

С. В. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ, В. Я. БАГРИЙ

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ползучесть бетона экспериментально хорошо изучена при действии сжимающей нагрузки как постоянной, так и изменяющейся во времени по различным законам. При длительном растяжении поведение бетона изучено значительно слабее, причем исследовались в основном случаи постоянной или ступенчато-изменяющейся нагрузки [4], [5], [6], [8].

Однако, в большинстве конструкций, например, гидротехнических и промышленных, в процессе их эксплуатации возникают как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Интересен также случай периодических воздействий на бетон, поскольку большинство конструкций, находящихся на открытом воздухе или подвергающихся периодическим технологическим циклам (пропарочные камеры, автоклавы), работают именно в таких условиях. Примером подобных воздействий могут служить изменения температуры и влажности окружающего воздуха в их годовом или технологических циклах, периодические изменения эксплуатационных нагрузок и т. д.

В связи с этим авторами в НИИЖБ Госстроя СССР были поставлены специальные опыты по изучению ползучести бетона при действии знакопеременных периодических воздействий. Опыты проводились на двух сериях образцов по примерно одинаковой программе и методике.

Исследовалась ползучесть бетона состава (по весу) — 1:2.61:3.62; $V/U = 0.62$ для I-й серии и, соответственно, состава 1:2.54:3.54; $V/U = 0.6$ для II-й серии. Для приготовления бетона использовались обычный портландцемент активностью 462 кг/см^2 (I серия) и 428 кг/см^2 (II серия), речной песок и мелкий известняковый щебень.

Экспериментальное изучение связи между деформациями бетона и периодически изменяющимися двузначными напряжениями, имеющими период $T = 14 \text{ сут}$, проводилось в условиях одномерной задачи в области линейной ползучести бетона, т. е. при $\varepsilon < 0.45 R_{пр}$ при сжатии и $\varepsilon < 0.8 R_{р}$ при растяжении.

Образцы, подвергаемые действию длительной нагрузки, представляли собой бетонные призмы с размерами $7 \times 7 \times 60 \text{ см}$ и $10 \times 10 \times 100 \text{ см}$ со специальными оголовками из стальных плиток. Постоянно действующей растягивающей и периодически изменяющейся нагрузке подвергались образцы с размерами $10 \times 10 \times 100 \text{ см}$, а постоянной сжимающей — $7 \times 7 \times 60 \text{ см}$ и $10 \times 10 \times 100 \text{ см}$.

Бетонирование образцов производилось в стальных формах в горизонтальном положении. Забетонированные образцы покрывались слоем влажных опилок и находились в таких условиях вплоть до момента распалубки. Сразу же после распалубки в трехсуточном возрасте призмы гидроизолировались парафином, техническим вазелином и несколькими слоями полиэтиленовой пленки*.

Для исключения погрешностей измерений, связанных с влиянием колебаний температуры окружающей среды на показания приборов, служили четыре аналогично гидроизолированных незагруженных образца-близнеца (две призмы сечением 10×10 см и две — сечением 7×7 см), которые являлись температурными эталонами. Показания приборов, установленных на этих эталонах, при обработке данных опытов вычитались из показаний приборов на рабочих образцах, что позволило выделить чистые деформации призм, вызванные только действием приложенных к ним нагрузок.

Для измерения деформаций образцов по их четырем боковым граням с помощью специальных рамок крепились стационарные индикаторы часового типа. При испытаниях на сжатие база измерения деформаций была равна 500 мм, что обеспечило измерение относительных продольных деформаций призм с большой степенью точности, равной $0,4 \cdot 10^{-5}$. Для случая испытаний на растяжение и действие знакопеременной периодической нагрузки база измерений равнялась 750 мм, а точность измерения относительных деформаций была при этом еще выше и составляла $0,3 \cdot 10^{-5}$.

Опыты проводились в специальной камере при практически стабильных температурно-влажностных условиях с температурой и влажностью воздуха соответственно равными $18^\circ \pm 1,5^\circ$ и $60\% \pm 5\%$.

Возраст призм к началу загрузки режимных образцов и первых образцов из числа подвергаемых испытаниям при постоянных напряжениях сжатия и растяжения был равен 4 суткам.

Режимные образцы загружались в соответствии с заданными графиками напряжений. При переходе от сжатия к растяжению производилась перестановка этих образцов в установки, специально оснащенные приспособлениями для их растяжения. Загрузка образцов длительной постоянной нагрузкой производилось ступенями; между ступенями приращений напряжений делались четырехминутные выдержки. Деформации, натекающие за время выдержек при постоянной нагрузке, относились в последующем к деформациям ползучести.

Кроме основных рабочих призм, для оценки физико-механических свойств бетона на всем интервале исследования, из того же самого бетона было изготовлено и испытано большое количество контрольных образцов-близнецов. Призменная прочность бетона в раз-

* Испытания на гидроизолированных образцах производились с целью исключения погрешностей в определении деформаций ползучести, связанных с неоднородностью усадки и ползучести.

личных возрастах определялась испытанием призм с размерами $7 \times 7 \times 60$ см и $10 \times 10 \times 100$ см. Прочность бетона на осевое растяжение определялась на бетонных восьмерках сечением 10×10 см и 5×5 см с вытянутой призматической частью. Все призмы, восьмерки и кубы хранились гидроизолированными вплоть до их испытания.

Результаты испытаний контрольных образцов-близнецов, приведенные на фиг. 1, позволяют судить о хорошей степени однородности исследуемых бетонов. Призменная прочность бетона была близка к кубиковой и не было выявлено заметного влияния масштабного фактора на прочность кубов и призм.

В опытах было отмечено, что прочность при осевом растяжении восьмерок сечением 5×5 см примерно на 20% больше, чем у восьмерок сечением 10×10 см, т. е. в этом случае уже проявилось действие масштабного фактора.

Имеются различные предложения для аналитического выражения закона роста во времени модуля упругости обычного тяжелого бетона. При теоретической обработке результатов описываемых экспериментов было использовано наиболее удачное из них, предложенное Н. Х. Арутюняном [3]

$$E(\tau) = E_0(1 - \beta e^{-\alpha \tau}) \quad (1)$$

На фиг. 1 изображены осредненные кривые роста модуля упругости бетона $E(\tau)$, которым соответствуют следующие значения параметров, входящих в формулу (1): $E_0 = 3.2 \cdot 10^5$ кг/см²; $\beta = 0.542$; $\alpha = 0.129$ (сут)⁻¹ для I серии опытов и, соответственно, $E_0 = 3.05 \cdot 10^5$ кг/см²; $\beta = 0.575$; $\alpha = 0.09$ (сут)⁻¹ для II серии.

На фиг. 2 представлены экспериментальные кривые удельных относительных деформаций ползучести $C(t, \tau)$ I серии опытов, являющиеся средними между кривыми этих деформаций при сжатии $C_{сж}(t, \tau)$ и при растяжении $C_{раст}(t, \tau)$, которые в этой серии опытов практически мало отличались друг от друга. На фиг. 3 экспериментальные кривые $C(t, \tau)$, полученные во II серии опытов, приведены отдельно для случаев сжатия и растяжения, поскольку в этой серии они уже несколько отличались друг от друга. На фиг. 2 и 3 показано также сравнение экспериментальных кривых $C(t, \tau)$, полученных в опытах, с соответствующими теоретическими кривыми, рассчитанными по аналитическим выражениям:

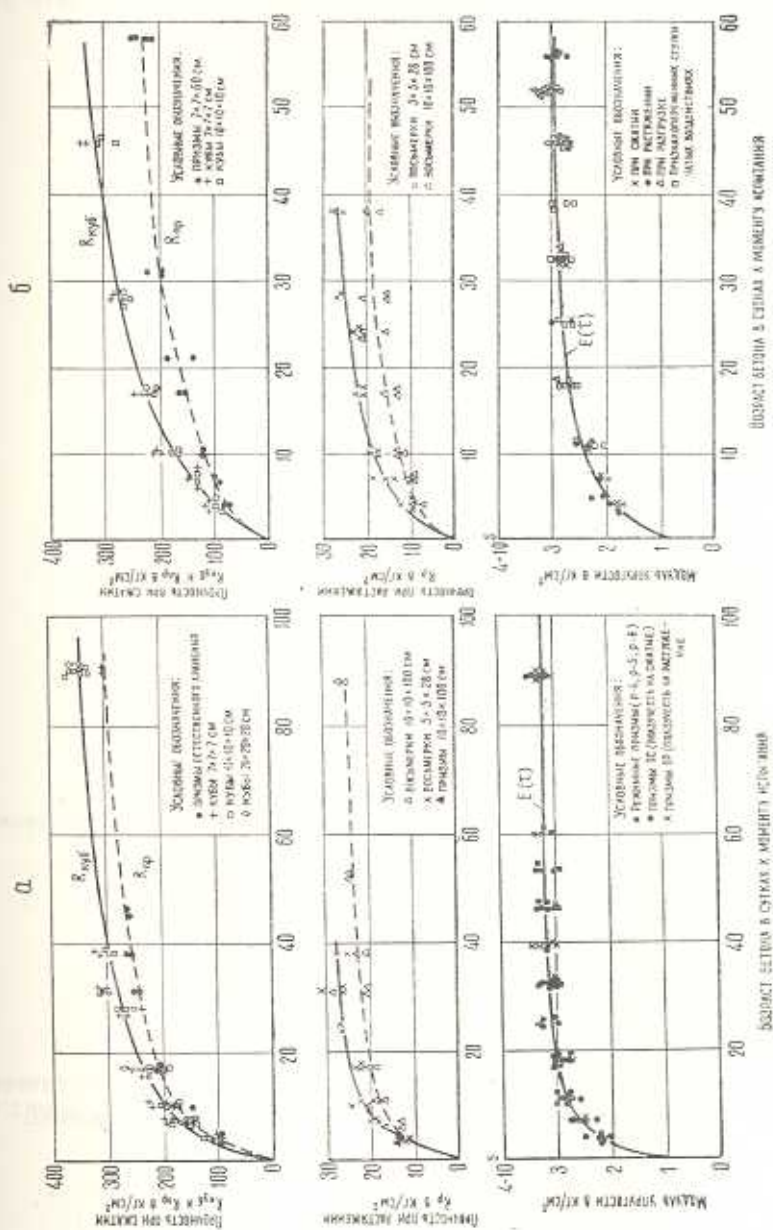
теории старения [7]

$$C(t, \tau, \tau_1) = C(t, \tau_1) - C(\tau, \tau_1) \quad (2)$$

и теории упруго-ползучего тела в форме, предложенной С. В. Александровским [1]

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) - \psi(t) \left(\frac{e^{t\tau} - A_2}{e^{t\tau} - A_1} \right) - \Delta(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)} \quad (3)$$

Для I серии опытов (фиг. 2) теоретические кривые $C(t, \tau, \tau_1)$ по теории старения рассчитывались на основе выражения (t — в сутках, $\tau_1 = 4$ сут)

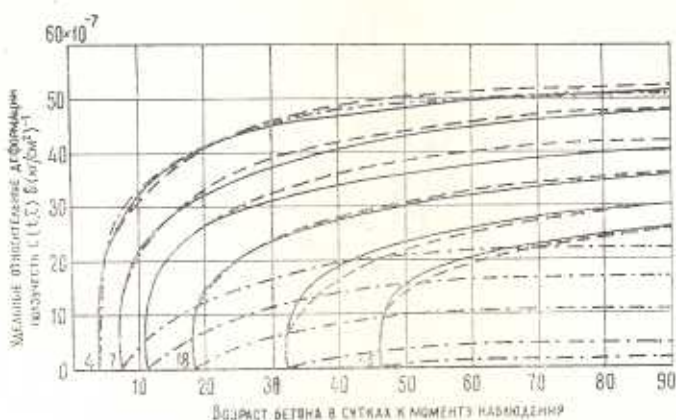


Фиг. 1. Результаты испытаний контрольных образцов-близнецов: а) I-я серия образцов; б) II-я серия образцов.

$$C(t, \tau_1) = \left[51 - 26 e^{-0.06(t-\tau_1)} - 25 e^{-1.3(t-\tau_1)} \right] \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1} \quad (4)$$

причем последующие теоретические кривые $C(t, \tau, \tau_1)$ строились на основе формулы (2), с учетом (4). По теории упруго-ползучего тела кривые $C(t, \tau)$ в форме (3) рассчитывались с параметрами

$$A_2 = 0.7; \quad \gamma = 0.02 (\text{сут})^{-1}; \quad \alpha = 5 (\text{сут})^{-1}$$



Фиг. 2. Сравнение экспериментальных кривых удельных относительных деформаций ползучести при сжатии и растяжении образцов I серии опытов с теоретическими кривыми, рассчитанными по теории упруго-ползучего тела и теории старения.

— экспериментальные кривые,
 - - - по теории упруго-ползучего тела,
 - · - · - по теории старения.

Функции же $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$ определялись по следующим выражениям:

$$\varphi(\tau) = (33.5 + 36.5 e^{-0.09\tau} - 6.72 e^{-0.1\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\Delta(\tau) = (11.25 + 10.44 e^{-0.125\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1}$$

(τ — в сутках).

Для II серии опытов (фиг. 3) по теории старения теоретические кривые $C(t, \tau)$ рассчитывались по аналогии с учетом выражений: для случая сжатия

$$C(t, \tau_1) = [78.2 - 28.2 e^{-0.08(t-\tau_1)} - 50 e^{-3(t-\tau_1)}] \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1} \quad (6)$$

для случая растяжения

$$C(t, \tau_1) = [70 - 34 e^{-0.09(t-\tau_1)} - 36 e^{-3(t-\tau_1)}] \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1} \quad (7)$$

(t — в сутках, $\tau_1 = 4 \text{ сут}$).

Теоретические же кривые $C(t, \tau)$ в форме (3) рассчитывались при следующих параметрах и функциях $\varphi(\tau)$, $\Delta(\tau)$:

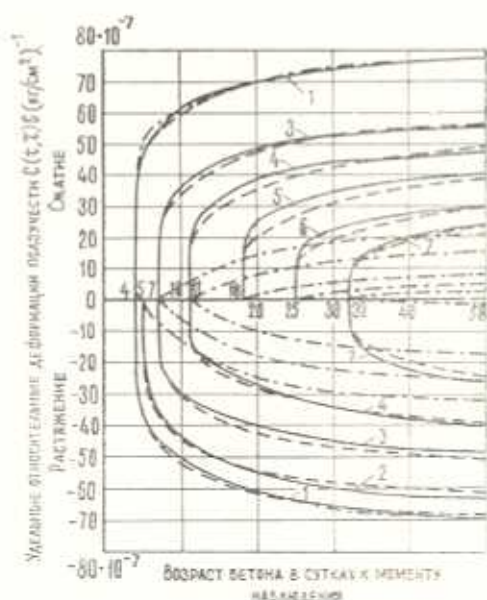
для случая сжатия

$$A_2 = 0.8; \quad \gamma = 0.025 \text{ (сут)}^{-1}; \quad \alpha = 5 \text{ (сут)}^{-1}$$

$$\varphi(\tau) = (30 + 42.2 e^{-0.07\tau} + 219 e^{-0.639\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1}$$

$$\Delta(\tau) = (7.5 + 22.7 e^{-0.054\tau} + 108.5 e^{-0.49\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1}$$

(8)



Фиг. 3. Сравнение экспериментальных кривых удельных относительных деформаций ползучести образцов II серии опытов с теоретическими кривыми, рассчитанными по теории упруго-ползучего тела и теории старения.

— экспериментальные кривые,
 - - - - по теории упруго-ползучего тела,
 по теории старения.

для случая растяжения

$$A_2 = 0.7; \quad \gamma = 0.03 \text{ (сут)}^{-1}; \quad \alpha = 5 \text{ (сут)}^{-1}$$

$$\varphi(\tau) = (37 + 87.83 e^{-0.23\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1}$$

$$\Delta(\tau) = (12 + 43 e^{-0.23\tau}) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\kappa \Gamma}{\text{см}^2} \right)^{-1}$$

(9)

(τ — в сутках).

Анализируя данные, приведенные на фиг. 2 и 3, можно сделать вывод, что кривые удельных деформаций ползучести $C(t, \tau)$, вычисленные по теории упруго-ползучего тела на основе выражения (3), хорошо согласуются с экспериментальными кривыми на всем диапазоне времени наблюдения t . Из этих же фигур видно, что по теории старения наблюдается значительное занижение деформаций ползучести призм, нагруженных в более поздние сроки. Этот недостаток теории старения, как известно, связан с принимаемой ею дополнительной гипотезой о полной необратимости деформаций ползучести (параллельности кривых $C(t, \tau)$). В дальнейшем это обстоятельство в полной мере проявилось при обработке на основе теории старения результатов наблюдения за деформациями образцов, подвергаемых длительным двухзначным ступенчатым и плавным периодически изменяющимся воздействиям.

Соответствующие экспериментальные данные о деформациях образцов, полученные при ступенчатых режимах знакопеременных напряжений, приведены на фиг. 4 и 5, соответственно, для I-й и II-й серий опытов.

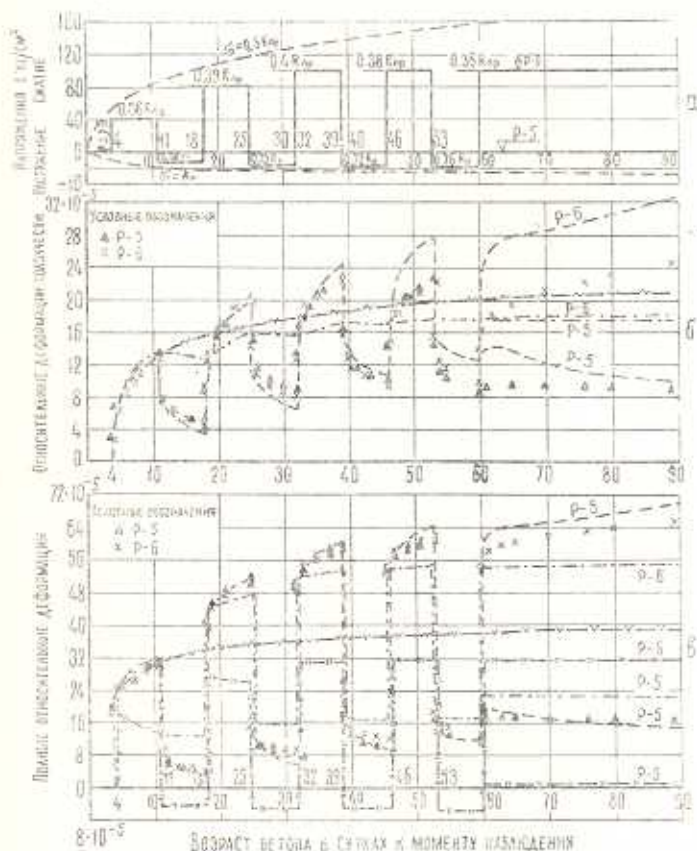
Следует отметить, что в обеих сериях абсолютный уровень напряжений при растяжении на каждом последующем цикле увеличивался согласно принятой методике; при сжатии он также возрастал, но до определенного уровня, равного $\sigma = 100 \text{ кг/см}^2$ для I-й и $\sigma = 62 \text{ кг/см}^2$ для II-й серии опытов.

Приведенные экспериментальные данные характеризуются достаточно хорошим соответствием у образцов-близнецов (расхождение в величинах деформаций образцов-близнецов не превышало 10%).

Рассматривая фиг. 4 и 5, можно видеть, что изменения деформаций образцов при длительном интервале наблюдения весьма четко соответствуют изменениям напряжений в них. Ввиду того, что опыты начинались в весьма молодом возрасте (начальное нагружение образцов производилось в возрасте бетона, равном 4 суткам) с приложения сжимающих напряжений, экспериментальные кривые деформаций на всем интервале исследования в обеих сериях располагаются в области деформаций, соответствующих начальному циклу сжатия. Это, вероятно, объясняется бурным развитием деформаций ползучести в молодом возрасте при первичном нагружении, а также „старением“ бетона и некоторым „отжатием“ необратимой части деформаций ползучести.

На графиках фиг. 4б и 5б нанесены соответствующие теоретические кривые, рассчитанные по принципу наложения воздействий, полученные алгебраическим сложением ординат кривых $\sigma(\tau_1) C(t, \tau_1)$, при τ_1 , соответствующих моментам перехода к напряжениям другого знака. В качестве необходимых для этого кривых мер ползучести брались соответствующие экспериментальные кривые $C(t, \tau_1)$. На этих же графиках нанесены также теоретические кривые, построенные по теории старения.

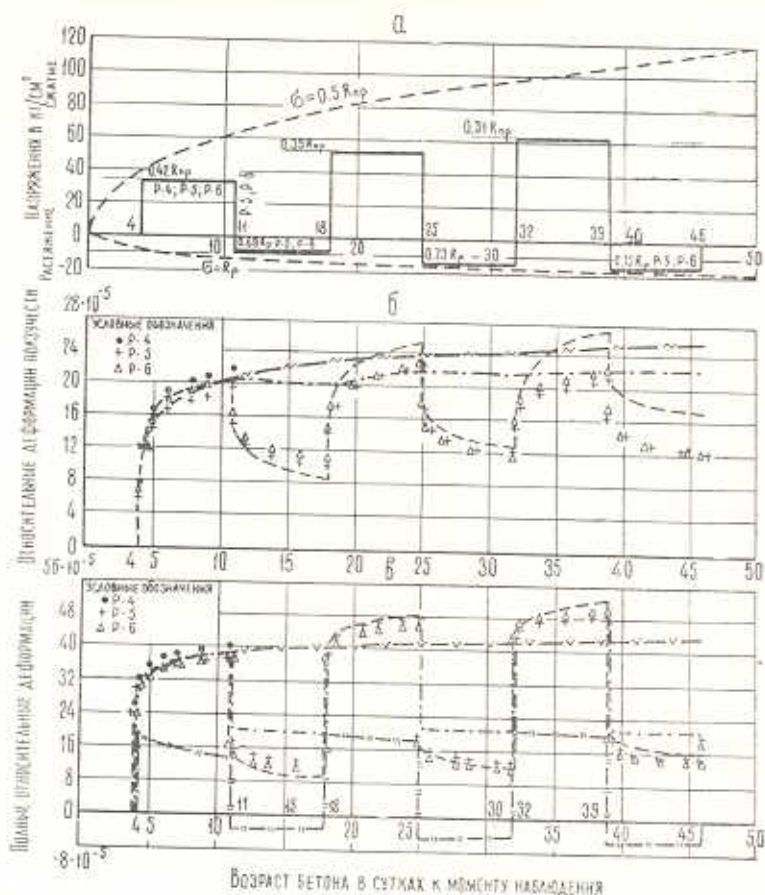
Из графиков фиг. 4б и 5б видно, что на первом цикле при действии сжимающей нагрузки экспериментальные кривые деформаций ползучести и теоретические кривые, построенные по принципу наложения воздействий, практически совпадают. На этом же цикле при действии растягивающих напряжений теоретические кривые в обеих сериях проходят ниже экспериментальных. Это свидетельствует о некотором „отжати“ части деформаций ползучести после первого же нагружения, так как при построении теоретической кривой деформаций использовались экспериментальные данные, относящиеся к „свежезагруженным“ образцам.



Фиг. 4. Результаты I серии опытов, полученные на режимных образцах, подвергнутых действию ступенчатых периодически изменяющихся воздействий, и сопоставление их с теоретическими данными: а) режим нагружения образцов, б) относительные деформации ползучести режимных образцов, в) полные и упругие относительные деформации режимных образцов. Условные обозначения:

- теоретические кривые по принципу наложения воздействий на основе опытных кривых,
- теоретические кривые по теории старения,
- кривые упругих деформаций,
- кривая деформаций ползучести,
- кривая полных деформаций.

Отжати деформаций ползучести особенно четко проявилось во II-й серии опытов. Из графика фиг. 5б видно, что экспериментальные кривые деформаций ползучести, несмотря на возрастание абсолютных величин напряжений по сравнению с их значением на первом цикле, располагаются ниже кривой $\sigma(t, 4)$, в то время как теоретические кривые, не учитывающие „отжати“ ползучести, проходят выше нее. Это же, но, правда, в меньшей степени проявилось и в I-й серии,



Фиг. 5. Результаты II серии опытов, полученные на режимных образцах, подвергнутых действию ступенчатых периодически изменяющихся знакопеременных воздействий, и сопоставление их с теоретическими данными.

- а) Режим нагружения образцов,
 б) относительные деформации ползучести режимных образцов,
 в) полные и упругие относительные деформации режимных образцов.

Примечание: Условные обозначения те же, что и на фиг. 4.

хотя в последующих циклах этой серии имело место значительное увеличение абсолютных величин напряжений и к тому же бетон имел более высокую марку. И в этом случае (см. фиг. 4-б) теоретическая кривая деформаций ползучести существенно превышает кривую

$\varepsilon(4)C(t, 4)$, в то время как экспериментальная превышает ее незначительно.

На графиках фиг. 4б и 5б также видно, что теоретическая кривая деформаций ползучести при ступенчатых знакопеременных напряжениях, построенная с использованием кривых $C(t, \tau)$, вычисленных по теории старения, уже начиная со второй половины первого цикла, качественно и количественно неправильно отражает процесс изменения деформаций ползучести. Это объясняется тем, что теория старения неправильно постулирует полную необратимость деформаций ползучести.

На графиках фиг. 4в и 5в, представлены экспериментальные и теоретические кривые полных относительных деформаций образцов. Все отмеченные выше особенности поведения бетона, конечно, проявляют себя и в этом случае; однако здесь эти особенности несколько сглаживаются вследствие наличия больших упругих деформаций образцов. Это приводит в целом к достаточно хорошему соответствию между экспериментальными и теоретическими кривыми полных деформаций, полученными на основе экспериментальных кривых $C(t, \tau)$ по принципу наложения воздействий. Для теоретических же кривых полных деформаций, полученных с использованием кривых мер ползучести, вычисленных по теории старения, попрежнему наблюдается значительно худшее соответствие с экспериментальными кривыми.

Расхождения между величинами ординат экспериментальных кривых полных деформаций режимных образцов и их теоретическими значениями, найденными по принципу наложения воздействий, приведены в табл. 1. В каждой из клеток этой таблицы содержатся три цифры: цифра в числителе означает теоретическую величину полной относительной деформации, увеличенную в 10^5 раз, цифра в знаменателе — экспериментальное значение этой деформации, также увеличенное в 10^5 раз, а в скобках указано их отношение.

Полученные в описываемых опытах экспериментальные данные по исследованию связи между напряжениями и деформациями бетона при плавных периодически изменяющихся знакопеременных напряжениях приведены на фиг. 6 и 7.

Изменение напряжений в образцах в I серии опытов (фиг. 6а) описывается синусоидальным законом

$$\sigma(t) = A_i \sin \frac{2\pi}{T} (t - \tau_i) \quad (t > \tau_i) \quad (10)$$

Здесь A_i — различная для каждого полупериода i амплитуда цикла, T — период цикла, в опытах равный 14 суткам, а τ_i — моменты времени, соответствующие началу каждого из последовательных полупериодов.

В конце опыта, в возрасте бетона, равном 60 суткам, два режимных образца этой серии были загружены ступенчато-сжимающей

нагрузкой до уровня напряжений $\sigma = 100 \text{ кг/см}^2 = 0.36 R_{\text{пр}}$, а один образец находился в разгруженном состоянии.

Таблица I
Сопоставление экспериментальных и теоретических значений полных деформаций бетона, вычисленных по принципу наложения воздействий

Возраст бетона в сутках к моменту наблюдения	По теории упруго-ползучего тела		По теории старения	
	I серия	II серия	I серия	II серия
7.5	$\frac{28}{27.6}$ (1.01)	$\frac{37.2}{36.4}$ (1.02)	$\frac{29.6}{27.6}$ (1.07)	$\frac{37.2}{36.4}$ (1.02)
14.5	$\frac{4.0}{5.0}$ (0.8)	$\frac{10}{12.5}$ (0.8)	$\frac{12.4}{5.0}$ (2.48)	$\frac{20.4}{12.5}$ (1.63)
21.5	$\frac{48.4}{48}$ (1.01)	$\frac{47}{45.2}$ (1.04)	$\frac{45.6}{48}$ (0.95)	$\frac{44}{45.2}$ (0.97)
28.5	$\frac{7.3}{9.1}$ (0.90)	$\frac{13.4}{13.4}$ (1.00)	$\frac{15.2}{9.1}$ (1.67)	$\frac{21.2}{13.4}$ (1.53)
35.5	$\frac{57.4}{57.0}$ (1.01)	$\frac{53}{48.6}$ (1.09)	$\frac{52.8}{57}$ (0.93)	$\frac{43}{43.6}$ (0.99)
42.5	$\frac{11.2}{12.2}$ (0.92)	$\frac{17.2}{15.4}$ (1.12)	$\frac{16.6}{12.2}$ (1.36)	$\frac{22.0}{15.4}$ (1.43)
49.5	$\frac{62}{59.6}$ (1.04)	—	$\frac{54.4}{59.6}$ (0.91)	—
56.5	$\frac{12}{13.1}$ (0.92)	—	$\frac{16.8}{13.1}$ (1.28)	—
90	$\frac{70.2}{65.8}$ (1.07)	—	$\frac{55.2}{65.8}$ (0.84)	—
Абсолютная величина максимального отклонения в %	20	20	148	63.2
Среднее квадратическое отклонение в %	10.72	10.3	56.72	39.21

По ряду соображений, о которых будет сказано ниже, во II серии опытов изменение напряжений в образцах (фиг. 7а) в течение полупериода первого цикла сжатия производилось по закону, который описывался суммой двух простых экспонент, причем:

при

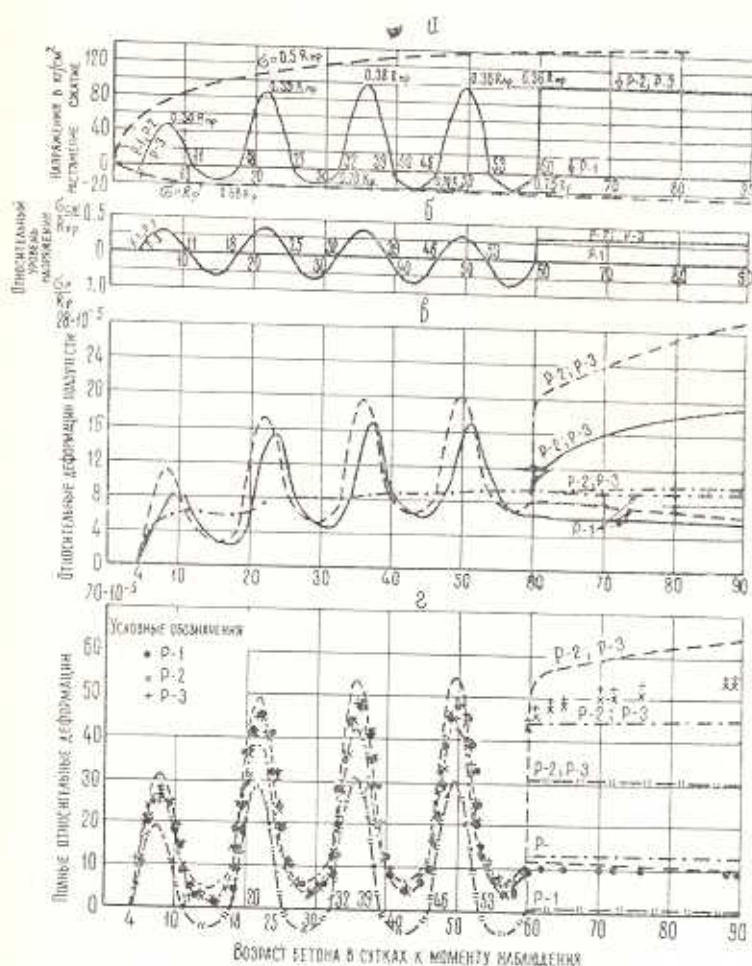
$$4 \leq t \leq 7.5 \quad \sigma(t) = 40.92 [1 - e^{-1.86(t-4)}] \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad (11)$$

$$7.5 \leq t \leq 11 \quad \sigma(t) = 40.92 [1 - e^{-1.86(11-t)}] \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$$

(t — в сутках).

В последующем же напряжения в образцах изменялись по синусоидальному закону в соответствии с выражением (10). Таким обра-

зом, в этой серии на первом полупериоде наблюдалось резкое повышение относительного уровня напряжений, в последующем же эти изменения имели уже более спокойный периодический характер.



Фиг. 6. Результаты I серии опытов, полученные на режимных образцах, подвергнутых действию планых периодически меняющихся знакопеременных напряжений, и сопоставление их с теоретическими данными: а, б) — режимы загрузки образцов, в) — относительные деформации ползучести режимных образцов, г) — полные и упругие относительные деформации режимных образцов.

Условные обозначения:

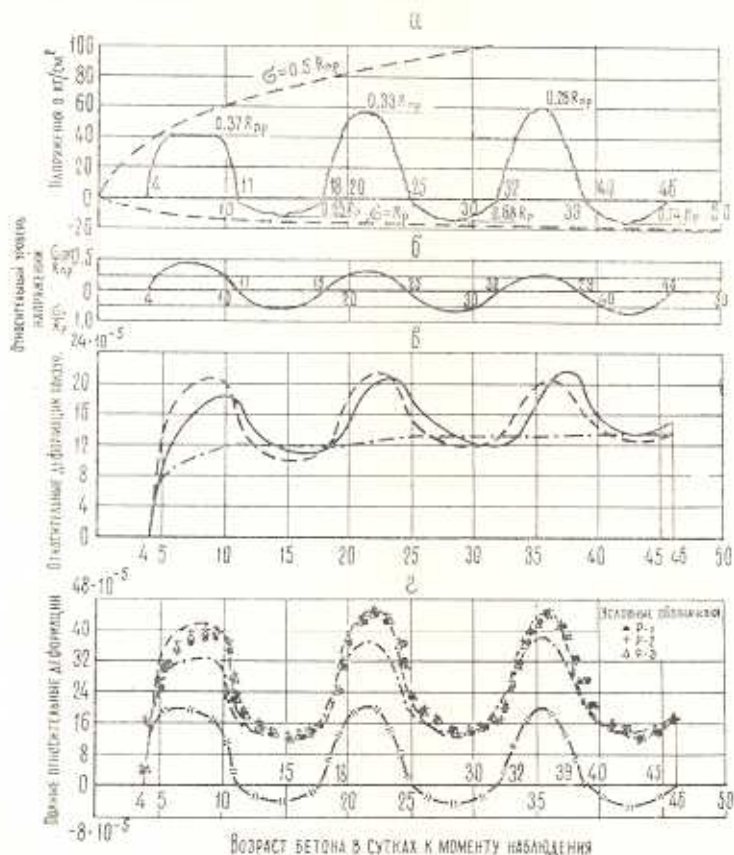
- Экспериментальная кривая относительных деформаций ползучести,
- теоретические кривые по теории упруго-ползучего тела,
- теоретические кривые по теории старения,
- “—” — кривая упругих деформаций.

В каждой серии опытов режимным испытаниям подвергались три образца-близнеца, относительные деформации ползучести которых изображены на графиках фиг. 6в и 7в сплошной линией. Величины этих деформаций получались вычитанием из текущих экспериментальных

значений полных деформаций образцов их упругих деформаций, подсчитанных по формуле

$$\bar{\varepsilon}_{\text{уп}}(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau \quad (12)$$

где $\sigma(t)$ и $E(t)$ — соответственно напряжения в образце и модуль упругости бетона в момент наблюдения t , а $\sigma(\tau)$ и $E(\tau)$ — их текущие значения на исследуемом интервале опыта.



Фиг. 7. Результаты II серии опытов, полученные на режимных образцах, подвергнутых действию плавных периодически меняющихся знакопеременных напряжений, и сопоставление их с теоретическими данными: а, б) — режимы загрузки образцов, в) — относительные деформации ползучести режимных образцов, г) — полные и упругие относительные деформации режимных образцов.

Примечание: Условные обозначения те же, что и на фиг. 6.

Уравнение (12) после интегрирования по частям и с учетом того, что в начале наблюдения, т. е. при $t = \tau_1$, $\sigma(\tau_1) = 0$, принимает вид

$$\bar{\varepsilon}_{\text{уп}}(t) = \int_{\tau_1}^t \sigma'(\tau) \frac{1}{E(\tau)} d\tau \quad (13)$$

Входящие в это выражение величины $\sigma'(\tau)$ для соответствующих участков интегрирования вычислялись на основе формул (10) и (11), а модуль упругости $E(\tau)$ — по формуле (1) при соответствующих значениях входящих в нее параметров.

На графиках фиг. 6г и 7г представлены экспериментальные кривые полных деформаций режимных образцов. Наблюдается хорошее согласование опытных данных, найденных по 3 образцам, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. На этих же графиках нанесены кривые упругих деформаций $\frac{\varepsilon(t)}{E(t)}$, которые по своему характеру соответствуют изменениям напряжений в образцах на всем интервале наблюдения.

Кривые полных деформаций в общем также хорошо соответствуют закону изменения напряжений в образцах. Однако, наблюдается некоторое смещение по фазе кривых полных относительно деформаций относительно кривых изменений напряжений, т. е. экстремальные точки этих кривых не совпадают по времени. Это объясняется тем, что деформации ползучести бетона, которые входят в полные деформации, обладают свойством „наследственности“, т. е. история нагружения и длительность его действия оказывают влияние на деформацию ползучести в данный момент времени наблюдения.

Сказанное особенно ясно видно на графиках фиг. 6в и 7в, где экспериментальные точки кривых деформаций ползучести смещены относительно экстремумов кривых напряжений еще в большей степени, чем на графиках полных деформаций.

Следует отметить, что в обеих сериях опытов кривые деформаций ползучести и полных деформаций находятся целиком в области их положительных значений, соответствующих начальному циклу сжатия, хотя к образцам прикладывались знакопеременные напряжения. Это объясняется тем, что первый цикл начинался с приложения сжимающей нагрузки в бетоне очень молодого возраста, а также наличием „старения“ бетона и „отжатия“ некоторой необратимой части деформаций ползучести, которое проявилось в заметном смещении экспериментальных кривых деформаций ползучести вдоль оси ординат.

На графике фиг. 6в, кроме экспериментальной кривой ползучести, показаны также соответствующие теоретические кривые, рассчитанные на основе теории упруго-ползучего тела и теории старения.

Вычисление ординат кривой деформаций ползучести по теории упруго-ползучего тела производилось с использованием выражения (3) методом численного интегрирования по участкам на основе выражения

$$\bar{\varepsilon}_{полз}(t) = - \int_{\tau_1}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \quad (14)$$

Входящие сюда напряжения $\sigma(\tau)$ определялись по формуле (10) при соответствующих значениях параметров для данного участка интегрирования, функции же $\varphi(\tau)$, $\Delta(\tau)$ и параметры A_2 , γ , α имели значения, указанные выше.

Аналогичным образом на основе выражения (14) вычислялись ординаты кривых деформаций ползучести и по теории старения, но с учетом формул (2) и (4).

Из графика фиг. 6в видно, что теоретическая кривая деформаций ползучести, полученная на основе теории упруго-ползучего тела, качественно правильно отражает процесс деформирования и хорошо согласуется с графиком изменения напряжений в режимных образцах. Для этой кривой отмечается небольшой сдвиг по фазе по сравнению с кривой изменения напряжений. Однако этот сдвиг уже меньше, чем у кривой экспериментальных деформаций ползучести.

Сравнивая экспериментальную кривую деформаций ползучести с кривой, полученной на основе теории упруго-ползучего тела с использованием выражения (3), видим, что вторая кривая на полупериодах, когда действовали сжимающие напряжения, проходит выше первой, причем достигнутое на первом полупериоде расхождение в ординатах сравниваемых кривых фактически сохраняется и в дальнейшем, лишь несколько увеличиваясь к концу периодических изменений напряжений.

Следует отметить, что при построении теоретических кривых деформаций ползучести в расчет вводились аналитические выражения $C(t, \tau)$, полученные обработкой семейства кривых мер ползучести, средних между экспериментальными кривыми, полученными при действии постоянных сжимающих и постоянных растягивающих напряжений. Ввиду того, что при действии напряжений $\sigma = 0.4 R_{пр}$ уже может проявляться некоторая нелинейность деформаций ползучести [2], можно думать, что начальное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми деформаций ползучести на первом полупериоде объясняется именно этим обстоятельством. Кроме того, следует учесть, что ординаты введенных в расчет кривых $C_{эк}(t, \tau)$ несколько больше ординат кривых $C_{расч}(t, \tau)$, так как в данной серии опытов имело место условие $C_{расч}(t, \tau) > C_{эк}(t, \tau)$. Увеличение же расхождения между теоретической и экспериментальной кривыми деформаций ползучести в процессе опыта, вероятно, связано с отжатием некоторой необратимой части деформаций ползучести, что наиболее четко видно на последнем этапе опыта, т. е. при $t > 60$ суток.

Из графика фиг. 6в видно, что теоретическая кривая деформаций ползучести, рассчитанная на основе теории старения, на первом полупериоде располагается ниже экспериментальной кривой, а в последующем, несмотря на периодические изменения напряжений, практически

не изменяется, что связано с принятой в этой теории гипотезой о полной необратимости деформаций ползучести бетона.

Ввиду того, что в I серии опытов на первом полупериоде при действии сжимающих напряжений наблюдалось осязательное расхождение между кривой деформаций ползучести, найденной на основе теории упруго-ползучего тела и экспериментальной кривой, во II серии опытов на первом полупериоде напряжения прикладывались не по синусоидальному закону, а по экспоненциальному, более близкому к ступенчатому нагружению.

Предполагалось, что если указанное расхождение связано с нелинейностью деформаций ползучести, то при переходе к такому режиму загрузки образцов оно будет меньшим вообще и особенно на начальном полуцикле.

Действительно, это и наблюдалось во II серии опытов (фиг. 7). Как следует из графика фиг. 7в, расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми ползучести режимных образцов было уже значительно меньшим, чем в I серии. Все же остальные особенности кривой деформаций ползучести, рассчитанной на основе теории упруго-ползучего тела и выражения (3), аналогичны описанным выше для I серии опытов.

В табл. 2 приведено сравнение теоретических (цифры в числителе), вычисленных по теории упруго-ползучего тела с использованием выражения (3), и экспериментальных (цифры в знаменателе) значений полных относительных деформаций бетона, а также указано (в скобках) их отношение.

Из графика 7в видно, что кривая деформаций ползучести, найденная на основе теории старения, и в этой серии опытов на всем интервале наблюдения неправильно отражает процесс изменения деформаций ползучести, особенно на первом полупериоде, когда действовали бурно возрастающие сжимающие напряжения, что согласуется с данными, приведенными в работе [2].

На основе всего изложенного выше можно сделать вывод, что при ступенчатых и плавных периодически изменяющихся знакопеременных напряжениях процесс деформирования бетона практически вполне хорошо качественно и количественно описывается на основе теории упруго-ползучего тела с использованием для меры ползучести выражения (3).

В этом случае теоретические кривые деформаций бетона достаточно удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными. При этом, как следует из табл. 2, наибольшее из наблюдаемых в опытах расхождение между теоретическими и экспериментальными кривыми полных деформаций режимных образцов не превышало 18%, а средне-квадратичное отклонение—11%.

Таблица 2

Возраст бетона в сутках к моменту наблюдения	I серия	II серия
7.5	$\frac{31.2}{26.4}$ (1.18)	$\frac{41.4}{37.3}$ (1.09)
14.5	$\frac{2.0}{2.0}$ (1.0)	$\frac{11.6}{12.6}$ (0.92)
21.5	$\frac{49}{44.4}$ (1.10)	$\frac{45.2}{43.8}$ (1.03)
28.5	$\frac{4.0}{4.0}$ (1.0)	$\frac{12.6}{13.8}$ (0.91)
35.5	$\frac{53.6}{48}$ (1.12)	$\frac{44.8}{43.6}$ (1.03)
42.5	$\frac{4.8}{5.2}$ (0.92)	$\frac{12.6}{13.6}$ (0.93)
49.5	$\frac{54.4}{48}$ (1.13)	—
56.5	$\frac{4.4}{4.8}$ (0.92)	—
90	$\frac{63.6}{54.4}$ (1.17)	—
Максимальное отклонение в %	18	9.5
Средне-квадратичное отклонение в %	11.3	7.1

Примечание: Абсолютные значения деформаций, приведенные в таблице, увеличены в 10^5 раз.

Теория же старения качественно и количественно неправильно отражает процесс деформирования бетона при периодически изменяющихся знакопеременных напряжениях.

Научно-исследовательский институт
бетона и железобетона
Госстроя СССР

Поступила 10 IV 1967

Ս. Վ. ԱԼԵՔՍԱՆԴՐՈՎՍԿԻ, Վ. Յ. ԲԱԳՐԻ

ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԸ ՆՇԱՆԱՓՈԽ, ՊԱՐԲԵՐԱԿԱՆ ՆԵՐՉՈՐՄՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա մ փ ո փ ո ի մ

Բետոնն և ճեղքաթրեոնն կոնստրուկցիաները շահագործման պրոցեսում
ճանախ ենթարկվում են նշանափոխ, պարբերական ներգործությունների,
որինակ՝ բեռների կամ օդի ջերմաստիճանի ու խոնավությունից պարբերական
փոփոխությունների հետևանքով:

Բետոնի զեֆորմացիաների փորձնական ուսումնասիրությունը՝ միաշափ-
խնդրի պայմանների առկայության դեպքում և զծային սողքի սահմաննե-
րում, պարբերաբար փոփոխվող երկնշան լարումների երկարատև ազդեցու-
թյան դեպքում, երբ պարբերությունը հավասար է 14 օրվա, ի հայտ է բերել
մի շարք հետաքրքիր օրինաչափություններ:

Բետոնափորման առաջին ցիկլում կատարվում է սողքի զեֆորմացիա-
ների մի մասի «արտասեղմում», որը հետագայում դառնում է անհակադար-
ձելի: Այդ պատճառով՝ սեղման սկզբնական ցիկլից հետո, նմուշների զե-
ֆորմացիաների կորերը փորձի ամբողջ ընթացքում շարունակում են մնալ
սեղման զեֆորմացիաների տիրույթում, չնայած նմուշների վրա հետագա-
յում կիրառվում են նշանափոխ լարումներ:

Սողքի զեֆորմացիաները օժտված են «ժառանգականություն» հատ-
կությունով, որի դեպքում բետոնափորման պատմությունը և ներգործության
երկարատևությունը ազդում են զեֆորմացիայի վրա դիտման ավելի ակն-
թարթում: Այդ պատճառով պարբերաբար փոփոխվող բետոներով ներգործվող
նմուշների լրիվ զեֆորմացիաների կորերը ունեն որոշակի շեղում՝ ըստ
փուլի, լարումների փոփոխությունների կորերի նկատմամբ:

S. V. ALEKSANDROVSKY, V. Y. BAGRY

THE CREEP OF CONCRETE ON ALTERNATING PERIODICAL INFLUENCES

S u m m a r y

Reinforced concrete constructions are often subjected, when in service, to alternating periodic influences, for example due to periodic changes in load or temperature and humidity of air. Therefore, it is important to study concrete behaviour under such conditions.

Experimental investigations of concrete strains under the long time effect of periodically changing two-digit stresses with the period equal to 14 days under the conditions of one-dimensional task and in the field of linear creep are given in this paper. These investigations have shown some interesting regularities.

There is some „compression“ of the part of creep strain in the first stage of loading, which is non-reversible afterwards.

In connection with this the curves of specimen strains during all the time of the experiment after the initial cycle of compression continued to be in the field of compression strains, although the specimens were subjected later on to applied alternating stresses.

The creep strains have the properties of „heredity“ under which the history of loading and duration of its action influenced the strain at this moment of observation.

Owing to this, the curves of total strains of specimens subjected to periodically changing stresses have some displacement on the phase concerning the curves of stresses alteration.

Under stepped and smooth, periodically changing stresses, the process of concrete deformation is practically quite well described on the basis of the theory of „elastic-creep body“ with utilization of the principle of superposition and specified analytic expression for measure of concrete creep proposed by S. V. Alexandrovsky

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) - \psi(t) \left(\frac{e^{\gamma\tau} - A_2}{e^{\gamma t} - A_2} \right) - \Delta(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)}$$

in which

α, γ, A_2 — parameters selected from the experiment where $\psi(t)$ and $\Delta(\tau)$ monotonously diminishing functions, fixed upon the experiment results, similar to the function of ageing applying in this theory, where

$$\psi(\tau) + \Delta(\tau) = \varphi(\tau)$$

In this case the theoretical curves of concrete strains in conformity with the experimental data are well enough.

A mean-square deviation of the theoretical curves of strains from the experimental data in the described tests does not exceed 11%.⁰

The process of concrete deformation under the periodically alternating effects is incorrectly described by the theory of ageing quantitatively and qualitatively and for this reason this theory should not be applied.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройиздат, 1966.
2. Александровский С. В., Багрий Э. Я., Полкова О. М. Некоторые экспериментально-теоретические вопросы феноменологической теории ползучести бетона, важные для ее дальнейшего развития. VI конференция по бетону и железобетону. Материалы секций конференции, подготовленные НИИЖБ Госстроя СССР, вып. I, Стройиздат, 1966.
3. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести бетона. Гостехтеориздат, 1952.
4. Блинков В. В. Исследование ползучести бетона при повторных длительных действующих нагрузках. Известия ВНИИГ, т. 60, 1958.
5. Висильев П. И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. Известия ВНИИГ, т. 49, 1953.
6. Катин Н. И. Исследование ползучести бетона при высоких напряжениях. Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций. Труды НИИЖБ, вып. 4. Стройиздат, 1959.
7. Улицкий И. И., Чжан Чжун-Яо, Гольмшев А. Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. Стройиздат УССР, 1960.
8. Illston I. M. The Creep of Concrete under Uniaxial Tension. Magazine of Concrete Research, vol. 17, No 51, 1965.