

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

З. А. Ацагорцян

Определение оптимальной марки цемента

Развитие цементной промышленности СССР за последние годы привело к значительному расширению ассортимента выпускаемой продукции. Основной вид цемента—портландцемент—выпускается разнообразных марок, с пределом прочности сжатию нормальных образцов от 200 до 600 кг/см².

Имея большой выбор, строители должны уметь в каждом случае определить наиболее рациональную для данных условий марку цемента. При решении этой задачи главным является соображение экономики. Широкое движение за экономию в промышленности и во всем народном хозяйстве обязывает вплотную заняться вопросом экономически наивыгоднейшей марки цемента для бетонных и железобетонных конструкций. Имеющиеся до сих пор в технической литературе соображения по затронутому вопросу являются слишком общими [1, 2, 3].

В настоящей работе мы постарались разобрать вопрос более детально и дать математические выражения для определения оптимальной марки портландцемента для различных видов и марок бетонов.

Введем обозначения:

S_0 — стоимость единицы объема бетона,

K_c — цена единицы веса цемента,

K_m — цена единицы объема гравия (щебня),

K_s — цена единицы объема песка,

c — расход цемента по весу на единицу объема бетона,

g — расход гравия (щебня) по объему на единицу объема бетона,

s — расход песка по объему на единицу объема бетона,

T — стоимость труда, затрачиваемого на приготовление, транспорт и укладку бетона.

Тогда для стоимости единицы объема бетона можно записать следующее выражение:

$$S_0 = cK_c + gK_m + sK_s + T. \quad (1)$$

Если соотношение объемов песка и щебня обозначить через α , коэффициент выхода бетона через β и объемный вес цемента при дозировке через γ , то сумма объемов материалов в единице объема бетона выразится уравнением:

$$\left(\frac{c}{\gamma} + g + s\right)\beta = 1,$$

откуда

$$g = \frac{1 - \beta \frac{c}{\gamma}}{\beta(1 + \alpha)}, \quad (2)$$

$$s = \frac{\left(1 - \beta \frac{c}{\gamma}\right)\alpha}{\beta(1 + \alpha)}. \quad (3)$$

Подставляя значения (2) и (3) в выражение (1), имеем:

$$S_0 = cK_n + \frac{1 - \beta \frac{c}{\gamma}}{\beta(1 + \alpha)} (K_m + \alpha K_n). \quad (4)$$

Для того, чтобы уравнение (4) привести к виду, пригодному для определения оптимальной марки цемента, необходимо расшифровать в нем значение c , выразив его через марку цемента — R_n .

Зависимость между расходом цемента и его маркой будет различна для различных видов бетона; поэтому дальнейший разбор вопроса нам необходимо провести раздельно для каждого вида бетона.

Тяжелый и легкий бетоны на сравнительно прочных заполнителях

Для обычного тяжелого бетона существует ряд формул зависимости прочности бетона от его состава; пользуясь ими, можно вывести зависимость между расходом цемента и его маркой. Наиболее простой и употребительной из формул прочности бетона является следующая:

$$R = kR_n \left(\frac{c}{w} - 0,5\right), \quad (5)$$

где R — марка бетона,

k — коэффициент, принимаемый 0,5 при употреблении гравия и 0,55 при щебне,

$\frac{c}{w}$ — цементно-водный фактор.

Из этой формулы получается

$$c = w \left(\frac{R}{kR_n} + 0,5\right). \quad (6)$$

Исследованиями по технологии бетона установлено, что расход цемента для получения заданной марки и консистенции бетона не меняется при переходе от гравия к щебню одинаковой грануляции.

Увеличение водопотребности (w) во втором случае компенсируется улучшением сцепления цементного теста с крупным заполнителем. Поэтому формула (6) сохранит свою универсальность, если принять $K=0,5$ и под w подразумевать водопотребность бетона при употреблении гравия. Тогда

$$c = w \left(2 \frac{R}{R_u} + 0,5 \right). \quad (6-a)$$

Эта формула дает нам зависимость между расходом и маркой цемента при заданной марке тяжелого бетона и его консистенции. Последняя, как известно, при данных заполнителях, практически однозначно определяется водопотребностью (w).

Формула (6-a) применима также к легким бетонам, если прочность заполнителя превышает в определенной степени прочность бетона. В этом случае, как доказано работами АИС [4,6], формула прочности тяжелого бетона сохраняет свою силу и для легких бетонов (в частности туфобетонов).

Подставляя значение расхода цемента по формуле (6-a) в выражение стоимости бетона (4), после преобразований получим:

$$S_6 = \frac{R}{R_u} \cdot 2w \left[K_n - \frac{K_m + \alpha K_n}{\gamma(1 + \alpha)} \right] + 0,5w \left(K_n - \frac{K_m + \alpha K_n}{1 + \alpha} \right) + \frac{K_m + \alpha K_n}{\beta(1 + \alpha)} + T.$$

Для краткости введя обозначения

$$A = 2w \left[K_n - \frac{K_m + \alpha K_n}{\gamma(1 + \alpha)} \right], \quad (7)$$

$$B = 0,5w \left(K_n - \frac{K_m + \alpha K_n}{1 + \alpha} \right) + \frac{K_m + \alpha K_n}{\beta(1 + \alpha)} + T, \quad (8)$$

можем писать

$$S_6 = A \frac{R}{R_u} + B. \quad (9)$$

Формула (9) дает четкую зависимость стоимости тяжелого бетона от марки бетона и марки цемента.

Для экономических подсчетов, в частности для определения оптимальной марки цемента, можно значительно упростить выражения (7) и (8). В этих целях можно принять средние значения следующих величин $w = 0,2 \text{ м}^3$ (для пластичной консистенции бетона), $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,62$, $\gamma = 1,3 \text{ т/м}^3$. При этом, обозначив $K_m + \alpha K_n = K_0$, получим (с некоторым округлением):

$$A = 0,4K_n - 0,2K_0, \quad (7a)$$

$$B = 0,1K_n + K_0 + T. \quad (8a)$$

Пользуясь формулой (9) и выражениями (7-а) и (8-а), легко подсчитать стоимость бетона заданной марки при разных марках цемента (от 200 до 600) и таким образом выяснить оптимальную марку цемента, дающую минимальную стоимость бетона. При этом цены на материалы могут быть приняты для каких-либо средних условий строительства, т. к. их изменение практически не влияет на величину оптимальной марки цемента.

Пемзобетон

Для пемзобетона имеется следующая формула прочности, данная М. З. Симоновым [5]:

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

Здесь c — выражается в $кг/м^3$. Из этой формулы, выразив c в $т/м^3$, получается

$$c = \frac{R - 10}{10\sqrt{R_n}}. \quad (10)$$

Подставляя это значение расхода цемента в выражение стоимости бетона (4), имеем:

$$S_6 = \frac{R - 10}{\sqrt{R_n}} \left[\frac{K_n}{10} - \frac{K_m + \alpha K_n}{10\gamma(1 + \alpha)} \right] + \frac{K_m + \alpha K_n}{\beta(1 + \alpha)} + T.$$

Введя обозначения:

$$A_1 = 0,1K_n - \frac{K_m + \alpha K_n}{10\gamma(1 + \alpha)} \quad \text{и} \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{K_0}{\beta(1 + \alpha)} + T, \quad (12)$$

можем писать для пемзобетона

$$S_6 = A_1 \frac{R - 10}{\sqrt{R_n}} + B_1. \quad (13)$$

Значения коэффициентов A_1 и B_1 могут быть конкретизированы аналогично предыдущему случаю:

$$A_1 = 0,1K_n - 0,06K_0 \quad (11-а)$$

$$B_1 = 1,1K_0 + T. \quad (12-а)$$

Арктикуфобетон

Для бетона на заполнителях, изготовленных из арктического туфа, существует формула прочности, аналогичная приведенной выше для пемзобетона [5]:

$$R = 0,012\sqrt{R_u} \cdot c + 10.$$

Отсюда, если выразить c в τ/μ^3 , то

$$c = \frac{R - 10}{12\sqrt{R_u}}. \quad (14)$$

Пользуясь этим выражением, для стоимости арктифобетона получаем следующую формулу:

$$S_6 = A_2 \frac{R - 10}{\sqrt{R_u}} + B_2, \quad (15)$$

где

$$A_2 = \frac{1}{12} K_u - 0,05K_0, \quad (16)$$

$$B_2 = 1,1K_0 + T. \quad (17)$$

Туфобетон на сравнительно слабом заполнителе

На основе экспериментальной работы, проведенной над туфобетонами [6], В. М. Худавердяном предложена формула прочности этих бетонов, в которой в качестве параметра фигурирует также прочность заполнителя R_0 :

$$R = \frac{R_0}{3} \left[\sqrt{1 + 6,6 \frac{R_u}{R_0} \left(\frac{c}{w} - 0,5 \right)} - 1 \right] \quad (18)$$

Эта формула применима для значений $R_0 \leq 1,5R$. Когда $R_0 > 1,5R$, как указано было выше, может быть применена формула прочности тяжелого бетона. При $R_0 = 1,5$ формула (18) превращается в формулу (5).

Решая уравнение (18) относительно c , имеем:

$$c = \left(1,36 \frac{R^2}{R_u R_0} + 0,91 \frac{R}{R_u} + 0,5 \right) w \quad (19)$$

Подставив это значение в уравнение (4) и принимая те же средние величины, получим формулу:

$$S_6 = A_3 \frac{R^2}{R_u R_0} + B_3 \frac{R}{R_u} + D, \quad (20)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= 0,29K_u - 0,15K_0 \\ B_3 &= 0,19K_u - 0,1K_0 \\ D &= 0,1K_u + K_0 + T \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Минимальный расход цемента

Выбирая оптимальную марку цемента, необходимо учитывать также минимально допустимый расход цемента в бетоне. Если при

оптимальной по формулам марке цемента потребный его расход получается ниже установленного Техническими Условиями минимального предела, то должна быть выбрана марка цемента—соответствующая минимальному расходу. Это будет верхний предел целесообразных марок цемента.

Для каждого вида и марки бетона этот верхний предел будет различен. Его можно определить, исходя из формул: (6), (10), (14) и (19), подставив в них значения минимального расхода цемента, допустимого по ТУ, и расход воды, в зависимости от требуемой консистенции бетона и свойств материалов.

Как известно, ТУ [3] дают величины минимального расхода цемента на 1 м^3 обычного тяжелого бетона, в зависимости от характера конструкции и способа бетонирования. В таблице 1 приводим эти величины, а также определенные по указанным выше формулам предельные марки цемента (макс $R_{ц}$), выраженные через марку бетона. Макс $R_{ц}$ даны для бетонов пластичной консистенции, укладываемых без вибрирования, при средней грануляции заполнителей (принимая $w = 100 \text{ л}$). Эти предельные марки цемента могут быть приняты также для бетонов, укладываемых с вибрированием, т. к. при этом уменьшение оптимального расхода цемента сопровождается соответствующим уменьшением потребного количества воды.

Таблица 1

№№ п/п	Характер конструкции	Минимальный расход цемента в $\text{кг}/\text{м}^3$		Предельная марка цемента—макс $R_{ц}$
		при бетонировании с вибрированием	при ручной укладке бетона	
1	Для конструкций, находящихся в непосредственном соприкосновении с водой и подверженных частому замерзанию	240	265	2,4R
2	Для обычных конструкций, не защищенных от атмосферных воздействий	220	250	2,7R
3	Для конструкций, защищенных от атмосферных воздействий	200	220	3,3R

Для легких бетонов, согласно „Инструкции по применению Норм и Технических Условий проектирования железобетонных 88 конструкций“ (1940), минимальным расходом цемента является $150 \text{ кг}/\text{м}^3$, при условии наличия суммы пылевидных и цемента не менее $300 \text{ кг}/\text{м}^3$. Исходя из этого получается:

для пемзобетона

$$\text{макс}R_n = 0,45(R - 10)^2, \quad (22)$$

для арктикуфобетона

$$\text{макс}R_n = 0,31(R - 10)^2, \quad (23)$$

для туфобетона на сравнительно прочном заполнителе (при $R_0 \geq 1,5R$).

$$\text{макс}R_n = 8R, \quad (24)$$

для туфобетона на сравнительно слабом заполнителе (при $R_0 < 1,5R$):

$$\text{макс}R_n = \frac{R}{45} \left(286 \frac{R}{R_0} + 191 \right). \quad (25)$$

Определяя по приведенным формулам $\text{макс}R_n$ для легких бетонов, получим следующие значения (таблица 2):

Таблица 2

Вид легкого бетона	макс R_n для марок бетона:			
	50	70	90	110
Пемзобетон	710	1600	—	—
Арктикуфобетон	494	1110	2000	—
Туфобетон				
при $R_0 > 1,5R$	400	560	720	880
при $R_0 = 50 \text{ кг/см}^2$	530	920	1410	2000
при $R_0 = 75 \text{ кг/см}^2$	425	712	1070	1490
при $R_0 = 100 \text{ кг/см}^2$	—	610	896	1236
при $R_0 = 125 \text{ кг/см}^2$	—	—	794	1083

Таблицы 1 и 2 дают верхние пределы, которые необходимо учитывать при определении оптимальных марок цемента по нашим формулам.

Для иллюстрации применения выведенных формул ниже приводим расчет оптимальных марок цемента для условий г. Еревана.

Как было сказано выше, изменения стоимости материалов, в зависимости от географического расположения строительства, практически не влияют на величину оптимальной марки цемента. Поэтому полученные нами результаты могут быть обобщены хотя бы для всей Армянской ССР. Для расчетов стоимость материалов принята согласно ценнику, составленному „Коммунарпроект“ (в ценах 1949 г.), и дополнительным калькуляциям, составленным нами.

Стоимость цемента различных марок франко-приобъектный склад для средних условий г. Еревана (городской район) представляется в следующем виде (таблица 3):

Таблица 3

Марка цемента $R_{ц}$	200	250	300	400	500	600
Стоимость цемента $R_{ц}$	193—40	212—89	233—42	259—07	287—80	326—80

Значения $K_0 = K_{ц} + \alpha K_n$, определенные для различных заполнителей, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Род заполнителя	K_0
Пемза	47—23
Туфолава (арктический туф)	56—93
Туф	41—16
Тяжелые заполнители	71—90

Среднее значение T , по нашим калькуляциям, принято для тяжелого бетона и туфобетона 8—50, для пемзобетона и арктикуфобетона 8—00.

Исходя из указанных цифр, на основе приведенных выше формул (9), (13), (15) и (20), нами произведены расчеты стоимости бетонов на цементе различных марок.

Результаты расчетов приведены в таблицах 5—9.

Таблица 5

Стоимость тяжелого бетона

Марка бетона	Марка цемента	200	250	300	400	500	600
	90	128,1	127,2	127,4	126,4	127,3	130,5
110	134,4	132,8	132,7	130,8	131,4	134,4	
140	143,8	141,3	140,6	137,5	137,4	140,2	
170	153,2	149,8	148,5	144,2	143,5	146,0	
200	162,7	158,3	156,4	150,9	149,5	151,8	
250	178,4	172,5	169,5	162,1	159,6	161,5	
300	194,2	186,6	182,7	173,2	169,7	171,2	
400	225,7	215,0	209,0	195,6	189,9	190,6	
500	257,2	243,4	235,4	217,9	210,0	210,1	
600	288,7	271,7	261,7	240,2	230,3	229,4	

Таблица 6

Стоимость туфобетона на сравнительно прочных заполнителях ($R_{с} > 1,5R$)

Марка бетона	Марка цемента	200	250	300	400	500	600
	50	86,3	86,3	87,2	87,5	89,1	92,5
70	93,2	92,5	92,9	92,3	93,4	96,6	
90	100,1	98,6	98,6	97,1	97,7	100,7	
110	107,0	104,8	104,2	101,8	101,9	104,7	

Таблица 7

Стоимость туфобетона на сравнительно слабых заполнителях ($R_0 < 1,5R$)

Прочность туфа	Марка цемента		200	250	300	400	500	600
	Марка бетона							
50	50		89,6	89,4	90,0	89,8	91,3	94,6
50	70		104,9	102,8	102,5	100,4	100,7	103,6
50	90		124,1	120,0	118,3	113,6	112,6	115,0
50	110		147,3	140,8	137,4	128,7	127,0	128,7
75	70		96,7	95,7	95,8	94,7	95,7	98,8
75	90		110,6	108,0	107,2	104,3	104,3	107,0
75	110		127,4	122,8	120,9	115,8	114,5	116,8
100	90		103,9	102,0	101,7	99,7	100,1	103,6
100	110		117,3	113,8	112,6	108,8	108,3	110,9
125	110		111,1	108,5	107,6	104,7	104,6	107,3
150	110		107,1	104,9	104,3	101,9	102,1	104,9

Таблица 8

Стоимость артикуфобетона

Марка бетона	Марка цемента		200	250	300	400	500	600
50			108,2	108,3	108,6	108,2	108,5	112,0
70			126,9	127,0	127,6	127,0	127,5	132,8
90			145,6	145,8	146,6	145,8	146,4	153,5

Таблица 9

Стоимость пемзобетона

Марка бетона	Марка цемента		200	250	300	400	500	600
35			89,1	89,1	89,5	88,8	88,9	90,4
50			106,6	106,6	107,3	105,1	106,3	108,6
70			129,9	129,9	130,9	129,1	129,5	133,0

Рассмотрение таблиц 1—9 позволяет наглядно видеть оптимальные марки цемента в различных случаях, дающие наименьшую стоимость бетона. При этом, если бетон на различных марках цемента имеет одну и ту же стоимость, предпочтение следует отдавать более высокой марке, приводящей к меньшему количественному расходу цемента, а следовательно и облегчению транспорта. С другой стороны, известно, что повышение марки цемента приводит к уменьшению удельного расхода топлива на его производство [7].

Установив оптимальные марки цемента по расчетам из условия наименьшей стоимости бетона, следует сопоставить их с марками,

вытекающими из условия наименьшего допустимого расхода цемента. Это и сделано в таблице 10, где в последней графе даются реальные оптимальные марки цемента, исходя из совокупности двух условий.

Таблица 10

Вид бетона	Марка бетона	Оптимальная марка цемента по формулам	Наибольшая марка цемента из условия допустимого минимума расхода цемента	Реальная оптимальная марка цемента	
Тяжелый бетон	90	400	200—300	200—300	
	110	400	250—400	250—400	
	140	500	350—500	300—500	
	170	500	400—600	400—500	
	200	500	500—600	500	
	250—550	500	600	500	
	600	600	600	600	
Туфобетон при $R_0 \geq 1.5R$	50	250	400	250	
	70	400	600	400	
	90	400	600	400	
	110	400	600	400	
Туфобетон при $R_0 < 1.5R$	а) $R_0 = 50 \text{ кг/см}^2$	50	250	500	250
		70	400	600	400
		90	500	600	500
	б) $R_0 = 75 \text{ кг/см}^2$	110	500	600	500
		70	400	600	400
		90	500	600	500
	в) $R_0 = 100 \text{ кг/см}^2$	110	500	600	500
		90	400	600	400
	г) $R_0 = 125 \text{ кг/см}^2$	110	500	600	500
	д) $R_0 = 150 \text{ кг/см}^2$	110	400	600	400
Арктиктуфобетон	50	400	500	400	
	70	400	600	400	
	90	400	600	400	
Пемзобетон	35	400	300	300	
	50	400	600	400	
	70	400	600	400	

Анализируя приведенный цифровой материал, приходим к следующим выводам:

1. При тяжелом бетоне до марки 170 оптимальная марка цемента ограничивается условием наименьшего допустимого расхода цемента. Следовательно, в бетонах до марки 170 следует принимать такую марку цемента, которая приводит к расходу цемента не больше допустимого минимума.

Для более высоких марок тяжелого бетона оптимальной является марка цемента 500—600. При этом переход от низких марок цемента к высоким дает значительное удешевление бетона, доходящее до 20% его стоимости.

2. В легких бетонах обычных марок 50—110 оптимальной является марка цемента 400—500. При этом в сравнительно низких марках бетона 50—70 изменение марки цемента не дает ощутимого изменения стоимости бетона, так что может быть принята, собственно говоря, любая марка цемента. При марках же бетона 90—110 выгода применения высокой марки цемента становится уже ощутимой, доходящей до 10—15% стоимости бетона.

Ограничение марки цемента из условия допустимого минимума расхода цемента в легких бетонах имеет место лишь при их марке ниже 50.

Пользуясь приведенной в настоящей статье методикой, можно легко определить оптимальные марки цемента при установлении любых новых государственных цен на цемент. Что касается изменения цен на заполнители, то оно, как было уже указано выше, практически не влияет на величину оптимальной марки цемента.

Институт Строительных Материалов и Сооружений

Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 8 VII 1950.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Е. Фрайфельд—Законы стоимости железобетонных конструкций. Харьков, 1935.
2. В. Г. Скрябин—Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. Москва, 1936.
3. Технические Условия на производство и приемку общестроительных и специальных работ, вып. II, ч. I. Москва—Ленинград, 1940.
4. Э. А. Ацагорян—Тuff и пемза в железобетонных конструкциях. Отчет. АИС, 1933.
5. М. Э. Симонов—Конструкции и сооружения из легкого железобетона (Инструкции по проектированию и возведению). Тбилиси, 1937.
6. В. М. Худавердян—Метод проектирования составов туфобетона. Ереван, 1950.
7. Строительная промышленность, № 4, 1948.

Չ. Ա. Հացազործյան

ՅԵՄԵՆՏԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՄԱՐԿԱՅԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Ներկայումս արտադրվող ջեմենտի մարկաների / բաղմազանությունը հնարավորություն է ապրիս շինարարներին ընտրել կանխեա պայմանների համար ջեմենտի ամենանպաստավոր մարկան:

Մանրամասն անալիզի հիման վրա հեղինակը ապրիս է մաթեմատիկական արտահայտություններ, որոնցով կարելի է սրուշել ջեմենտի օպտիմալ մարկան՝ զանազան տեսակի բետոնների համար, այն է՝ (9) սովորական ծանր բետոնի և համեմատաբար ամուր լցիչներով պատրաստված թեթև բետոնի համար, (13)—պեմզաբետոնի, (15) արթիկաուֆաբետոնի համար և (20)—համեմատաբար թույլ լցիչներով պատրաստված տուֆաբետոնի համար: Բլլոստրացիայի նպատակով բերված թվական հաշիվները ջույց են ապրիս, որ Հայկական ՍՍՌ շինարարության պայմաններում թեթև բետոնների համար նպատավոր է, ընդհանուր առմամբ, ջեմենտի բարձր մարկաների (400—500) գործածությունը: