

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М. З. Симонов

Вопросы расчета прочности бетонов

1. Влияние плотности цементного камня на прочность бетона

Распределение напряжений, возникающих в бетоне от приложения внешних сил, будет происходить по различным схемам в зависимости от вида заполнителей, размеров зерен и взаимного расположения их между собой, в зависимости от качества цементного камня и прочности его сцепления с частицами заполнителя, в зависимости от размеров, распределения по сечению и общего объема пор в бетоне и, наконец, в зависимости от собственных напряжений в бетоне.

Напряжения в бетоне будут концентрироваться на его компонентах с высокими модулями упругости. Но даже не находясь под действием нагрузок, на поверхностях спайки цементного камня с заполнителем может иметь место напряженное состояние в результате усадочных и температурных явлений. Поэтому под воздействием внешних сил, прилагаемых с той или иной интенсивностью, напряжения, возникающие в различных точках бетона, будут приближаться к своим критическим значениям различными темпами.

Известно, что прочность цементного камня и пористых заполнителей зависит от их плотности. Можно показать, что когда пористость материала заполнителей близка к нулю, т. е. при плотных заполнителях, прочность бетона с достаточной для практики точностью однозначно определяется плотностью цементного камня в нем.

Действительно, используем закономерность Ферре, выражаемую формулой:

$$R_0 = k \left(\frac{c}{c+v+p} \right)^2, \quad (1)$$

где R_0 — прочность бетона (раствора) на сжатие,

k — коэффициент, зависящий от качества цемента и заполнителей, c, v и p — абсолютные объемы в бетоне цемента, воды и воздушных пор.

Распространяя эту закономерность как на бетоны, так и на растворы, можно заключить, что при одинаковой плотности цементного теста в бетоне и растворе, прочности их должны быть равны. Из этого следует, что при плотности бетона равной плотности цементного раствора при стандартных испытаниях цемента, предел прочности бетона на сжатие должен равняться марке цемента. При-

мом во внимание, что коэффициент „k“ в выражении (1) совмещает в себе влияние нескольких факторов, главными из которых являются качество цемента и качество заполнителя. Заменим коэффициент „k“ соответственно двумя коэффициентами α и β , из которых первый будет учитывать влияние качества заполнителя, а второй—влияние качества цемента. Примем во внимание также, что из сущности высказанной выше закономерности следует, что прочность бетона правильнее рассматривать как функцию не плотности цементного теста, а плотности цементного камня. Обозначая абсолютный объем цемента в затвердевшем бетоне, т. е. цементного камня через c_k , выражение (1) можем написать в следующем виде:

$$R_b = \alpha\beta \left(\frac{c_k}{c+v+n} \right)^2, \quad (2)$$

или

$$R_b = \alpha\beta\delta^2, \quad (3)$$

где $\delta = \frac{c_k}{c+v+n}$ — плотность цементного камня в бетоне.

Значение коэффициента β определим исходя из высказанных ранее соображений.

Активность цемента представляет собой прочность раствора на нормальном (вольском) песке. Методы приготовления, хранения и испытания образцов из стандартного цементного раствора, равно, как и качество песка, применяемого при изготовлении раствора для установления активности цемента, точно регламентированы.

Поэтому пользуясь выражением (3) и принимая значение коэффициента $\alpha = 1$ можем для прочности стандартного цементного раствора (активности цемента) написать:

$$R_a = \beta\delta_p^2, \quad (4)$$

где δ_p — плотность цементного камня в стандартном цементном растворе.

Из (3) и (4) получим:

$$R_b = \alpha \frac{R_a \delta^2}{\delta_p^2}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что, как указывалось выше, при равных плотностях цементного камня в бетоне и стандартном цементном растворе, т. е. при $\delta = \delta_p$ и при $\alpha = 1$ будет иметь место равенства прочности бетона и активности цемента.

Располагая значениями δ_p и δ и зная марку цемента, можно определить прочность бетона по формуле (5).

Формула (5) может быть упрощена путем введения в нее среднего значения плотности цементного камня в стандартных растворах (в трамбованных образцах).

Это значение плотности цементного камня может быть вычислено, если принять во внимание нижеследующие колебания в составе растворов. Удельный вес цемента колеблется в пределах от 3,0 до 3,1. Удельный вес нормального песка—2,65. Нормальная густота

$$\text{раствора—от } \frac{25}{4} + 1 = 7,25\% \text{ до } \frac{30}{4} + 1 = 8,5\%.$$

Расход воды на сухой замес стандартного раствора весом 4 кг составит от $\frac{7,25 \cdot 4}{100} = 0,290$ кг до $\frac{8,5 \cdot 4}{100} = 0,340$ кг.

Среднее значение объема воздушных пор в стандартных растворах, в соответствии с результатами опытной проверки, составляет 6%.

Значение плотности цементного камня в стандартных растворах вычисляются согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Данные для расчета плотности цементного камня в стандартных растворах

Пропорция исходных материалов	Абсолютные объемы на 1 замес в л		Абсолютные объемы на 1 м ³ раствора в л	
	от	до	от	до
Цемент 1 кг	0,323	0,333	174	173
Нормальный песок 3 кг	1,131	1,151	610	590
Вода от 7,25 до 8,5%	0,290	0,340	156	177
Воздушные поры 6 %	0,111	0,115	60	60

Принимая во внимание данные табл. 1 и учитывая, что коэффициент увеличения абсолютного объема гидратированного цемента в 28-дневном возрасте должен быть принят 1,55 [1] можно вычислить предельные значения плотности цементного камня в стандартных растворах.

Значения их составят:

$$\text{от } \delta_p^2 = \left(\frac{174 \cdot 1,55}{174 + 150 + 60} \right)^2 = 0,48,$$

$$\text{до } \delta_p^2 = \left(\frac{173 \cdot 1,55}{173 + 177 + 60} \right)^2 = 0,43.$$

Примем среднее значение

$$\delta_p^2 = 0,45.$$

Подставляя в (5), получим:

$$R_0 = \alpha \frac{R_u}{0,45} \delta^2. \quad (6)$$

По сравнению с (5) формула (6) более удобна в том отношении,

что для расчета прочности бетона по ней необходимо знать только активность цемента и плотность бетона.

Формула (6) позволяет определить прочность бетона, состав которого уже имеется.

Для использования при проектировании составов бетона формула (6) может быть видоизменена следующим образом.

Плотность цементного камня в бетоне (δ) может быть вычислена, имея расходы цемента и воды и приняв во внимание объем воздушных пор в уплотненном бетоне.

Объем воздушных пор в свежесжатом бетоне составляет не более 2% от его объема, т. е. около 20 л/м³ [2]. Отношение объема воздушных пор к объему цементного теста определится из следующего расчета. Расход цемента для различных марок бетона можно принять от 200 до 500 кг/м³ и расход воды—от 150 до 220 л/м³. Тогда, расход цементного теста на 1 м³ бетона составит от $\frac{200}{3,1} + 150 = 215$ л до $\frac{500}{3,1} + 220 = 381$ л. Соответственно, отношение объема воздушных пор (n) к объему цементного теста составит:

$$\text{от } \frac{n}{c+v} = \frac{20}{215} = 0,0930,$$

$$\text{до } \frac{n}{c+v} = \frac{20}{381} = 0,0525.$$

Среднее значение составит:

$$\frac{n}{c+v} = 0,073.$$

Принимая во внимание найденные значения, а также то, что абсолютный объем цементного камня находится из выражения $C_k = 0,5 \cdot c$ [1], где c —вес цемента в кг на 1 м³ бетона, можно написать новое выражение для определения плотности цементного камня в бетоне.

$$\delta^2 = \left(\frac{c_k}{c+v+n} \right)^2 = \left[\frac{0,5c}{\frac{c}{3,1} + v + \left(\frac{c}{3,1} + v \right) \cdot 0,073} \right]^2 = \left[\frac{0,5c}{\left(\frac{c}{3,1} + v \right) \cdot 1,073} \right]^2,$$

или

$$\delta^2 = 0,22 \left(\frac{3,1 \frac{c}{v}}{3,1 + \frac{c}{v}} \right)^2.$$

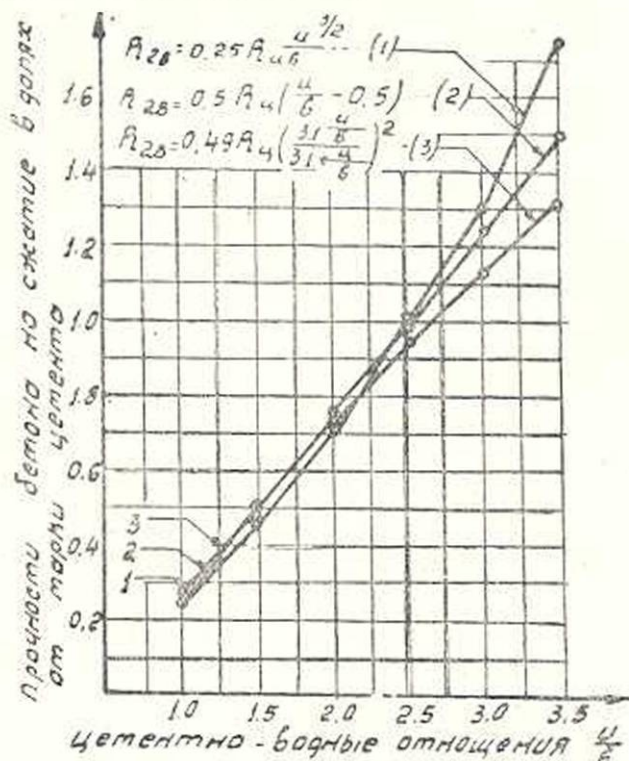
Подставляя найденное значение в (6), получим:

$$R_b = 0,49 \cdot R_n \left(\frac{3,1 \frac{c}{v}}{3,1 + \frac{c}{v}} \right)^2. \quad (7)$$

Формула (7) может быть использована для расчета состава бетона, а формула (6)—для проверки и уточнения рассчитанного состава бетона.

Формула (7) приведена в книге автора и К. С. Завриева [15], но с несколько меньшим значением коэффициента перед α , чем здесь, поскольку при выводе ее в то время автором значение плотности цементного камня в стандартном растворе было принято не среднее, а наибольшее, что приводило к излишним запасам.

На фиг. 1 показаны кривые, построенные по формуле (7) и по формулам, применяемым на практике.



Фиг. 1. Прочности бетона на сжатие в долях от марки цемента, вычисленные по различным расчетным формулам.

На фиг. 1 видно, что выведенная при принятом допущении формула (7) подтверждается известными расчетными формулами, основанными на многочисленных экспериментальных данных, за исключением участков при $\frac{C}{W} = 2.5$ и выше.

Но имеющиеся в литературе указания о том, что расчетные формулы дают преувеличенные значения прочности бетонов над фактическими, имеют в виду именно участки с цементноводными отношениями свыше 2.5. Этим самым полностью подтверждается и приня-

тая при выводе формулы (7) предпосылка о зависимости прочности бетонов на обычных заполнителях от плотности цементного камня.

2. Общие закономерности, связывающие прочность бетонов и входящих в них материалов

То обстоятельство, что установление численного выражения зависимости прочности обычного бетона от плотности цементного камня привело к формуле (7), совпадающей по своим результатам с эмпирическими формулами, свидетельствует о том, что в обычных бетонах влияние других факторов, в том числе и прочности заполнителей, на прочность бетонов сказываются незначительно. Объяснение этому можно дать исходя из третьей гипотезы прочности Б. Г. Скрамтаева [3], подтвержденной результатами опытов Н. В. Свечина [4] и единой теории Я. Б. Фридмана [5].

Согласно третьей гипотезе прочности, разрушение бетона происходит от разрыва при поперечном расширении. При этом могут быть три случая:

- разрушение произойдет вследствие разрыва по цементному камню;
- разрушение произойдет из-за нарушения сцепления между цементным камнем и заполнителем;
- разрушение произойдет вследствие разрыва самих зерен заполнителя.

Поскольку прочность обычных бетонов, как вытекает из выражения (7), зависит только от качества цементного камня, то исходя из сказанного приходим к выводу, что в этих бетонах разрыв происходит по цементному камню, как по наиболее слабому месту и что в них прочность при растяжении цементного камня всегда меньше, чем прочность при растяжении заполнителя.

В таком случае ясно, что в обычных бетонах прочность заполнителя свыше некоторого значения не будет отражаться на прочности бетона, как бы велика не была эта прочность.

Второй случай разрушения обычного бетона, когда происходит не разрыв цементного камня, а отрыв его от заполнителя, следует считать не типичным.

Как показывают опыты, проведенные совместно с Т. Г. Матузовым [6], такое явление, например, может иметь место при обсидиановом заполнителе со стекловидной поверхностью, неприменяемой на практике (фиг. 2).

Если разрушение бетонов на плотных заполнителях хорошо объясняется исходя из третьей гипотезы прочности, то тем более не должно быть оснований для отказа от этой гипотезы прочности при объяснении разрушения бетонов на пористых заполнителях.

Б. Г. Скрамтаев считает, что наиболее применимой к легким бетонам является первая его гипотеза прочности, основанная на допущении распределения нормальных напряжений между цементным камнем и заполнителем пропорционально их модулям упругости.

По мнению автора, допущение, положенное в основу первой гипотезы, приемлемо для изучения упругих свойств и напряженного состояния легкого бетона в промежуточных стадиях его загрузки. В предельном же состоянии, как это подтверждает и картина разрушения образцов из легкого бетона, причиной их разрушения следует считать разрыв при поперечном расширении от сжатия. Иначе говоря, исходя из третьей гипотезы прочности следует объяснить разрушение как обычного, так и легкого бетонов. Однако, в отличие от обычного бетона, прочность пористого заполнителя на растяжение может оказаться меньше прочности на растяжение цементного камня или меньше прочности его сцепления с заполнителем. Вообще случаи разрушения бетонов от недостаточного сцепления цементного камня с заполнителем в легких бетонах следует считать исключенным, тем более, что даже в обычных бетонах этот случай является достаточно редким.

А. И. Ваганов для объяснения разрушения легкого бетона также принимает третью гипотезу прочности, но при этом он считает необходимым учитывать не прочности раствора (скелета) и заполнителя, а характеристики их предельной растяжимости [7]. Исходя из того, что предельная растяжимость заполнителя есть величина постоянная, а предельная растяжимость скелета увеличивается с увеличением его прочности, А. И. Ваганов намечает две фазы: первую, на протяжении которой предельная растяжимость раствора (ϵ_p) меньше, чем предельная растяжимость заполнителя (ϵ_z), и вторую, когда $\epsilon_p > \epsilon_z$.

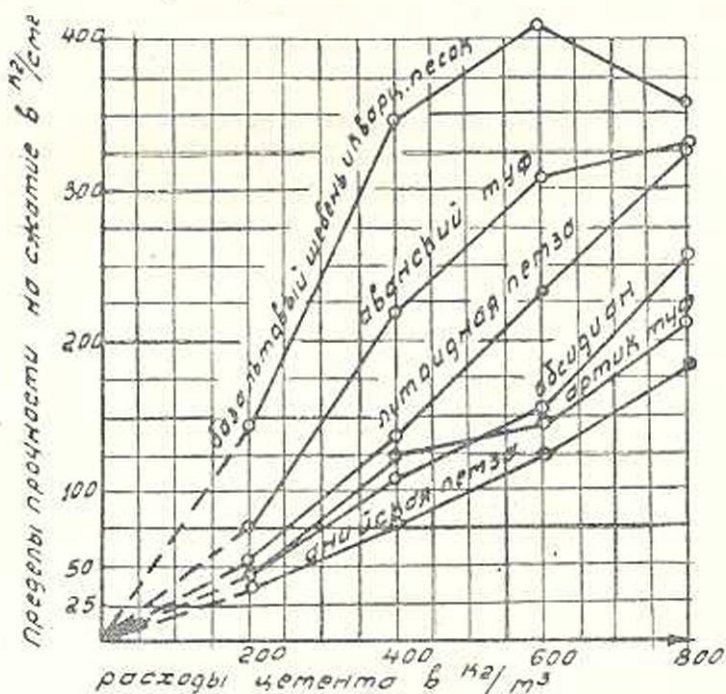
Исходя из этого А. И. Ваганов приходит к выводу, что в течение первой фазы должно иметь место интенсивное нарастание прочности легкого бетона и в течение второй фазы — сильное замедление нарастания его прочности.

Рассмотрение кривых прочностей бетонов и растворов, изготовленных в сравниваемых условиях на различных заполнителях (фиг. 2) показывает наличие первой фазы, т. е. интенсивный рост прочности легких бетонов даже при таких больших расходах цемента, свыше которого теряется практический интерес. Из этого можно заключить, что случаи, когда $\epsilon_p > \epsilon_z$ не являются характерными, а из этого следует, что вместо характеристик деформаций можно рассматривать прочностные характеристики цементного камня и пористого заполнителя.

В соответствии со сказанным, прочность легкого бетона при цементном камне одинаковых качеств будет равна прочности обычного бетона только в случае высокой прочности пористых заполнителей, когда разрыв при поперечном расширении опять-таки будет происходить по цементному камню.

Вообще же прочность легкого бетона будет ниже прочности обычного бетона, поскольку при разрушении его разрыв произойдет частично по цементному камню и частично по заполнителю.

Основываясь на вышесказанных соображениях можно написать общий вид зависимости прочности легких бетонов от основных обуславливающих ее факторов:



Фиг. 2. Кривые прочности на сжатие в 28-дн. возрасте бетонов на различных видах заполнителей.

$$R_b = \frac{R_{ц}}{0,45} \left(\frac{c_k}{c+v+n} \right)^2 \mu_{ц} + R_a (1 - \mu_{ц}) \dots \quad (8)$$

где $\mu_{ц}$ — объем цементного камня и части заполнителя, прочность на растяжение которого в бетоне данной марки превышает прочность цементного камня на растяжение.

Считая, что соотношение между площадями, занимаемыми в поперечном сечении бетона цементным камнем и означенной частью заполнителя, пропорциональны занимаемым им в бетоне объемам, коэффициент $\mu_{ц}$ следует рассматривать как показатель отношения площади разрыва по цементному камню ко всей площади разрыва.

Если расход цементного теста в л/м³ обозначить через t , то можно написать условие

$$\frac{t}{1000} < \mu_{ц} < 1. \quad (9)$$

Из (9) следует, что в легких бетонах предельными являются следующие два случая:

а) верхний предел

$$\mu_{ц} = 1. \quad (10)$$

В этом случае разрыв будет полностью проходить по цементному камню и прочность легкого бетона в сравниваемых условиях будет равна прочности обычного бетона. Подставив выражение (10) в общий вид зависимости (8), получим то же выражение, что и для обычного бетона, а именно:

$$R\delta = \frac{R_n}{0,45} \left(\frac{c_k}{c+v+n} \right)^2 = 0,49 R_n \left(\frac{3,1 \frac{c}{v}}{3,1 + \frac{c}{v}} \right)^2 \quad (11)$$

б) нижний предел:

$$\mu_n = \frac{t}{1000} \quad (12)$$

В этом случае разрыв будет происходить как по цементному камню, так и по всем без исключения зернам заполнителя, расположенным в сечении, по которому произошел разрыв бетона. При этом, прочность бетона, повидимому, должна быть наиболее низкой, поскольку прочность на растяжение заполнителя в данном случае является меньшей, чем прочность на растяжение цементного камня.

Иначе говоря, можно написать:

$$R_n (1 - \mu_n) \leq \frac{R_n}{0,45} \left(\frac{c_k}{c+v+n} \right)^2 (1 - \mu_n) \dots \quad (13)$$

Формула (8) показывает, что в общем случае, если прочность обычного бетона зависит только от прочности цементного камня, то прочность легкого бетона зависит как от прочности цементного камня, так и от прочности заполнителя.

Исходя из формулы (8) можно сделать следующие выводы.

При увеличении расхода цемента, поскольку расход воды при этом растет незначительно, будет иметь место увеличение прочности цементного камня и соответственно увеличение разницы в прочностях цементного камня и заполнителя. Поэтому, с увеличением расхода цемента будет увеличиваться площадь разрыва по заполнителю, причем, если в начальной стадии разрывались только крупные зерна заполнителей, как наиболее слабые, то по мере увеличения расхода цемента предельного состояния на разрыв будут достигать зерна со все меньшими размерами. В конечном итоге, в легких бетонах, в определенных интервалах может иметь место линейная зависимость между прочностью бетона и расходом цемента, что и подтверждается опытными данными.

Углы наклона прямых, как это видно из фиг. 2, определяются соотношениями прочностей цементного камня и заполнителей.

Тенденция к нарастанию интенсивности увеличения прочности бетона с увеличением расхода цемента, заметна для наиболее низкопрочного пористого заполнителя и тенденция к затуханию нара-

стания интенсивности его — для наиболее высокопрочного пористого заполнителя.

Сказанное объясняется следующим.

При наиболее высокопрочных пористых заполнителях значение коэффициента μ_n приближается к верхнему пределу $\mu_n = 1$. В этом случае разрыв будет происходить почти целиком по цементному камню, минуя зерна заполнителя. Поэтому, поскольку площадь разрыва по цементному камню будет оставаться неизменной, то увеличение прочности бетона при увеличении расхода цемента будет иметь место только за счет увеличения плотности цементного камня, как в обычных бетонах. Однако, как это видно из фиг. 2, увеличение расхода цемента в бетоне свыше определенного количества (в обычном бетоне свыше $500-600 \text{ кг/м}^3$) приводит к затуханию роста и даже уменьшению плотности цементного камня, поскольку зерна цемента начинают раздвигать зерна заполнителя, увеличивая при этом суммарный объем пустот в бетонной смеси. Поэтому, чем высокопрочнее пористый заполнитель, тем скорее начинается затухание интенсивности роста прочности бетона.

При наиболее низкопрочных пористых заполнителях значение коэффициента μ_n приближается к нижнему пределу $\mu_n = \frac{t}{1000}$.

В этом случае разрыв происходит почти через все зерна заполнителя, расположенные в плоскости разрыва. Поэтому увеличение расхода цемента будет приводить к увеличению прочности бетона под влиянием двух факторов: увеличения плотности цементного камня и увеличения площади занимаемой цементным камнем.

Так как фактор увеличения плотности цементного камня, в соответствии с описанным в предыдущем случае, имеет затухающий характер, а фактор увеличения площади — равномерно нарастающий характер, то под совместным влиянием обоих факторов ослабление интенсивности увеличения прочности при низкопрочных заполнителях может наступить позже, чем при высокопрочных заполнителях.

И действительно, для бетонов на ангийской пемзе при расходах цемента вплоть до 800 кг/м^3 интенсивность увеличения прочности оказалась нарастающей.

В заключение следует отметить, что как указывалось выше, при цементном камне одинаковых качеств, прочность легкого бетона будет равна прочности обычного бетона в пределе, когда вследствие высокой прочности пористых заполнителей разрыв при поперечном расширении происходит целиком по цементному камню. Однако качество цементного камня в легких бетонах при одинаковых условиях может быть выше, чем в обычных бетонах, вследствие явления самовакуумирования. Поэтому при одинаковых расходах цемента и консистенции, прочность легкого бетона в пределе может быть не только равной, но и превосходить прочность обычного бетона, в особенности при относительно низких расходах цемента.

3. Расчет прочности легких бетонов

Из предыдущего видно, что качества бетонов на пористых заполнителях находятся в более сложной зависимости от качества их составляющих, чем для обычных бетонов. Поэтому расчеты прочности легких бетонов могут быть сделаны с меньшей точностью.

В предыдущей части было пояснено, что для легких бетонов в известном интервале зависимость между прочностью бетона и расходом цемента в нем может иметь линейный характер, что упрощает построение расчетных формул.

В соответствии с этим и исходя из удобства применения на практике, расчетные формулы целесообразно принять отвечающими уравнению прямой вида

$$R = kc + b, \quad (14)$$

где k —характеристика угла, образуемого прямой с осью расхода цемента;

b —отрезок, отсекаемый прямой на оси прочности бетонов и имеющий как положительный, так и отрицательный знаки.

Расчетные формулы типа (14) автором были разработаны и опубликованы для пемзобетона и арктикуфобетона еще в 1937 году [8].

В соответствии с экспериментальными данными, на основе которых они были тогда построены, формулы эти считались действительными только при марках не превышающих для пемзобетона „70“ и для арктикуфобетона „90“, с консистенцией принимаемой в монолитном железобетонном строительстве при ручном уплотнении бетона. Проведенные в дальнейшем опыты показали, что означенные формулы остаются в силе при расходах цемента вплоть до 800 кг/м^3 .

В течение истекших лет для легких бетонов предложены различные эмпирические формулы. Схематично эти формулы можно свести к следующим группам:

$$R = k_0 R_n \left(\frac{c}{b} - A \right) - \text{Н. А. Попов и Г. Д. Цискрели [9, 10],}$$

$$R = \varphi R_n c - \text{Н. С. Годзиев [11],}$$

$$R = \frac{R_n}{3} \left[\sqrt{1 + 6,6 \frac{R_n}{R_3} \left(\frac{c}{b} - 0,5 \right)} - 1 \right] - \text{В. М. Худавердян [12].}$$

В этих формулах под $\frac{c}{b}$ подразумевается „истинное“ цементно-водное отношение, учитывающее только ту часть воды, которая удерживается цементным тестом (без учета воды, отсасываемой заполнителем). Кроме того, во всех этих формулах влияние заполнителей учитывается коэффициентами, кроме формулы В. М. Худавердяна, в которой зависимость прочности легкого бетона от прочности заполнителя дается в явной форме.

В той общей форме, в которой ставится здесь вопрос, в особенности для сравнения между собой различных видов легких бетонов, наиболее целесообразным следует признать расчетные формулы типа (14). Ниже приводятся рекомендуемые расчетные формулы указанного типа для легких бетонов изготовленных на основных видах пористых заполнителей. При этом, кроме собственных экспериментальных данных использованы также данные других авторов.

Приводим эти формулы.

Для бетонов на ангийской пемзе или на каменноугольных шлаках:

$$R = 0,01 \sqrt{R_n} \cdot c + 10. \quad (15)$$

Для бетонов на арктической туфолаве:

$$R = 0,012 \sqrt{R_n} \cdot c + 10. \quad (16)$$

Для бетонов на керамзитовом гравии:

$$R = 0,013 \sqrt{R_n} \cdot c + 10. \quad (17)$$

Для бетонов на керамзитовом щебне:

$$R = 0,015 \sqrt{R_n} \cdot c + 10. \quad (18)$$

Для бетонов на вулканических туфах, с различными пределами прочности на сжатие (R_s):

$$\text{при } R_s = 70 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,024 \sqrt{R_n} \cdot c; \quad (19)$$

$$\text{при } R_s = 95 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,028 \sqrt{R_n} \cdot c - 10; \quad (20)$$

$$\text{при } R_s = 131 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,030 \sqrt{R_n} \cdot c - 10; \quad (21)$$

$$\text{при } R_s = 164 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,036 \sqrt{R_n} \cdot c - 30; \quad (22)$$

$$\text{при } R_s = 211 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,038 \sqrt{R_n} \cdot c - 40; \quad (23)$$

$$\text{при } R_s = 262 \text{ кг/см}^2 \quad R = 0,050 \sqrt{R_n} \cdot c - 8; \quad (24)$$

$$\text{Для бетонов на литой пемзе } R = 0,036 \sqrt{R_n} \cdot c - 30. \quad (25)$$

Формулы (19)–(24) для бетонов на вулканических туфах выведены на основе экспериментальных данных В. М. Худавердяна [13]. В формуле (25) частично использованы данные А. А. Аракеляна [14].

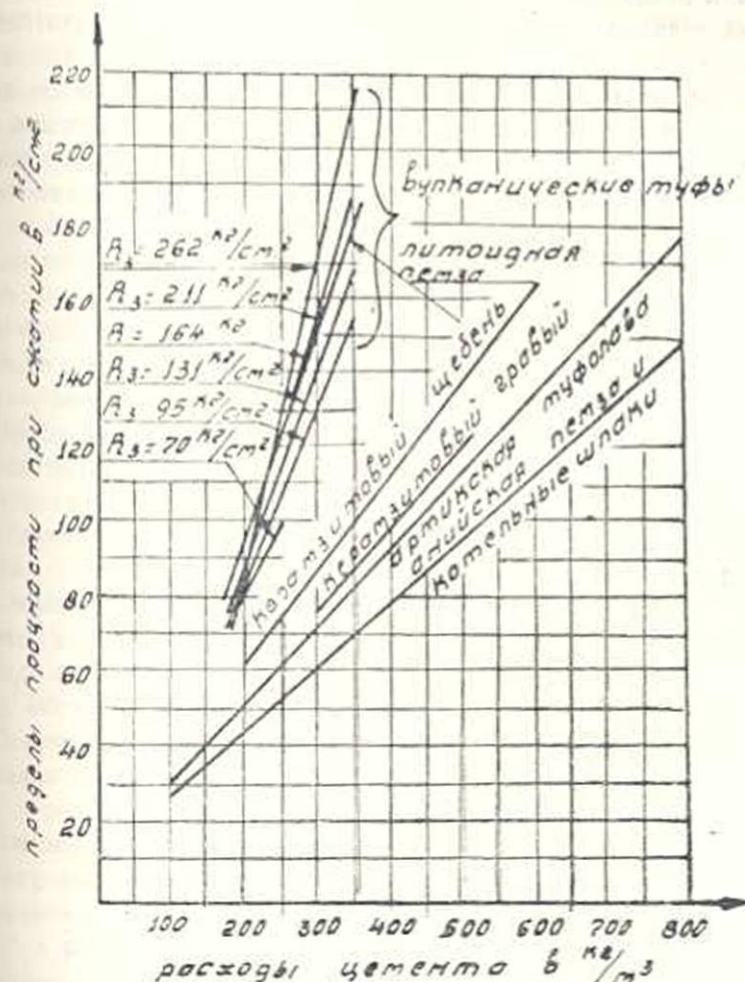
Как показывают формулы (25) и (22), для бетонов на литой пемзе пределы прочности на сжатие получаются одинаковыми с бетонами на вулканических туфах при $R_s = 164 \text{ кг/см}^2$, т. е. на вулканических туфах одинаковой прочности с литой пемзой ($R_s = 150 \text{ кг/см}^2$).

На основании расчетных формул (15)–(25) составлен сводный график прочностей на сжатие бетонов, изготовленных на различных видах заполнителей и цемента марки „300“. Длина прямых для каждого вида легкого бетона принята в соответствии с пределами, в которых они обоснованы экспериментальными данными.

Фиг. 3. позволяет получить наглядное представление о сравнительной прочности легких бетонов, изготовленных на различных видах пористых заполнителей.

При выводе формул (15)–(25) принимались в расчет консистенция бетонной смеси, характеризующаяся осадкой конуса около 3 см и наибольшая крупность зерен заполнителя до 40 мм.

При проектировании составов легких бетонов с использованием расчетных формул (15)–(25) необходимо иметь в виду нижеследующее:



Фиг. 3. Пределы прочности на сжатие в 28-дневном возрасте различных видов легких бетонов по эмпирическим формулам.

а) О водопотребности легких бетонов.

Абсолютные значения водопотребности бетонов на пористых заполнителях в 1,5–2 раза превышают водопотребности обычных бетонов. При этом указанная разница в водопотребностях имеет место для получения начальной подвижности и во всяком случае для подвижности с осадкой не более 3 см; дальнейшее увеличение подвижности бетонной смеси для обычных и легких бетонов требует примерно одинакового количества воды.

При увеличении расхода цемента с 200 до 800 кг/м^3 расход воды в легких бетонах одной и той же консистенции увеличивается

на 10—25%, в то время как при тех же условиях в обычных бетонах расход воды увеличивается на 40—45%. В тех же случаях расход воды в легких и обычных растворах остается без изменения, с некоторой тенденцией уменьшения при повышении расхода цемента с 200 до 600 кг/м³.

б) О влиянии консистенции на прочность легких бетонов.

Наибольшая прочность легких бетонов соответствует консистенции их, при которой при принятом методе уплотнения достигается наибольшая плотность. В строительной практике, в особенности при изготовлении сборных изделий из легкого железобетона, консистенция легкого бетона может быть принята с меньшими осадками, чем принятая при выводе расчетных формул (15)—(25). С другой стороны, могут потребоваться и более разжиженные бетонные смеси. В соответствии с этим, прочности легких бетонов могут быть и большими и меньшими, чем вычисляемые по приведенным формулам.

в) Влияние вида и крупности заполнителя на качества бетона.

Вид заполнителя оказывает на прочность и другие качества легкого бетона почти столь же существенное влияние, как и расход цемента. Чем прочнее легкие заполнители, тем прочнее изготавливаемые на их основе бетоны.

Так как прочность заполнителей в свою очередь зависит от их плотности, то вид заполнителя влияет как на прочность, так и на весовые характеристики бетона.

Влияние вида легких заполнителей на качества бетона усложняется тем, что качества самих заполнителей в отношении прочности, объемного веса, водоотсасывания и водоотдачи зависят от строения заполнителя.

Расчетный объемный вес легких бетонов, т. е. объемный вес легких бетонов, устанавливающийся в эксплуатационных условиях, по данным автора, может быть вычислен грубо приближенно по формуле:

$$\gamma_{\text{расч}} = \frac{3 + 1,5\alpha}{1000}, \quad (26)$$

где $\gamma_{\text{расч}}$ — объемный вес в т/м³,

α и α — веса заполнителя и цемента в кг на 1 м³ бетона.

Наибольшая крупность зерен заполнителя должна устанавливаться исходя не только из толщины конструкции и густоты арматуры, но и из марки бетона: чем низкопрочнее заполнитель и выше требуемая марка бетона, тем в большей мере должна быть ограничена наибольшая крупность зерен заполнителя.

В тех случаях, когда для бетонов основным является не прочностный, а весовой показатель, к заполнителям должны быть предъявлены иные требования: заполнитель должен быть выбран наиболее легковесный, а содержание крупных зерен должно быть доведено до максимально возможного значения.

г) О влиянии зернового состава заполнителя.

При выборе отношения между песком и щебнем оптимальным следует считать отношение, дающее минимальный выход смеси, как обеспечивающий минимальную пустотность. Содержание мелких и пылевидных частиц в заполнителе весьма благоприятно сказывается на удобоукладываемости и прочности бетонов. Поэтому при применении пористых заполнителей более важно ограничивать не максимальное, а минимальное их содержание. Оптимальное количество пылевидных частиц зависит от расхода цемента и области применения: в растворах содержание их должно быть большим, чем в бетонах, поскольку смесь песка и щебня обладают меньшей пустотностью, чем отдельно взятый песок. Для предварительных расчетов можно принять, что содержание цемента и пылевидных частиц ($< 0,15$ мм) в сумме должно быть: в бетонах—не менее 300 кг/м^3 и в растворах—не менее 400 кг/м^3 .

При относительно невысоких расходах цемента фактор плотности бетона имеет большее значение, чем фактор прочности заполнителя. Иначе говоря при относительно невысоких расходах цемента бетоны и, в особенности, растворы на высокопрочных заполнителях, содержащих недостаточное количество пылевидных частиц, могут обладать меньшей прочностью, чем бетоны (растворы) на низкопрочных заполнителях, но содержащих оптимальное количество пылевидных частиц.

д) Об уплотнении бетонной смеси.

Вопросу уплотняемости бетонной смеси как на легких, так и на обычных заполнителях посвящена специальная работа автора [2]. Здесь необходимо отметить, что, в особенности при слабо разжиженных смесях, уплотнение различными методами, при одной и той же объемной дозировке бетонной смеси, может привести к различному уменьшению объема смеси (коэффициенту выхода) и соответственно к различному содержанию цемента в единице объема бетона в уплотненном виде. Прочности бетона при этом будут соответствовать фактическому содержанию цемента, независимо от того каким методом уплотнялась бетонная смесь. Поэтому о составах бетонов необходимо судить не по принимаемой пропорции исходных материалов, а по фактическому расходу материалов в единице объема бетона, уплотненного в условиях подобных производственным.

Институт строительных материалов
и сооружений АН Армянской ССР

Поступило 18 XII 1952

ЛИТЕРАТУРА

1. Симонов М. З. Седиментационные процессы в цементном тесте и возможности их регулирования. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. VI, № 4, 1953.
2. Симонов М. З. Элементы теории подвижности и уплотняемости бетонной смеси. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. VI, № 3, 1953.

3. Скрамтаев Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси, Москва, 1936.
4. Свечин Н. В. К вопросу наименьшей прочности заполнителя бетона. Сборник статей „Исследования по технологии бетона“, ЦНИПС, Стройиздат, 1950.
5. Фридман Я. Б. Единая теория прочности материалов. Оборонгиз, 1943.
6. Симонов М. З. и Матузов Т. Г. Высокопрочные бетоны на пористых заполнителях для тонкостенных сборных железобетонных конструкций. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. V, № 1, 1952.
7. Ваганов А. И. Теория прочности керамзитобетона на экспериментальной основе. Труды Центрального научно-исследовательского института речного флота. Вып. XV. Сборник статей по корпусу речного судна, М.—Л., 1952.
8. Симонов М. З. Конструкции и сооружения из легкого железобетона (Инструкция по проектированию и возведению). ТНИС, Тбилиси, 1937.
9. Попов Н. А. Новые виды легких бетонов, Москва, 1939.
10. Цискрели Г. Д. Вопросы проектирования легкого бетона. Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям, ч. III, Стройиздат, 1949.
11. Годзиш Н. С. Вибрирование легких бетонов, Москва, 1951.
12. Худавердян В. М. Принципы проектирования составов туфобетонов. Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям, ч. III, Стройиздат, 1949.
13. Худавердян В. М. Применение туфобетонов в строительстве. Отчет АИС, 1947.
14. Аракелян А. А. Гидротехнический бетон на литондной немзе вибрационной укладки (результаты дополнительных опытов). Отчет № 4, АИС, 1953.
15. Заариев К. С. и Симонов М. З. Проектирование составов бетона. Тбилиси, 1948.

Մ. Զ. ՍԻՄՈՆՈՎ

ԲԵՏՈՆՆԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՀԱՐՑԵՐԸ

Ա. Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Խիտ կազմութիւն ունեցող լցիչներով պատրաստած բետոնի ամրութիւնը պայմանավորված է ցեմենտաքարի խտությամբ: Ելնելով գրանից, արածոված է հաշվարկային ֆորմուլա, որ հաստատվում է հայտնի էմպիրիկ ֆորմուլաներով:

Ծակոտիկէն լցիչներով պատրաստած բետոնի ամրութիւնը պայմանավորվում է ոչ միայն ցեմենտաքարի խտությամբ, այլև լցիչի ամրությամբ և կազմությամբ: Կիրառելով ամրության երրորդ հիպոթեզը թեթև բետոնների նկատմամբ, կարելի է բացատրել նրանց ամրության կորերի բնույթը:

Գործնական նպատակների համար թեթև բետոնների կազմության նախազեւմը կարելի է կատարել, ելնելով նրանց ամրության և ցեմենտի ծախսի միջև եղած զժային կապից: Հոգովածում բերվում են զանազան ծակոտիկէն լցիչներով պատրաստած բետոնների կազմութիւնը հաշվելու ֆորմուլաներ: