяжелого бетона с призмной прочностью  $200-600 \text{ кг/см}^2$  согласно [4] колеблются в пределах  $(120-160) \times 10^{-5}$ . В экспериментальных исследованиях автора предельные деформации легкого бетона на перлитовом заполнителе с призмной прочностью  $200-450 \text{ кг/см}^2$  получились  $(200-300) \times 10^{-5}$ . Для литоидноцемзобетона предельные деформации оказались примерно на 20% больше, чем у перлитобетона. Предельные поперечные деформации перлитобетона колебались в пределах  $(75-115) \times 10^{-5}$ . Соответствующие деформации для литоидноцемзобетона оказались больше на 30-40%.

ЛИСМ

Поступило 1. IX 1964

Ա. Օ. ԵՆՅԱ

ՀՐԱԲԵԱՅԻՆ ԼՅԻՉՆԵՐՈՎ ԹԵԹԵՎ ԲԵՏՈՆՆԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆԻՆԸ ԵՎ  
ԳԵՆՈՐՄԱՅԻՆՆԵՐԸ ՔԱՉՐԱԿԻ ԿՐԿՆՎՈՎ ԲԵՏՆԵՐԻ ՏԱԿ

(Հաղորդում 1)

Ա մ փ ո փ ո ռ լ մ

Հաղորդման մեջ բերված է լիթոիդային պեմզայի և օկրչիտի լցիչներով  $200-500 \text{ կգ/սմ}^2$  ամրությամբ բետոնների ստատիկորեն ազդող բեռների տակ կատարված ուսումնասիրության արդյունքները: Հաշորդ հաղորդման մեջ կրկրվեն այդ բետոնների բաղմակի կրկնվող ամրության և զեֆորմացիաների հետազոտությունների արդյունքները:

Փորձերից ստացված հիմնական օրինաչափությունները արված են նկ. 2-6-ում և տերաում բերված (1)-(4) (1)-(4) բանաձևերում:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Трансжелдориздат, 1961.
2. Берг О. Я. Прочность бетона и других материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию, и условия сложного напряженного состояния. Тр. ЦНИИС, вып. 36, Трансжелдориздат, 1960.
3. Квирикадзе О. П. Влияние масштабного фактора на механические и деформативные характеристики бетона. Журн. «Бетон и железобетон», № 2, 1964.
4. Писанко Г. Н. Исследование прочностных и деформативных свойств высокопрочных бетонов. Тр. ЦНИИС, вып. 36, Трансжелдориздат, 1960.
5. Прокопович Н. Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. Госстройиздат, 1963.
6. Симонов М. З. Бетон и железобетон на пористых заполнителях. Госстройиздат, 1955.
7. Строительные нормы и правила. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. (СНыП II -В, 1-62).