

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

К. С. Карапетян

**Влияние старения бетона на зависимость
между напряжениями и деформациями ползучести**

Одной из основных предпосылок, положенных в основу существующих линейных теорий ползучести бетона, является принятие линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести. Однако, и на сегодня строго не определено то предельное напряжение, при котором кончается область линейной ползучести и начинается область нелинейной ползучести.

Предыдущими нашими исследованиями [6] было показано, что существовавшие до этого экспериментальные данные не могли служить основанием для правильного суждения о пределе пропорциональности между напряжениями и деформациями ползучести. Впервые нами было установлено, что этот предел в большей мере зависит от возраста бетона к моменту его длительного нагружения. Иначе говоря, фактор старения бетона в большей мере предreshает то напряжение, до которого имеет место линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести. Одновременно, впервые нами было выявлено, что бетон, находясь под длительной нагрузкой, в начальный период может претерпевать нелинейную ползучесть, а спустя некоторое время — линейную ползучесть. Эта особенность характерна для бетона, нагруженного в молодом возрасте.

В свете вышеизложенного, основная цель настоящей работы заключается в установлении границы линейной и нелинейной ползучести в зависимости от возраста бетона к моменту нагружения, а также характера развития деформации ползучести за пределом линейной ползучести. Одновременно постановка таких опытов даст возможность осветить и ряд других важных, малоизученных вопросов, как например, восстановление деформаций после разгрузки бетона, влияние длительного нагружения на прочность и деформативность бетона в зависимости от его возраста к моменту нагружения и величины напряжения.

§ 1. О механизме ползучести бетона

Исследования, проведенные ранее автором [6, 7, 8], а также работы Фрейсине [15], А. Е. Шейкина [17] И. И. Улицкого [13], О. Я.

Берга [2] дали возможность еще в работе [6] выдвинуть обобщенную гипотезу механизма ползучести бетона. Согласно этой гипотезе, ползучесть бетона до напряжения $0,6 R$ (R — предел прочности бетона на сжатие) является следствием как вязкости гелевой структурной составляющей цементного камня, так и капиллярных явлений, а при более высоких напряжениях еще и следствием появления и развития микротрещин в бетоне. Специальными исследованиями, по возможности, была выявлена роль каждого из упомянутых факторов в явлении ползучести бетона [7, 8]. При этом оказалось, что ползучесть, обусловленная тем или иным из этих факторов, зависит от температуры и влажности окружающей среды, возраста бетона к моменту нагружения, величины напряжения, длительности нагружения и т. д.

О. Я. Берг [2] при испытании бетонных призм на центральное сжатие, микроскопическими наблюдениями установил, что при определенных нагрузках на боковых поверхностях призм появляются необратимые микрощели.

Первые микрощели на призмах появлялись при относительных напряжениях $0,55 \div 0,60$ и имели раскрытие 10 микрон и протяженность $10 \div 20$ м. В момент обнаружения микрощелей относительные поперечные деформации бетона составляли в среднем $\varepsilon_y = 1,0 \times 10^{-4}$, что совпадает с величиной предельной деформации бетона при испытании на центральное растяжение. На основании этого О. Я. Берг пришел к выводу, что разрушение образцов является следствием образования и развития микрощелей. Этот вывод подтверждается тем, что, когда при испытании бетонного образца опорное трение устраняется, его разрушение происходит при нагрузках, близких к величине нагрузки, при которой образуются микрощели [2, 12].

Появлением и развитием микрощелей нами объяснялось нарушение линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести. К такому выводу мы пришли ранее на основе исследований ползучести бетона при высоких напряжениях [6]. Однако, тогда нам не удалось точно установить то предельное напряжение, после которого начинается нелинейная ползучесть. Дело в том, что в этих опытах бетонные образцы были нагружены длительной нагрузкой только при относительных напряжениях 0,25; 0,50 и 0,70 и в возрасте бетона 7, 14 и 32 дня.

Таким образом, отсутствовали опыты при относительном напряжении 0,6, при котором, согласно опытам О. Я. Берга, появляются микрощели.

§ 2. Методика экспериментов

Для установления границы линейной и нелинейной ползучести с учетом старения бетона, а также зависимости между напряжениями и деформациями ползучести за пределом линейной ползучести, требовалась постановка опытов более широких масштабов, чем в прежней нашей работе [6].

Исходя из этого, в первую очередь необходимо было установить при каких относительных напряжениях осуществить загрузку образцов длительной нагрузкой для того, чтобы, по возможности, меньшим количеством образцов получить ответы на интересующие нас вопросы.

В прежних наших опытах линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести наблюдалась, при $\tau = 7$ дней, вплоть до относительного напряжения 0,70, а при $\tau = 14$ и 32 дня — до 0,5. Однако, для $\tau = 14$ и 32 дня, относительное напряжение 0,5, очевидно, не является предельным, до которого справедлива линейная зависимость.

Основной причиной нарушения линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести является образование и развитие микротрещин в бетоне [6], которые, как уже говорилось, образуются при относительном напряжении примерно 0,6. Поэтому надо было полагать, что если образцы загрузить относительным напряжением 0,6, то линейная зависимость сохранится до указанного напряжения.

Учитывая это обстоятельство, в новых опытах образцы в каждом возрасте были загружены при относительных напряжениях 0,25; 0,50; 0,60; 0,75; 0,90 и 0,95. Более частое изменение относительного напряжения выше $\frac{\sigma}{R_n} = 0,6$ диктовалось необходимостью получения полной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести при высоких напряжениях.

Загрузка образцов длительной нагрузкой было осуществлено при возрасте бетона 7; 14; 29; 95 и 185 дней. В дальнейшем предполагается загрузить образцы при $\tau = 1$ году.

Постановка таких опытов требовала изготовления большого количества образцов. Поэтому необходимо было установить наиболее целесообразные размеры испытываемых образцов. При этом мы исходили из того, чтобы по возможности малым числом замесов бетона изготовить необходимое количество образцов. Это было весьма важно для исключения тех дополнительных факторов, которые могли повлиять на точность экспериментов. С другой стороны, размеры образцов необходимо были принять такими, чтобы имеющимися в нашем распоряжении пружинными приспособлениями можно было обеспечить напряжение в бетоне равное 0,95 от предела прочности бетона, загружаемого при самом большом возрасте. Из этих соображений была принята сравнительно невысокая марка исследуемого бетона.

Исходя из вышесказанного, форма испытываемых образцов была принята, цилиндрической, диаметром 10 см, высотой 60 см. Опыты были поставлены над тяжелым бетоном мелким заполнителем которого является кварцевый песок, а крупным заполнителем — базальтовый щебень. В качестве вяжущего был применен портландцемент. Характеристика бетона приводится в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетона по весу	Расход материалов на 1 куб.м бетона в кг				Объем, вес свеже-уложенного бетона в m^3	Объем, вес бетона в месячном возрасте в m^3	Кубиковая прочность на сжатие в месяцы, возрасте в $кг/см^2$
	цемент	песок	щебень	вода			
1:4,79:3,53	230	1101	811	187	2,33	2,27	132

Из каждого замеса бетона изготавливались по 50 шт. цилиндрических образцов и 24 шт. кубиков разм. $10 \times 10 \times 10$ см. По намеченной программе опытов такое количество цилиндрических образцов было достаточно для загрузки их в двух возрастах и для испытаний по определению цилиндрической прочности в момент загрузки образцов длительной нагрузкой. Помимо этого, на четырех образцах каждой серии определялись объемные изменения бетона во времени. Всего было сделано 5 замесов бетона и изготовлено 250 цилиндрических образцов и соответствующее количество кубиков. Количество изготовленных образцов было взято с некоторым запасом, для последующего нагружения их в более поздних возрастах.

Изготовление образцов производилось в металлических разборных формах, которые были снабжены соответствующими пробками для образования в бетонных образцах гнезд, в которые в последующем устанавливались металлические марки для измерения деформаций.

Приготовление бетона производилось вручную, а уплотнение — на виброплощадке при продолжительности вибрации 15 секунд. Образцы освобождались от форм через одни сутки. Все образцы, с момента изготовления, хранились в помещении с $t = 20 \pm 5^\circ C$ и влажности $P = 80 \pm 10\%$.

Измерение деформаций бетонных образцов производилось с помощью переносного деформометра конструкции Максимова-Лисиченко [10].

Необходимо отметить, что деформометр указанной конструкции имеет тот существенный недостаток, что при измерении одной и той же величины дает нестабильные показания.

Для измерения деформаций деформометр снабжен двумя стальными кернами. А для этих кернов на стальных марках, установленных на бетонном образце, имеются соответствующие гнезда. При измерениях деформаций, стальные керны деформометра своими остриями прикладываются к стальным маркам. Как показал опыт применения такого деформометра, колебания его показаний в большой мере зависят от степени прижатия деформометра к стальным маркам. Поскольку база измерения сравнительно большая (500 мм), в зависимости от степени прижатия, получается изгиб стальной трубы прибора, что и приводит к неточным результатам. Если же прибор недостаточно прижимается к стальным маркам, то неточность следует из-за неплотного прилегания стальных кернов к стальным маркам.

Для устранения указанных недостатков было внесено небольшое изменение в конструкцию деформометра. Стальные керны были заменены наконечниками штоков индикаторов часового типа, концы которых снабжены стальными шариками. Для этих шариков, по их размеру, на стальных марках путем вдавливания под определенным усилием, устраивались гнезда. В этом случае деформометр при измерении деформаций подвешивается к стальным маркам, в результате чего во всех случаях прижимается к ним своим собственным весом.

Деформации образцов измерялись с двух сторон цилиндрических образцов на базе 500 мм.

Загружение образцов длительной нагрузкой осуществлялось пружинными приспособлениями [5, 6]. Количество загруженных образцов различных возрастов и напряжений указано в табл. 2.

Таблица 2

t в днях	R_n в кг/см ²	ε в кг/см ²	$\frac{\varepsilon}{R_n}$	Количество загруженных образцов в штуках
7	41,2	10,3	0,25	2
		20,6	0,50	3
		24,7	0,60	3
		30,9	0,75	3
		37,1	0,90	4
		39,1	0,95	1
14	52,9	13,2	0,25	2
		26,4	0,50	3
		31,7	0,60	3
		39,7	0,75	3
		47,6	0,90	3
		50,3	0,95	1
29	64,3	16,1	0,25	3
		32,2	0,50	3
		38,6	0,60	3
		48,2	0,75	3
		57,9	0,90	3
		61,1	0,95	3
95	74,9	18,7	0,25	3
		37,4	0,50	3
		44,9	0,60	3
		56,1	0,75	3
		67,4	0,90	3
185	78,3	19,6	0,25	3
		39,2	0,50	3
		47,0	0,60	3
		58,7	0,75	3
		70,5	0,90	4
		74,4	0,95	2

§ 3. Влияние фактора времени на прочность и упругие деформации бетона

Для загрузки образцов при высоких относительных напряжениях, близких к пределу длительной прочности бетона, весьма важным являлось по возможности точное определение цилиндрической прочности бетона в момент каждого нагружения. С этой целью образцы при испытании строго центрировались. Кроме этого, каждый раз испытывались три, а иногда 4—5 образцов. Данные испытания цилиндрических образцов в различных возрастах приведены в табл. 3.

Таблица 3

t в днях	R_n отдельных образцов в кг/см ²	R_n средняя в кг/см ²	σ отклонения
3	23,1	22,0	+5,0
	21,7		-1,4
	21,9		-0,5
	20,8		-5,5
	22,3		+1,4
7	40,6	41,4	-1,5
	40,2		-2,4
	41,4		+0,5
	42,7		+3,6
14	55,2	52,9	+4,3
	51,6		-2,5
	51,9		-1,9
29	65,1	64,3	+1,2
	63,7		-1,0
	67,0		+4,2
	61,2		-4,8
95	73,8	74,9	-1,5
	77,7		+3,7
	73,1		-2,4
185	81,8	78,3	+4,5
	75,2		-4,1
	77,8		-0,6

Как показывают данные табл. 3, только в отдельных случаях максимальные отклонения R_n образцов от среднего значения превышает $\pm 5\%$, а в большинстве случаев — намного меньше. Однако и такое отклонение, с нашей точки зрения, имеет существенное значение при нагружении образцов длительной нагрузкой при относительных напряжениях 0,90—0,95.

Как уже отмечалось, эталонные образцы для определения цилиндрической прочности и образцы предназначенные для длительного нагружения изготавливались из одного и того же замеса бетона.

Однако, из табл. 3 следует, что цилиндрические прочности эталонных образцов, хоть и незначительно, но все же отличались друг от друга. Фактическая же прочность каждого загружае-

мого образца нам не может быть известна, так как пока нет такого метода, который дал бы возможность достоверно установить прочность бетона без его разрушения.

По этой причине при нагружении какого либо образца относительным напряжением 0,95, исходя из данных испытаний эталонных образцов, фактическое относительное напряжение в нем может оказаться больше или меньше 0,95. В случае, если фактическое относительное напряжение в момент нагружения окажется больше 0,95, то это может тут же привести к разрушению образца или оно может произойти через некоторое время после интенсивного развития деформаций. Это обстоятельство может явиться причиной и того, что дефор-

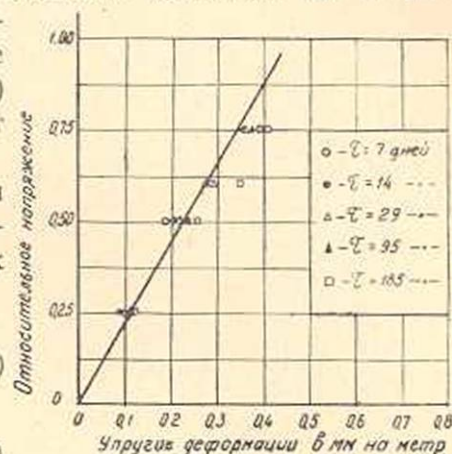
мации образцов, нагруженных при одном и том же τ и относительном напряжении, существенно будут отличаться друг от друга. Особенно заметно это может иметь место при нагружении бетона в старом возрасте, когда дальнейшее нарастание прочности бетона во времени незначительно и поэтому влияние образования и развития трещин на деформации бетона протекает гораздо интенсивнее и длительнее.

На фиг. 1 приведены кривые изменения кубиковой R_k и цилиндрической $R_{ц}$ прочностей исследуемого бетона во времени. Кривые построены на основании формул (1) и (2), которые хорошо описывают экспериментальные данные.

Кубиковая и цилиндрическая прочности, подсчитанные по приведенным формулам для различных τ , сведены в табл. 4.

$$R_k = \frac{100\tau}{3,5 + 0,65\tau} \quad (1)$$

$$R_{ц} = \frac{100\tau}{8,4 + 1,25\tau} \quad (2)$$



Фиг. 1.

В той же таблице прочность бетона при разных τ выражена в % от прочности бетона в месячном возрасте. Одновременно приводится отношение $\frac{R_{ц}}{R_k}$.

Таблица 4

τ в днях	Предел прочности на сжатие в кг/см ²		$\frac{R_{ц}}{R_k}$	Предел прочности на сжатие в %, от месячной прочности бетона	
	R_k	$R_{ц}$		R_k	$R_{ц}$
3	55	25	0,45	42	38
7	87	41	0,47	67	63
14	111	54	0,49	85	83
29	130	65	0,50	100	100
95	146	75	0,51	112	115
185	150	77	0,51	115	119

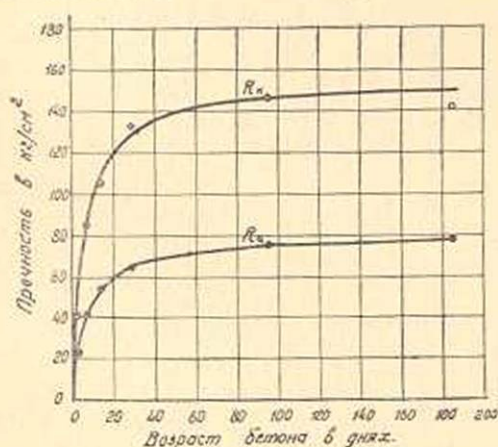
Данные табл. 4 показывают, что прочность бетона наиболее интенсивно нарастает до месячного возраста, а после трехмесячного возраста дальнейший рост прочности практически прекращается. Одновременно из табл. 4 следует, что при данных размерах образцов коэффициент перехода от кубиковой к цилиндрической прочности почти не зависит от возраста бетона. Аналогичная закономерность наблюдалась и в ранее проведенных нами исследованиях [9]. Так

например, при испытании цилиндрических образцов диаметром 14 см, высотой 60 см и кубиков разм. $20 \times 20 \times 20$ см из тяжелого бетона в возрастах бетона 7, 28 дней 3, 5, 15 месяцев и 3 года коэффициент перехода от кубиковой прочности к цилиндрической прочности колеблется в пределах от 0,73—0,80.

Отмеченная закономерность является важной так как определив коэффициент перехода от кубиковой к цилиндрической или призмочной прочности в каком либо возрасте бетона, можно его отнести к любому другому возрасту бетона.

Коэффициент перехода от кубиковой прочности к цилиндрической по данным табл. 4 получился намного меньше (0,45—0,5!), чем в прежних опытах (0,73—0,80) [9]. Это обстоятельство, в основном, является следствием того, что в одном случае отношение высоты цилиндрического образца к его диаметру составляет 6, а в другом случае 4,3. Отчасти это обусловлено также разными размерами испытанных кубиков.

В момент загрузки цилиндрических образцов длительной нагрузкой, для каждого возраста бетона и относительного напряжения, определялись упругие деформации. При этом оказалось, что при одинаковых относительных напряжениях упругие деформации, соответствующие различным возрастам бетона к моменту испытания, незначи-



Фиг. 2.

тельно отличаются друг от друга. Таким образом можно считать, что при одинаковом относительном напряжении возраст бетона не оказывает влияния на упругие деформации бетона. Это наглядно видно из фиг. 2, где нанесены экспериментальные точки, соответствующие различным возрастам бетона к моменту испытания и различным относительным напряжениям.

Благодаря отмеченной закономерности представляется возможным выразить зависимость между упругими деформациями и относительными напряжениями для всех возрастов бетона одной общей линейной зависимостью по формуле:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2100} \times \frac{\sigma}{R_{с2}} \quad (3)$$

Откуда для модуля упругости вытекает следующая зависимость

$$E = 2100 R_{с2} \quad (4)$$

Подставляя в формулу (4) значение R_a по формуле (2), получим

$$E = \frac{2,1\tau}{8,5 + 1,25\tau} \times 10^5. \quad (5)$$

В табл. 5 приведены значения модулей упругости для различных возрастов бетона, подсчитанные на основании формулы (5).

Таблица 5

τ в днях	Предел прочности на сжатие в кг/см^2		Модуль упругости в кг/см^2	Модуль упругости в % от модуля упругости в месячном возрасте
	R_b	R_a		
3	55	25	52000	38
7	87	41	86000	63
14	111	54	113000	83
29	130	65	136000	100
95	146	75	157000	115
185	150	77	162000	119

В наших опытах модуль деформации для данной марки бетона получился намного ниже, чем это следует из известных формул Графа, Роша и Шюле [12]. Основной причиной этого является то, что в наших опытах отношение высоты цилиндра к диаметру составляет $\frac{h}{d_n} = 6$, в то время как формулы Графа, Роша и Шюле получены на основании испытания призматических образцов при отношении высоты к стороне сечения призмы $\frac{h}{a} = 2 - 3$.

По американским нормам, модуль деформации бетона принимается пропорциональным цилиндрической прочности [12]

$$E = 1000R_a. \quad (6)$$

Причем эта формула соответствует $\frac{h}{d_n} = 2$.

Однако, как известно, формула (6) не отвечает действительности [12], что вытекает и из наших опытов.

По формуле (4) модуль упругости бетона в месячном возрасте составляет 136000 кг/см^2 , а по формуле (6)— 65000 кг/см^2 . Правда, здесь необходимо учесть то, что по формуле (6) определяется не модуль упругости, а модуль полных деформаций, однако, как известно, они отличаются друг от друга незначительно, в пределах 10—15%.

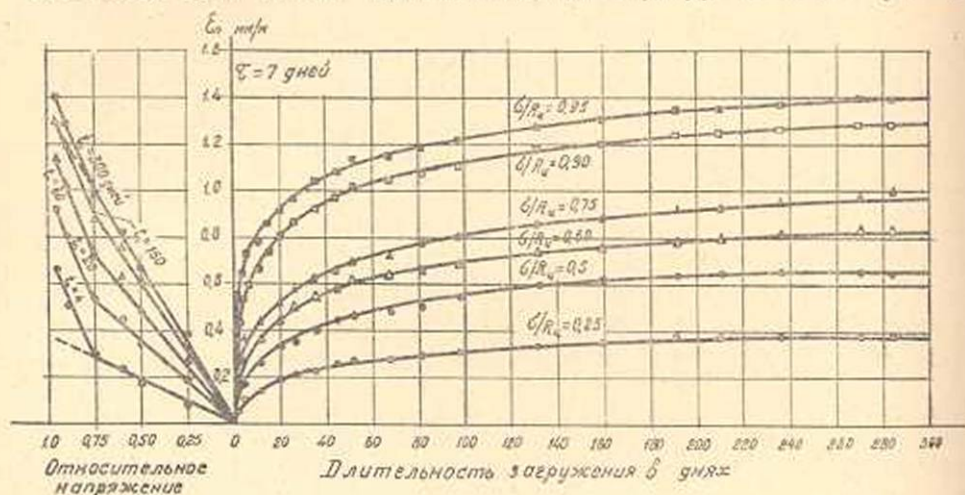
При одинаковом относительном напряжении независимость упругих деформаций от возраста бетона к моменту испытания является весьма важной закономерностью. Причем, на основании наших других

опытов, она подтверждается и в отношении полных деформаций бетона [9].

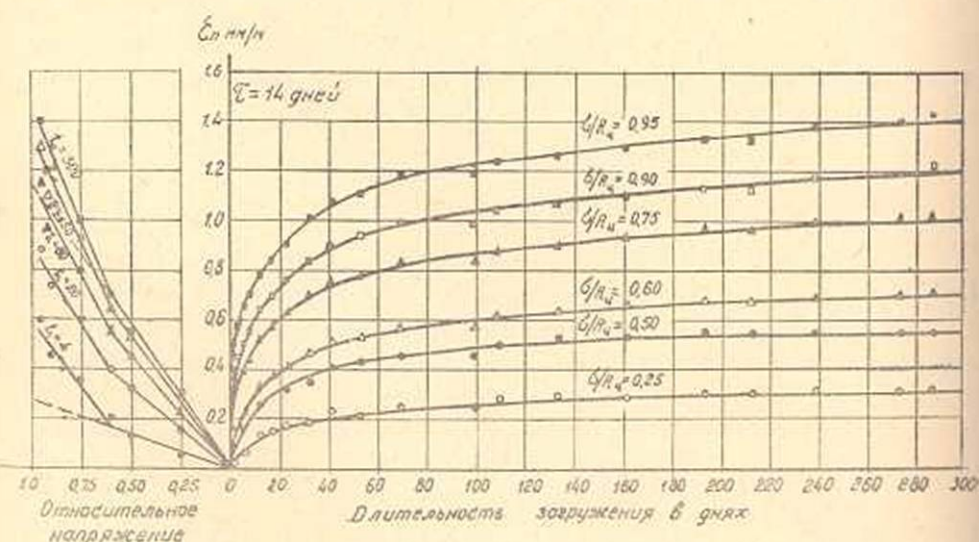
Имея зависимость между прочностью бетона и его возрастом, путем определения изменения упругих или полных деформаций в зависимости от относительного напряжения при каком-либо молодом возрасте бетона, мы можем получить интересные нас модули для любого возраста.

§ 4. Влияние возраста бетона к моменту загрузки на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести

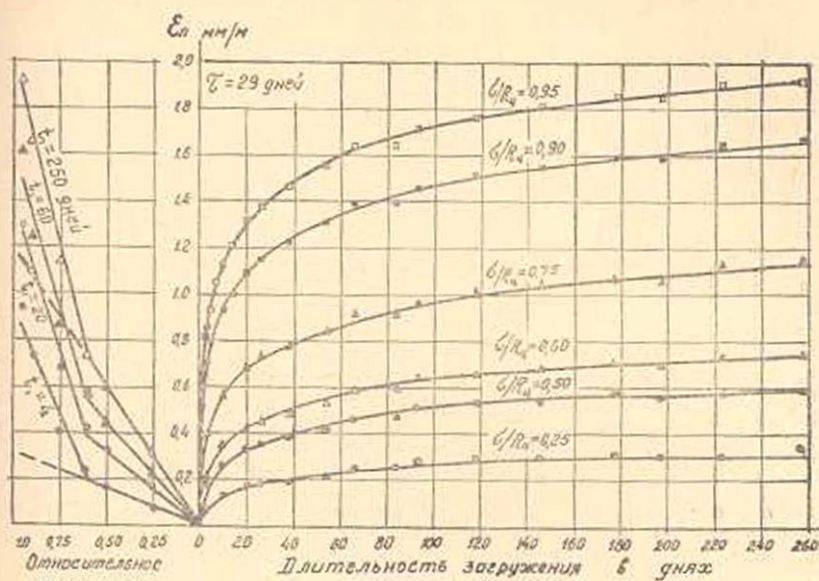
На фиг. 3—7 представлены полученные экспериментальные кривые ползучести бетона. Кривые на каждой фигуре соответствуют од-



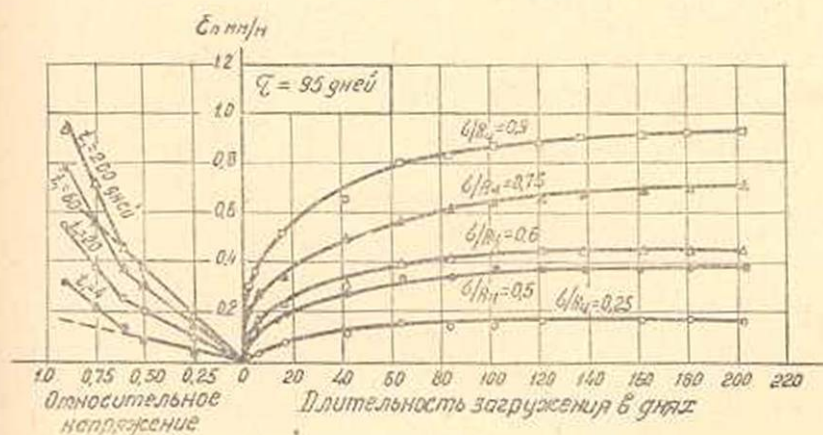
Фиг. 3.



Фиг. 4.



Фиг. 5.



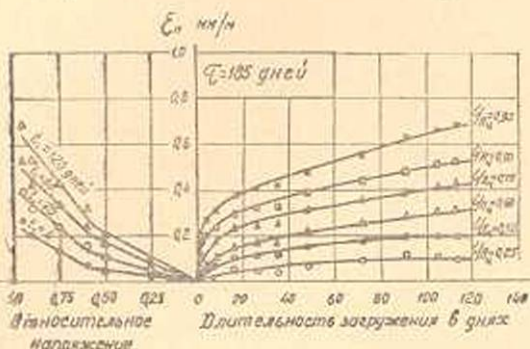
Фиг. 6.

ному возрасту и различным относительным напряжениям. Одновременно, на основании кривых ползучести построены зависимости между относительными напряжениями и деформациями ползучести для различных длительностей загрузки.

Мы уже отмечали, что до сих пор считают, что до определенных, еще строго не установленных напряжений, имеет место линейная ползучесть, а при более высоких напряжениях — нелинейная ползучесть. Причем, как уже указывалось, предельное напряжение, до которого справедлива линейная ползучесть, существенно зависит от возраста бетона к моменту его загрузки.

На фиг. 3—7 связь между напряжениями и деформациями ползучести принята в виде двух прямых линий. Принятие такой закономерности лучше отвечает экспериментальным данным, чем принятие криволинейной зависимости.

Как видно из фиг. 3—7, во всех случаях при одном и том же τ , но разных длительностях загрузки ($t - \tau$), пересечения двух



Фиг. 7.

прямых имеют место при одном и том же относительном напряжении. Так, например, при $\tau = 7$ дней это относительное напряжение составляет 0,75, а при $\tau = 14, 29, 94$ и 185 дней — 0,6.

Таким образом, здесь наблюдается новая закономерность, которая подтверждается столь многочисленными опытными

данными. Эта закономерность выражается в том, что хотя начальная линейная зависимость выше определенного напряжения не сохраняется, однако и далее между напряжениями и деформациями ползучести имеет место линейная зависимость. Разница заключается лишь в том, что одинаковому приращению $\frac{\epsilon}{R_n}$ при высоких напряжениях соответствует большее значение деформации ползучести.

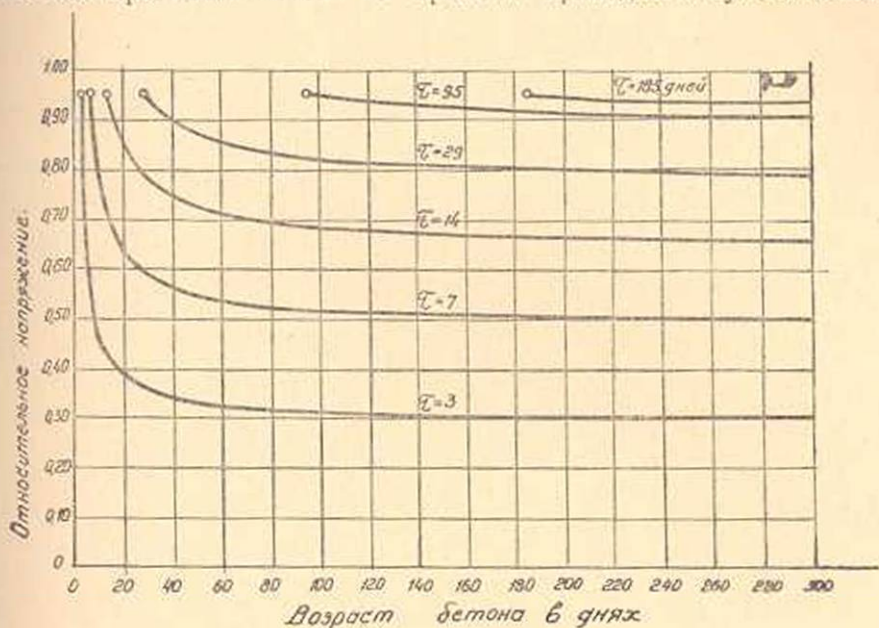
Такое явление, с нашей точки зрения, весьма закономерно и исходит из механизма ползучести бетона.

При напряжениях выше примерно 0,6 от предела прочности бетона, ползучесть, помимо вязкости гелевой структурной составляющей цементного камня и капиллярных явлений, еще обусловлена появлением и развитием микротрещин в бетоне. Таким образом, при указанном напряжении появляется новый фактор, который приводит к нарушению прежней линейной зависимости благодаря увеличению интенсивности деформаций. Однако, влияние этого нового фактора также выражается линейным законом.

Относительное напряжение, при котором происходит переход от первой области линейной ползучести во вторую область линейной ползучести, в большой мере зависит от возраста бетона к моменту его загрузки. И вполне понятно, почему для бетона, загруженного в молодом возрасте (7 дней), этот переход происходит при более высоком относительном напряжении, чем в остальных случаях. Для объяснения причин этого явления обратимся к фиг. 8, где для примера приведены кривые падения относительного напряжения для различных возрастов бетона к моменту загрузки в результате нарастания цилиндрической прочности бетона во времени.

В данном случае указанные кривые соответствуют тому случаю, когда относительное напряжение в момент загрузки составляло 0,95, т. е. самое высокое, которое было в наших опытах. Кривые построены использованием формулы (2).

Рассмотрение кривых фиг. 8 показывает, что нарастание цилиндрической прочности бетона во времени приводит к существенному



Фиг. 8.

падению относительного напряжения в бетоне после его загрузки. И чем меньше возраст бетона к моменту загрузки, тем интенсивнее и больше падает относительное напряжение.

В тех случаях, когда $\frac{\sigma}{R_y} < 0,95$ рост прочности бетона приведет к еще меньшим конечным величинам относительных напряжений. Этим, в основном, и следует объяснить то, что в наших опытах для $\tau = 7$ дней первая область линейной ползучести сначала не сохраняется до относительного напряжения 0,75. При $\frac{\sigma}{R_y} = 0,75$, хотя в бетоне и развиваются микротрещины и это приводит к более интенсивным деформациям, однако, это длится недолго. После того как относительное напряжение падает и становится $< 0,6$, дальнейшие деформации, обусловленные появлением и развитием микротрещин, прекращаются и дальнейшая ползучесть протекает лишь за счет вязкости гелевой составляющей цементного камня и капиллярных явлений. Такое объяснение вытекало из наших прежних исследований [6] и оно вновь подтверждается теперешними опытными данными.

Здесь еще раз подтверждается и то отмеченное нами ранее явление, что при одном и том же τ (когда $\tau \leq 7$ дней) с увеличением

длительности загрузки имеет место постепенный переход нелинейной ползучести в линейную ползучесть. Однако, на основании теперешних опытов и при высоких напряжениях связь между напряжениями и деформациями ползучести выражается линейной зависимостью. Поэтому правильнее будет сказать, что с увеличением длительности загрузки имеет место постепенный переход второй области линейной ползучести в первую область линейной ползучести. Это видно из фиг. 3, если сравнить между собой зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, которые соответствуют длительностям загрузки 4 и 300 дней.

Для наглядности на фиг. 3 прямые, которые выражают линейную ползучесть первой области при указанных длительностях загрузки, пунктиром продолжены до $\frac{\sigma}{R_n} = 0,95$. И, как видно, для длительности

загрузки 300 дней линейную ползучесть первой области без особой погрешности можно распространить до относительного напряжения 0,95.

Сказанное относилось к бетону, загруженному при $\tau = 7$ дней, что, по-видимому, в еще большей мере справедливо для случаев $\tau < 7$ дней. При $\tau < 7$ дней деформации бетона, обусловленные появлением и развитием трещин, еще быстрее прекратятся вследствие более быстрого падения относительного напряжения благодаря росту прочности бетона во времени. Поэтому не исключена возможность, что в таких случаях линейная зависимость между напряжениями и деформациями ползучести может сохраниться вплоть до относительного напряжения 0,95.

Рассмотрим аналогичные кривые ползучести при $\tau = 14$ дней (фиг. 4). В этом случае падение относительного напряжения также значительно (фиг. 8), однако, в итоге все же конечное относительное напряжение сохраняется $> 0,6$. По этой причине деформации, которые развиваются за счет образования и развития трещин, хотя и несколько затухают, однако, частично продолжают развиваться в процессе всего длительного загрузки. В результате этого с увеличением длительности загрузки уже не имеет места уменьшение отклонения прямой второй области ползучести от прямой ползучести первой области. А, наоборот, при $\tau = 14$ дней, поскольку дальнейший рост прочности бетона недостаточен, чтобы полностью приостановить развитие деформаций за счет образования и развития трещин, с увеличением длительности загрузок имеет место постепенное увеличение отклонения прямой второй области ползучести от прямой первой области ползучести. При этом, это отклонение возрастает как с увеличением длительности загрузки, так и возраста бетона к моменту его загрузки.

Таким образом, проведенные опыты наглядно показывают, какое существенное влияние оказывает возраст бетона к моменту загрузки на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести и на то предельное напряжение, до которого справедлива первая область линейной ползучести. Иными словами, зависимость

между напряжениями и деформациями ползучести в большой мере зависит от фактора старения бетона.

Как уже отмечалось, одной из основных предпосылок, на которой базируются существующие линейные теории ползучести бетона, является принятие линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести. Поэтому важно установить пределы применимости указанных теорий с точки зрения данной предпосылки.

Из наших опытов следует, что в тех случаях, когда $\tau \leq 7$ дней указанная предпосылка справедлива до напряжения, составляющего 0,75 от предела прочности бетона, а при $\tau > 7$ дней—0,6. Однако, поскольку наибольший практический интерес представляют те случаи, когда $\tau > 7$ дней, то можно считать, что линейные теории ползучести справедливы до относительного напряжения 0,6.

Проведенные исследования еще раз подтверждают наш тот вывод, что основной причиной нарушения начальной линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, после относительного напряжения 0,6, является образование и развитие микротрещин в бетоне. Рассмотрение фиг. 3—7 показывает, что при одном и том же τ , чем больше относительное напряжение, тем интенсивнее развиваются деформации ползучести. В случае молодого бетона ($\tau = 7; 14$ дней) кривые ползучести независимо от величины напряжения имеют затухающий характер, в то время как при $\tau > 14$ дней то же самое имеет место до относительного напряжения 0,6—0,75. В остальных случаях, т. е. когда $\tau > 14$ дней и $\frac{\sigma}{R_u} > 0,75$, деформации

ползучести до конца развиваются тем интенсивнее, чем больше возраст бетона к моменту загрузки и относительное напряжения.

Особенно это наглядно видно из фиг. 7, где деформации при относительных напряжениях 0,9 и 0,95 до конца развиваются установившейся скоростью, не показывая признаков затухания. Дальнейшее развитие этих деформаций в конечном счете может привести к разрушению бетона.

В табл. 6 приведена характеристика ползучести бетона при различных возрастах бетона к моменту загрузки в зависимости от относительного напряжения и длительности загрузки.

Как известно, характеристика ползучести

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_{\pi}(t_1)}{\varepsilon_0}$$

где $\varepsilon_{\pi}(t_1)$ — деформация ползучести при длительности загрузки t_1 ;
 ε_0 — упругая деформация в момент загрузки, т. е. при $t_1 = 0$.

При рассмотрении наших опытных данных (фиг. 3, 4, 5, 6 и 7) было отмечено наличие линейной зависимости между относительными напряжениями и деформациями ползучести. Причем для $\tau = 7$ дней

первая область линейной ползучести распространяется до $\frac{\sigma}{R_n} = 0,75$, а для $\tau > 7$ дней — 0,6.

Таблица 6

τ в днях	$\frac{\sigma}{R_n}$	Характеристика ползучести бетона φ_t при длительности загрузки					
		20 дней	60 дней	100 дней	150 дней	250 дней	300 дней
7	0,25	1,51	2,27	2,60	2,85	3,19	3,19
	0,50	1,47	2,02	2,35	2,60	2,77	2,77
	0,60	1,57	2,16	2,45	2,62	2,79	2,87
	0,75	1,48	2,01	2,27	2,44	2,66	2,72
	0,90	1,87	2,38	2,61	2,80	2,94	2,98
	0,95	2,03	2,50	2,70	2,87	3,05	3,09
14	0,25	1,34	1,85	2,18	2,35	2,52	2,52
	0,50	1,34	1,85	2,06	2,18	2,27	2,27
	0,60	1,40	1,84	2,10	2,28	2,38	2,42
	0,75	1,68	2,24	2,41	2,53	2,77	2,80
	0,90	1,70	2,24	2,33	2,42	2,75	2,77
	0,95	1,94	2,52	2,72	2,85	3,05	3,09
29	0,25	1,34	1,85	2,18	2,44	2,60	—
	0,50	1,34	1,85	2,18	2,35	2,48	—
	0,60	1,47	2,00	2,24	2,38	2,56	—
	0,75	1,90	2,41	2,69	2,91	3,19	—
	0,90	2,56	3,12	3,40	3,61	3,84	—
	0,95	2,87	3,54	3,80	4,00	4,24	—
95	0,25	0,67	1,18	1,34	1,43	—	—
	0,50	0,84	1,20	1,51	1,55	—	—
	0,60	0,91	1,33	1,51	1,58	—	—
	0,75	1,06	1,57	1,82	1,93	—	—
	0,90	1,28	1,82	2,03	2,14	—	—
185	0,25	0,42	0,67	0,84	—	—	—
	0,50	0,42	0,71	0,84	—	—	—
	0,60	0,56	0,81	1,02	—	—	—
	0,75	0,67	0,92	1,12	—	—	—
	0,90	0,72	0,98	1,17	—	—	—
	0,95	0,86	1,15	1,41	—	—	—

Линейная зависимость получилась также между напряжениями и упругими (мгновенными) деформациями (фиг. 2). А поскольку характеристика ползучести есть отношение деформации ползучести к упругим деформациям, то при одном и том же τ и длительности загрузки, но разных относительных напряжениях, она будет выражаться одним и тем же числом. Это наглядно видно из табл. 6, где на основании экспериментальных данных в указанных случаях характеристики ползучести незначительно отличаются друг от друга, тем самым подтверждая наличие линейной зависимости между напряжениями и деформациями.

Из данных табл. 6 следует, что с увеличением длительности загрузки характеристика ползучести во всех случаях возрастает.

Если же рассматривать при одинаковых длительности загрузки и относительном напряжении, то с увеличением возраста бетона к моменту загрузки φ_t уменьшается.

Данные табл. 6 показывают, что в зависимости от ряда факторов характеристика ползучести может достигнуть величины 4,25.

§ 5. Влияние старения бетона на ползучесть

Несмотря на ряд работ, все же до сих пор влияние старения бетона на деформации ползучести мало изучено.

До исследований автора [6], для изучения влияния старения на ползучесть бетона при сжатии, последний в различных возрастах загружался одной и той же нагрузкой. При этом, обычно, напряжение не превышало половины предела прочности бетона на сжатие.

В результате таких опытов были отмечены следующие основные закономерности:

1. При одинаковых длительности загрузки и величине напряжения, чем больше возраст бетона к моменту загрузки, тем меньше ползучесть.

2. При одинаковом напряжении кривые ползучести, соответствующие различным возрастам бетона к моменту загрузки, после некоторой длительности загрузки, параллельны друг другу.

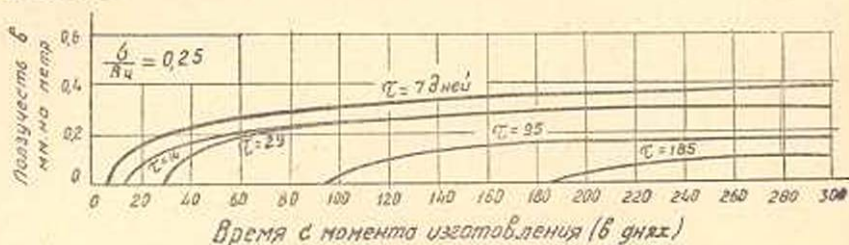
Установление указанных закономерностей дало возможность принять гипотезу о „параллельности“ кривых ползучести, которая использована при построении одной из существующих теорий ползучести бетона — теории старения.

Необходимо, однако отметить, что указанная выше методика изучения влияния старения бетона на ползучесть верна в тех случаях, когда напряжение, которым загружается бетон в различных возрастах, не превышает $0,6R$. В противном случае отмеченные выше закономерности нарушаются, что вытекает также из принятой нами гипотезы механизма ползучести бетона.

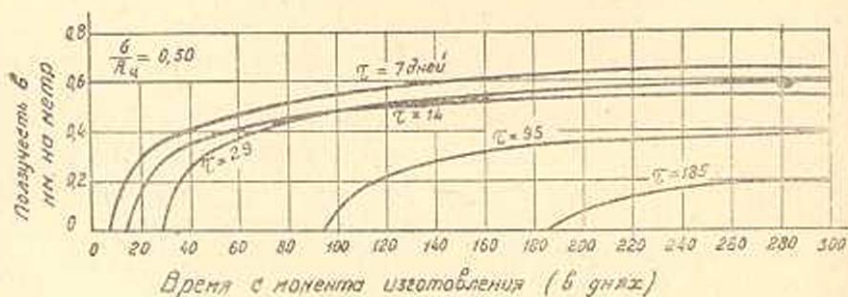
Дело в том, что когда для какого-либо возраста напряжение, которым загружается бетон в различных возрастах, больше $0,6R$, то в этом случае деформации ползучести развиваются за счет вязкости геля, капиллярных явлений и за счет образования и развития микротрещин в бетоне. А для тех возрастов, для которых напряжение в момент загрузки $< 0,6R$, деформации ползучести, обусловленные образованием и развитием микротрещин, будут отсутствовать. Таким образом, с точки зрения механизма ползучести, бетон будет находиться в неодинаковых условиях и поэтому там, где напряжение $> 0,6R$ это приведет к нарушению отмеченных выше закономерностей.

Учитывая это обстоятельство, при изучении влияния старения на ползучесть бетона, особенно при высоких напряжениях ($> 0,6R$), необходимо бетон в различных возрастах загружать не одинаковым напряжением, а одинаковым относительным напряжением.

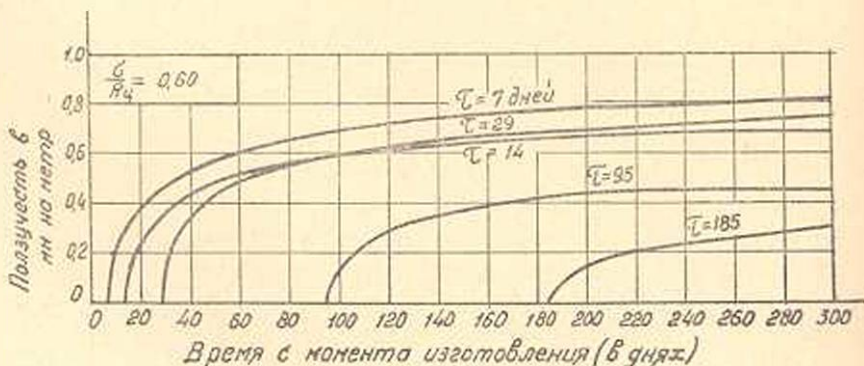
На фиг. 9, 10, 11, 12, 13 и 14 приведены экспериментальные кривые ползучести, соответствующие различным возрастам бетона к моменту загрузки при относительных напряжениях 0,25; 0,50; 0,60; 0,75; 0,90 и 0,95. Рассмотрение семейства кривых ползучести при различных относительных напряжениях показывает, что независимо от величины относительного напряжения, чем моложе бетон к моменту загрузки, тем интенсивнее происходит затухание деформаций ползучести бетона во времени. Указанная закономерность впервые нами была отмечена в работе [6] и объяснялась тем, что чем моложе бетон к моменту загрузки, тем больше дальнейшее нарастание его прочности во времени, которое приводит к падению начального относительного напряжения и, благодаря этому, к затуханию деформаций ползучести.



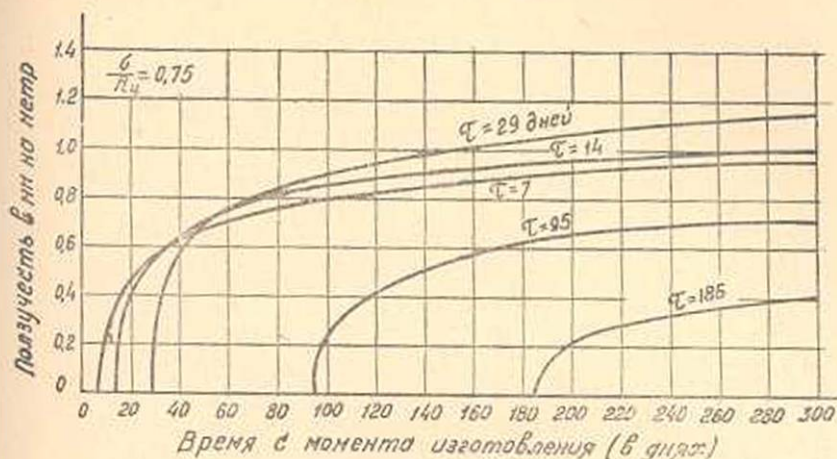
Фиг. 9.



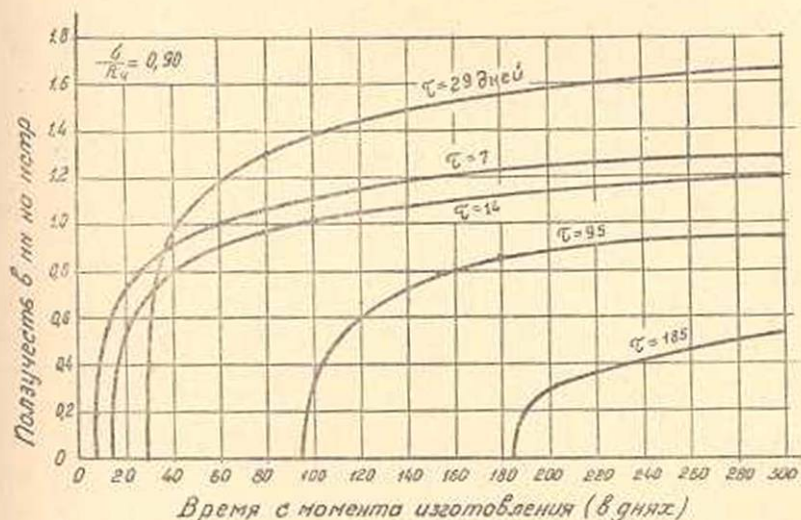
Фиг. 10.



Фиг. 11.



Фиг. 12.

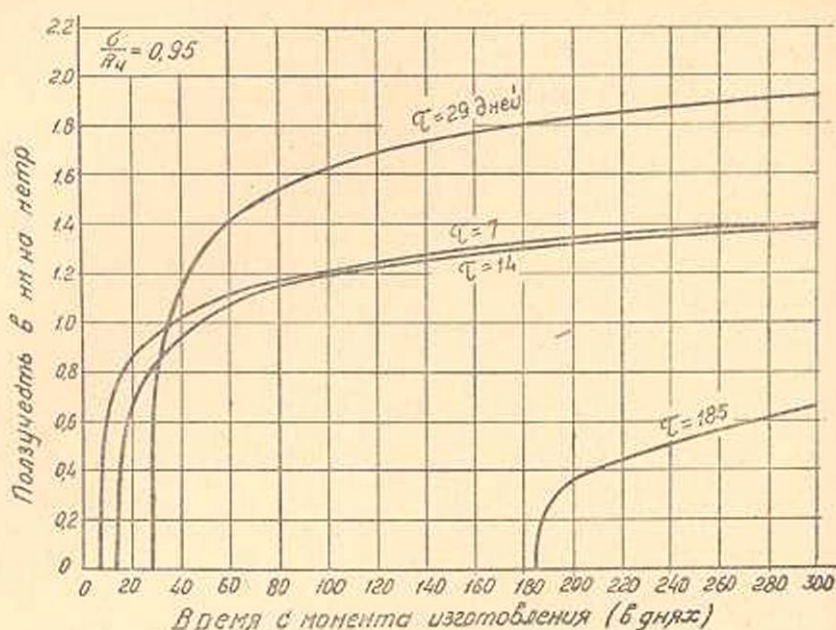


Фиг. 13.

На этом вопросе мы подробно остановились в предыдущем параграфе при рассмотрении зависимости между напряжениями и деформациями ползучести.

Падением относительного напряжения, вследствие роста прочности бетона во времени, было объяснено и то явление, что бетон при высоких напряжениях в начальный период загрузки претерпевает нелинейную ползучесть, а далее линейную ползучесть.

На основании кривых ползучести фиг. 9, 10 и 11 можно отметить что, при одинаковом относительном напряжении, когда последнее не превышает 0,6, с увеличением возраста бетона к моменту загрузки ползучесть уменьшается. При более высоких относительных напряжениях указанная закономерность нарушается и остается в силе только для тех случаев, когда $\tau > 29$ дней. На фиг. 12, где приведены кривые



Фиг. 14.

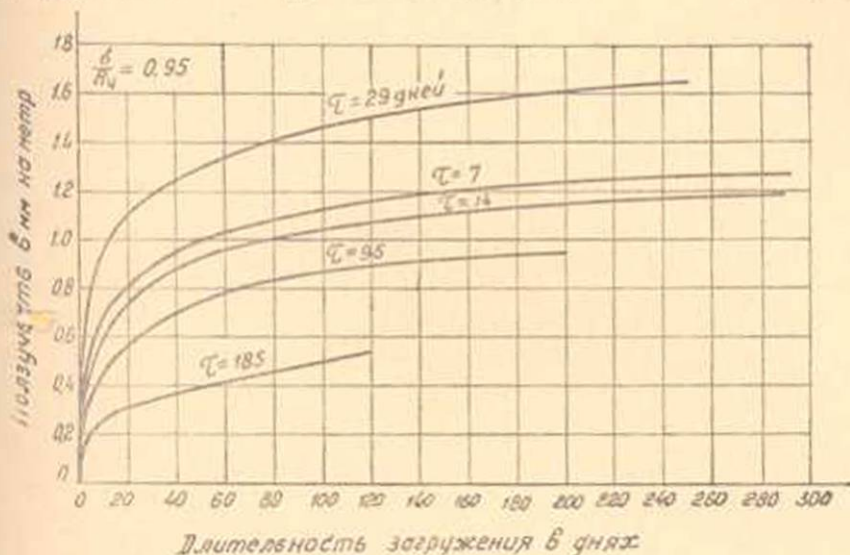
ползучести для различных возрастов при $\frac{\sigma}{R_u} = 0,75$, кривая ползучести, соответствующая возрасту 7 дней, после длительности нагружения примерно 22 дня, пересекает кривую для возраста 14 дней и далее располагается ниже последней. Что касается кривой ползучести возраста 29 дней, то она через некоторую длительность нагружения пересекает кривые ползучести более молодых возрастов (7 и 14 дней) и располагается выше. То же самое имеет место и при более высоких относительных напряжениях (фиг. 13 и 14). Причем, с увеличением относительного напряжения, деформации образцов, нагруженных при $\tau = 29$ дней, все больше превышают деформации образцов, нагруженных при $\tau = 7$ и 14 дней.

Таким образом, когда $\frac{\sigma}{R_u} > 0,6$ и $\tau \leq 29$ дней, с увеличением возраста бетона к моменту нагружения, ползучесть возрастает. Такая же закономерность была получена в наших прежних опытах, когда бетонные образцы были нагружены при $\tau = 7, 14$ и 32 дня и относительном напряжении 0,7 [6]. Аналогичные результаты, но при сравнительно кратковременных опытах, были получены П. И. Васильевым [4].

Однако, новые опыты автора, которые поставлены при более широком изменении возраста бетона к моменту нагружения, показывают, что указанная закономерность при $\tau > 29$ дней нарушается. Как видно из фиг. 12, 13 и 14, кривые ползучести, которые соответствуют возрастам 95 и 185 дней, расположились ниже кривых ползучести более ранних возрастов. Поэтому после возраста 29 дней получается

та известная закономерность, что с увеличением возраста, несмотря на высокие относительные напряжения, ползучесть уменьшается.

Для наглядности на фиг. 15 представлены кривые ползучести бетона при разных возрастах с совмещением их начал. Как видно из фиг. 15, кривые ползучести для $\tau = 7, 14, 29$ и 95 дней после некоторой длительности загрузки имеют затухающий характер в то



Фиг. 15.

время, как этого при $\tau = 185$ дней не наблюдается. В последнем случае деформации продолжают и далее развиваться интенсивно и, очевидно, с увеличением длительности загрузки намного приблизятся по величине к деформациям бетона, загруженного при более ранних возрастах.

Рассмотрение кривой нарастания цилиндрической прочности бетона во времени (фиг. 2) показало, что после трехмесячного возраста дальнейшее нарастание прочности бетона во времени незначительно, а после возраста 6 месяцев — практически прекращается. Поэтому можно считать, что при высоких напряжениях ($>0,6R$) деформации бетона, загруженного длительной нагрузкой при возрасте 185 дней, в основном протекают за счет образования и развития микротрещин в бетоне. Деформации, обусловленные другими факторами (вязкостью геля и капиллярными явлениями), будут незначительны, так как бетон старый. Если это так, то при загрузке бетона в более старом возрасте ($\tau > 185$ дней) примерно должна получиться та же кривая ползучести, которую мы получили для $\tau = 185$ дней.

На основании вышесказанного, как будто вполне понятно, почему при относительных напряжениях $>0,6$ в наших опытах деформации ползучести при возрасте бетона к моменту загрузки 29 дней получились намного больше, чем при возрасте 95 дней, а в последнем

случае больше, чем при возрасте 185 дней. Очевидно, это явление следует объяснить более интенсивным развитием деформаций за счет вязкости геля и капиллярных явлениях. Как известно, деформации, обусловленные указанными факторами, развиваются интенсивнее в молодом возрасте бетона. Естественно, возникает вопрос: если это так, то почему деформации образцов, которые были загружены при возрасте 7 и 14 дней, оказались намного меньше, чем при возрасте 29 дней. Причиной этого опять является падение относительного напряжения вследствие нарастания прочности бетона во времени, которое, как уже было показано, происходит тем интенсивнее и больше, чем моложе бетон к моменту его загрузки (фиг. 8).

Если, например, загружая бетон в различных возрастах, можно было бы с момента загрузки сохранить неизменность во времени его физико-механических свойств, то нет сомнения, что все кривые ползучести по отношению друг к другу расположились бы по обычной, нам известной, закономерности. В этом случае кривая ползучести самого молодого бетона расположилась бы выше всех остальных кривых, а кривая ползучести наиболее старого бетона — ниже всех. Однако, поскольку в действительности при $\tau = 7$ и 14 дней, относительное напряжение в бетоне с момента загрузки существенно падает, это приводит к меньшим деформациям ползучести, чем при $\tau = 29$ дней. Конечно, и в последнем случае имеет место падение относительного напряжения благодаря нарастанию прочности бетона во времени, однако, все же в итоге относительное напряжение сохраняется высоким (фиг. 8). По этой причине деформации ползучести интенсивно развиваются как за счет вязкости геля и капиллярных явлений, так и за счет образования и развития микротрещин в бетоне. По мере дальнейшего увеличения возраста бетона к моменту загрузки ($\tau > 29$ дней) деформации, обусловленные вязкостью геля и капиллярными явлениями, уменьшаются, а деформации, обусловленные образованием и развитием трещин, увеличиваются. Поэтому, очевидно, при некоторой длительности загрузки деформации ползучести, вызванные первыми двумя факторами, будут равны деформациям, вызванным третьим фактором.

На основании вышеизложенного, рассматривая фиг. 15, можно прийти к выводу, что при данных температурно-влажностных условиях хранения бетона все же деформации развивающиеся вследствие вязкости геля и капиллярных явлений, намного превосходят деформации, вызванные образованием и развитием микротрещин в бетоне. Однако, сказанное справедливо до некоторого τ . В бетоне, загруженном в старом возрасте, деформации ползучести в основном протекают за счет образования и развития микротрещин в бетоне.

Загружение образцов в годичном возрасте даст нам возможность в дальнейшем еще больше уточнить указанные выводы.

Таким образом, влияние старения бетона на ползучесть при высоких относительных напряжениях выражается весьма сложной зако-

номерностью, так как здесь одновременно участвует ряд факторов, которые в совокупности обуславливают полученные нами результаты.

В заключении этого параграфа следует отметить, что, как показывают наши многолетние экспериментальные исследования ползучести как легких, так и тяжелых бетонов, гипотеза о „параллельности“ кривых деформаций ползучести бетона, положенная в основу теории старения, справедлива лишь в случае старых бетонов, т. е. когда фактически деформации ползучести приобретают свои предельные значения. Поэтому утверждения некоторых авторов (Уйтней, Фрайфельд) о том, что решение различных задач на основании теории старения, которая является частным случаем теории упруго-ползучего тела, приводит почти к одинаковым результатам, следует считать несостоятельным (16).

§ 6. Влияние длительного нагружения бетона на его прочность и деформативность

Обычно длительное нагружение бетона статической нагрузкой, когда величина последней не превышает определенные пределы, как это установлено [11, 13], положительно сказывается на прочности бетона. При этом бетон, твердеющий под нагрузкой, как правило, имеет большую прочность и модуль упругости, чем бетон, твердеющий без нагрузки. Однако, эффект данного явления существенно зависит от возраста бетона к моменту его нагружения, а также ряда факторов.

В тех случаях, когда интенсивность напряжения превышает упомянутые пределы, имеет место отрицательный эффект.

По нашим опытам пока рано судить, как качественно и количественно влияет длительное нагружение бетона на его прочность и деформативность в зависимости от возраста к моменту нагружения и величины напряжения, так как образцы еще не разгружены и не испытаны. Однако, поскольку на сегодня еще ни один образец (даже из числа тех, которые были нагружены относительным напряжением 0,9, 0,95) не разрушился, можно считать, что длительная прочность указанного бетона $> 0,95 R$. Особенно это можно утверждать в отношении тех случаев, когда возраст бетона к моменту нагружения < 3 месяцев. В этом случае, как это следует из соответствующих кривых ползучести, последние даже при относительных напряжениях 0,9 и 0,95 имеют затухающий характер. Поэтому вряд ли дальнейшее нахождение бетона под нагрузкой может привести к его разрушению. Что касается бетона, нагруженного при $\tau = 185$ дней, то в отношении этого пока рано делать окончательный вывод, так как длительность нагружения сравнительно небольшая, причем кривые ползучести при относительных напряжениях 0,9 и 0,95 показывают дальнейший интенсивный рост деформаций ползучести.

§ 7. Описание экспериментальных кривых ползучести

В предыдущих параграфах, путем анализа полученных экспериментальных данных, были показаны те зависимости, которые имеют место между напряжениями и деформациями ползучести при различных возрастах бетона к моменту загрузки. Описание столь сложных закономерностей единой математической зависимостью, естественно, связано с определенными трудностями, ибо, с одной стороны данная зависимость должна быть по возможности простой, а с другой стороны—должна хорошо отвечать экспериментальным данным. Известно, что получить по возможности простую, удобную для практических расчетов зависимость большей частью удается лишь за счет худшего описания результатов экспериментов, поэтому в таких случаях приходится принимать какое-то среднее, во всех отношениях приемлемое, решение.

При рассмотрении экспериментальных данных, зависимость между напряжениями и деформациями ползучести при различных возрастах бетона к моменту загрузки нами была принята в виде двух прямых, из коих нижняя прямая выражает первую область линейной ползучести, а верхняя прямая—вторую область линейной ползучести. Причем, относительное напряжение, при котором кончается первая область и начинается вторая область линейной ползучести для $\tau > 7$ дней составляет 0,6.

Для описания экспериментальных кривых ползучести мы воспользовались теорией упруго-ползучего тела, как наиболее общей теорией, которая учитывает также старение бетона [1].

Согласно теории упруго-ползучего тела, мера ползучести бетона

$$C(t_1, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau), \quad (7)$$

где $\varphi(\tau)$ —функция, учитывающая старение бетона, а

$f(t - \tau)$ —функция, учитывающая длительность загрузки бетона.

На основании наших экспериментальных данных, мера ползучести бетона для первой области линейной ползучести выражается следующей зависимостью:

$$C = \left(3 + \frac{700}{\tau + 16}\right) \left[1 - e^{-0,03(t-\tau)}\right] 10^{-6} \quad (8)$$

Кривые меры ползучести бетона на основании формулы (8) приведены на фиг. 16 пунктиром и, как видим, они дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Исходя из формулы (8), для всех возрастов бетона к моменту загрузки будем иметь:

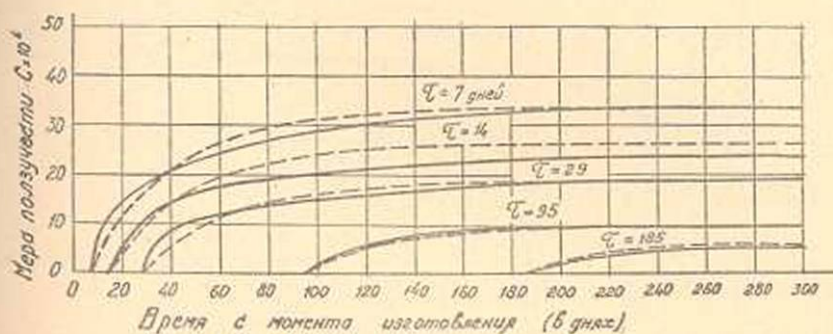
$$\varepsilon_n = \left(3 + \frac{700}{\tau + 16}\right) \left(\frac{100\tau}{8,4 + 1,25\tau}\right) \left[1 - e^{-0,03(t-\tau)}\right] \frac{\sigma}{R_n} 10^{-6} \quad (9)$$

или

$$\varepsilon_n = \left(235 + \frac{56000}{\tau + 27} \right) \left[1 - e^{-0,03(t-\tau)} \right] \frac{\sigma}{R_n} 10^{-6}. \quad (10)$$

Для описания кривых ползучести при относительных напряжениях $> 0,6$ и $\tau > 29$ дней, мы получили следующую формулу:

$$\varepsilon_n = \left(150 + \frac{149000}{0,01\tau^2 + 62} \right) \left(\frac{\sigma}{R_n} - 0,6 \right) 10^{-6} + \left(235 + \frac{56000}{\tau + 27} \right) \times \\ \times \left\{ \left[1 - e^{-0,03(t-\tau)} \right] 0,6 + \left[1 - e^{-0,01(t-\tau)} \right] \left(\frac{\sigma}{R_n} - 0,6 \right) \right\} 10^{-6}, \quad (11)$$



Фиг. 16.

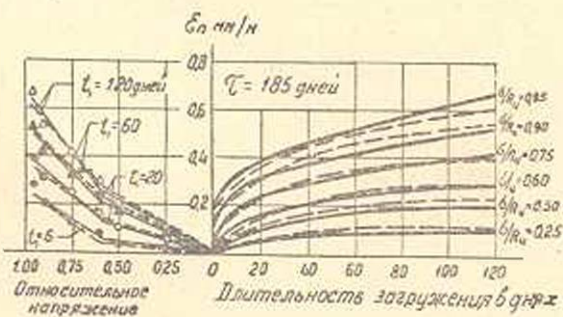
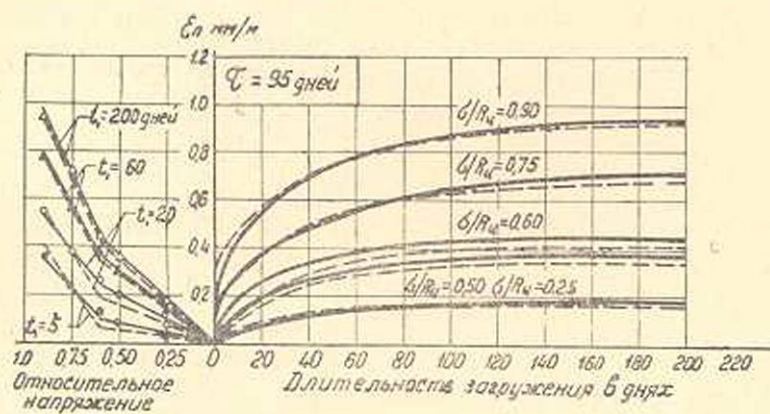
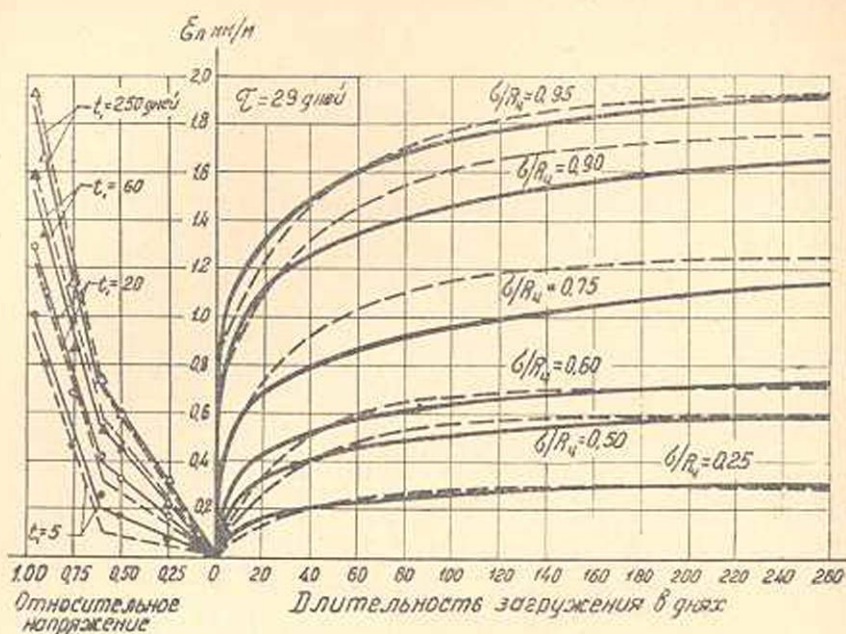
Первый член этой формулы представляет деформации ползучести за первые 30—40 часов после приложения нагрузки в зависимости от возраста бетона к моменту нагружения и величины относительного напряжения. Поскольку время 30—40 часов незначительно по сравнению с общей длительностью опытов, деформации, развивающиеся за это время, условно приняты независимыми от длительности нагружения. Это допущение было сделано для лучшего описания экспериментальных кривых ползучести при относительных напряжениях $> 0,6$.

На фиг. 17 нанесены как экспериментальные кривые, так и кривые построенные по формулам (10) и (11). Причем кривые, построенные по формулам, нанесены пунктиром.

Рассмотрение фиг. 17 показывает, что формулы (10) и (11) хорошо описывают экспериментальные кривые ползучести бетона после длительности нагружения 3—5 дней особенно при $\frac{\sigma}{R_n} > 0,6$.

Аспирантом Института математики и механики АН АрмССР У Жуй-Фыном для решения ряда практических задач была сделана попытка описать полученные нами экспериментальные кривые ползучести бетона более простой зависимостью (14).

Для этой цели им была использована зависимость следующего вида, предложенная в свое время П. И. Васильевым (3).



Фиг. 17.

$$\varepsilon_n = C(t, \tau) [\alpha + \beta \tau^n], \quad (12)$$

где α , β и n — постоянные, определяемые из опыта.

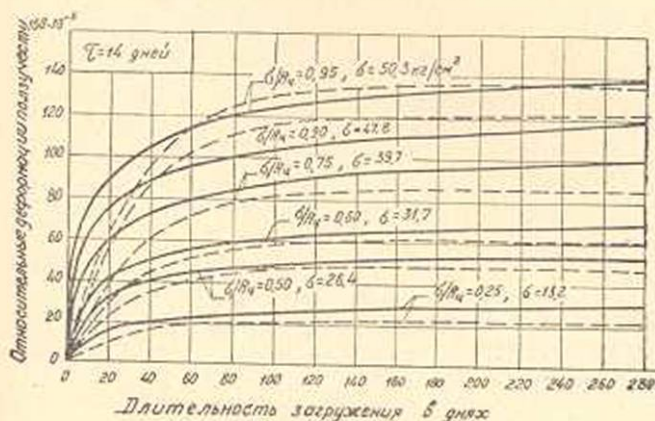
При этом должно быть удовлетворено условие $\alpha + \beta = 1$.

Подобрав соответствующую зависимость для меры ползучести и постоянные α , β и n У Жуй-Фын получил для деформации ползучести следующую зависимость:

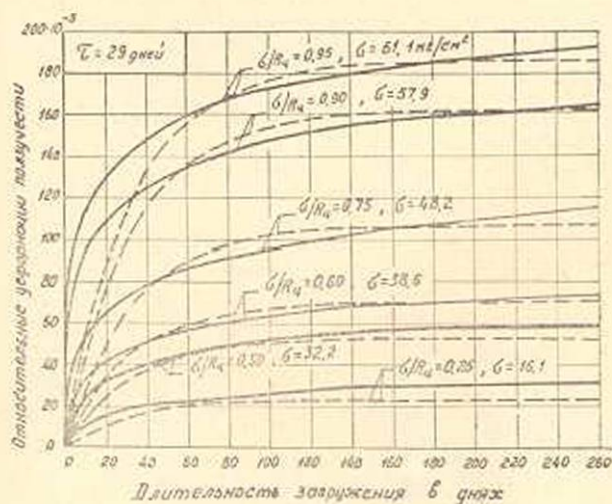
$$\varepsilon_n = \left(0,28 + \frac{4450}{\tau^2 + 3030}\right) [1 - e^{-0,03(t-\tau)}] [0,999995\sigma + 0,000005\sigma^4] \cdot 10^{-5}, \quad (13)$$

которая действительна при $\tau \geq 14$ дней.

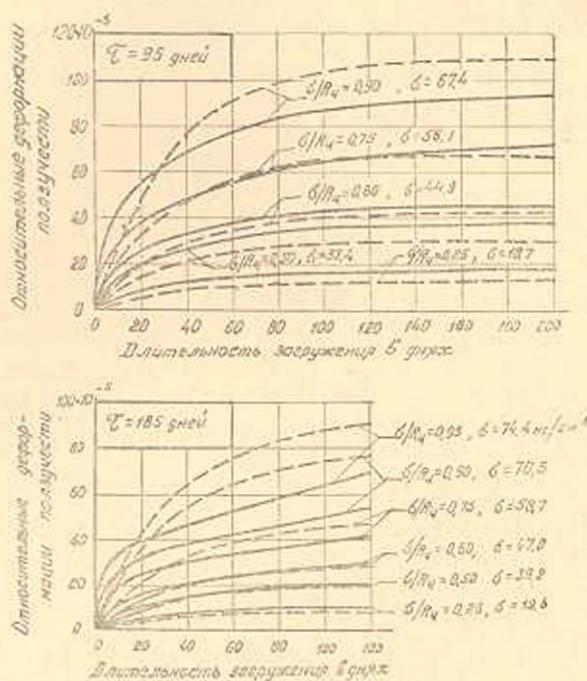
Экспериментальные кривые ползучести, описанные по формуле (13) при различных τ , приведены на фиг. 18 и 19.



Фиг. 18.



Фиг. 18б.



Фиг. 19.

Рассмотрение фиг. 18 и 19 показывает, что данную формулу можно считать удовлетворительной только после длительности загрузки 40–60 дней.

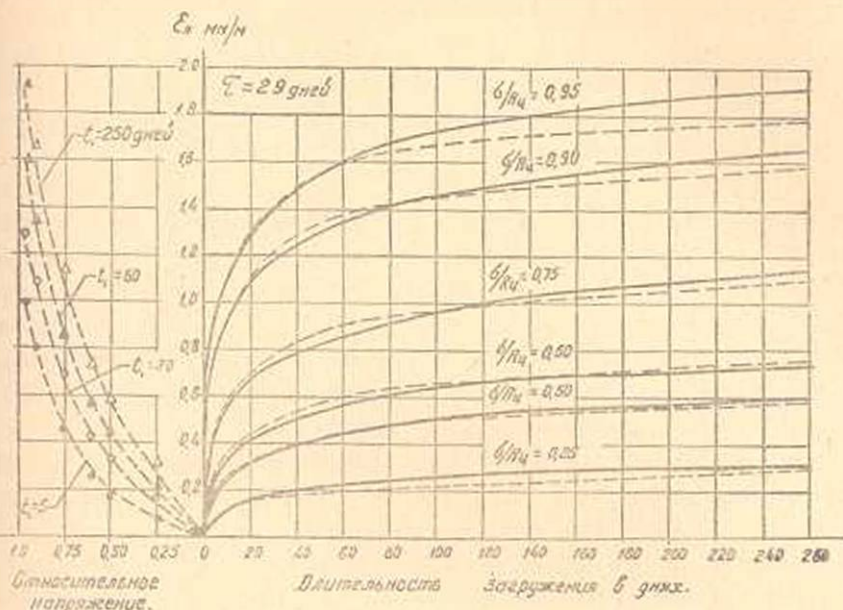
В дальнейшем мы попытались аналогичной зависимостью лучше описать экспериментальные кривые ползучести. Однако, при этом даже для одного возраста зависимость получается такой сложной и громоздкой, что уже не может быть речи о получении общей формулы, которая охватила бы все возраста бетона.

Так, например, для возраста бетона к моменту загрузки 29 дней, была получена следующая зависимость:

$$\epsilon_n = 19 \left[1 - e^{-0.01(t-29)} \right] \left[\left(\frac{643}{t_1 + 1} + 0.083t_1 + 33 \right) \frac{\sigma}{R_n} + \left(\frac{1300}{t_1} + 45 \right) \left(\frac{\sigma}{R_n} \right)^4 \right] 10^{-6}. \quad (14)$$

Таким образом, в данном случае α и β не являются постоянными, а зависят от длительности загрузки. Именно это и приводит к лучшему описанию экспериментальных данных, чем формулой (13). Однако, формула (14) отвечает только одному возрасту.

Экспериментальные кривые и кривые соответствующие формуле (14) приведены на фиг. 20.



Фиг. 20.

Очевидно, формулой типа (13) можно удовлетворительно описать только сравнительно кратковременные опыты, при которых коэффициенты α и β можно принять постоянными.

Анализируя приведенные выше различные зависимости для описания полученных экспериментальных кривых ползучести, приходим к выводу, что наиболее лучшими из них являются (10) и (11).

Однако, при решении определенных задач не исключена целесообразность применения зависимости типа (13).

Необходимо отметить, что приведенными здесь зависимостями не исчерпываются возможности получения других относительно более простых зависимостей.

Выводы

1. Возраст бетона к моменту загрузки τ оказывает существенное влияние на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести.

2. Связь между напряжениями и деформациями ползучести, вплоть до относительного напряжения 0,9, может быть выражена двумя линейными законами. Относительное напряжение $\frac{\sigma}{R_u}$, при котором имеет место переход от первого линейного закона ко второму определяется возрастом бетона к моменту загрузки. Для $\tau \leq 7$ дней, это относительное напряжение составляет 0,75, и в остальных случаях — 0,6.

3. Переход от первой во вторую область линейной ползучести происходит благодаря тому, что при относительном напряжении примерно 0,6 наступает новое состояние бетона, вследствие начала образования и развития микротрещин. Развитие микротрещин приводит также к деформациям бетона.

4. Сравнительно высокое относительное напряжение, при котором происходит переход от первой области линейной ползучести во вторую, в случае молодого бетона ($\tau \leq 7$ дней), является следствием более интенсивного дальнейшего нарастания прочности бетона во времени с момента его длительного нагружения. Упрочнение бетона приводит к быстрому падению начального высокого относительного напряжения и тем самым к затуханию деформаций, обусловленных образованием и развитием микротрещин.

5. При молодом бетоне, когда $\tau \leq 7$ дней, по мере увеличения длительности нагружения отклонение прямой второй области ползучести от прямой первой области ползучести уменьшается. Благодаря такой закономерности, для длительности нагружения > 300 дней, первую область линейной ползучести можно распространить до относительного напряжения 0,9—0,95.

В тех случаях, когда $\tau > 14$ дней, указанная закономерность нарушается, и, с увеличением длительности нагружения, отмеченное выше отклонение увеличивается.

6. При одинаковых относительных напряжениях, когда последний $< 0,6$, с увеличением τ ползучесть уменьшается. Если же относительное напряжение $> 0,6$, то до месячного возраста с увеличением τ ползучесть возрастает, а после месячного возраста с дальнейшим увеличением τ ползучесть уменьшается.

7. Первая область линейной ползучести бетона для $\tau \leq 7$ дней справедлива до относительного напряжения 0,75, а для $\tau > 7$ дней—0,6.

8. Упругие и полные деформации бетона при обычных кратковременных испытаниях, соответствующие разным возрастам при одинаковых относительных напряжениях, незначительно отличаются друг от друга.

9. Связь между напряжениями и деформациями ползучести, до относительного напряжения 0,9—0,95, с учетом старения бетона, при подборе соответствующих параметров, могут быть описаны зависимостями теории упруго-ползучего тела.

Կ. Ս. Կարապետյան

ԲԵՏՈՆԻ ԾԵՐԱՑՄԱՆ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍՈՂՔԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԻ
ԵՎ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԵՂԱԾ ԱՌՆՁՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Բետոնի սողքի զեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած գծալին կապի օրինքը, հանդիսանում է գծալին սողքի տեսություն հիմնական նախադրյալներից մեկը: Բայց մինչև օրս պարզված չէր այն սահմանալին լարվածությունը, որի դեպքում վերջանում է գծալին սողքի տիրույթը և սկսվում է ոչ գծալին սողքի տիրույթը: Դեռևս [6] աշխատանքում մեր կողմից ցույց էր տրված, որ հիշյալ սահմանալին լարվածությունը մեծ չափով կախված է երկարատև բևեռավորման մոմենտին համապատասխանող բետոնի հասակից:

Հոդվածում բերված են բետոնի սողքի զեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած կապի էքսպերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքները հաշվի առնելով նրա ծերացումը:

Կատարված են 7, 14, 29, 85 և 185 օր հասակ ունեցող ծանր բետոնի զրանաձև նմուշների փորձարկումները՝ 0,25, 0,50, 0,60, 0,75, 0,90 և 0,95 հարաբերական լարումների դեպքում: Փորձերի հիման վրա պարզված է, որ, երբ բետոնի հասակը բևեռավորման մոմենտին 7 օրից ավել է, մինչև 0,60 հարաբերական լարումները, սողքի զեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած կապը գծալին է: 7 օր հասակ ունեցող բետոնի համար այդ հարաբերական լարվածության մեծությունը հասնում է 0,75: Պարզված է նաև, որ ավելի բարձր հարաբերական լարումների դեպքում (0,60—0,95) սողքի զեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած կապը նույնպես գծալին է, միայն այն տարբերությամբ, որ այդ տիրույթում՝ հարաբերական լարումների միևնույն աճի դեպքում, սողքի զեֆորմացիաների մեծությունները ավելի բարձր են:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян, Н. А., Некоторые вопросы теории ползучести, Гос. изд. техн. теор. лит., 1952.
2. Берг О. Я., К вопросу о прочности и пластичности бетона, ДАН СССР, том XII, № 4, 1950.
3. Васильев П. И., Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом времени, Изв. ВНИИГ, том 45, 1951.
4. Васильев П. И., Влияние старения бетона на вид кривых ползучести, Изв. ВНИИГ, том 75, 1957.
5. Карапетян К. С., О ползучести туфобетона, Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), том V, № 4, 1952.
6. Карапетян К. С., Ползучесть бетона при высоких напряжениях, Известия АН АрмССР (серия ФМЕТ наук), том VI, № 2, 1953.
7. Карапетян К. С., Влияние размеров образца на усадку и ползучесть бетона, Известия АН АрмССР (серия ФМЕТ наук), том IX, № 1, 1956.
8. Карапетян К. С., Экспериментальное исследование ползучести легкого бетона на естественных пористых заполнителях, Диссертация, 1956.
9. Карапетян К. С., Влияние фактора времени на прочность и деформативность бетона на литонидной немзе и некоторые другие его свойства. Сборник статей „Гидротехнический бетон на литонидной немзе“, Изд. АН АрмССР, 1959.

10. Лисиченко В. А., Деформометр новой конструкции. Изв. АН АрмССР, том 1, № 6, 1948.
11. Саташкин А. В., Сеиченко Б. А., Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. Автографиздат, 1955.
12. Столяров Н. В., Введение в теорию железобетона, Стройиздат, 1956.
13. Улицкий И. И., Ползучесть бетона, Гостелиздат Украины, 1948.
14. У Жуй-Фын, Неустойчивая ползучесть составных цилиндрических труб в упругой среде. Известия АН АрмССР (серия ФМ наук), том XII, № 3, 1959.
15. Фрейсман Е., Переворот в технике бетонов ОНТИ, 1938.
16. Фрайфельд С. Е., Основные вопросы теории деформации бетона. Сборник статей "Теория расчета и конструирования жел. бет. конструкций", 1957.
17. Шейкин А. Е., К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Труды МИИТ, вып. 69, Трансжелдориздат, 1946.