

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М. З. Симонов

Самовакуумирование легких бетонов

§ 1. Сущность явления

Легкие бетоны, отличающиеся от обычных значительной пористостью, относительно мало уступают им по своим показателям прочности, водонепроницаемости и морозостойкости. В случае применения таких заполнителей, как литонидная пемза, легкие бетоны, при одинаковых расходах цемента и одинаковой консистенции, обладают даже лучшими показателями, чем обычные бетоны [1].

Указанное обстоятельство может быть объяснено характером капиллярных явлений, происходящих в легких бетонах.

Формирование свойств легких бетонов протекает в условиях взаимодействия двух капиллярных систем: цементного теста, постепенно затвердевающего в цементный камень, и пористого заполнителя. Зерна пористого заполнителя, подобно „микронасосам“, отсасывают из цементного теста воду, „аккумулируют“ ее в капиллярах и отдают воду обратно цементному тесту по мере его затвердевания и высыхания.

Если бы заполнитель поглощал из цементного теста столько воды, сколько вытесняется из его капилляров воздуха, то в тесте происходила бы замена водяных пор равным им объемом воздушных пор, и плотность цементного теста оставалась бы неизменной. В легких бетонах отсасываемый заполнителем из цементного теста объем воды не компенсируется отдачей тесту равного объема воздуха, в результате чего имеет место уплотнение цементного теста на поверхностях контактов с заполнителем.

Это утверждение будет обоснованным при условии доказательства следующих выдвигаемых здесь положений:

а) капилляры пористых заполнителей являются сообщающимися, и если достаточно долгое хранение заполнителей в воде все же не приводит к полному обводнению этих капилляров, то это объясняется защемлением в них воздуха, а не наличием в них „открытых“ и „закрытых“ пор;

б) давление защемленного в порах и капиллярах заполнителей воздуха в общем случае не равно атмосферному; давление это должно быть выше атмосферного при отсасывании заполнителями воды из цементного теста и ниже — при обратном движении воды.

Последнее может иметь место при вакуумной обработке легкобетонной смеси или в процессе затвердевания и высыхания бетона. В обоих случаях будет иметь место градиент давления между цементным тестом (камнем) и заполнителем на поверхностях контактов.

Экспериментальное исследование выдвинутых положений и составляет задачу настоящей работы.

Описанный характер протекающих в легких бетонах капиллярных явлений дает основание говорить о „самовакуумировании“ легких бетонов, поскольку явления эти до известной степени могут быть сравнены с явлениями, имеющими место в бетонах вообще, при вакуумной обработке.

Следует отметить, что если при вакуумной обработке бетона вода может отсасываться из цементного теста с интенсивностью не выше одной атмосферы, то капиллярные явления, как известно, не связаны с атмосферным давлением и поэтому при „самовакуумировании“ отсасывание воды из цементного теста пористым заполнителем может осуществляться и с более высокой интенсивностью.

При вакуумировании бетона отсасывание воды производится на толщину укладываемого слоя. Поэтому в вакуумированном бетоне может иметь место неоднородность—убывание эффекта вакуумирования по мере удаления от вакуумированной поверхности. В легком бетоне зерна пористых заполнителей, выполняющие роль „вакуумполостей“, равномерно распределены в бетоне. В то же время толщина „самовакуумируемого“ слоя в легких бетонах измеряется не десятками сантиметров, как в предыдущем случае, а долями сантиметра и даже миллиметра.

Можно показать расчетами, что толщина „самовакуумируемого“ слоя, незначительная по отношению к мелким зернам, быстро растет по мере увеличения крупности зерен. В соответствии с этим, мелкие зерна пористого заполнителя в качестве „вакуумполостей“ будут „заканчивать работу“ и „выключаться“ в начальной же стадии затвердевания бетонной смеси. Из сказанного следует, что эффект „самовакуумирования“, в том смысле, в каком это имеется в виду при вакуумной обработке бетона, будет тем больший, чем крупнее зерна заполнителя, чем меньше (до известной степени) подвижность бетонной смеси и чем медленнее всасываемость данного вида заполнителя. В этом же смысле, „самовакуумирование“ должно дать в легких бетонах больший эффект при их раздельной укладке и применении сухих заполнителей и меньший эффект—при обычном приготовлении бетонной смеси и применении предварительно насыщенных водой заполнителей.

Благодаря самовакуумированию вредные последствия седиментационных явлений в легких бетонах должны сказываться в меньшей степени, чем в обычных бетонах [2].

При обычной вакуумной обработке бетонной смеси отсасывание из нее воды производится в промежутке между окончанием

уплотнения и началом ее схватывания и продолжается обычно 10—15 минут. В легких бетонах процессы самоупучивания, т. е. отсасывание воды из цементного теста зернами заполнителя и затем отдача влаги обратно твердеющему цементному камню, протекают начиная с момента затворения бетонной смеси в течение всего периода формирования бетона. Поэтому предварительное вымачивание пористых заполнителей может «выключить» их из участия в процессах самоупучивания лишь в изначальной стадии, на некотором отрезке времени.

Явление вакуума в бетонах и растворах изучается с 1940 года [3]. В частности, вопрос этот изучался в Институте стройматериалов и сооружений АН Армянской ССР А. А. Аракелянцем в 1947 г.

Описанное выше самоупучивание легких бетонов следует отличать от явления вакуума в бетонах, обусловленного контракцией твердеющего цементного камня, неоднократно описанного в литературе [3, 4, 5, 6].

Явление вакуума, обусловленное контракцией, развивается в основном после начала схватывания бетонной смеси, т. е. в период, когда вакуумная обработка с целью ее уплотнения становится бесполезной.

Явление вакуума от контракции неизбежно будет накладываться на явление самоупучивания легких бетонов, соответственно усложняя общую картину.

Из описания сущности самоупучивания можно прийти к выводу, что процесс этот, протекающий в легких бетонах в течение длительного срока и самопроизвольно, может привести как к положительному, так и к отрицательному эффекту. В соответствии с этим, значительный интерес представляет не только изучение факторов, обуславливающих самоупучивание легких бетонов, и влияние этого явления на их качество, но и изучение возможностей управления процессами самоупучивания.

§ 2. Строение капилляров и капиллярные явления в пористых каменных материалах и бетонах

Каменные материалы, используемые в легких бетонах в качестве заполнителей, обладают значительной пористостью. Относительный объем пор в наиболее легких породах камней (аппийская пемза) достигает 80%. При приготовлении из таких камней заполнителей к собственной пористости их добавляется еще объем межзернивых пространств.

Объем пор (O) в каменных, бетонных и других капиллярно-пористых материалах легко определяется по одной из следующих формул:

$$O = v \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_s} \right) = v \alpha \quad (1)$$

$$\text{или} \quad O = \frac{P}{\gamma_0} \alpha, \quad (2)$$

где v — объем камня (бетона),

P —вес камня (бетона),

α —относительный объем пор,

γ_0 и γ_u —объемный и удельный вес камня.

Объем пор (Q) до известной степени характеризует прочность каменных и бетонных материалов на сжатие и объемный вес. Что же касается таких показателей их, как капиллярная всасываемость, морозостойкость, водонепроницаемость, воздухопроницаемость и др., то эти качества пористых материалов определяются не столько объемом пор и капилляров, сколько размерами и строением последних.

Строение капилляров

В технической литературе иногда указывают на капиллярно-пористые материалы с системой замкнутых или сообщающихся пор. При этом к материалам с замкнутой системой пор относят те из них, в которых, при достаточно долгом выдерживании в воде, часть пор остается заполненной воздухом.

Как уже указывалось выше, автор исходит из допущения, что в большинстве капиллярно-пористых тел капилляры связаны между собой, а неполное заполнение капилляров водой объясняется не „замкнутостью“ пор, а строением капилляров, обуславливающим защемление в них воздуха.

Диаметры капилляров по своим размерам колеблются от нескольких миллиметров в поперечнике до размеров молекул, когда они перестают быть доступными для молекул крупных размеров.

В этих пределах различаются не только диаметры капилляров между собой, но и диаметры одного и того же капилляра по длине. Переменность сечения капилляров выражается как в сужении и расширении их по длине, так и в изменении формы: цилиндрическая форма может переходить в конусообразную, клинообразную, щелевидную форму и т. п. Наряду с этим, следует различать одиночные и ветвистые капилляры со стенками гладкими, пористыми, запыленными и т. д.

Необходимо отметить также, что для развития капиллярной диффузии необходимо наличие в стенках капилляров углублений и микроскопических открытых каналов.

Существует качественное различие в характере капиллярных явлений, протекающих в капиллярах различных размеров, в связи с чем имеются предложения по разделению капилляров на макрокапилляры и микрокапилляры.

По предложению А. В. Лыкова [7], к микрокапиллярам следует отнести капилляры с радиусом, удовлетворяющим условию:

$$0,5 \times 10^{-7} \text{ см} < r < 10^{-5} \text{ см.}$$

Предложение это обосновывается тем, что при более тонких капиллярах радиусы их становятся сравнимыми с радиусом молекулы $\sim 10^{-8}$ см, а для радиуса капилляра $r = 107 \times 10^{-7}$ см давление насыщенного пара над мениском практически не отличается от давления насыщенного пара над плоской поверхностью.

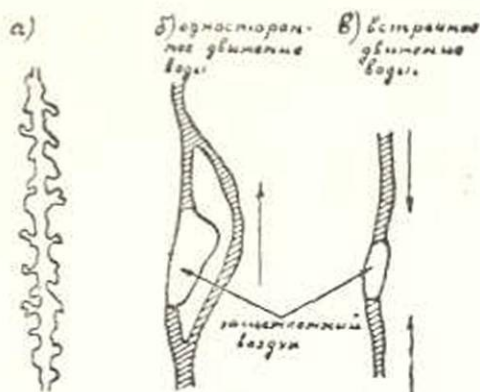
Капилляры с радиусом $r > 10^{-2}$ см относятся к макрокапиллярам.

Деление капилляров на макро- и микрокапилляры обосновывается еще по признакам конденсации в них пара. Толщина адсорбционного слоя пара, согласно многочисленным экспериментальным данным, составляет примерно 10^{-2} см. Таким образом, если капилляр сквозной, то слияние адсорбированных пленок жидкости может произойти, если радиус капилляра в наиболее узком месте будет $r < 10^{-2}$ см. Только тогда образуется мениск, и, следовательно, будет происходить капиллярная конденсация.

Если же $r > 10^{-2}$ см, то в сквозном капилляре мениск не образуется, и капиллярной конденсации быть не может. Такой капилляр может быть заполнен водой только при непосредственном соприкосновении с ней.

Защемление воздуха в капиллярах легко себе представить в случаях соприкосновения капиллярно-пористого тела с водой одновременно по всей поверхности (схема а, фиг. 1), как это имеет место при затворении бетонной смеси, когда движение воды в капиллярах пористого заполнителя будет происходить от периферии к центру.

Но защемление воздуха в капиллярах будет иметь место и в случае одностороннего соприкосновения пористого материала с водой из-за неодинаковой скорости движения воды в капиллярах разных диаметров. Так, например, в капилляре, состоящем из двух ветвей (схема б, фиг. 1), вода подымается по тонкой (правой) ветви и далее будет двигаться по основному стволу капилляра, преграждая выход в этот ствол воздуху, находящемуся в утолщении левой ветви.



Фиг. 1. Схемы капилляров.

Методика изучения строения капилляров

Из предыдущего можно сделать вывод, что изучение строения капилляров в капиллярно-пористых телах является достаточно сложной задачей. Представляется возможным получить количественную и качественную характеристику строения капилляров в пористых каменных материалах и бетонах микроскопическим методом, методом капиллярного давления, путем анализа изотерм сорбции и десорбции и т. д.

Микроскопический метод может быть использован для определения размеров капилляров и их распределения в шлифах пористых камней и бетонов по аналогии с методом, принятым в петрографии для определения размеров минералов и их относительных количеств.

Линейным методом микроскопического анализа автором изучены размеры пор и общая пористость ряда пористых каменных материалов и бетонов [8]. Площади, занимаемые крупными порази, микроскопическим методом определяются точнее, чем площади, занимаемые мелкими порази. Поэтому установление размеров пор этим методом можно ограничить определенными диаметрами. Суммарная площадь, занимаемая более тонкими капиллярами, может быть определена как разность между общей объемом пор, вычисляемым, исходя из удельного и объемного весов материала, и объемом пор, обуславливаемым крупными капиллярами. Этот метод основан на предположении о равномерном распределении пор в породе.

Методом капиллярного давления следует именовать метод, применяемый для определения пор ультрафильтров и некоторых других материалов. Этот метод использован В. В. Стольниковым и Е. В. Лавринович для определения размеров пор в цементном растворе и цементном камне [9]. Метод этот основан на использовании функциональной зависимости между величиной капиллярного давления и радиусом кривизны поверхности раздела жидкость-вода. Путем продавливания жидкости из капилляра газом находят то давление, при котором с поверхности образца, обращенной к воде, начинают отрываться отдельные пузырьки воздуха. Диаметр пор D будет равен

$$D = \frac{4\sigma}{1,014 \times 10^6 P} \text{ см}, \quad (3)$$

где σ — поверхностное натяжение на границе жидкость-газ,

P — давление воздуха в атмосферах.

Для определения размеров фракций пор в гетеропорозных телах А. В. Думанским предложено применять метод возрастающего давления.

По предложению А. В. Лыкова [7] представление о строении капиллярно-пористых тел можно получить по форме изотерм сорбции и десорбции. При этом методе исследуемый материал помещают в атмосферу влажного воздуха с определенным давлением водяного пара. По истечении некоторого промежутка времени устанавливается равновесие между содержанием воды в материале и давлением пара в окружающем воздухе. Изменяя последовательно давление пара в окружающем воздухе, можно получить зависимость между давлением пара и содержанием воды в материале в виде некоторой кривой. Кривая эта называется изотермой, поскольку зависимость между содержанием воды в материале и давлением пара устанавливается при неизменной температуре.

Среди исследователей естественных камней и бетонов получил распространение метод качественной оценки их строения по интенсивности и высоте капиллярного подсоса.

Оценка строения капиллярно-пористых тел возможна также по удельной поверхности. Удельная поверхность материалов в существенной мере зависит от того, получены ли они размолот плотных или пористых материалов. Например, порошок цементных клинкеров, молотого кварца, известняков и др., характеризующиеся малой пористостью, обладают малой внутренней поверхностью. Даже в том случае, когда такого рода материал проходит через сито 10000 отверстий на 1 см^2 , поверхность его может составлять доли $1 \text{ м}^2/\text{г}$. В то же время такие материалы как трепела, диатомиты, вулканические пеплы, глины и др. обладают чрезвычайно тонкой пористостью и высоко развитой внутренней поверхностью раздела, достигающей многих сотен $\text{м}^2/\text{г}$.

С точки зрения рассматриваемой задачи особенно большой интерес представляет изучение удельной поверхности капиллярно-пористых тел без диспергирования последних.

Метод определения удельной поверхности сыпучих или пористых тел основан на измерении сопротивления, которое оказывает пористое тело протеканию через него разреженного воздуха [10].

Величина и свойства внутренней поверхности и структура тонких пор могут быть определены также структурным и электронно-микроскопическим методом [11].

По мнению автора, важную косвенную характеристику строения капиллярно-пористого тела можно получить измерением в нем кинематики зацементации воздуха.

Интенсивность капиллярного всасывания

Водоотсасывающая способность пористого материала зависит от водоподъемной силы капилляров, относительной площади, занимаемой этими капиллярами на поверхности данного материала, и от влажности материала.

Водоподъемная сила капилляра Q находится из известного выражения.

$$Q = \frac{4\sigma}{\alpha} = h\gamma, \quad (4)$$

где σ — поверхностное натяжение воды,

α — диаметр капилляра,

γ — плотность воды,

h — высота поднятия водяного столба.

Из выражения (4) видно, что подъемная сила капилляра равна весу водяного столба.

Каждая частица воды, расположенная на высоте $h' < h$, испытывает растягивающее напряжение $h'\gamma$, а столб воды как бы висит в капиллярной трубке, передавая свой вес на ее стенки.

Относительная площадь, занимаемая капиллярами на поверхности пористого материала, пропорциональна относительному объему пор (α) в материале.

Поэтому водоотсасывающая способность пористого материала (F) в сухом состоянии будет равна произведению водоподъемной силы капилляров на относительный объем пор в материале, а именно

$$F = Q\alpha. \quad (5)$$

Защемление воздуха в капиллярно-пористых телах и методика определения его давления

Выше уже указывалось, что в капиллярно-пористых материалах может иметь защемление воздуха независимо от того — соприкасается ли данный материал с водой всей поверхностью или ее частью.

В зависимости от строения капиллярно-пористых тел относительный объем защемленного воздуха и его давление будут различными.

Объем защемленного воздуха (O_z) во влажном капиллярно-пористом материале определяется весьма просто.

Общий объем пор (O) в материале вычисляется согласно выражению (1) или (2), и общий объем воды, вошедший в капилляры (B) материала, определяется из разности весов влажного и сухого материала. Тогда

$$O_z = O - B. \quad (6)$$

Защемленный воздух, как потерявший связь с атмосферой, в общем случае будет иметь давление, отличающееся от атмосферного. Давление защемленного воздуха в материале будет зависеть от объема вытесняемого из капиллярного воздуха (O_n) при проникновении в них воды.

Среднее давление защемленного воздуха (P_z) по закону Мариотта вычисляется из следующего выражения:

$$P_z = \frac{P(O - O_n)}{O_z}. \quad (7)$$

где P — атмосферное давление.

Объем вытесненного из капилляров воздуха может быть меньше или равен объему воды, вошедшей в капилляры.

Принимая во внимание выражение (6), приходим к выводу, что:

$$\begin{array}{ll} \text{при } O_n = B & P_z = P \\ \text{и} & \text{при } O_n < B & P_z > P. \end{array}$$

Из приведенных данных видно, что защемленный воздух будет иметь давление, равное атмосферному только в частном случае. В общем же случае давление защемленного воздуха будет выше атмосферного.

Эти же данные позволяют заключить, что водоотсасывающая

способность пористых тел может изменяться в заметных пределах в зависимости от целого ряда факторов: изменения атмосферного давления, изменения температуры воздуха, температуры воды, наличия в воде примесей поверхностно-активных веществ и др.

Понижение атмосферного давления будет увеличивать всасываемость пористых тел подобно тому, как это приводит к поднятию уровня грунтовых вод.

Изменение температуры заземленного воздуха будет вызывать в нем изменение давления и соответственно вытеснение или дополнительное всасывание капиллярами воды.

Изменение температуры воды или наличие в воде поверхностно-активных веществ будет вызывать изменение поверхностного натяжения воды и, соответственно, изменение водоподъемной силы капилляров.

Давление заземленного воздуха и, соответственно, количество воздуха, вытесняемого из капилляров при проникновении в них воды, можно вычислить на основе данных опыта, проводимого по следующей методике.

Сосуд необходимой емкости с горлышком заполняется исследуемым капиллярно-пористым материалом и заливается водой. Горлышко сосуда закрывается резиновой пробкой с вставленной в нее бюреткой и сверху до некоторой отметки заливается водой. При проведении опыта должны быть обеспечены быстрое заполнение сосуда и бюретки водой и герметизация сосуда. Во избежание испарения воды из бюретки последняя прикрывается, а на поверхность воды наливается капля масла. Уровень воды в бюретке останется неизменным, если объем вытесняемого из капилляров воздуха равен объему воды, проникаемой в капилляры, т. е. если $O_0 = B$.

Понижение уровня воды в бюретке будет указывать на то, что вода проникает в капилляры без вытеснения из них воздуха, т. е. сжимая воздух в них.

По данным изменения уровня воды в бюретке можно сделать необходимые вычисления.

Зная взятую навеску капиллярно-пористого материала, вычисляют, согласно выражению (2), объем пор (O) в нем.

По приращению веса материала в воде вычисляется объем (вес) воды (B), вошедшей в капилляры.

Объем заземленного воздуха вычисляется согласно выражению (6)

$$O_0 = O - B.$$

Давление заземленного воздуха определится из выражения

$$p_3 = \frac{p(O_0 + B_0)}{O_0}, \quad (8)$$

где B_0 — количество воды, „осевшее“ в бюретке ниже нулевой отметки.

Описанная методика тождественна с методикой В. В. Некрасова, предложенной им для определения контракции [6]. Очевидно, что при

изучении, например, свежензготовленных бетонов на пористых заполнителях, количество воды, „осевшее“ в бюретке, будет вызвано как сжатием защемленного воздуха, так и контракцией цементного камня. Поэтому для получения картины сжатия защемленного воздуха в легких бетонах следует отдельно установить картину контракции цемента в бетонах того же состава на плотных заполнителях.

Случай, когда давление защемленного воздуха ниже атмосферного, а именно

$$p_a < p, \quad (9)$$

может иметь место, например, в свежензготовленном бетоне на пористом заполнителе при вакуумной обработке. Вода при вакуумировании будет отсасываться как из цементного теста, так и из капилляров пористых заполнителей. В результате отсасывания из капилляров воды давление защемленного воздуха внутри может упасть ниже атмосферного.

После удаления вакуумщитов вода начнет отсасываться капиллярами в обратную сторону, и давление защемленного воздуха начнет увеличиваться.

Описанная картина служит объяснением высокой эффективности вакуумирования легких бетонов, поскольку в них имеет место суммирование обычного эффекта вакуумирования с явлениями самовакуумирования.

§ 3. Водопоглощение пористых каменных материалов в зависимости от различных факторов

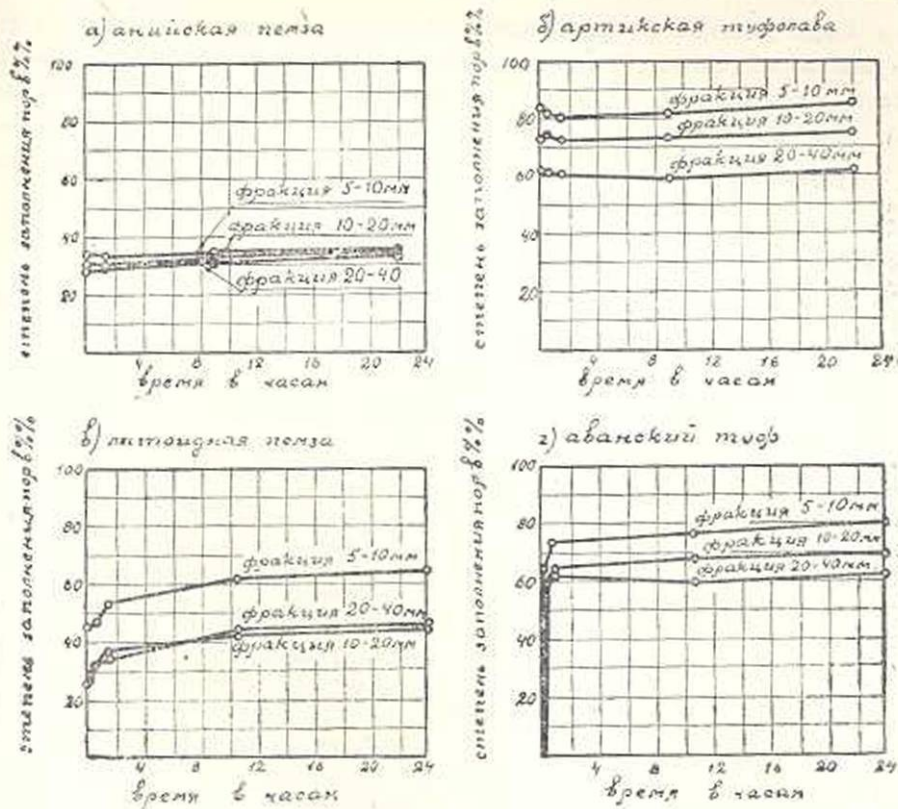
Как уже было отмечено, капилляры пористых камней при погружении в воду, из-за защемления в них воздуха, не могут заполняться водой полностью и что степень заполнения их капилляров зависит от породы камней, от размера их и ряда других причин.

Водопоглощение в зависимости от породы камней и размера образцов

Вопрос этот был подвергнут экспериментальному изучению первоначально на 4 видах пористых заполнителей: из анийской пемзы, арктической туфолавы, литондной пемзы и аванского туфа. Для каждого вида заполнителя изучались 3 фракции: с зернами от 5 до 10 мм, от 10 до 20 мм и от 20 до 40 мм.

Водонасыщение заполнителей определялось путем выдерживания их в воде в течение суток. Результаты опытов показаны на фиг. 2.

Как видно из фигуры, ни в одном из изученных заполнителей вода не заполнила полностью всех капилляров и пор. Объемные веса зерен испытанных заполнителей имели значения: для анийской пемзы— 560 кг/м^3 , арктической туфолавы— 1075 кг/м^3 , литондной пемзы— 1400 кг/м^3 и аванского туфа— 1550 кг/м^3 . Пористость зерен заполнителей была наибольшей у анийской пемзы (0,762) и наименьшей у аванского туфа (0,380).



Фиг. 2. Степень заполнения капилляров зерен заполнителя в проц. в зависимости от крупности зерен и продолжительности выдерживания в воде.

Как показали опыты, уже 15-минутное выдерживание в воде оказалось достаточным для максимального насыщения водой заполнителей из ангийской пемзы и арктического туфа, в то время как заполнители из аванского туфа и в особенности из литондной пемзы продолжали впитывать воду и в течение последующего времени. Степень заполнения пор оказалась тем выше, чем мельче зерна заполнителя.

Вопрос о том, в какой степени плотность материала и увеличение размера зерен заполнителя (свыше 20—40 мм) влияют на водопоглощение, был изучен на литондной пемзе. Образцы были изготовлены кубической формы. Испытанию было подвергнуто 42 образца, с размерами ребер от 4,3 до 6,9 см. Опыты эти показали, что при объемном весе от 1130 до 1777 кг/м³ влагоемкость образцов составила от 5,4 до 18,9% по весу и от 8,8 до 25,6% по объему. В то же время общий объем пор в образцах составлял от 23,7 до 51,5% и при выдерживании их в воде в течение суток поры эти заполнялись водой на 16,4—65,3%. Определенной закономерности между плотностью литондной пемзы и влагоемкостью не наблюдалось.

Интенсивность водонасыщения, изученная на 3 образцах с ребрами от 4 до 5 см, показана на фиг. 3.

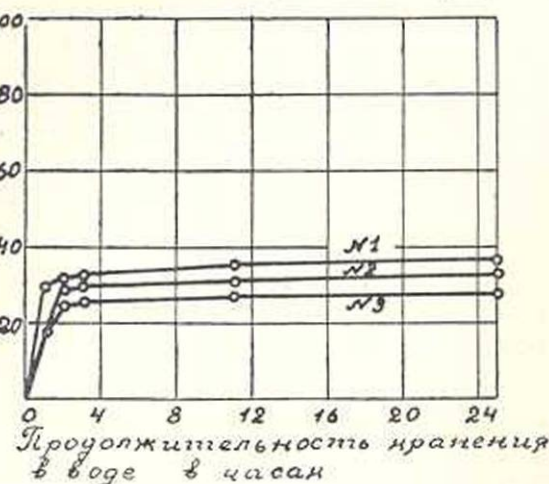
Судя по этой фигуре, наиболее интенсивное водопоглощение имеет место в течение первых 2 часов. Капилляры и поры в течение указанного периода заполняются водой на 25,6—32,6%, в то время как при 25-часовом выдерживании образцов в воде степень заполнения

пор составила всего 28,8—37,5%.

Необходимо отметить, что если заполнитель из литонидной пемзы при зернах от 20 до 40 мм уже при 15-минутном выдерживании в воде показал водопоглощение 7,5% по весу и заполнение пор на 26,2%, то кубики из литонидной же пемзы с ребрами от 4 до 5 см имели примерно те же

показатели водопоглощения только после 2-часового выдерживания

в воде.



Фиг. 3. Влагоемкость литонидной пемзы в проц. от объема в зависимости от продолжит. хранения в воде.

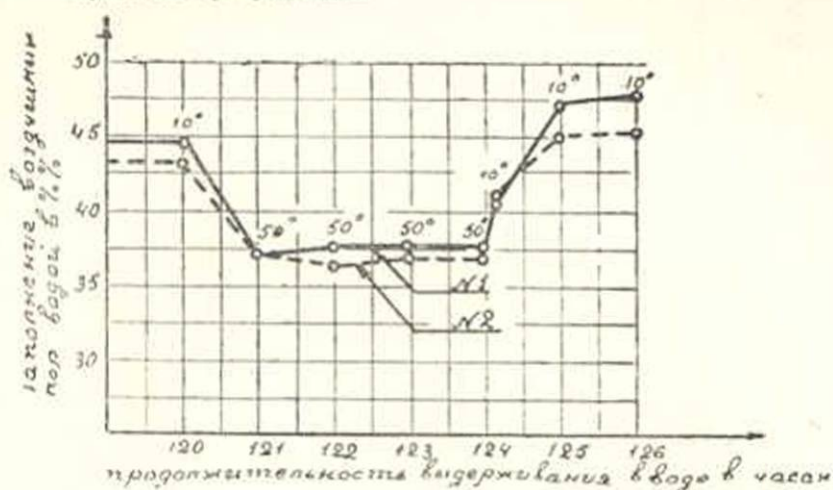
Водопоглощение пористых камней в зависимости от температурного фактора

Согласно представлениям, высказанным выше, капилляры в пористых заполнителях можно рассматривать как бы закрытые с одного конца. Вода, проникая в такие капилляры, должна вызвать постепенное сжатие находящегося внутри их воздуха до момента наступления некоторого равновесия. Последнее должно нарушаться при изменении температуры воздуха: с повышением температуры объем воздуха будет увеличиваться, и вода из капилляров начнет вытесняться наружу и, наоборот, с понижением температуры вода в капиллярах будет двигаться вглубь. Если пренебречь изменением поверхностного натяжения воды и изменением количества воды, расходуемого на насыщение воздуха в капиллярах, в зависимости от температуры, то объем воздуха, заключенный в порах и капиллярах, должен изменяться пропорционально изменению абсолютных температур по известной формуле:

$$v_2 : v_1 = (273 + t_2) : (273 + t_1).$$

Высказанные предположения были подтверждены следующими опытами. Кубики, выпиленные из литонидной пемзы с ребрами от 4 до 5 см, были выдержаны в воде с температурой 10° в течение 5 суток. Затем вода, в которую были уложены образцы, была подогрета в течение 1 часа до 50° и, спустя несколько часов, температура воды вновь была понижена до 10°.

В течение всего этого времени образцы взвешивались и на основании полученных данных делались расчеты по определению степени заполнения в этих образцах пор и капилляров водой. На фиг. 4 показаны полученные результаты.



Фиг. 4. Степень заполнения капилляров литонидной пемзы водой в проц. при повышении температуры воды от 10 до 50°.

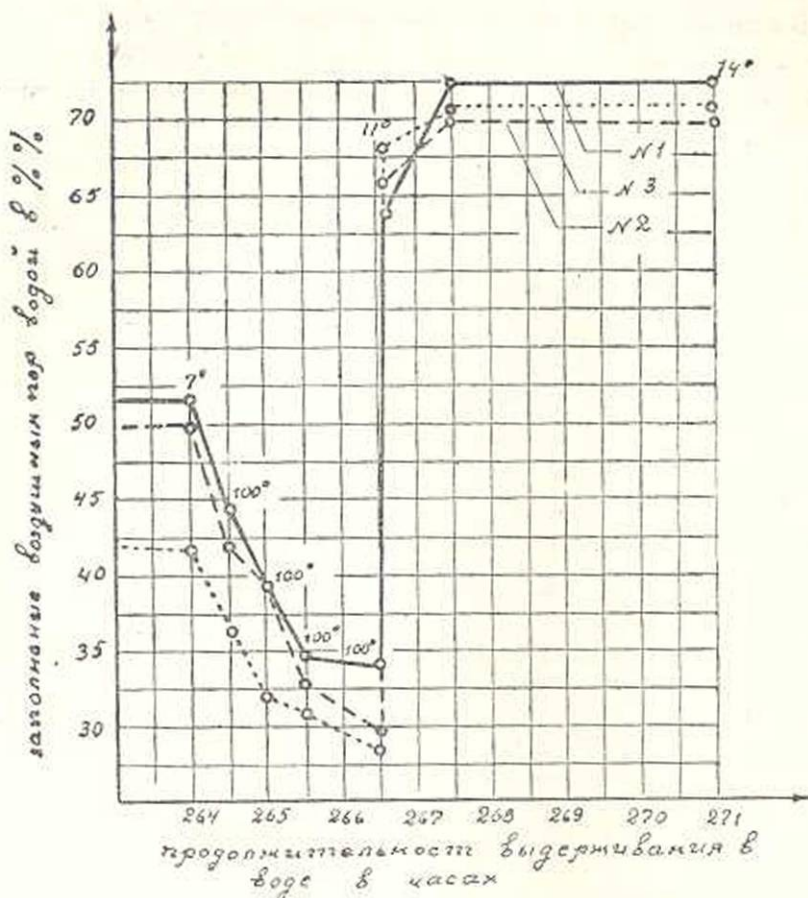
Как видно из фигуры, при повышении температуры воды степень заполнения водой воздушных пор в образцах из литонидной пемзы уменьшается и при восстановлении температуры водной среды степень заполнения воздушных пор восстанавливается, но с некоторым превышением.

Аналогичные результаты соответственно численно большие, были получены в других опытах при повышении температуры воды от 7 до 99° (см. фиг. 5).

Делая допущение, что при изменении температуры заземленного воздуха давление его остается неизменным, были сделаны расчеты по определению объема этого воздуха при двух крайних температурах воды. Как показали опыты, фактические значения объемов вытесненной из капилляров воды приблизительно оказались равными разнице в объемах заземленного воздуха, определенной путем соответствующих расчетов.

В обоих опытах, при восстановлении исходной температуры, степень заполнения пор водой восстанавливалась, но с некоторым превышением. Это явление следует объяснить тем, что в крупных капиллярах, в которых глубина всасывания воды будет соответственно меньшей, чем в мелких капиллярах, заземленный воздух при расширении может вытеснить всю воду и частично потерять также некоторую часть своего объема.

Если повышение температуры среды вызывает уменьшение влагоемкости пористых заполнителей, то снижение температуры среды должно привести к обратному результату. Для проверки этого, обра-



Фиг. 5. Степень заполнения капилляров литонидной пемзы водой в проц. при повышении температуры воды от 7 до 90°.

зец из литонидной пемзы был высушен до постоянного веса и погружен в воду с температурой 50°. Спустя 3 часа, температура воды была понижена до 10°. Данные о влагоемкости этого образца, сопоставленные с данными о влагоемкости того же образца, но выдержанного все время при температуре 20°, показаны на фиг. 6.

Как видно из фигуры, водопоглощение литонидной пемзы при понижении температуры воды с 50 до 10°, в результате уменьшения объема заземленного воздуха, действительно повысилось.

Приведенные данные показывают, что изменением температуры среды можно влиять на водопоглощение пористых заполнителей, причем, чем больше объем заземленного воздуха, тем значительнее будет изменение их водопоглощения.

Можно указать на следующие возможности использования описанных явлений на практике. Если свежесформованные изделия из легкого бетона или легкого железобетона еще задолго до начала схватывания внести в камеру с более низкой температурой, то произойдет дополнительный процесс „самовакуумирования“ этих изделий.



фиг. 6. Влагоемкость литондной пемзы в проц. от объема в зависимости от изменения температуры среды.

При термической обработке изделий из легкого бетона и легко-го железобетона методом электропрогрева, электрообогрева или прогрева без применения пара опасения пересыхания бетона уменьшаются, поскольку при этом из капилляров заполнителей будет вытесняться некоторая часть аккумулированной в них воды, т. е. произойдет „самоувлажнение“ бетона.

В начальные сроки твердения легких бетонов с повышением температуры в них в результате экзотермических процессов также будет иметь место „самоувлажнение“ бетона, что благотворно будет влиять на твердение бетона. В частности, процесс самоувлажнения легкого бетона явится фактором торможения развития усадочных явлений в легких бетонах, что весьма желательно в целях предупреждения появления трещин в молодом бетоне.

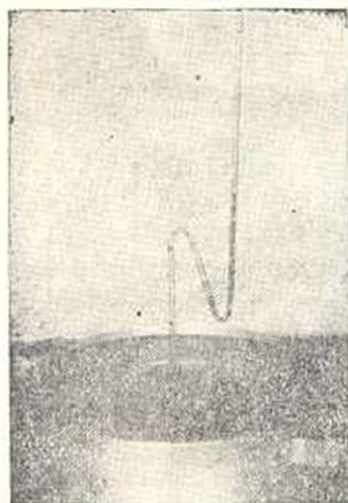
§ 4. Давление защемленного воздуха в пористых камнях и бетонах

Если капилляры пористых каменных материалов являются сообщающимися, то в разреженном пространстве вода должна их заполнить полностью. Исходя из этого, испытуемые заполнители с зернами от 20 до 40 мм были высушены до постоянного веса, высыпаны в камеру, в которой было создано разрежение воздуха в 500 мм ртутного столба и затем залиты водой. Опыты эти показали, что степень заполнения капилляров в легких заполнителях, по сравнению с насыщением их при обычном давлении воздуха, повысилась:

- для ангийской пемзы с 33,5 до 87,5%,
- для арктической туфолавы с 62,6 до 80,7%,
- для литондной пемзы с 44,5 до 97,8%.

Полученные результаты дают основание считать, что в условиях более высокого разрежения заполнение капилляров пористых каменных материалов более близко подойдет к 100% и что стенки между отдельными пора́ми и капиллярами в легких заполнителях являются проницаемыми для капиллярной воды.

Переходя к вопросу о степени сжатия заземленного воздуха в порах увлажненных легких заполнителей, необходимо прежде всего отметить, что факт сжатия воздуха в них легко устанавливается простым способом, показанным на фиг. 7.



Фиг. 7. Качественное определение сжатия заземленного воздуха в литондной пемзе.

Стеклянная трубка, изогнутая, как это показано на фигуре, и заполненная в нижнем колене подкрашенной водой или ртутью, устанавливается в отверстие, просверленное в кубике, выпиленном из испытуемого вида заполнителя. После этого кубик погружается в воду. Спустя некоторое время, происходит нарушение равновесия в уровнях ртути, причем последняя начинает перемещаться в сторону открытого конца трубки, как это видно на фиг. 7. Такое движение жидкость может получить только в результате сжатия воздуха в ядровой части кубика.

Описанный опыт может служить только для качественного изучения вопроса. Для определения степени сжатия заземленного воздуха в порах заполнителей был принят метод, описанный выше, подобный принятому В. В. Некрасовым для изучения контракционных явлений [6]. В соответствии с этим методом, стеклянные колбы с узким горлом под самую пробку заполнялись испытуемым материалом, после чего колбы плотно закрывались резиновой пробкой с вставленной в нее бюреткой и сверху до некоторой отметки заливались водой. Во избежание испарения, на поверхность воды в бюретку наливалась капля масла. Наблюдения за уровнем мениска в бюретке в начале опыта производились через каждые 5 минут, а далее — через большие промежутки времени.

Описанным методом сжатие заземленного воздуха было измерено в щебне с зернами от 20 до 40 мм из ангийской пемзы и литондной пемзы, а также в бетонах на тех же заполнителях и для сравнения в бетоне на плотном заполнителе и в тесте из обыкновенного цемента и известково-пемзового вяжущего.

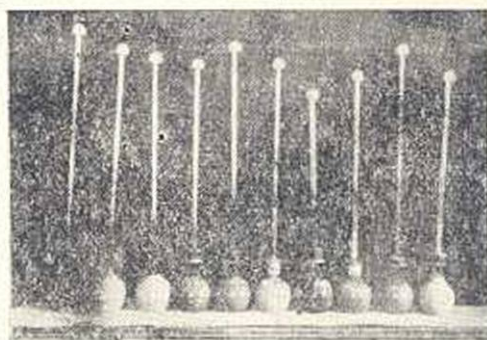
В легких бетонах явление вакуума, как уже указывалось, обусловливается одновременно как водопоглощением пористых заполнителей, так и контракцией системы цемент + вода.

Поэтому для ориентировочного определения количества воды, отсасываемого легкими бетонами за счет сжатия защемленного воздуха, необходимо вычесть из суммарного количества поглощенной воды то количество, которое поглощается вакуумом за счет контракционных явлений в обычном бетоне.

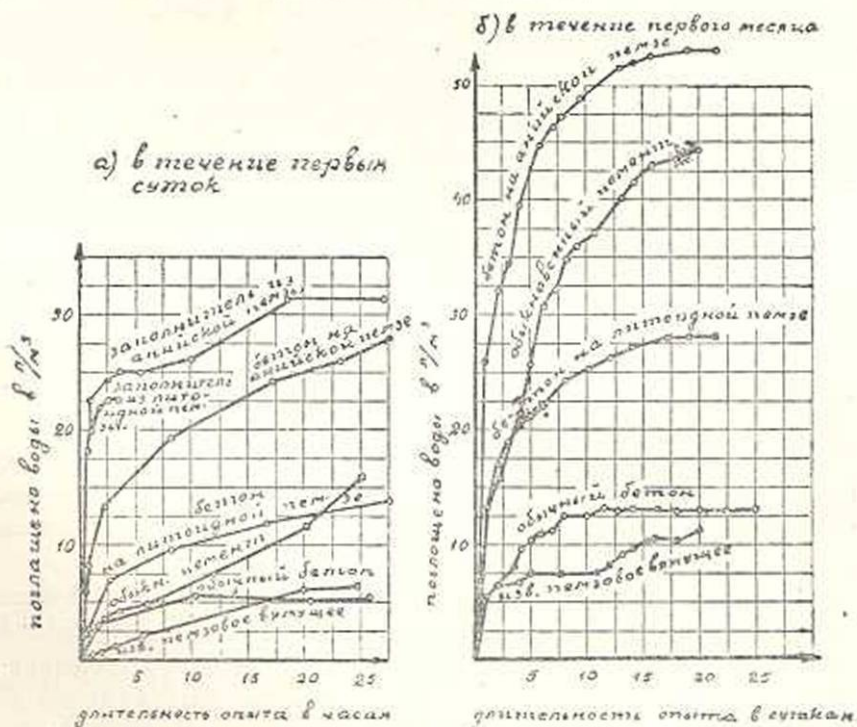
На фиг. 8 показаны колбы с бюретками в стадии опытов.

Результаты определения описанным методом количества поглощаемой бетонами, вяжущими и заполнителями воды показаны на фиг. 9.

Итоговые данные о количестве воды, отсасываемого изученными материалами в результате самовакуумирования, т. е. за счет сжатия защемленного воздуха и контракции, приведены в таблице 1.



Фиг. 8. Колбы с бюретками в стадии опытов по определению степени сжатия защемленного воздуха в пористых материалах.



Фиг. 9. Интенсивность самовакуумирования бетонов, заполнителей и вяжущих.

Таблица I

Количество воды, отсасываемое пористыми камнями, вяжущими и бетонами за счет сжатия зацементированного в них воздуха и контракции

Наименование материалов	Количество воды, отсасываемое в л/м	
	в течение 5 часов	в течение 20 суток
Щебень из ангийской пемзы	25	—
Щебень из литонидной пемзы	22,5	—
Тесто из обычн. цемента	4,5	44
Тесто из известк. пемзового вяжущего	2	11
Бетон из ангийской пемзы	16	53
Бетон на литонидной пемзе	8	28
Бетон на базальт. щебне и кварц. песке	4	13

Как видно из приведенных данных, из испытанных бетонов наибольшее количество воды отсасывается бетоном на ангийской пемзе и наименьшее — обычным бетоном.

Если считать, что отсасывание воды обычным бетоном является результатом только контракционных явлений, и не учитывать это количество в легких бетонах, то можно прийти к выводу, что в бетоне на ангийской пемзе отсасывание воды, сопровождаемое сжатием зацементированного в капиллярах заполнителей воздуха, втрое превышает отсасывание воды в результате контракции. Отсасывание воды бетоном на ангийской пемзе оказывается даже большим, чем отсасывание воды твердеющим цементным камнем, не содержащим заполнителей.

В свою очередь контракционные явления в затвердевшем тесте из обыкновенного цемента оказываются в 4 раза больше, чем в затвердевшем известково-пемзовом вяжущем.

Опыты эти показывают, что явление вакуума в легких бетонах за счет сжатия зацементированного воздуха продолжает развиваться в течение длительного времени, во всяком случае и после того, как в обычном бетоне затухает явление контракции.

Соответствующие расчеты показали, что в капиллярах пористых заполнителей зацементированного и сжимается только меньшая часть заключенного в них воздуха; большая же часть воздуха, при проникновении в капилляры воды, вытесняется из них.

Все же проведенные опыты позволяют установить новый важный факт, свидетельствующий о том, что следствием самовакуумирования в легких бетонах является не только уменьшение водосодержания цементного теста (простое замещение в нем воды воздухом), но и уплотнение его на величину сжатия зацементированного в капиллярах пористого заполнителя воздуха.

В результате сжатия зацементированного воздуха и контракции в описанных опытах увеличение объемного веса бетонов водного хране-

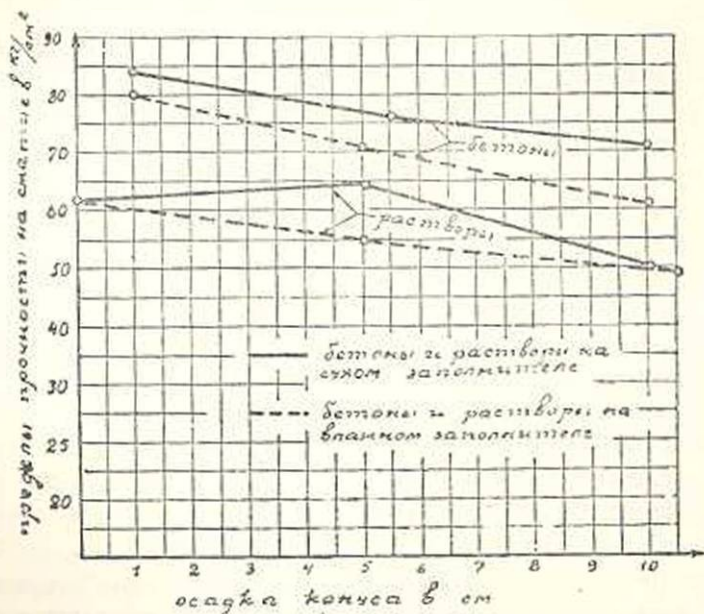
ния по сравнению со свежензготовленными достигало: в обычных бетонах до 13 кг/м^3 и в легких бетонах до 53 кг/м^3 .

§ 5. Влияние водопоглощения пористых заполнителей на прочность бетона при обычном и раздельном методах укладки

Водопоглощение пористых заполнителей обуславливает самовакуумирование бетонов, в результате чего может иметь место повышение их прочности.

Экспериментальная проверка этого была проведена на нескольких сериях опытов.

Одна серия опытов автором (совместно с Т. Г. Матузовым) была проведена на бетонах и растворах, изготовленных на литонидной пемзе при одном и том же расходе цемента 300 кг/м^3 . Заполнителем использовались сухие и предварительно увлажненные. Опыты эти показали, что влияние предварительного увлажнения заполнителей отражается как на прочности, так и на весовых показателях бетонов и растворов. Преобладание объемных весов бетонов, изготовленных на предварительно увлажненных заполнителях, над объемными весами бетонов, изготовленных на сухих заполнителях, значительное для слабо разжиженных смесей, заметно уменьшается при смесях с осадкой 10 см .



Фиг. 10. Прочность бетонов на литонидной пемзе на сжатие в 28-дневном возрасте в зависимости от консистенции.

Влияние предварительного увлажнения заполнителей на прочность бетонов можно усмотреть из фиг. 10.

Как видно из фигуры, пределы прочности на сжатие для бетонов

на сухих заполнителях оказываются несколько большими, чем для бетонов на предварительно увлажненных заполнителях.

Другая серия опытов проведена на бетонах, изготовленных на заполнителях из вулканических туфов. Результаты их были опубликованы автором ранее [12]. В этих опытах бетонная смесь заготавливалась маленькими порциями и укладывалась в формы немедленно, дабы возможно большая часть водоотсасывания успевала протекать после окончания формовки образцов.

В связи с этим, результаты как на сжатие, так и на растяжение для бетонов, изготовленных на сухих заполнителях, получились лучшими в еще большей степени.

К мнению о преимуществах изготовления легких бетонов на сухих пористых заполнителях приводят также старые опытные данные Р. М. Михайлова и Н. А. Попова [13]. Ими были испытаны пемза и гранулированный доменный шлак при одном составе бетона (1:3:5) и при одинаковой консистенции (угол наклона желоба при чистом стекании смеси составлял 23°).

В одном случае заполнители предварительно насыщались водой, а в другом случае брались в естественно сухом состоянии. В последнем случае прочность бетона на сжатие неизменно оказывалась выше в пределах около 25%.

В свете приведенных данных необходимо проанализировать утверждение американских исследователей Ф. Э. Рихарта и В. П. Дженсена [14] о важности и желательности предварительного смачивания пористых заполнителей. Указанные исследователи сравнивали между собой легкие бетоны, изготовленные в одном случае на сухих и в другом — на влажных заполнителях, выдерживая для обоих случаев одинаковыми как состав, так и водоцементное отношение. Общий расход воды в обоих случаях был одинаковым, но в одном случае часть воды еще до затворения бетона затрачивалась на замачивание заполнителя и оставшая часть воды — при затворении бетона, в то время как в другом случае (при сухих заполнителях) все количество воды затрачивалось при затворении бетона. При таких условиях опыта бетонная смесь на сухих заполнителях должна была получиться значительно более подвижной, чем на влажных заполнителях. Легко себе представить, что при таких условиях бетонная смесь на влажных заполнителях должна была находиться в более благоприятных условиях, чем изготовленная на сухих заполнителях. Действительно, на увлажнение заполнителей было затрачено количество воды, которое по предположению Рихарта и Дженсена отсасывается сухим заполнителем из бетона. Но из цементного теста вода должна отсасываться заполнителем менее интенсивно, чем непосредственно из воды. Кроме этого, пока в бетоне, приготовленном на сухом заполнителе, последним будет отсосано столько влаги, сколько было затрачено на увлажнение заполнителя, в бетонной смеси

изготовленной на влажных заполнителях, будет иметь место дальнейшее отсасывание воды.

В конечном итоге, при принятой указанными исследованиями методике, бетоны на предварительно увлажненных заполнителях должны были обладать более высокой прочностью, вследствие большей плотности цементного теста.

К неправильному выводу американских исследователей привело то обстоятельство, что они проводили сравнение бетонов не при одинаковой консистенции, а при одинаковом водоцементном отношении, т. е. в несопоставимых условиях.

Как уже указывалось, наибольший эффект самовакуумирования легких бетонов должен получиться при раздельном методе их укладки. При этом методе бетонируемое пространство заполняется крупными камневидными частицами и заливается послойно жидким раствором „сверху вниз“ или подается „снизу вверх“ при помощи специальных труб. Автором были поставлены некоторые опыты по изучению эффекта самовакуумирования легких бетонов при раздельной укладке. В качестве заполнителей были использованы песок с крупностью зерен до 5 мм и щебень с зернами от 40 до 80 мм из литой пемзы. Песок использовался в сухом состоянии, а щебень в одном случае в сухом и в другом — в насыщенном водой состоянии. Раствор изготовлялся с осадкой конуса „СтройЦНИЛ“ 8 и 12 см. Металлические формы 20×20×20 см, заполненные соответственно сухим или влажным щебнем, устанавливались на виброплощадку и в состоянии вибрации заполнялись раствором. Результаты этих опытов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Пределы прочности на сжатие бетонов, изготовленных раздельным методом на сухом и влажном заполнителях

Р а с т в о р ы				Б е т о н ы			
весовая пропорция раствора	ц/в	осадка конуса Строй- ЦНИЛ в см	расход цем. в кг/м³	расход цем. в кг/м³	Пределы прочно- сти при сжатии в кг/см²		превышен- проч. б-нов на сухих за- полн.
					сухой зап.	влажн. зап.	
1:2,5	1,0	8	391	225—242	134	95	41%
1:2,5	1,12	12	368	216—225	118	88	34%

Учитывая приведенные выше данные и соображения, а также экономические преимущества, следует прийти к выводу о большой перспективности применения раздельного метода укладки легких бетонов.

В ы в о д ы

Установлен факт защемления воздуха в пористых каменных материалах и бетонах и дана методика определения объема и давления защемленного воздуха в них.

Установлено в связи с этим, что пористые заполнители в бетонах следует рассматривать не только как низкопрочные и легковесные составляющие, но и как возбудители процессов самоуплотнения в них. Объем воды, отсасываемый пористым заполнителем из цементного теста в бетоне, менее объема, отдаваемого заполнителем тесту воздуха. За счет этой разницы в объемах, обусловливаемой сжатием защемленного в капиллярах самого заполнителя воздуха, имеет место уплотнение цементного теста и улучшение физико-химической связи его с поверхностью заполнителя в легких бетонах.

Приведенные выводы могут послужить для объяснения ряда особенностей легких бетонов и пористых каменных материалов.

Институт строительных материалов
и сооружений АН Армянской ССР

Поступило 8 IV 1953

ЛИТЕРАТУРА

1. Ходжа-Эйнатов А. А. Новый вид гидротехнического бетона. Журн. „Гидротехн. строительство“, № 11, 1952.
2. Симонов М. З. Седиментационные процессы в цементном тесте и возможности их регулирования. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. VI, № 4, 1953.
3. Францман П. Э. Использование явления вакуума, развивающегося при твердении бетона для устройства битумной гидроизоляции. Журн. „Гидротехн. строительство“, № 9, 1940.
4. Скрамтаев Б. Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи. Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям, ч. III, Стройиздат, 1949.
5. Скрамтаев Б. Г. и Панфилов Л. И. Исследования явления вакуума в твердеющих цементах. Труды НИИЦЕМЕНТ, вып. II, Москва, 1949.
6. Некрасов В. В. Изменения объема системы при твердении гидравлических вяжущих. Известия АН СССР ОТН, № 6, 1945.
7. Лыков А. В. Теория сушки. Госэнергоиздат, 1950.
8. Симонов М. З. Исследование некоторых особенностей бетона и железобетона на пористых заполнителях. Диссертация на степень доктора технических наук, 1952.
9. Стольников В. В. и Лиеримович Е. Б. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на формирование структуры бетона и его водонепроницаемость. Известия ВНИИГ, т. 47, 1952.
10. Дерягин Б. В., Захаваева Н. И. и Талаев М. В. Прибор для определения удельной поверхности порошковых и дисперсных тел по сопротивлению течению разреженного воздуха. Изд. АН СССР, 1951.
11. Джигит О. М., Зайцева М. А., Кисилев А. В., Красильников К. Г., Лукьянович В. М. и Радухевич Л. В. Определение удельной поверхности цемента и активных добавок адсорбционным, структурным и электронно-микроскопическим методом. Труды НИИЦЕМЕНТ, вып. III, Москва, 1950.
12. Симонов М. З. Легкий бетон на пористых заполнителях и его применение. Труды IV Всес. конф. по бетону и железобет. конструкциям, ч. III, М.—Л., 1949.
13. Михайлов Р. М. и Попов Н. А. Теплый бетон, ч. I, Москва, 1931.
14. Рихарт Ф. Э. и Дженсен В. П. Применение и проектирование гайдитового бетона. Journal of the American Concrete Institute, № 2, 1934.

Մ. Զ. Սիմոնյան

ԹԵԹԵՎ ԲԵՏՈՆՆԵՐԻ ԻՆՔՆԱՎԱԿՈՒՄԱՑՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում պարզված է ծակոտկեն քարանյութերում և բետոններում օդի ներկավման փաստը և տրված է այդ օդի ծավալի ու ճնշման որոշման մեթոդը:

Այդ կապակցությամբ պարզված է, որ բետոններում ծակոտկեն լցիչները պետք է դիտել ոչ միայն որպես ցածրամուր և թեթևակշիռ բաղադրիչներ, այլև որպես բետոններում ինքնավակուումացման պրոցեսների հարուցիչներ: Բետոնում ցեմենտախմորից ծակոտկեն լցիչի ծծած ջրի ծավալը ավելի փոքր է, քան լցիչի կողմից խմորին տրվող օդի ծավալը: Մավալների այդ տարբերությամբ հաշվին, որը պայմանավորված է լցիչի մազանոթներում ներկավմած օդի սեղմմամբ, տեղի ունի ցեմենտախմորի խտացման և թեթև բետոններում լցիչի մակերևույթի հետ նրա փիզիկո-քիմիական կապի բարելավում:

Բերված ևզրակացությունները կարող են կիրառվել թեթև բետոնների և ծակոտկեն քարանյութերի մի շարք առանձնահատկությունների բացատրման համար: