

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М. З. Симонов

Седиментационные процессы в цементном тесте
и возможности их регулирования

1. Роль седиментационных процессов в формировании строения
бетона и задачи настоящих исследований

Бетонная смесь в промежутке времени от момента ее затворения до начала схватывания, под влиянием седиментационных процессов претерпевает ряд структурных изменений.

В цементном тесте происходит осаждение твердых частиц и отжатие воды. Отжавшаяся из цементного теста вода в бетонной смеси перераспределяется различным образом. В бетонной смеси на обычных (плотных) заполнителях часть воды, обуславливающая наружное водоотделение смеси, устремляясь вверх, обтекает частицы заполнителя и создает в бетонной смеси сеть сообщающихся капиллярных ходов. Кроме этого, выступающая над поверхностью бетонной смеси вода ослабляет связь данного бетонного слоя с последующим. Другая часть воды, обуславливающая внутреннее водоотделение смеси, скопляется под нижними поверхностями крупных зерен заполнителя, образуя под ними прослойки воды и этим ослабляя и уменьшая контакт заполнителей с цементным камнем. Зоны ослабленного контакта между цементным камнем и заполнителем и сообщающиеся капиллярные ходы являются в затвердевшем бетоне основными путями проникновения в него воды в условиях капиллярного подсоса или при напорной фильтрации. Эти же капилляры являются путями для проникновения в бетон агрессивных вод, и стало быть, очагами разрушения бетона от коррозии.

Наконец, наличие в бетоне сообщающихся капиллярных ходов и ослабленных контактов обуславливает снижение морозостойкости бетона.

В. В. Стольников и Е. В. Лавринович [1] провели исследования, освещающие влияние седиментационных процессов в бетонной смеси на водонепроницаемость и структуру бетона. Исследования эти показали, что водонепроницаемость бетона определяется размерами пор в бетоне, обусловленных внутренним водоотделением в результате седиментационных явлений. Уменьшение седиментационного самоуплотнения цементной пасты устраняет внутреннее водоотделение и

образование ориентированной системы капилляров, в результате чего повышается водонепроницаемость бетонов.

Указанные авторы пришли к выводу, что задачу проектирования водонепроницаемости можно свести к задаче выбора растворной и цементной составляющей, при определенном составе крупных заполнителей, если составить растворные смеси так, чтобы они при водоцементном отношении, взятом из условия прочности бетона, обеспечивали необходимую подвижность бетонной смеси и вместе с этим имели заданную седиментационную характеристику.

В бетонной смеси на легких (пористых) заполнителях отжавшаяся из цементного теста вода, в зависимости от кинетики водоотдачи и, с другой стороны, кинетики водопоглощения пористых заполнителей, может отсосаться капиллярами заполнителей, в результате чего явление внутреннего и наружного водоотделения в легких бетонах будет иметь иной характер. Соответственно, при одинаковых составах, структура легкого бетона может существенно отличаться от структуры обычного бетона.

Из вышеизложенного видно, что крайне важно не только значение седиментационных характеристик цементного теста и их учет при проектировании составов бетонов, но и изучение закономерностей, связанных с седиментационными процессами в цементном тесте и их влиянием на формирование цементного камня.

Статья посвящена рассмотрению этих закономерностей и установлению связи между седиментационными процессами в цементном тесте и сроками его схватывания, плотностью и прочностью цементного камня и химически связанной воды в нем.

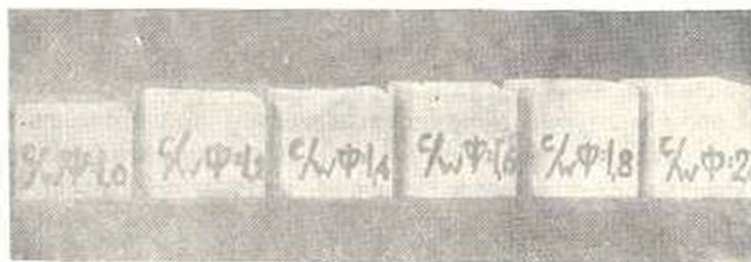
2. Влияние различных факторов на седиментационные процессы в цементном тесте

Водоотделение и водоудерживающая способность цементного теста, составляющие различные стороны одного и того же процесса—седиментации, зависят от целого ряда факторов.

Ниже рассматривается влияние на седиментационные процессы в цементном тесте механических факторов, а также добавок неорганического и органического происхождения. При этом, главное внимание уделено изучению не скорости оседания частиц, а образующегося седиментационного объема.

а) Влияние механических факторов. Еще при изучении цементного камня, с целью построения кривых прочностей, автором было отмечено [2], что над цементным тестом, уложенным в формы, постепенно всплывает вода. По истечении некоторого времени слой отжавшейся воды перестает изменяться, а находящееся под водой тесто начинает затвердевать. По освобождению от формы цементные образцы имеют уменьшенную высоту на толщину слоя отжавшейся из теста воды (фиг. 1).

Так как более разжиженным смесям цемента и воды соответствовал и более толстый слой отжавшейся воды, то можно было сделать предположение, что водоудерживающая способность цемента равна объему пустот в нем, а наличие отжавшейся над цементным тестом воды должно свидетельствовать о превышении воды затворения над объемом пустот в цементе. В действительности водоудерживающая способность цементного теста и соответственно седиментационный объем оказались зависимыми от концентрации цементно-водной суспензии, т. е. от $\frac{Ц}{В}$ (цементно-водного отношения).



Фиг. 1. Цементные кубики, изготовленные при различных цементно-водных отношениях.

Для изучения этого вопроса цемент с водой в пропорциях, принимаемых в бетонах, затворялись непосредственно в мензурках. После тщательного перемешивания тесту давалось осесть. Слой воды над осевшим цементным тестом достигал окончательной толщины уже в течение 30—50 минут. Схватывание цементного теста изучаемых концентраций начиналось значительно позже. Так, например, наиболее жидкие смеси цемента с водой можно было взболтать и вылить из мензурки по истечении одних суток после затворения. Для того, чтобы не дать цементному тесту схватиться в самой мензурке, обычно, опыт прекращался через 3—4 часа и мензурка освобождалась от теста.

Следует еще отметить, что при затворении цемента особенно большими количествами воды, оседание теста начиналось с наиболее крупных фракций цементного порошка. Таким образом, рассматривая осевшее в мензурке цементное тесто, можно было наблюдать рассев цементного порошка от наиболее крупных фракций в нижней части до мелких фракций в верхней части.

Первоначально для опытов был использован цемент Новороссийского завода.

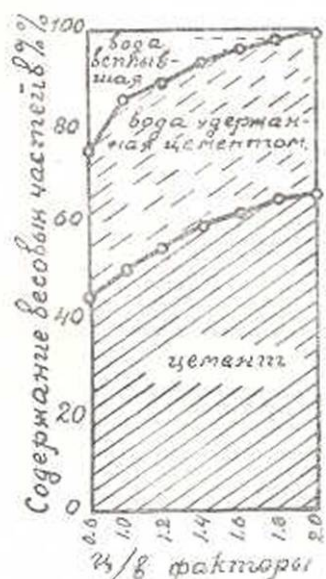
Опыты показали, что при изменении $\frac{Ц}{В}$ от 0,8 до 2,0 отношение веса удержанной в седиментационном объеме воды „ву“ к весу взятой навески цемента уменьшается с 70 до 50%.

Иная картина получается если вес, удержанный цементным

тестом воды „Ву“, относится к сумме первоначально взятых весов цемента и воды (с). Указанное отношение $\frac{Ву}{с}$ для цементного теста в интервале $\frac{Ц}{В} = 0,8 \div 2,0$ изменяется в пределах всего лишь от 33,4 до 35,4%, составляя в среднем 34,4% (см. фиг. 2).

Проведенные опыты позволили констатировать, что устанавливающийся в цементном тесте $\frac{Ц}{Ву}$ всецело зависит от величины первоначального $\frac{Ц}{В}$, и, что отношение $\frac{Ву}{с}$ при $\frac{Ц}{В} = 0,8 \div 2,0$ практически является постоянной величиной.

Отмеченные факты были проверены на цементах других заводов. При этом мензурки с цементным тестом подвергались продолжительному утряхиванию. Полученные экспериментальные данные, можно сказать, показали ту же картину, что и в предыдущем случае (фиг. 3).



Фиг. 2. Седиментация цементного теста в состоянии покоя.

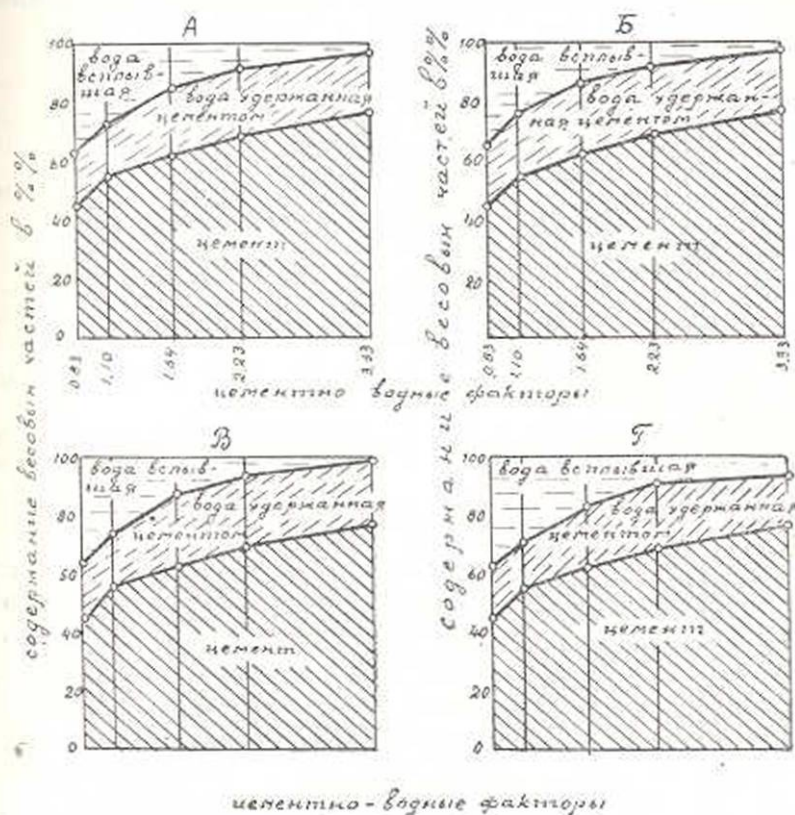


Фиг. 3. Седиментация цементного теста при постукивании посуды.

Наконец, означенная закономерность была проверена на цементном тесте, подвергнутом центрофугированию. Для этого автор воспользовался экспериментальными данными физико-химического института в Праге, приведенными в книге Ю. Я. Штаермана [3].

Центрофугирование цементного теста в этих опытах осуществлялось следующим образом. Был сконструирован специальный ап-

парат—центрофуга, с четырьмя бокалами, емкостью 200 см³ каждый. Число оборотов колебалось от 1000 до 2600 в минуту. Затворенное в тазике цементное тесто переносилось без остатка в сосуд для центрифугирования. Заполненный бокал взвешивался для определения веса центрифугируемой массы. Жидкость всплывающая над осадком после центрифугирования сливалась и бокал с остатком взвешивался. Графики, построенные на основании экспериментальных данных, показаны на фиг. 4.



Фиг. 4. Седиментация цементного теста при центрифугировании.

Эти графики, указывая на значительное уменьшение количества удерживаемой тестом воды при центрифугировании, снова подтверждают постоянство отношения $\frac{W_v}{C}$.

На основании приведенных данных можно утверждать, что независимо от условий седиментации (состояние покоя, утряхивание, центрифугирование), цементное тесто обладает свойством удерживать воду в определенной пропорции от заданного количества воды, и, что отношение веса, удержанного в тесте, воды к сумме весов цемента и воды (с) мало изменяется и может быть принято за постоянную величину, т. е.:

$$\frac{B_y}{c} = m, \quad (1)$$

где m — постоянная величина, зависящая от качества цемента и от состояния теста, при котором происходит выделение избыточного количества воды.

Принимая во внимание, что $c = \text{ц} + \text{в}$, легко вывести формулу для вычисления, устанавливающегося в цементном тесте, цементно-водного отношения по заданному цементно-водному отношению.

Имеем:

$$\frac{\text{ц}}{B_y} = \frac{\text{ц/в}}{\left(1 + \frac{\text{ц}}{\text{в}}\right)m}$$

Обозначая $k = \frac{\text{ц}}{\text{в}}$ и $k_1 = \frac{\text{ц}}{B_y}$, предыдущее соотношение можно переписать в следующем виде:

$$k_1 = \frac{k}{m(1+k)} \quad (2)$$

Из этой формулы видно, что совпадение первоначального и фактически устанавливающегося $\frac{\text{ц}}{\text{в}}$, т. е. равенство $k = k_1$ возможно только при условии

$$m(1+k) = 1 \quad (3)$$

б) *Влияние неорганических добавок.* Наряду с изучением механических факторов были поставлены также опыты по изучению изменения водоудерживающей способности и плотности цементного теста под влиянием различных добавок: поваренной соли, хлористого кальция, жидкого стекла, аскангеля, извести-пушонки и пемзовой гидравлической добавки. Результаты опытов приведены в таблице 1.

Пемзовая добавка, известь-пушонка и аскангель брались в процентах от суммы цемента и добавки, остальные добавки — в процентах от веса цемента.

Как видно из таблицы 1, перечисленные добавки повысили водоудерживающую способность цемента, за исключением хлористого кальция, который при $\text{ц/в} = 1,33$ дал противоположный эффект, вызвав уплотнение цементного теста: от 0,327 (при 0% добавки) до 0,337 (при 1% добавки).

Характерно, что влияние указанной добавки на формирование цементного теста оказалось в зависимости не от отношения ее к весу цемента, а от отношения к весу воды, т. е. от концентрации цементного теста, о чем свидетельствует тот факт, что указанная добавка в тех же дозах не давала того же эффекта при $\text{ц/в} = 1,0$ и 0,8.

Наиболее распространенным электролитом, прибавляемым к обыкновенному цементу для регулирования свойств его, как известно, является гипс. Поэтому были поставлены специальные опыты по изу-

Таблица 1

Влияние электролитов и некоторых других неорганических добавок на водоудерживающую способность и плотность цементного теста

Наименование добавки	Процент добавки	$\frac{ц}{в} = 0,8$		$\frac{ц}{в} = 1,0$		$\frac{ц}{в} = 1,33$	
		колич. всплыв. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цемент. теста	колич. всплыв. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цемент. теста	колич. всплыв. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цемент. теста
(Без добавки)	0	39,5	0,298	27,3	0,307	11	0,327
Повар. соль	0,5	28,2	0,264	12,3	0,269	7	0,317
	1	30,7	0,271	16,3	0,279	7	0,317
	2	36,3	0,288	27,3	0,307	10	0,323
Хлористый кальций	0,5	35,4	0,286	20,3	0,288	12	0,330
	1	33,0	0,278	26,3	0,304	15	0,337
	2	37,0	0,291	24,3	0,298	12	0,330
	3	35,4	0,286	27,3	0,307	12	0,330
	4	35,4	0,286	25,3	0,302	12	0,330
Жидкое стекло	0,5	25,8	0,258	14,3	0,274	2	0,305
	1	15,4	0,234	10,3	0,264	4	0,311
	2	13,8	0,231	5	0,254	1	0,302
	3	8,3	0,220	4	0,252	—	0,294
	4	4,3	0,212	1	0,246	—	0,289
Аскагель	5	28,2	0,268	19	0,290	7	0,320
	10	21,8	0,254	14	0,280	—	0,300
	15	16,2	0,243	7	0,267	—	0,299
	20	11,4	0,236	4	0,264	—	0,300
Известь-пушонка	5	21,8	0,255	9	0,268	—	0,298
	10	25,8	0,270	9	0,275	—	0,304
	15	17,8	0,256	0,3	0,261	—	0,308
	20	16,2	0,257	1	0,269	—	0,312
Пемзовые пылевидные частицы	20	16,2	0,246	12	0,282	—	0,290

чению влияния гипса на водоудерживающую способность цементов. Для опытов были взяты 4 различных цемента, при чем цементы под номерами №№ 1—3 были отобраны с разных партий каспского цементного завода, содержащие обычную дозу гипса добавляемую при помолу; цемент № 4 был специально приготовлен в лаборатории без прибавления гипса из клинкера того же цементного завода.

Химический состав этих цементов приведен в таблице 2.

Для изучения водоудерживающей способности и плотности указанных цементов из них готовилось тесто при $\frac{ц}{в} = 1,0$ с одновременным введением добавки гипса в количестве 0—5% по весу. Результаты опытов приведены в таблице 3.

Как указывалось, в цементах №№ 1—3 уже содержалось некоторое количество CaSO_4 , а именно: в цементе № 1—3,92%, в цементе № 2—3,46% и в цементе № 3—2,43%.

Химический состав цементов

Таблица 2

Наименование определений	Номера цементов			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
SiO_2	20,76	24,92	21,70	20,92
Al_2O_3	6,56	4,30	8,05	6,76
Fe_2O_3	3,64	2,30	2,55	3,24
CaO	56,42	60,70	60,59	58,57
MgO	1,72	2,23	2,41	3,89
SO_3	2,31	2,04	1,43	0,95
п. п. п.	9,28	3,36	4,02	5,00
Сумма	100,69	99,85	100,85	99,33

Таблица 3

Водоудерживающая способность и плотность цементного теста в зависимости от добавки гипса

Добавки гипса в проц. к весу цемента	Номера цементов							
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
	колич. вкл. воды в процент. от взятого колич.	плотн. цементн. теста	колич. вкл. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цементн. теста	колич. вкл. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цементн. теста	колич. вкл. воды в проц. от взятого колич.	плотн. цементн. теста
0	38	0,344	39	0,345	10	0,265	15	0,307
1	33	0,327	33	0,325	14	0,273	18	0,320
2	18	0,284	22	0,292	13	0,271	28	0,367
3	19	0,286	23	0,294	9	0,263	22	0,330
4	15	0,276	21	0,200	10	0,262	22	0,335
5	—	—	—	—	—	—	20	0,309

Введение в эти цементы дополнительного количества гипса, судя по данным таблицы 3, оказывает следующее влияние: для цементов №№ 1 и 2 водоудерживающая способность увеличивается; для цемента № 3, содержащего до этого наименьшее количество CaSO_4 (2,43%), водоудерживающая способность уменьшается и соответственно плотность теста повышается при увеличении гипса в пределах 1—2%, дальнейшее же увеличение содержания гипса приводит к тому же эффекту, что для цементов №№ 1—2. Что же касается цемента № 4, не содержащего первоначально гипса, наибольшее снижение водоудерживающей способности и достижение наибольшей плотности имеют место при добавке гипса 2—4%.

Проведенные опыты показывают, что при помощи ряда электро-

литов и некоторых неорганических добавок можно достигнуть регулирования водоудерживающей способности и плотности цементного теста. Опыты эти показали также, что существует оптимальный процент добавки гипса, при котором водоудерживающая способность данного цемента является минимальной, а плотность теста — максимальной.

в) *Влияние органических добавок.* Наряду с указанными выше неорганическими добавками было изучено также влияние на те же качества цементного теста некоторых органических веществ. Водоудерживающая способность этих добавок изучалась на тесте при $\rho/\nu = 1,0$. Цементное тесто было затворено водой, содержащей 1% пластифицирующей добавки СП—А, и водой, содержащей воздухововлекающую добавку (абетиновую смолу) в количестве 0,05%. Для сравнения цементное тесто было затворено также на чистой воде.

В таблице 4 приведены данные о водоотделении и плотности цементного теста, под влиянием указанных добавок.

Таблица 4
Плотность цементного теста в зависимости от содержания
поверхностно-активных добавок

Наименование добавок	Перво- началь- ное ρ/ν	Колич. вспл. воды в г вв	Колич. удерж. воды в г в у	Устан. значе- ние $\frac{\rho}{\nu}$	Плотн. це- ментн. теста
Чистая вода	1,0	13	37	1,35	0,298
Вода + 1% пластиф. СП—А	1,0	16,1	33,9	1,48	0,316
Вода + 0,05% аб. смолы	1,0	23	27	1,85	0,366

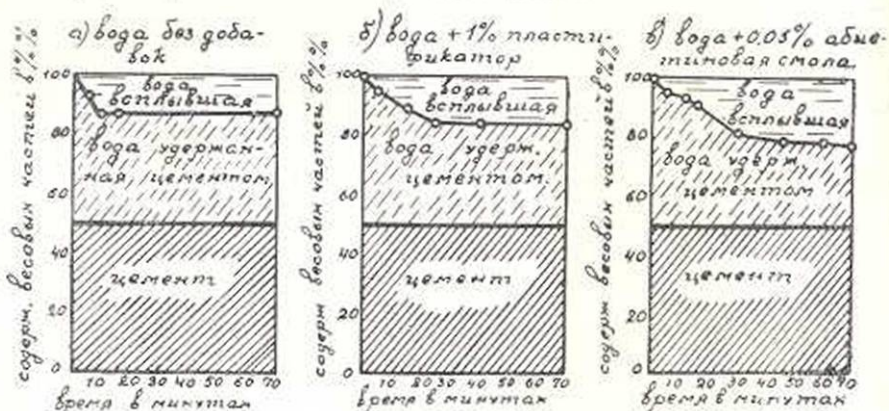
Наряду с окончательно установившимися показателями водоотделения, при проведении опытов фиксировались также показатели интенсивности водоотделения под влиянием добавок.

На фиг. 5 приведены графики водоотделения в зависимости от времени.

Проведенные опыты показывают, что обе изученные поверхностно-активные добавки увеличивают водоотделение и повышают плотность цементного теста, при чем сам процесс осаждения цементного теста при этом происходит в течение более длительного времени, чем при цементном тесте на чистой воде.

С. В. Шестоперов впервые показал, что влияние поверхностно-активных добавок на свойства цементного теста и цементного камня не одинаково на цементы, различающиеся между собой по химическому и минералогическому составу. По исследованиям А. В. Сатапкина [4] наиболее активное влияние поверхностно-активные вещества оказывают на алитовые и, особенно, вы-

сокоалюминатные цементы и относительно мало изменяют свойства белитовых цементов. В свете сказанного, интересно отметить, что опыты по изучению интенсивности водоотделения цементного теста под влиянием добавок были проведены и А. В. Саталкиным [5]. Смесь из 10% цемента и 90% воды с различными поверхностно-активными добавками взбалтывалась в течение 15 минут и оставлялась в покое до полного оседания частиц. Цементное тесто без добавок оседало в течение 200 минут, с добавкой абиетиновой смолы (0,5%) в течение 5 минут и с добавкой барды (0,10%) и сульфитного щелока (1,10%) в течение 1440–1550 минут.



Фиг. 5. Интенсивность водоотделения от цементного теста в зависимости от добавок.

Последние добавки определенно повышали суммарную поверхность цементных зерен, сильно увеличивая время их оседания, что отмечалось и в опытах автора. Что же касается влияния абиетиновой смолы, то опыты А. В. Саталкина и автора дали различные результаты, что следует объяснить разницей в качестве использованных цементов, а также разницей в концентрациях цементного теста в этих опытах.

Ю. М. Буттом и Г. М. Берковичем [6] было изучено влияние на водоудерживающую способность и другие свойства цементного теста интенсификатора помола гипроцемента, сульфатно-спиртовой барды, дубильного экстракта, древесного пека, некаля и подмыльного щелока на цементное тесто и цементные растворы, изготовленные на портландцементе заводского изготовления.

Опыты эти показали, что одни добавки уменьшают, а другие (дубильный экстракт и некаль) увеличивают водоотделение цемента.

Сравнивая влияние органических добавок на седиментационные качества цементного теста с влиянием на них неорганических добавок, изученных автором, можно прийти к выводу, что в конечном итоге обе группы добавок могут приводить к одним и тем же результатам.

Переходя к анализу данных в целом, следует прежде всего отметить, что для суспензий цемента плотность упаковки частиц определяется не геометрическими, а физико-химическими факторами. Экспериментально это обнаруживается в резко различных плотностях, т. е. условиях структурообразования под водой. Наши теоретические представления основываются на исследованиях в области физико-химии поверхностных явлений, проведенных академиком П. А. Ребиндером и его сотрудниками. Следуя этим работам можно сказать, что плотность упаковки определяется степенью гидрофильности поверхности частиц, т. е. их стабилизации водной средой по отношению к коагуляционному структурообразованию. С другой стороны, с увеличением дисперсности частиц в результате их диспергирования при взаимодействии с водной средой — резкого увеличения числа частиц в единице объема при той же весовой концентрации, способность к коагуляционному структурообразованию резко возрастает. Взаимодействие этих противоположных явлений (стабилизация и нептизация или диспергирование) и определяет в итоге рыхлость структурной сетки в цементном тесте и объем механически удержанной в этой сетке свободной воды.

3. Связь между седиментационными процессами в цементном тесте и сроками схватывания и прочностью цемента

По вопросу влияния гипса, хлористого кальция и ряда других веществ на различные свойства цемента имеются многочисленные работы. Среди них необходимо отметить работу Л. А. Гудовича [7], изучавшего зависимость свойств цементов от количественного развития процесса взаимодействия между компонентами твердеющего цемента и гипса.

В результате проведенных исследований Л. А. Гудович пришел к следующим выводам: введение гипса в цемент существенно сказывается на его прочности; вызываемое введением гипса изменение прочности цементов зависит от их минералогического состава, главным образом от содержания C_3A и от количества введенного гипса и определяется кинетикой связывания гипса в сульфоалюминат кальция; оптимальным является такое количество гипса, которое связывается полностью в течение 18—24 часов твердения цемента; предельным же, при котором прочность цемента нарастает во времени, является такое количество, которое связывается полностью за 28 дней.

Считая, что процесс схватывания и отчасти твердения зависит прежде всего от скорости растворения клинкерных минералов и от скорости вывадания новообразований из пересыщенного раствора, следует все же допустить, что в известной мере на эти процессы должны оказывать также влияние седиментационные свойства цемента и, в частности, его водоудерживающая способность.

Вопросы эти были изучены автором на 4 различных цементах, описанных в п. 2, химические составы коих даны в таблице 2.

Цементы №№ 1—3 были подвергнуты стандартным испытаниям в трамбованных растворах с вольским песком в пропорции 1:3. К этим цементам добавлялся полуводный гипс в количестве от 0 до 4 процентов по весу от цемента.

Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Согласно данным таблицы 5, введение в эти цементы дополнительного количества гипса оказывает следующее влияние: с увеличением содержания гипса сроки схватывания цементов сокращаются; при ускоренном методе испытания показатели прочности на сжатие в зависимости от содержания гипса получаются различными и соответственно изменяются переходные коэффициенты от ускоренных методов определения прочности на сжатие к нормальным; с повышением процента добавки гипса наблюдается замедление твердения в начальные сроки; полученные данные в отношении марки цемента в 28-дневном возрасте не дают устойчивой картины, но все же представляется возможным отметить тенденцию к увеличению марки цемента с увеличением процента добавки гипса в случае цемента № 3.

В свете этих данных большой интерес вызывало изучение влияния добавок на цемент № 4, полученный из клинкера без добавки гипса при помоле. Пределы прочности при сжатии и растяжении определялись на образцах из цементного камня, при чем на сжатие испытывались образцы размерами $2 \times 2 \times 2$ см, а на растяжение — восьмерки нормальных размеров. Образцы изготовлялись из цементного теста нормальной густоты.

В сравнении с предыдущими испытаниями, в данном случае в качестве добавок к цементу были взяты, кроме гипса, хлористый кальций, комбинация хлористого кальция с гипсом, комбинация гипса с глицерином, комбинация гипса с серной кислотой и, наконец, серная кислота. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

Несмотря на неполноту опытов, все же результаты их достаточно убедительно показывают возможности существенного регулирования свойств цементного теста и цементного камня путем добавления к цементу того или иного электролита, и в первую очередь гипса.

Из таблицы 6 следует, что добавка гипса к размолотому цементному клинкеру в количестве до 2 процентов, по сравнению с чистым цементным порошком, приводит к снижению нормальной густоты с 25,7 до 22,2%, удлинению сроков схватывания и повышению прочности цементного камня в 7-дневном возрасте на сжатие с 343 кг/см² до 652 кг/см² и на растяжение с 14,7 кг/см² до 34,6 кг/см².

Положительный эффект достигается и при прибавлении к цементному порошку других электролитов. В данных опытах наилучший эффект в отношении прочности цементного камня на сжатие, а именно, повышение ее с 343 кг/см² до 749 кг/см² имело место при добавке к цементу 2% гипса и 1% хлористого кальция. Опыты с цементным камнем (табл. 6) совершенно отчетливо показывают, что

Таблица 5

Влияние добавки гипса на качества цементов заводского изготовления

№№ цементов	Добав. гипса в проц. к весу цемента	Норм. густота в проц.	Сроки схватывания		Ускоренное испытание	Предел прочности при сжатии в кг/см ²			Предел прочности при растяжении в кг/см ²			Перех. коэфф. от ускор. испыт. к норм. на сжат. в 28-дн. возраст. $\frac{R_{\text{уск}}}{R_{28}}$
			начало	конец		3	7	28	3	7	28	
№ 1	0	29,5	7 ч. 5 мин.	10 ч. 10 мин.	175	235	369	354	19,5	18,3	28,6	0,50
	1	30	6 45	10 5	237	235	278	432	20,7	20,2	25,8	0,55
	2	30,5	4 30	10 10	248	180	360	490	19,8	21	28,2	0,51
	3	30,5	5 30	9 45	278	102	140	355	10,4	19	25,8	0,78
	4	30,7	5 20	9 50	230	120	133	354	12,3	14,2	24,9	0,65
№ 2	0	24,2	2 50	6 26	387	236	355	426	17,1	18,2	26	0,91
	1	24,5	3 00	7 00	446	254	293	323	17,1	20,4	32,6	1,14
	2	24,8	1 40	4 45	577	269	328	3×3	17,5	23,4	28,2	1,50
	3	25,0	2 14	4 55	483	223	325	454	20,6	20,2	20,9	1,06
	4	25,2	0 15	3 40	323	250	254	417	15,2	14,5	21,3	0,77
№ 3	0	25,0	3 50	6 45	448	—	—	—	—	—	—	—
	1	25,5	3 00	7 25	509	—	315	362	—	25,1	27	1,40
	2	26,0	2 30	6 25	520	—	397	441	—	29,5	27,8	1,18
	3	26,5	2 25	5 15	571	—	411	441	—	24,4	26,7	1,30
	4	26,5	3 00	6 05	375	—	334	450	—	26,2	29,9	0,84

Таблица 6

Наименование добавок	Добав. в проц. к весу цемента	Норм. густота	Сроки схватывания		Пределы прочности на сжатие в 7-дн. возр. в кг/см ²	Пределы прочности на растяж. в 7-дн. возр. в кг/см ²
			начало	конец		
Гипс	0	25,7	1 ч. 27 мин.	4 ч. 57 мин.	343	14,7
	1	22,8	4 10	—	422	27,5
	2	22,2	4	6 15	652	34,6
	3	23,9	2 50	7 30	383	24,0
	4	23,2	2 21	—	188	11,8
	5	23,6	1 55	3 17	213	14,4
Хлористый кальций	0,25	24,2	0 15	0 40	302	19,3
	0,5	23,0	0 35	2 02	341	17,8
	1,0	24,0	0 24	1 06	433	—
Гипс	2	—	—	—	—	—
Хлор. к.	1	22,7	3 05	—	749	20,2
Гипс	2	—	—	—	—	—
Глицерин	0,25	24,1	3 00	—	617	24,9
Гипс	2	—	—	—	—	—
Серная кислота	0,125	23,9	1 42	3 32	513	27,7
Серная кислота	0,25	24,7	0 35	0 39	510	23,8

те или иные добавки, повышающие прочность цемента, одновременно уменьшают „нормальную густоту“ его, что связано с водоудерживающей способностью цемента, т. е. в конечном итоге с седиментационными процессами.

4. Связь между седиментационными процессами в цементном тесте, химически связанной водой и плотностью цементного камня

Выше было показано, что в цементном тесте, сейчас же после его затворения и до начала схватывания, происходят процессы, в существенной мере предопределяющие плотность цементного камня. Было показано также, что можно влиять на абсолютное количество выступающей из цементного теста воды, но что количество воды, остающейся в цементном тесте, во всех случаях продолжает находиться в прямой зависимости от суммы взятых при затворении количество цемента и воды.

В свою очередь, плотность цементного теста в значительной мере предопределяет плотность цементного камня, поскольку со стабилизацией объема цементного теста, происходящей еще до начала схватывания, дальнейшее изменение плотности происходит только за счет процессов твердения цемента.

Процессы твердения цемента, начинаются с момента затворения теста, продолжаются очень долго и при благоприятных условиях тянутся многие месяцы и годы.

Ниже приводятся экспериментальные данные по определению

химически связанной воды в цементном камне и удельных весов затвердевшего цемента в месячном возрасте в зависимости от различной концентрации цементной суспензии. (Экспериментальная часть выполнена Б. А. Сосулиным.)

Химически связанной с цементом в этих опытах считалась вода, оставшаяся в цементном камне после сушки при 110° до постоянного веса.

Результаты опытов приведены в таблице 7.

Таблица 7

Количество химически связанной воды в процентах от веса цемента в зависимости от цементно-водных отношений

Наименование определений	Цементно-водные отношения					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Хим. связ. вода в проц. от цемента	14,7	13,5	12,2	11,2	10,0	9,5
Удельные веса цементного камня	2,25	2,26	2,27	2,29	2,31	2,33

По данным Б. Г. Скрамтаева [8], при водоцементном отношении от 0,25 до 0,386 количество химически связанной воды в проц. от веса цемента в 28-дн. возрасте составляет от 10,2 до 13,2%.

Результаты эти следует сопоставить с результатами аналогичных опытов, приведенных в книге Ф. Р. Мак-Миллана [9]. Результаты этих опытов приведены в таблице 8.

Таблица 8

Количество связанной воды в зависимости от возраста в процентах от веса цемента

Водоцементные отношения	Вода, оставшаяся в тесте после сушки при 115°C по отношению к сухому цементу (влажное хранение до испытания)							
	1 дн.	3 дн.	7 дн.	14 дн.	28 дн.	3 м.	6 м.	9 м.
0,30	4,1	6,3	8,3	8,8	9,7	10,6	11,0	11,6
0,45	5,0	7,7	9,8	10,5	11,7	13,0	14,0	14,7
0,60	5,7	8,6	10,8	11,7	13,0	14,6	15,9	16,8
0,75	6,2	9,2	11,5	12,6	13,9	15,8	17,0	18,2
0,90	6,6	9,6	11,9	13,3	14,4	16,7	17,7	19,0

Можно констатировать, что опытные данные разных авторов, в сравнимых случаях дают достаточно сходные результаты.

Данные эти показывают, что количество химически связанной воды в рассматриваемом возрасте, выраженное в процентах от веса цемента, имеет различные значения в зависимости от цементно-водного или, обратного ему, водоцементного отношения. Однако если

полученные в результате опытов количества связанной воды отнести не к весу цемента, а к сумме весов цемента и воды, взятых при затворении, то тогда процент связанной воды в данном возрасте цементного камня получится более или менее постоянным, независимо от цементно-водных отношений. Результаты такого перерасчета приводятся в таблице 9.

Таблица 9

Количество связанной воды в зависимости от возраста цементного камня и водоцементного отношения в процентах от суммы весов цемента и воды

Водоцементные отношения	Цементно-водные отношения	Возраст цементного камня								
		1 дн.	3 дн.	7 дн.	14 дн.	28 дн.	3 м.	6 м.	9 м.	1 г.
0,30	3,34	3,17	4,85	6,4	6,76	7,46	8,15	8,46	8,92	9,7
0,45	2,22	3,44	5,3	6,75	7,25	8,06	8,96	9,65	10,1	11,1
0,60	1,67	3,56	5,37	6,75	7,30	8,13	9,11	9,95	10,5	11,6
0,75	1,33	3,54	5,25	6,55	7,2	7,94	9,01	9,7	10,4	11,4
0,90	1,11	3,47	5,05	6,26	7,0	7,58	8,8	9,3	10,0	10,9
Средние значения		3,44	5,17	6,54	7,1	7,87	8,86	9,42	9,99	10,95

Результаты такого же перерасчета опытных данных В. Г. Скрамтаева и по таблице 7 приведены в таблице 10.

Таблица 10

Использованный источник	Цементно-водные отношения									
	1,0 (1,0)	1,5 (0,666)	2,0 (0,5)	2,5 (0,4)	2,59 (0,386)	3,0 (0,333)	3,13 (0,32)	3,5 (0,286)	4,0 (0,25)	Ср. знач.
По данным табл. 7	7,35	8,1	8,13	8,0	—	7,5	—	7,39	—	7,71
По данным В. Г. Скрамтаева	—	—	—	—	9,22	—	9,7	—	8,16	8,9

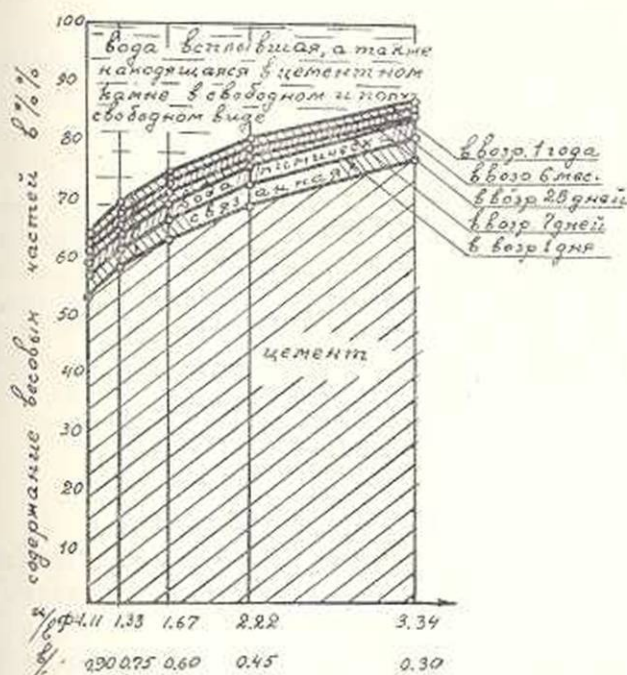
Таким образом, по всем данным результаты перерасчета количества химически связанной воды в 28-дневном возрасте дают близкие между собой значения—7,87%, 7,71% и 8,9% от суммы весов цемента и воды, взятых при затворении.

На фиг. 6 показан график, построенный по данным табл. 9, выражающий зависимость количества химически связанной воды в возрасте 1 д., 7 д., 28 д., 6 м. и 1 года.

Сравнивая фиг. 6 с фигурами №№ 2—4 легко видеть, что количество удерживаемой цементом воды в тесте и количество химически связываемой цементом воды определяются одним и тем же фак-

тором — концентрацией затворенного цементного теста и что оба эти количества находятся в прямой зависимости от суммы весов цемента и воды, взятых при затворении.

Как показывают приведенные опытные данные, вместе с увеличением веса цемента в цементном камне за счет химически связанной воды, происходит уменьшение удельного веса цементного камня.



Фиг. 6. Количество химически связанной воды в зависимости от возраста и цементно-водного отношения в процентах от суммы весов цемента и воды.

Оба эти обстоятельства приводят к тому, что абсолютный объем цементного камня и его плотность получаются большими, чем абсолютный объем цемента и плотность цементного теста. По данным Б. Г. Скрамтаева [8], удельные веса затвердевшего цемента составляют 2,47—2,68 при в/ц от 0,25 до 0,386.

По данным, приведенным в табл. 7, удельные веса затвердевшего цемента составляют 2,25—2,33 при ц/в от 1,0 до 3,5, т. е. при в/ц от 0,286 до 1,0.

Необходимо отметить, что, как показали точные исследования В. В. Некрасова [10], одновременно с увеличением объема твердой фазы происходит незначительное уменьшение суммарного объема системы цемент+вода (явление контракции). По его данным, величина предельной контракции в условиях подводного твердения цементного теста может составить до 80 мл на 1 кг цемента.

Считая, что цементно-водные отношения при изготовлении бетонов обычно принимаются в пределах от 1,0 до 2,5 и руководствуясь данными табл. 7. можно принять следующие средние значения: увеличение веса цемента за счет химически связанной воды на 13%, удельного веса затвердевшего цементного камня $\gamma_{цк} = 2,27$ и удельного веса цемента $\gamma_{ц} = 3,1$. Исходя из этих данных, среднее значение абсолютного объема цемента (C_k) в цементном камне в возрасте 28 дней составит

$$C_k = \frac{ц}{3,1} \cdot \frac{1,13 \times 3,1}{2,27} = \frac{ц}{3,1} \cdot 1,55.$$

Обозначая абсолютный объем цемента до затворения через C_1 , можно написать окончательные выражения:

$$C_k = 1,55 C_1 \quad (4)$$

или

$$C_k = 0,5 ц. \quad (5)$$

Выражение (4) для расчета плотности цементного камня в бетоне опубликовано автором еще в 1942 году [11].

В ы в о д ы

1. Седиментационный объем цементной суспензии (теста) разной концентрации определяется не геометрическими, а физико-химическими факторами.

Экспериментально установлено, что независимо от условий седиментации цементного теста (от состояния покоя до центрофугирования), количество воды, удержанной в седиментационном объеме, прямо пропорционально сумме весов цемента и воды, взятых при затворении цементного теста.

2. Специальные опыты по изучению влияния на седиментационные процессы в цементном тесте различных электролитов и добавок органического и неорганического происхождения показали, что в конечном итоге все они в той или иной степени могут быть использованы в качестве регуляторов скорости оседания частиц и седиментационного объема. При этом характер влияния этих добавок на седиментационные явления зависит не только от разновидности этих добавок и от химического и минералогического состава цемента, но и от количества добавок.

3. Существует связь между седиментационными процессами, сроками охватывания цементного теста и прочностью цементного камня. В опытах с цементным камнем показано, что те или иные добавки, повышающие прочность цементного камня, одновременно уменьшают „нормальную густоту“ цементного теста, что связано с водоудерживающей способностью цемента.

4. Уплотнение и упрочнение цементного камня в результате седиментационных явлений, наблюдаемые на образцах из цементного камня, не обязательно дадут такой же эффект в растворах и бетонах, поскольку в последних отжимающаяся из цементного теста вода может оставаться в межзерновых пространствах заполнителя. Влияние электролитов и поверхностно-активных добавок на механические характеристики цементного камня может заметно нарушить соответствие между собой марок цемента, устанавливаемых ускоренным методом „ЦНИПС-2“ в цементных кубиках и обычным методом в кубиках из раствора.

5. Закономерность, установленная в отношении водоудерживающей способности цементного теста (п. 1), распространяется и на химически связанную воду: количество химически связанной воды определяется концентрацией затворенного цементного теста и оно прямо пропорционально сумме весов цемента и воды, взятых при затворении цементного теста.

Институт строительных материалов
и сооружений АН Армянской ССР

Поступило 18 XII 1952

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Стольников В. В. и Лавринович Е. В. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на формирование структуры бетона и его водонепроницаемость. Известия ВНИИГ, т. 47, 1952.
2. Симонов М. З. Цемент Каспского завода. Журн. „Техника и строительство“, №№ 1—2, 1932.
3. Штаерман Ю. Я. Центрофугированный бетон. Тифлис, 1933.
4. Саталкин А. В. и Кубланова М. Б. Влияние поверхностно-активных веществ на цементы разного минералогического состава. ДАН СССР, т. LXXVII, № 4, 1951.
5. Саталкин А. В. и Кубланова М. Б. Влияние добавок поверхностно-активных веществ на основные свойства цементных растворов и бетонов. Журн. Прикладной химии, т. XXIII, № 10, 1950.
6. Бутт Ю. М. и Берковиц Г. М. Исследование влияния некоторых органических добавок на свойства цемента. Труды НИИЦЕМЕНТ, вып. 3, Москва, 1950.
7. Гудович Л. А. Установление оптимального и предельного содержания сернистого ангидрида в порглицементах. Труды Гипроцемент, вып. XIII, М.—Л., 1950.
8. Скрамтаев Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. Москва, 1936.
9. Мак-Миллан Ф. Р. Основные принципы приготовления бетона. Под редакцией и с дополнением А. Н. Адамовича и Л. В. Митгарца, М.—Л., 1935.
10. Некрасов В. В. Изменения объема системы при твердении гидравлических вяжущих. Известия АН СССР, ОТН, № 6, 1945.
11. Завриев К. С. и Симонов М. З. Проектирование составов бетона. Первое изд. в 1942 и второе в 1948, Тбилиси.

Մ. Զ. ՍԻՄՈՆՈՎ

ՍԵԴԻՄԵՆՏԱՑԻՈՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԸ ՑԵՄԵՆՏԱՅԻՆ ԽՄՈՐԻ ՄԵՋ ԵՎ ՆՐԱՆՑ
ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Կատարված հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ բեռաններում կիրառվող խառնվածքային ունեցող ցեմենտային սուսպենզիայի սեդիմենտացիոն ծավալը կախված է ոչ թե երկրաչափական, այլ ֆիզիկո-քիմիական գործոններից և որ սեդիմենտացիոն ծավալում պահվող ջրի քանակը ուղիղ համեմատական է չաղախման ժամանակ վերցված ջրի և ցեմենտի կշիռների գումարին։ Օգտագործելով զանազան էլեկտրոլիտներ կամ օրգանական և անօրգանական ծագում ունեցող զանազան հալելույթներ, կարելի է զեկալարել սեդիմենտացիոն պրոցեսները։ Կապ գոյություն ունի ցեմենտի խմորի մեջ կատարվող սեդիմենտացիոն պրոցեսների և կոպակցման ժամկետների, ցեմենտի ամրության և նույնիսկ ցեմենտի հետ քիմիապես կապված ջրի քանակի միջև։