

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А. А. АРАКЕЛЯН

О ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Формирование цементного камня является следствием химического взаимодействия цементного порошка и воды. Количество воды для затворения цемента всегда берется значительно больше, чем требуется для химической реакции при твердении цемента. Лишняя вода, не вошедшая в химическую реакцию с цементом, после испарения образует капилляры в цементном камне, придавая ему капиллярно-пористую структуру. Поэтому затвердевший цементный камень можно рассматривать как капиллярно-пористый материал, который будет иметь свойства, подобные капиллярно-пористым туфам и пемзам, и поэтому установленная нами зависимость между прочностью R , объемным весом γ и коэффициентом скорости капиллярной всасываемости K для капиллярно-пористых материалов [1] будет справедлива и для цементного камня.

Прежде чем установить зависимость $\left(R, \frac{\gamma}{K} \right)$ для цементного камня, необходимо рассмотреть некоторые вопросы, связанные с процессом его формирования. При затворении цемента водой наблюдается седиментационный процесс в цементном тесте, свидетельствующий о превышении воды затворения над объемом пустот в цементе.

Количество воды затворения, равное объему пустот цемента, есть его нормальная густота, которая устанавливается с точностью 0,25% на пестике Тетмайера.

При нормальной густоте в цементном тесте седиментационные процессы настолько малы, что ими можно пренебречь. Казалось бы, что вся лишняя вода должна быть отжата, но однако в действительности цемент обладает водоудерживающей способностью, которая повышается по мере увеличения количества воды затворения [2].

Водоудерживающая способность цемента зависит от многих факторов—минералогического состава, тонкости его помола, органических и неорганических добавок, от условий седиментации (состояние покоя, вибрирование, утряска) и т. д. В работе проф. А. Е. Дёсова [3] приведены кривые водоудерживающей способности цементного теста в зависимости от V/C отношения и от тонкости помола цемента.

Для установления количества воды, удерживаемой цементным тестом ($B_{уд.}$), нами проведены некоторые опыты по методике, изложенной ниже.

Как известно, процессы твердения портландцемента сопровождаются объемными изменениями. Если измерять суммарный абсолютный объем системы „цемент + вода“, то всегда будет иметь место уменьшение объема этой системы (контракция) [4].

В рассматриваемом случае нас интересует не абсолютный объем системы, а изменение внешних размеров образца цементного камня, связанных с усадкой и набуханием. Практически усадка и набухание цементного камня выражаются в долях процента, поэтому этими изменениями можно пренебречь и принять, что после полного седиментационного процесса в тесте, т. е. при оставшемся количестве воды, удерживаемой цементом ($B_{уд.}$), объем цементного теста останется практически неизменным за все время его твердения.

Согласно вышесказанного можно определить объемный вес ($\gamma_{об}$) цементного теста следующей формулой:

$$\gamma_{об} = \frac{\text{вес}}{\text{объем}} = \frac{Ц + \Delta a}{\frac{Ц}{\gamma_{ц}} + B_{уд.}} \quad * \quad (1)$$

где $Ц$ — вес цемента в кг, взятый для приготовления цементного теста;

Δa — количество химически связанной воды при твердении цемента во времени;

$\gamma_{ц}$ — удельный вес цементного порошка;

$B_{уд.}$ — количество воды, которое удерживает цемент.

Количество химически связанной воды Δa зависит от водоцементного отношения, от количества цемента, его минералогического состава и тонкости помола и, наконец, от возраста цементного камня**.

Химически связанную воду Δa можно отнести, как показали опыты проф. М. З. Симонова [2], к сумме весов цемента и воды затворения, т. е. можно написать $\Delta a = \alpha (Ц + B)$, где α будет иметь различное значение в зависимости от качества цемента и возраста цементного камня (2, 5, 6).

Разделив числитель и знаменатель формулы (1) на $Ц$ и решив уравнение относительно $(B/Ц)_{уд.}$, получим приближенное выражение для $(B/Ц)_{уд.}$:

* Для более точных данных необходимо учесть объем воздушных пор в цементном тесте, при этом будет достаточно объем цементного теста $(Ц / (\gamma + B_{уд.}))$ умножить на коэффициент β , который будет иметь значение от 1,02 до 1,08 в зависимости от укладки цементного теста от величины $B/Ц$ фактора и от применяемых добавок и т. д.

** Количество воды, оставшееся в цементном камне после его сушки при $t = 105^\circ\text{C}$ до постоянного веса.

$$(B/C)_{уд.} = \frac{1 + \delta (1 + B/C)}{\gamma_{об.}} - \frac{1}{\gamma_n} \quad (2)$$

В частности, при возрасте цементного камня 28 дней, можно химически связанную воду (δ) принять равной 8% от суммы весов цемента и воды затворения [2].

В целях получения функциональной зависимости $(B/C)_{уд.}$ от B/C были проведены соответствующие опыты на различных видах цементов. Были изготовлены цилиндры диаметром и высотой 5 см, для которых после 28-дневного влажного и воздушного хранения были определены объемные веса цементных камней, затем вычислены $(B/C)_{уд.}$ по формуле (2). Цилиндры предварительно были высушены при $t = 105^\circ\text{C}$ до постоянного веса.

При вычислении $(B/C)_{уд.}$ по формуле (2) химически связанную воду приняли ориентировочно для образцов воздушно-влажного хранения — 8%, а для цементов с добавками 20% и 40% пемзы, соответственно — 6,5% и 5%. При фактических значениях химически связанной воды величины $(B/C)_{уд.}$ по формуле (2), независимо от вида хранения цементного камня, получаются одинаковыми.

На основании опытных данных составлен график (см. рис. 1) за-

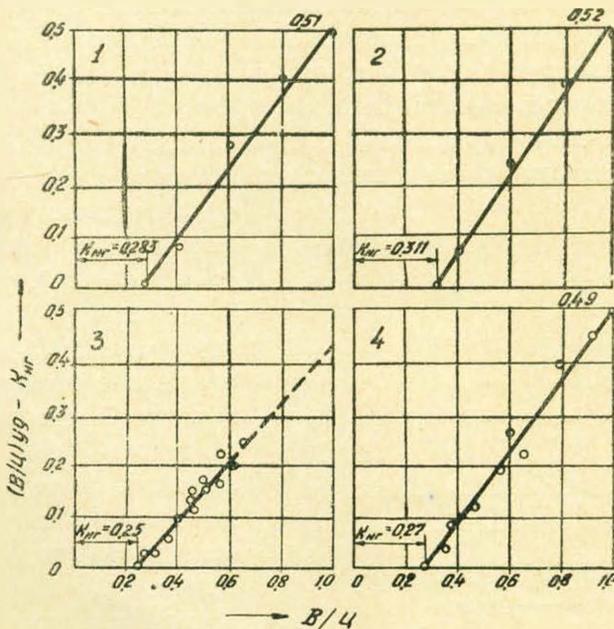


Рис. 1. Зависимость водоудержания цемента $(B/C)_{уд.}$ от водоцементного отношения B/C . 1 — портландцемент 80%, пемзовая добавка 20%; 2 — портландцемент 60%, пемзовая добавка 40%; 3 — портландцемент; 4 — пуццолановый портландцемент.

висимости $(B/C)_{уд.}$ от B/C . По оси ординат отложена величина $(B/C)_{уд.} - K_{кр.}$, а по оси абсцисс — значения B/C . Зависимость $(B/C)_{уд.} - K_{кр.}$ и B/C получается прямолинейная. Как видно из данных рис. 1 пря-

мые линии зависимости пересекают абсциссу в точках, соответствующих $K_{н.г.}$, т. е. когда $B/C = K_{н.г.}$, $(B/C)_{уд.} - K_{н.г.} = 0$ и $(B/C)_{уд.} = K_{н.г.}$.
На основании рис. 1 можно написать следующую зависимость:

$$(B/C)_{уд.} - K_{н.г.} = (B/C - K_{н.г.}) \frac{\alpha}{1 - K_{н.г.}}$$

или
$$(B/C)_{уд.} = K_{н.г.} + \alpha \frac{B/C - K_{н.г.}}{1 - K_{н.г.}}, \quad (3)$$

где $(B/C)_{уд.}$ — отношение воды, удерживаемой цементом, к весу цемента;

$K_{н.г.}$ — нормальная густота цемента;

α — коэффициент водоудержания, который зависит от тонкости помола и минералогического состава цемента, от условий седиментации (ручная укладка, вибрирование, центрифугирование и т. д.), от видов и количества добавок и т. д.

В нашем случае, когда имеется портландцемент или портландцемент с добавкой пемзы 20% и 40% (обычного помола) значение коэффициента α согласно рис. 1 можно принять от 0,42 до 0,52.

В среднем для наших целей принимаем приблизительно $\alpha = 0,47$.

При иных условиях седиментации цементного теста коэффициент α будет иметь другие значения, что можно установить опытным путем по вышеописанной методике.

На основании формулы (3) составлен график (рис. 2) водоудержания цементного теста и выхода цементного камня в литрах из

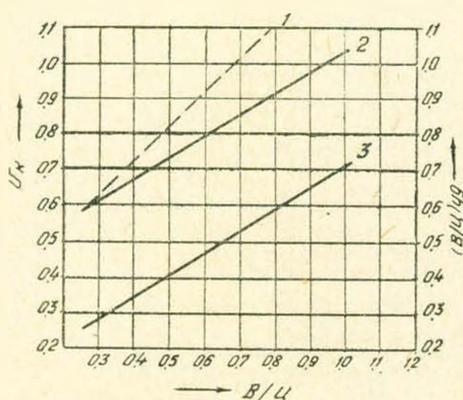


Рис. 2. Зависимость V_k и $(B/C)_{уд.}$ от водоцементного отношения. 1 — теоретическая кривая выхода цементного камня; 2 — $V_k = 1 / (1 + (B/C)_{уд.})$; 3 — $(B/C)_{уд.} = K_{н.г.} + \alpha \frac{B/C - K_{н.г.}}{1 - K_{н.г.}}$.

$$\alpha \frac{B/C - K_{н.г.}}{1 - K_{н.г.}}$$

1 кг цемента. График составлен при значениях коэффициента $\alpha = 0,47$, удельного веса цемента $\gamma_{ц} = 3,1$ и нормальной густоты $K_{н.г.} = 0,25$.

Выше было отмечено, что цементный камень можно рассматривать, как капиллярнопористый материал. Исходя из этого, затвердевшие цементные камни различных составов были испытаны на одностороннее всасывание воды в атмосферной среде. Результаты этих исследований приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что подъем воды по капиллярам цементных камней, как функция от квадратного корня вре-

мени выражается прямой линией. Аналогичная картина наблюдалась для туфов Ереванского и Арктикского месторождений [1].

Коэффициент скорости капиллярной всасываемости цементного камня является угловым коэффициентом прямой линии отсоса.

В целях установления зависимости $\left(R, \frac{1}{K}\right)$ [1], для цементного камня были проведены опыты по изучению зависимости между

коэффициентом скорости капиллярной всасываемости (K) и $(B/L)_{\text{ул}}$ фактором. На трех видах цементов были изготовлены цилиндры диаметром и высотой 5 см, которые после 28-дневного воздушного и воздушно-влажного хранения были подвергнуты испытанию по методу, указанному в работе [1] для установления коэффициента скорости капиллярной всасываемости (K). Перед испытанием цилиндры были высушены при $t = 105^\circ\text{C}$ до постоянного веса.

На рис. 4. дано графическое выражение зависимости $[K, (B/L)_{\text{ул}}]$.

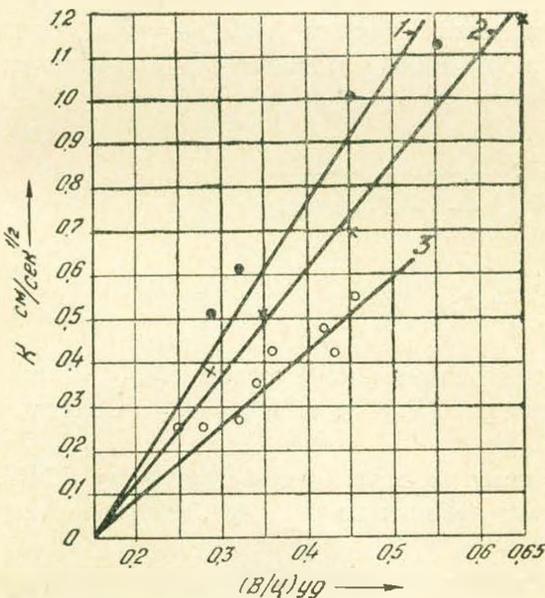


Рис. 4. Зависимость коэффициента скорости капиллярной всасываемости K от $(B/L)_{\text{ул}}$. 1 — воздушное хранение $R_{\text{ц}} = 324$; 2 — воздушное хранение $R_{\text{ц}} = 468$; 3 — влажное хранение $R_{\text{ц}} = 310$.

Рис. 3. Зависимость высоты подъема воды по капиллярам цементного камня при одностороннем подсосе в атмосферной среде от времени.

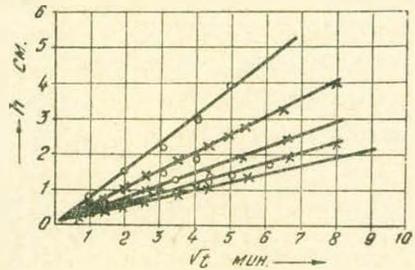


Рис. 3. Зависимость высоты подъема воды по капиллярам цементного камня при одностороннем подсосе в атмосферной среде от времени.

Как видно из рис. 4 зависимость $[K, (B/L)_{\text{ул}}]$ выражается прямой линией, проходящей через начало координат, т. е.

$$K = \beta (B/L)_{\text{ул}}, \quad (4)$$

где β — угловой коэффициент, зависящий от вида цемента и условий твердения цементного камня.

Значение углового коэффициента β при влажно-воздушном хранении получается значительно меньше, чем при воздушном. Влажные условия твердения повышают плотность цементного камня и этим самым снижают скорость его подсоса. Однако, несмотря на изложенное обстоятельство, линейная зависимость, вы-

раженная формулой (4) остается для изученных цементов в силе при всех условиях хранения образцов.

Таким образом, для затвердевшего цементного камня будем иметь по формуле (1) значение объемного веса (γ), а по формуле (4) — значение коэффициента скорости капиллярной всасываемости (K).

Имея значения (γ) и (K) можно будет установить прочность цементного камня [1]

$$R_k = A \frac{\gamma}{K} = A \frac{Ц + \Delta a}{\left(\frac{Ц}{\gamma_{ц}} + B_{уд.} \right) \cdot \beta \left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.}}$$

Количество химически связанной воды (Δa) можно выразить также в долях от веса цемента, т. е. можно написать $\Delta a = \delta' \cdot Ц$, и при этом будем иметь:

$$R_k = C \frac{1}{\left[\frac{1}{\gamma_{ц}} + \left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.} \right] \left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.}}$$

где

$$C = A \frac{1 + \delta'}{\beta}$$

Для определения коэффициента C примем $\left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.} = K_{н.г.}$, тогда прочность цементного камня нормальной плотности ($R_{н.г.}$) выразится формулой:

$$R_k = R_{н.г.} = C \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_{ц}} + K_{н.г.} \right) K_{н.г.}}$$

и коэффициент $C = R_{н.г.} \left(\frac{1}{\gamma_{ц}} + K_{н.г.} \right) K_{н.г.}$

Прочность цементного камня нормальной плотности ($R_{н.г.}$) можно принять равной активности цемента ($R_{ц}$) т. е. $R_{н.г.} = R_{ц}$ по следующим причинам.

Как известно, активность цемента, согласно действующему ГОСТ, устанавливается на трамбованных кубиках из раствора, изготовленного на вольском песке.

Количество воды для затворения раствора берется равным нормальной плотности цемента (плюс вода для смачивания вольского песка). Поэтому прочность раствора должна получаться равной прочности цементного камня нормальной плотности.

Специальные опыты над растворами и цементными камнями, при сохранении постоянного $B/Ц$, проведенные Р. Р. Саркисян [8], доказывают, что прочности цементного камня и раствора получаются почти одинаковыми.

Это обстоятельство отмечено также Ахвердовым И. Н. в работе [7] на стр. 37.

Таким образом прочность цементного камня окончательно может выразиться формулой:

$$R_k = R_{ц} \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{ц}} + K_{н.г.} \right) K_{н.г.}}{\left[\frac{1}{\gamma_{ц}} + \left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.} \right] \left(\frac{B}{Ц} \right)_{уд.}} \quad (5)$$

Полученная формула для определения прочности цементного камня учитывает удельный вес, нормальную плотность и водоудерживающие свойства цемента. В этом и заключается преимущество этой формулы, так как удельный вес, нормальная плотность и водоудерживающее свойство в достаточной степени характеризуют минералогический состав и адсорбционные свойства цемента.

Для определения прочности цементного камня с учетом нормальной плотности цемента имеется формула в работе [7], которая дается в следующем виде:

$$R_k = \frac{R_{ц}}{1 + 1,65 \frac{K_{н.г.}}{K_{н.г.}} \cdot \frac{B}{Ц} - 1,65 K_{н.г.}} \quad (6)$$

где $K_{н.г.}$ — нормальная плотность;

B/C — водоцементное отношение.

В целях сравнения формул (5) и (6) в табл. 1 приведены расчетные значения прочностей цементного камня при $K_{н.г.} = 0,25$ и $0,30$; $\gamma_{ц} = 3,1$ и $\alpha = 0,47$.

Таблица 1

Расчетная прочность цементного камня по формулам автора и Ахвердова

№ п. п.	В/Ц		Значение $R_k/R_{ц}$ по формуле Ахвердова при		(B/C) _{уд.} по формуле (3) при		Значение $R_k/R_{ц}$ по формуле автора при		Отношение прочностей цем. камня по формуле (5) и (6)	
	0,25	0,30	$K_{н.г.} = 0,25$	$K_{н.г.} = 0,30$	$K_{н.г.} = 0,25$	$K_{н.г.} = 0,30$	$K_{н.г.} = 0,25$	$K_{н.г.} = 0,30$	$K_{н.г.} = 0,25$	$K_{н.г.} = 0,30$
1	0,25	1,00	—	—	0,25	—	1,0	—	1,0	—
2	0,30	0,78	1,00	—	0,281	0,30	0,85	1,0	1,09	1,0
3	0,40	0,547	0,666	—	0,344	0,367	0,625	0,737	1,14	1,10
4	0,50	0,41	0,50	—	0,407	0,434	0,483	0,567	1,18	1,13
5	0,60	0,333	0,401	—	0,469	0,503	0,386	0,447	1,16	1,11
6	0,70	0,278	0,334	—	0,533	0,568	0,314	0,369	1,13	1,10
7	0,80	0,242	0,287	—	0,595	0,635	0,263	0,307	1,08	1,07
8	1,00	0,189	0,223	—	0,72	0,77	0,192	0,221	1,01	0,99

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что максимальное отклонение расчетных данных по формулам (5) и (6) получается при $B/C = 0,4-0,7$. Отклонение получается до $14-18\%$.

С целью установления сравнительной точности формул (5) и (6), расчетные данные этих формул были сравнены с опытными, в зоне максимального отклонения формул, т. е. при $B/C=0,4-0,7$.

С этой целью были проанализированы опытные данные, приведенные в табл. работы [7]. Анализ этих данных представлен в табл. 2.

Таблица 2

Показатели прочности цементного камня с добавками

№ п.п.	Добавка туфа или ангийской пемзы в % по весу, проходившей через сито с 4900 от/см ²	Нормальная густота вяжущего К _{н.г.}	Удельный вес вяжущего	Фактическая активность вяжущего	Водоцементное отношение, В/Ц	Водоцементное отношение, (В/Ц) _{уд.} удержив. вяжущим	Фактич. прочность	Расчетная прочность по формуле		Отношение фактической прочности к расчетной по формуле	
								Ахвердова	автора	Ахвердова	автора
1	0	0,285	3,10	730	0,47	0,407	426	375	425	1,14	1,0
2	10	0,30	3,04	620	0,47	0,414	390	333	282	1,11	1,02
3	20	0,31	2,98	515	0,47	0,419	330	290	325	1,14	1,01
4	30	0,32	2,92	450	0,47	0,423	300	263	295	1,14	1,01
5	40	0,34	2,86	300	0,47	0,432	216	188	209	1,15	1,03
6	50	0,365	2,80	175	0,47	0,443	140	119	131	1,18	1,07
7	0	0,28	3,10	400	0,46	0,397	236	206	236	1,14	1,0
8	10	0,295	3,04	360	0,46	0,405	226	198	223	1,14	1,01
9	20	0,317	2,93	275	0,46	0,415	189	164	183	1,15	1,03
10	30	0,325	2,92	200	0,46	0,419	141	123	136	1,15	1,04
11	40	0,34	2,86	160	0,46	0,425	120	103	114	1,16	1,05
12	50	0,366	2,80	125	0,46	0,435	99	89	96	1,11	1,03
13	0	0,27	3,10	285	0,445	0,383	166	147	168	1,13	0,99
14	10	0,284	3,04	250	0,445	0,390	157	137	156	1,15	1,01
15	20	0,296	2,98	200	0,445	0,395	130	114	130	1,14	1,0
16	30	0,31	2,92	150	0,445	0,402	104	91	102	1,14	1,02
17	40	0,33	2,86	150	0,445	0,410	83	72	79	1,15	1,05
18	50	0,30	2,80	75	0,445	0,418	61	53	58	1,15	1,05

Примечание: 1. Нормальная густота добавки из туфа или пемзы, прошедшей через сито с 4900 от/см², получается 0,42.

2. Удельные веса вяжущих были определены по формуле $(\delta\gamma_{ц} + (1 - \delta)\gamma_{д})$, для чего было принято $\gamma_{ц} = 3,1$ и $\gamma_{д} = 2,5$
 δ — есть доля портландцемента в смеси.

В табл. 2, заимствованной из работы [7], приведены данные по 3 партиям цемента. Эти цементы разбавлены добавками (из туфа или ангийской пемзы) от 10 до 50% по весу. Всего 18 видов вяжущих, для которых установлена нормальная густота, активность и фактическая прочность при значениях $B/C=0,47; 0,46$ и $0,445$, соответствующих максимальному колебанию расчетных данных формул (5) и (6). В табл. 2 приведены расчетные прочности вяжущих, установленных по формулам (5) и (6).

Применяемое в формуле (5) отношение $(B/C)_{уд.}$ определено по формуле (3) при $\alpha = 0,47$.

Анализ полученных данных, приведенных в табл. 2 наглядно показывает, что отклонения фактических прочностей цементных камней от расчетных, установленные формулой (6), составляют в среднем 15%, а формулой (5) — 3%. Это говорит о неоспоримом преимуществе формулы (5).

В заключение следует отметить, что выведенные нами формулы (3) и (5) вероятно найдут применение при проектировании составов бетонов и растворов.

Структурному анализу и дальнейшему упрощению формул посвящена другая статья автора.

НИИ строительных материалов и сооружений
Армянской ССР

Поступило 19 XII 1958

Հ. Ա. ԱՌԱՔԵՆՅԱՆ

ՅԵՄԵՆՏԱՔԱՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում բերված են Հայկական ՍՍՍ Ծինանչությունների և կառուցվածքների ինստիտուտում կատարված էքսպերիմենտալ աշխատանքների արդյունքները ցեմենտաքարի ամրություն ուղղվածությամբ:

Փորձնական տվյալների հիման վրա ստացված է ցեմենտի ջրպահման ունակության որոշման բանաձև (3), որտեղ՝

$(B/L)_{\text{չա}}$ — ջրացեմենտային գործոնի այն մասն է, որը պահվում է ցեմենտի կողմից:

$K_{\text{ն.բ.}}$ — ցեմենտի նորմալ թանձրացման գործակիցն է:

α — ցեմենտի ջրպահման գործակիցն է, որը որոշվում է փորձնական տվյալների հիման վրա և ոչնչացված է ցեմենտի որակից: Սովորական պորտլանդ ցեմենտի համար կարելի է վերցնել $\alpha = 0,17$:

Ցեմենտաքարի ամրությունը որոշելու համար, փորձերի հիման վրա ստացված է բանաձև (5), որտեղ՝

R_x — ցեմենտաքարի ամրությունն է կգ/սմ²-ով:

$R_{\text{ն}}$ — ցեմենտի ակտիվությունն է կգ/սմ²-ով:

$\gamma_{\text{ն}}$ — ցեմենտի անսակարար կշիռն է գր/սմ³-ով:

$K_{\text{ն.բ.}}$ — ցեմենտի նորմալ թանձրացման գործակիցն է:

$(B/L)_{\text{չա}}$ — ջրացեմենտային գործոնն է, որը որոշվում է (1) բանաձևով:

Ստացված (3) և (5) բանաձևերը մեծ նշանակություն ունեն բետոնի և շաղախի վերաբերյալ եղած գիտությունը զարգացնելու անսակեռից:

ЛИТЕРАТУРА

1. Аракелян А. А., О зависимости прочности пористого камня от структуры его пор. «Известия АН АрмССР» (серия технических наук), том XI, № 1, 1958.
2. Симонов М. Э., Седиментационные процессы в цементном тесте и возможности их регулирования. «Известия АН АрмССР», том VI, № 4, 1953.
3. Дёсов А. Е., Вибрационный бетон. Москва, 1956.
4. Некрасов В. В., Изменения объема системы при твердении гидравлических вяжущих. «Известия АН СССР», № 6, 1945.
5. Скрамтаев Б. Г., Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси, Москва, 1936.
6. Мак-Миллан Ф. Р., Основные принципы приготовления бетона. Под редакцией и с дополнением А. Н. Адамовича и Л. В. Митгарца, М.—Л., 1955.
7. Ахвердов Н. Н., Годзиев Н. С. Овадовский И. М., Легкий бетон Москва, 1955.
8. Саркисян Р. Р., Влияние сульфито-спиртовой барды на цементные растворы и бетоны, Ереван, 1957.