

## ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. Карапетян, Р. А. Котикян

Влияние масштабного фактора на усадку бетона  
в зависимости от влажности среды

На основании опытов установлено, что масштабный фактор оказывает большое влияние на усадку и ползучесть бетона. Поэтому расчетные величины усадки и ползучести бетона для конструкций должны устанавливаться в зависимости от размеров их сечений. В лабораторных условиях обычно усадка и ползучесть бетона определяются на образцах малых сечений, поэтому эти данные применительны лишь к конструкциям таких же сечений.

Учитывая необходимость оценки усадки и ползучести бетона в конструкциях любых размеров сечений, в работе [3] одним из авторов настоящей статьи был предложен соответствующий обоснованный метод.

Указанный метод был применен И. И. Улицким, который путем обобщения существующих опытных данных установил коэффициенты масштабности усадки и ползучести бетона [7].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния масштабного фактора на усадку бетона в зависимости от влажности среды. Насколько нам известно, такие исследования пока никем не проводились. Одновременно эти исследования дадут возможность внести некоторую ясность в механизм усадки бетона.

Исследования влияния масштабного фактора на усадку бетона были поставлены на призматических образцах четырех различных размеров с сечениями  $7 \times 7$ ,  $10 \times 10$ ,  $15 \times 15$  и  $20 \times 20$  см. Высота всех призм составляла 60 см.

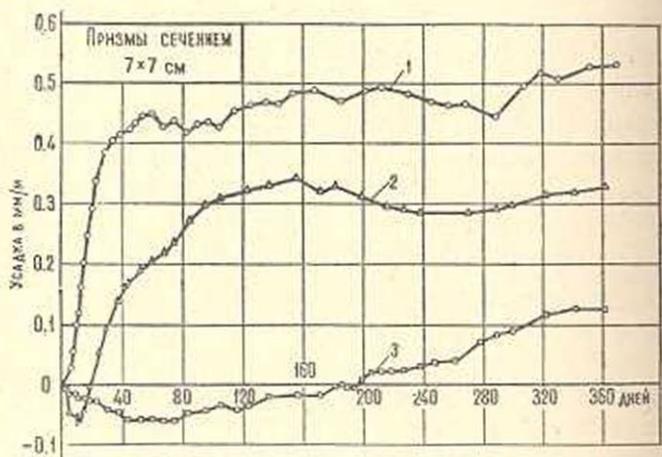
Опыты были поставлены над легким бетоном. Песок и щебень были получены путем дробления литой пемзы. В качестве вяжущего был применен пуцолановый портландцемент Араратского завода активностью  $471 \text{ кг/см}^2$ . Состав бетона 1:1,85:3,00 по весу.

Образцы бетонировались в вертикальных металлических разборных формах. Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение — на виброплощадке при продолжительности вибрации 30 сек. Всего было изготовлено 36 образцов по 9 штук каждого размера.

Измерение усадочных деформаций было начато через 1,5–2 часа после заполнения форм бетоном. До освобождения образцов от форм деформации измерялись на базе 600 мм. Освобождение призм от форм

производилось через 48 часов, после чего на образцах устанавливались металлические марки и в дальнейшем деформации измерялись переносным деформометром. Одновременно после распалубки наружные поверхности 12 призм (по 3 штуки каждого размера) были покрыты парафином с целью исключения испарения воды из бетона. Все изолированные образцы и такое же количество неизолированных образцов хранились в обычных условиях. Остальные 12 призм четырех размеров хранились во влажных условиях.

На 182 день часть изолированных образцов была освобождена от наружной изоляции с целью изучения влияния испарения на дальнейшую усадку бетона. Наблюдение за деформациями всех образцов продолжалось 360—370 дней.



Фиг. 1. Влияние влажности среды на набухание и усадку бетона (призмы сеч.  $7 \times 7$  см): 1—хранение обычное без изоляции; 2—хранение влажное без изоляции; 3—хранение обычное с изоляцией.

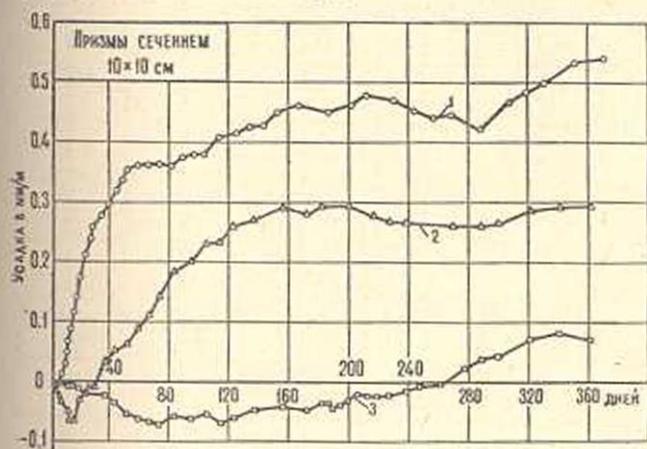
Температура помещения обычного хранения в процессе длительных испытаний  $T = 21 \pm 5^\circ\text{C}$ , а относительная влажность  $P = 60 \pm 1\%$ . В помещении влажного хранения  $T = 21 \pm 3^\circ\text{C}$ , а  $P = 88 \pm 7\%$ .

На фиг. 1 приведены кривые объемных деформаций призматических образцов с сечением  $7 \times 7$  см для разных условий хранения. Аналогичные кривые для призм других размеров представлены на фиг. 2, 3 и 4.

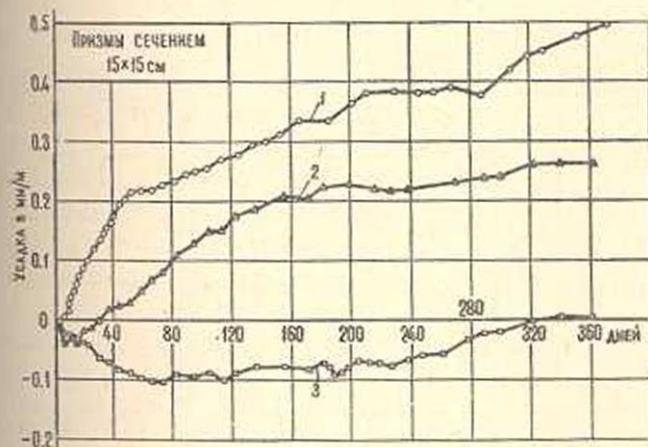
Согласно фиг. 1, 2, 3 и 4, при всех размерах образцов наибольшая усадка соответствует неизолированным образцам, хранившимся в обычных условиях, а наименьшая—изолированным, хранившимся в тех же условиях. Что касается образцов влажного хранения, то их кривые усадки занимают промежуточное положение между кривыми усадок изолированных и неизолированных образцов обычного хранения.

Как видно из фиг. 1, 2, 3 и 4, при влажном хранении, в отличие от случая обычного хранения, независимо от размеров образца усадка начинается после некоторого набухания бетона. Причем набухание

дятся тем дольше, чем больше размеры образца. Аналогичная закономерность имеет место и в деформациях изолированных образцов,



Фиг. 2. Влияние влажности среды на набухание и усадку бетона (призмы сеч.  $10 \times 10$  см): 1—хранение обычное без изоляции; 2—хранение влажное без изоляции; 3—хранение обычное с изоляцией.



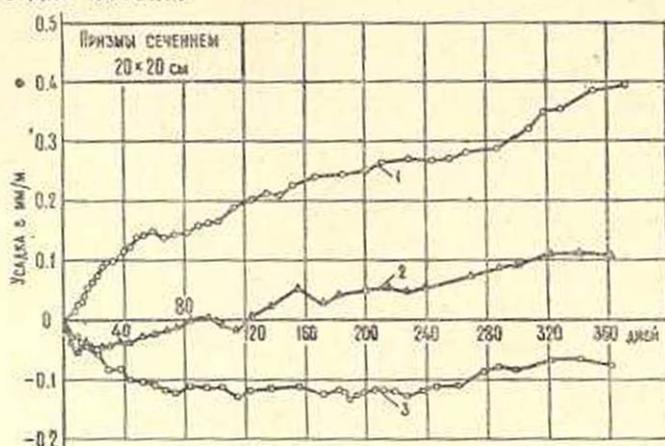
Фиг. 3. Влияние влажности среды на набухание и усадку бетона (призмы сеч.  $15 \times 15$  см): 1—хранение обычное без изоляции; 2—хранение влажное без изоляции; 3—хранение обычное с изоляцией.

лишь, в этом случае деформации набухания и их длительность еще больше. Кроме этого, при изолированных образцах чем больше образец, тем больше как деформация набухания, так и длительность набухания и меньше последующая усадка.

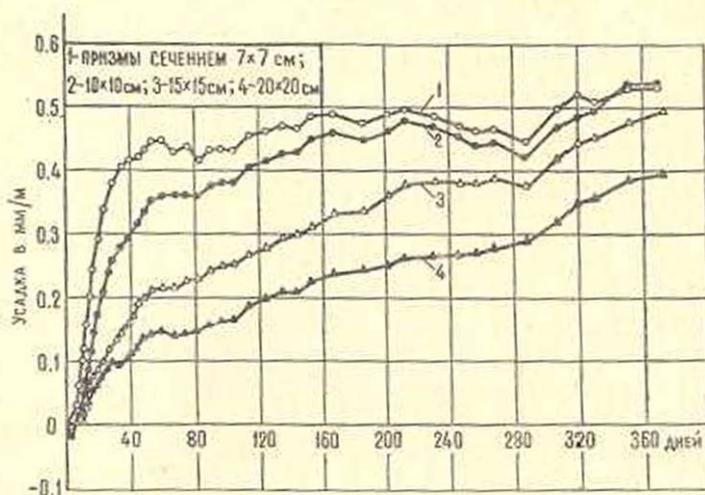
На основании фиг 1, 2, 3 и 4 исключение испарения воды из бетона путем изоляции приводит к существенному уменьшению усадочных деформаций. Причем чем больше размеры образца, тем больше разница между усадками неизоллированных и изолированных образцов.

Сравнение фиг. 1, 2, 3 и 4 показывает также, что влияние влажности на усадку бетона по мере увеличения размеров образца умень-

шается. Это—весьма закономерное явление и исходит из физической природы усадки бетона.



Фиг. 4. Влияние влажности среды на набухание и усадку бетона (призмы сеч.  $20 \times 20$  см): 1—хранение обычное без изоляции; 2—хранение влажное без изоляции; 3—хранение обычное с изоляцией.



Фиг. 5. Влияние масштабного фактора на набухание и усадку бетона при хранении в обычных условиях (образцы неизолированные).

На фиг. 5 приведены кривые усадки различных размеров при обычном хранении. Из фиг. 5 следует, что чем больше сечение призм, тем меньше усадка. Деформации малых образцов развиваются наиболее интенсивно в начальный период твердения и раньше достигают своего предельного значения. Так, например, в то время, усадка образцов сечениями  $7 \times 7$  и  $10 \times 10$  см практически прекращается, усадка образцов сечениями  $15 \times 15$  и  $20 \times 20$  см интенсивно продолжается до конца опытов.

В табл. 1 на основании фиг. 5 приведены значения усадочных деформаций для разных размеров образцов при их различном возрасте. Одновременно приводятся значения коэффициентов масштабности ( $\eta$ ). При их определении за единицу принята усадка наибольших призм для возможности сравнения их с аналогичными данными И. И. Улицкого [7].

Таблица 1

Размеры сечения призм в см	Усадка в мм/м и коэффициенты масштабности при возрасте									
	20 дней		40 дней		60 дней		150 дней		320 дней	
	$\epsilon_{ус}$	$\eta$	$\epsilon_{ус}$	$\eta$	$\epsilon_{ус}$	$\eta$	$\epsilon_{ус}$	$\eta$	$\epsilon_{ус}$	$\eta$
7 × 7	0,30	4,6	0,41	3,8	0,44	3,1	0,47	2,1	0,52	1,5
10 × 10	0,18	2,8	0,30	2,7	0,36	2,5	0,44	2,0	0,48	1,4
15 × 15	0,08	1,3	0,16	1,5	0,21	1,5	0,30	1,4	0,44	1,3
20 × 20	0,06	1,0	0,11	1,0	0,14	1,0	0,22	1,0	0,34	1,0

По данным табл. 1 коэффициент масштабности уменьшается с увеличением как возраста бетона, так и размеров образца.

Сравнение предельных коэффициентов масштабности с аналогичными данными И. И. Улицкого показывает, что они отличаются незначительно. Причем их значения по нашим опытным данным получились несколько больше.

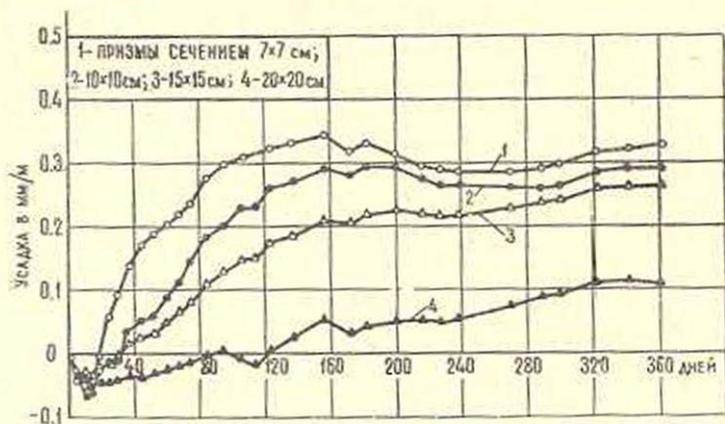
На фиг. 6 приведены кривые усадки образцов разных размеров для случая влажного хранения. И в этом случае влияние масштабного фактора выражается той же закономерностью, как это имело место при обычном хранении. Но при этом усадка начинается не сразу, а после некоторого набухания, которое длится тем дольше, чем больше сечение призмы.

На фиг. 7 представлены кривые деформаций изолированных образцов, на основании которых исключение испарения воды из бетона приводит к еще более длительному и большему набуханию бетона и к более позднему началу усадки. Так, например, видимый процесс набухания призм сечением 7 × 7 см длится 67 дней, а призм сечениями 10 × 10, 15 × 15 и 20 × 20 см соответственно 74, 75 и 185 дней. После этого, хотя набухание фактически и далее имеет место, однако, оно все больше начинает компенсироваться интенсивно развивающимися усадочными деформациями и поэтому начинается спад кривых набухания, причем тем больше, чем меньше сечение призм.

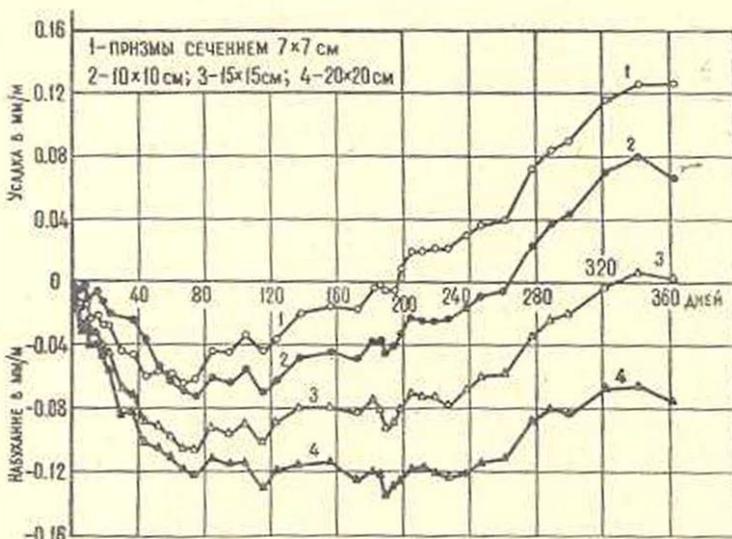
На основании своих работ С. В. Александровский пришел к выводу, что наиболее правильно физическую природу усадки объясняет структурная теория А. Е. Шейкина [1]. Согласно этой теории, усадка бетона является лишь следствием деформаций гелевой структурной составляющей цементного камня благодаря потери воды.

А. В. Александровский считает роль капиллярных явлений в усадке бетона, которым ранее приписывалась основная роль в данном явлении.

нии, незначительной [1]. Однако, чтобы доказать роль какого фактора более существенна в данном явлении, необходимы прямые опыты. Опыты следует поставить так, чтобы при определении усадки за счет одного из этих факторов влияние второго фактора было бы исключено.



Фиг. 6. Влияние масштабного фактора на набухание и усадку бетона при хранении во влажных условиях (образцы неизолированные).

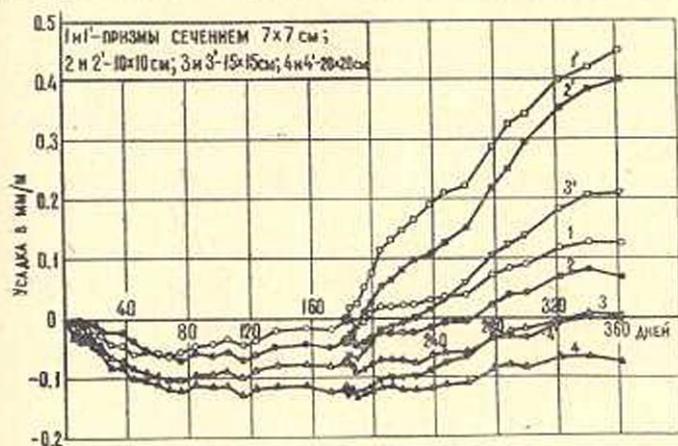


Фиг. 7. Влияние масштабного фактора на набухание и усадку бетона при хранении в обычных условиях (образцы изолированные).

Исключение испарения воды из бетона путем гидроизоляции образцов или хранения их в воде, при которых усадка в несколько раз уменьшается, казалось, уже является достаточным основанием, чтобы судить о той важной роли, которую играют капиллярные явления в усадке бетона. Однако, если исходить из теории А. Е. Шейкина, то уменьшение усадки в этих случаях можно приписать и уменьшению деформаций геля, так как испарение не имеет место.

Согласно одному из основных положений теории А. Е. Шейкина, при наличии прочного кристаллического сростка, удаление свободной воды не должно приводить к усадке бетона [9]. Поэтому для того, чтобы определить действительную роль капиллярных явлений в усадке бетона, опыты следует поставить на бетоне, в котором процесс гелеобразования и кристаллизации цементного камня можно считать законченным.

В начале данной работы отмечалось о тех изолированных образцах, с которых при возрасте бетона 182 дня изоляция была снята с целью изучения влияния испарения на усадку бетона. Изоляция была снята в шестимесячном возрасте с тем, чтобы было бы достаточное основание считать процесс гелеобразования и кристаллизации, если не совсем, то во всяком случае в основном законченным.



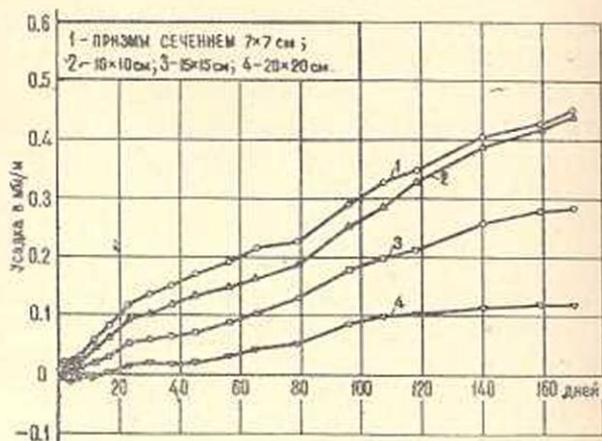
Фиг. 8. Набухание и усадка образцов разных сечений, хранившихся в обычных условиях: 1, 2, 3 и 4 — изолированные на весь период опытов; 1', 2', 3' и 4' до возраста 182 дней в изоляции, далее без изоляции.

На фиг. 8 приведены кривые объемных деформаций разных размеров изолированных образцов и одновременно тех образцов, с которых изоляция была снята. Как показывают кривые 1', 2', 3' и 4' с момента снятия изоляции во всех образцах начинается интенсивная усадка, которая тем больше, чем меньше образец. Для наглядности эти кривые отдельно представлены на фиг. 9.

В табл. 2 приведены усадочные деформации разных размеров образцов при различных условиях хранения.

Данные табл. 2 показывают, что усадка призм сечением  $7 \times 7$  см, с которых изоляция была снята, за 6 месяцев составила 85% от предельной усадки таких же неизолированных образцов.

На фиг. 10 приведены кривые усадочных деформаций разных размеров неизолированных образцов до возраста бетона 185 дней. Одновременно приводятся также кривые усадок изолированных образцов и образцов, с которых изоляции были сняты в возрасте 182 дня.



Фиг. 9. Усадка образцов разных сечений с момента снятия наружной изоляции.

Таблица 2

Размеры сечения призм в см	ε <sub>ус</sub> в мм/м в возрасте 360 дней при условиях хранения			
	обычное	влажное	с начала опытов обычное в изоляции	обычное в изоляции до возраста 182 дня, далее без изоляции
7 × 7	0,53	0,33	0,125	0,45
10 × 10	0,54	0,29	0,065	0,44
15 × 15	0,48	0,26	0,002	0,28
20 × 20	0,39	0,11	0,0	0,12

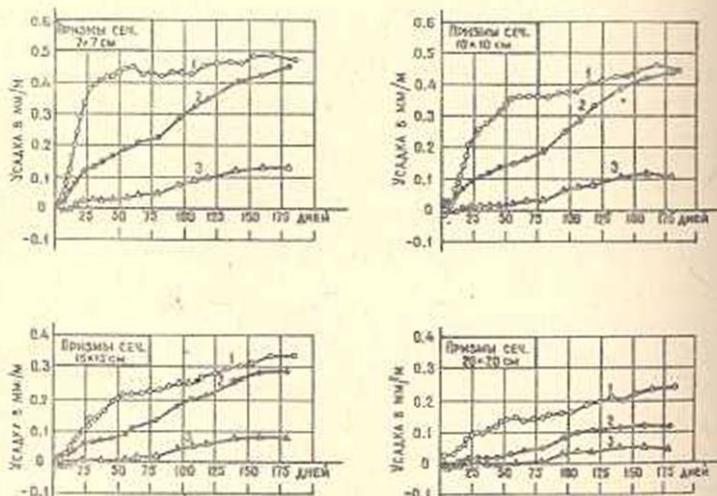


Рис. 10. Влияние условий хранения на набухание и усадку бетона: 1—деформации неизолированных образцов с начала опытов; 2—деформации образцов, изоляция которых была снята в возрасте 182 дней; 3—деформации изолированных образцов после возраста 182 дней.

Кривые фиг. 10 дают ясное представление о той важной роли, которую играют капиллярные явления в усадке бетона.

Усадку образцов, освобожденных от изоляции, мы целиком приписываем к капиллярным явлениям, так как то положение теории А. Е. Шейкина, на основании которого при наличии прочного кристаллического сростка потеря свободной воды не должна приводить к усадке цементного геля, не подтверждается.

После снятия изоляции усадка бетона в основном является следствием действия капиллярных натяжений в порах бетона в связи с началом интенсивного испарения свободной воды из бетона.

На основании данных исследований роль капиллярных явлений в усадке бетона более существенна, чем роль физико-химических процессов, сопровождающих схватывание и твердение цементного камня.

Таким образом, ни капиллярная теория Е. Фрейсиэ, ни структурная теория А. Е. Шейкина, в отдельности взятые, не могут объяснить ни механизм усадки, ни механизм ползучести бетона.

Усадка бетона является следствием как капиллярных явлений, так и физико-химических процессов, сопровождающих схватывание и твердение цементного камня [3, 4].

Как известно, обычно ползучесть бетона определяется путем исключения из суммарных деформаций усадки и ползучести нагруженных образцов усадочных деформаций ненагруженных образцов-близнецов.

Уже давно ряд исследователей указывали, что такая методика определения ползучести бетона не совсем точна, так как усадка бетона под нагрузкой не может не отличаться от усадки ненагруженного бетона.

О недостоверности этой методики отмечал также С. В. Александровский, который на основании своих исследований пришел к выводу, что усадка бетона при сжатии больше, а при растяжении меньше, чем усадка ненагруженного бетона [1, 2]. Однако, чтобы доказать сказанное, он делает некоторые предположения, которые, с нашей точки зрения, неправильны. Первое—это то предположение, что на короткий период опытов при сжатии и растяжении ползучесть бетона в изолированных и неизолированных образцах можно считать одинаковыми. Между тем, на основании опытов ряда исследователей изоляция бетона приводит к уменьшению ползучести бетона в несколько раз как при сжатии, так и при растяжении.

Впервые на основании длительных опытов это было показано одним из авторов настоящей статьи [3, 4].

В дальнейшем тоже самое подтвердилось и в опытах других исследователей [6, 7].

Таким образом, та методика, которая была принята С. В. Александровским для выяснения отличия усадок нагруженных и ненагруженных образцов, не является обоснованной.

С. В. Александровский считает, что, поскольку усадки нагруженного и ненагруженного бетона не одинаковы, от общепринятой методики определения ползучести бетона следует отказаться [1, 2]. Как более точный метод, он предлагает ползучесть бетона определять на изолированных образцах, не претерпевающих усадки [1, 2]. Однако вывод о том, что в изолированных образцах усадка отсутствует, также не правилен. Исключение испарения воды из бетона хотя и в несколько раз уменьшает усадку бетона, но она не настолько мала, чтобы ею можно было бы пренебречь. Так, например, в опытах [3, 5] усадка в изолированных образцах хотя и оказалась в 3 раза меньше, чем в неизолированных образцах, но все же величина ее составляла 0,23 мм/м.

Опыты С. В. Александровского, на основании которых сделаны все его выводы, были весьма кратковременными (17—23 дней) [1, 2]. Между тем, как это было показано, усадка в изолированных образцах начинается после длительного набухания, продолжительность которого тем дольше, чем больше размеры образца.

Поэтому вполне понятно, что на основании таких кратковременных опытов делать общий вывод об отсутствии усадки в изолированных образцах будет неправильно.

В изолированных образцах с момента их изготовления по независимым причинам развиваются как деформации набухания, так и усадочные деформации. Как уже было показано, деформация набухания и длительность набухания увеличиваются с увеличением размеров изолированного образца. Что касается усадочных деформаций, то при изолированных образцах они не зависят от размеров образца [3]. А поскольку это так, то надо полагать, что при определенном размере изолированного образца деформации набухания и усадки бетона по своим абсолютным значениям могут получиться одинаковые, а их алгебраическая сумма будет равна нулю.

Однако, такое явление будет иметь место в течение небольшого промежутка времени, после чего начнут развиваться усадочные деформации. Очевидно, при более длительных наблюдениях так было бы и в опытах С. В. Александровского.

Таким образом, усадкой изолированных образцов нельзя пренебречь, а поэтому для определения ползучести бетона в изолированных образцах также следует пользоваться обычной методикой.

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Масштабный фактор оказывает большое влияние как на набухание, так и усадку бетона. Чем больше сечение бетонного элемента, тем больше и длительнее деформация набухания и меньше последующая усадка;
2. Влияние масштабного фактора на усадку бетона уменьшается с увеличением влажности среды;

3. Исключение испарения воды из бетона путем изоляции приводит к более длительному набуханию и позднему началу усадки. Чем больше сечение изолированного образца, тем больше как деформация набухания, так и длительность набухания и меньше последующая усадка;

4. Если было бы возможным исключить набухание бетона, обусловленное экзотермией цемента, то при изолированных образцах масштабный фактор не оказывал бы влияния на усадку бетона;

5. Исключение испарения воды из бетона существенно уменьшает усадку бетона, однако, ею нельзя пренебречь;

6. Снятие наружной изоляции изолированных образцов даже в зрелом возрасте бетона приводит к началу интенсивного развития усадочных деформаций в связи с началом интенсивного испарения. И в этом случае усадка тем больше, чем меньше образец.

В зависимости от температуры и влажности среды за один и тот же период высыхания, усадка образцов, с которых снята изоляция, может составить 85% усадки аналогичных неизолированных образцов, из которых испарение имело место с момента их распалубки;

7. Усадка бетона является следствием как физико-химических процессов, сопровождающих схватывание и твердение цементного камня, так и капиллярных явлений. Чем меньше влажность среды, тем большую долю общей усадки составляют усадочные деформации, обусловленные капиллярными явлениями;

8. В изолированном бетоне и в массивных бетонных конструкциях усадка в основном протекает за счет физико-химических процессов, сопровождающих схватывание и твердение цементного камня;

9. Расчетные величины усадки должны быть установлены в зависимости от размеров сечений конструкций;

10. Коэффициент масштабности усадки уменьшается как с увеличением возраста бетона, так и с увеличением сечения бетонного элемента;

11. Предлагаемая С. В. Александровским методика определения ползучести бетона, согласно которой ползучесть бетона предлагается определять на изолированных образцах, неприемлема. Поскольку усадка имеет место и в изолированных образцах, и в этом случае ползучесть бетона следует определять по обычной методике;

12. Тот факт, что усадка бетона под нагрузкой отличается от усадки бетона, твердеющего без нагрузки, является несомненным. Однако, пока нет такой методики, с помощью которой можно было бы определить эту разницу и тем самым составить ясное представление о той погрешности, которую мы допускаем при определении ползучести бетона по обычной методике.

13. Определение ползучести бетона и впредь следует вести по обычной методике.

## Կ. Ս. Կարապետյան, Ռ. Ս. Կոտիկյան

ՄԱՍՇՏԱԲԻ ԳՈՐԾՈՆԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԵՏՈՆԻ ԿՏԿՄԱՆ ՎՐԱ՝  
ԿԱԽՎԱԾ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅՈՒՆՆԻՑ

## Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հետազոտությունները ցույց են տալի, որ մասշտաբի գործոնը մեծ ազդեցություն ունի կծկման դեֆորմացիաների վրա՝ որքան մեծ է ընտանի էլեմենտի կտրվածքը, այնքան փոքր է նրա կծկումը: Բետոնի կծկման դեֆորմացիաների վրա մասշտաբի գործոնի ազդեցությունը կախված է միջավայրի խոնավությունից՝ որքան մեծ է խոնավությունը, այնքան փոքր է այդ գործոնի ազդեցությունը:

Բետոնի նմուշների մեկուսացումը արտաքին պայմաններից զրախորհն պակասեցնում է նրանց կծկումը, քայց այն արհամարհել չի կարելի, որովհետև ժամանակի շարաքանչյուր մոմենտում մեկուսացված նմուշները ենթարկվում են ուռչող և կծկման դեֆորմացիաների ազդեցությանը: Որպես օրինք, սկզբում մեծ են ուռչող դեֆորմացիաները, իսկ որոշ ժամանակից հետո դեֆորմացնում են կծկման դեֆորմացիաները: Այդ պատճառով նրանց հանրահաշվական զուգարը, որը մեծապես կախված է նմուշի չափսերից և փորձի տեղությունից, փորձի սկզբում տալիս է ուռչում և ապա նոր՝ կծկում: Հետևաբար, Ալեքսանդրովսկու առաջարկված բետոնի սողքի որոշման մեթոդիկան, որի համաձայն բետոնի սողքը որոշվում է արտաքին միջավայրից մեկուսացված՝ գործընթացում չունեցող նմուշների վրա, որոնց կծկման դեֆորմացիաները ընդունվում են զրո, անընդունելի է, որովհետև մեկուսացված նմուշները, ինչպես ցույց են տալիս փորձերը, ունեն կծկում: Քանի որ դա արդպես է, ուստի մեկուսացված նմուշների դեպքում էլ սողքը պետք է որոշել մինչև այժմ ընդունված ընդհանուր մեթոդիկայով, այսինքն՝ բոլոր դեպքերում ուժի տակի նմուշի դեֆորմացիաներից պետք է հանել երկվորյակ շրջանավորված նմուշի դեֆորմացիաները:

Հետազոտությունները ցույց են տալի, որ արտաքին մեկուսացման վերացումը, նույնիսկ բետոնի մեծ հասակում, բերում է կծկման դեֆորմացիաների ինտենսիվ աճման և այս դեպքում էլ կծկումը այնքան մեծ է, որքան փոքր են նմուշի չափսերը:

Կատարված աշխատանքից մի անգամ ևս հետևում է, որ բետոնի կծկումը հանդիսանում է ինչպես ֆիզիկա-քիմիական պրոցեսների, այնպես էլ մազանոթային երևույթների հետևանք: Վերջում պետք է ավելացնել, որ կծկման հաշվային մեծությունները պետք է ընարվեն, կախված կոնստրուկցիայի լայնական կտրվածքի չափսերից:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Александровский С. В. О влиянии длительного действия внешней нагрузки на режим высыхания и усадку бетона. Сборник трудов НИИЖБ «Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций». Гостройиздат, М., 1959.

2. Александровский С. В. О влиянии длительного внешнего растяжения на режим высыхания и усадку бетона. Сборник трудов НИИЖБ „Исследования по теории железобетона“. Госстройиздат, М., 1960.
3. Карапетян К. С. Влияние размеров образца на усадку и ползучесть бетона. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат., ест. и техн. наук, 9, № 1, 1956.
4. Карапетян К. С. Экспериментальное исследование ползучести легкого бетона на естественных пористых заполнителях. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук, Ереван, 1956.
5. Карапетян К. С. Влияние фактора времени на прочность и деформативность бетона на литондвой пемзе и некоторые другие его свойства. Сборник трудов „Гидротехнический бетон на литондвой пемзе“. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1958.
6. Мельник Р. А. Экспериментальное исследование нелинейной ползучести бетона. Сборник трудов КИСИ, Киев, 1961.
7. Улицкий И. И. Практический метод расчетного определения деформаций ползучести и усадки бетона. „Бетон и железобетон“, № 4, 1962.
8. Улицкий И. И. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. Госстройиздат, УССР, Киев, 1960.
9. Шейкан А. Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Труды МИИТ, вып. 69, 1946.