

С. В. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ, П. Ф. УРЕНЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-ОБЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Надежность оценки напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных конструкций зависит от точности оценки влияния на него ползучести и усадки бетона.

С привлечением нелинейной теории ползучести бетона авторами было проведено экспериментально-теоретическое изучение напряженно-деформированного состояния центрально-обжатых элементов из высокопрочного бетона с учетом его ползучести и усадки.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из бетона М 800^{*}. Все образцы изготовляли в стальных формах одновременно, из одного замеса и хранили в одинаковых температурно-влажностных условиях при температуре, близкой к комнатной, с отклонениями от нее в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Бетон приготавливали на портландцементе Новоздолбуновского завода активностью 60.6 МПа. В качестве крупного заполнителя применяли гранитный щебень фракций 5—15 мм, плотностью 2640 кг/м³. Мелкий заполнитель — Москворецкий песок с модулем крупности 1.91 и плотностью 2650 кг/м³. Состав бетона по массе — 1:0.72:1.67; В/Ц — 0.304.

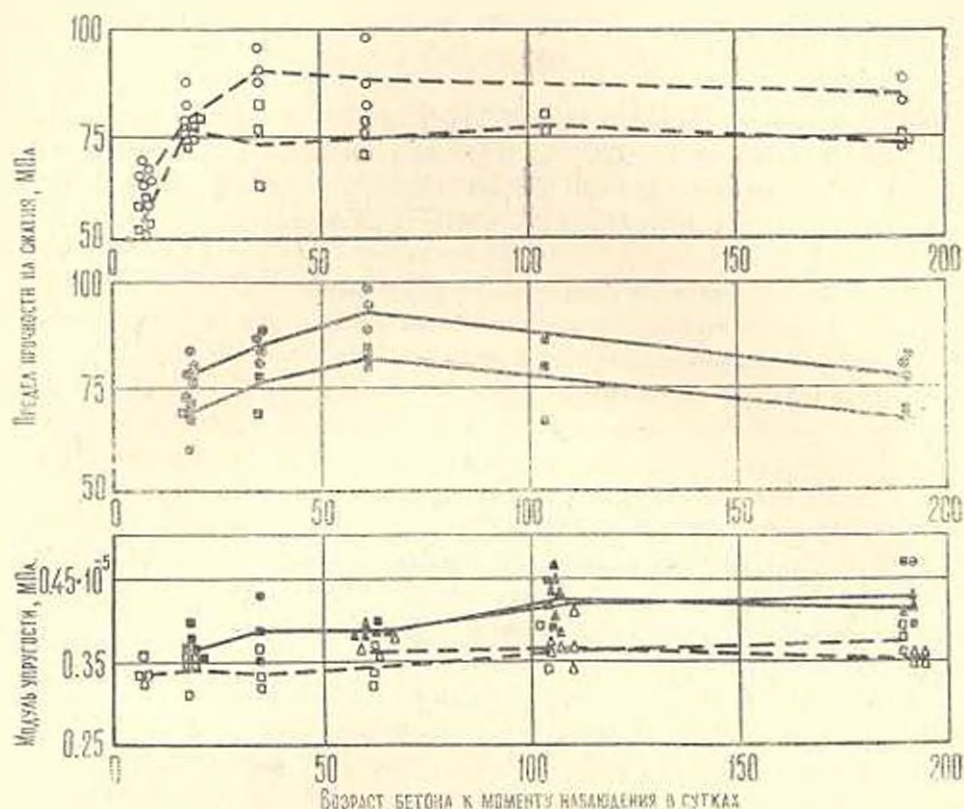
Опыты проводили как на свободно высыхающих, так и на полностью гидроизолированных образцах. Гидроизоляцию применяли для исключения влажностных деформаций бетона, а также для моделирования условий в массивных конструкциях. Изоляция состояла из трех слоев парафина и двух слоев полиэтиленовой пленки со смазкой техническим вазелином между ними.

Характеристики физико-механических свойств бетона определяли при кратковременных испытаниях кубов и призм в различных возрастах бетона (фиг. 1).

Ползучесть исследуемого бетона изучали в соответствии с требованиями методических рекомендаций [1] на призмах с размерами 7×7×60 см, которые загружали длительной постоянной нагрузкой в рычажных установках при напряжениях в долях от призмочной прочности бетона, составивших 0.25 и 0.42. Деформации бетона измеряли индикаторами часового типа с точностью $2 \cdot 10^{-3}$. Центрирование образцов производили по геометрической оси через шары в луниках стальных оголовков. В тех редких

^{*} Экспериментальная часть работы выполнена совместно с канд. техн. наук Г. Н. Окуновым, за что авторы выражают ему свою благодарность.

случаях, когда деформации бетона на взаимно противоположных гранях отличались более, чем на 20%, образцы отбраковывались.



Фиг. 1. Изменение физико-механических свойств исследованного бетона во времени: $\triangle$ — призмы $7 \times 7 \times 60$ см; $\circ$ — кубы $10 \times 10 \times 10$ см; $\square$ — призмы $10 \times 10 \times 40$ см. Примечание: заливные значки и сплошные линии — изолированные образцы; незаливные значки и пунктирные линии — неизолированные образцы.

Деформации ползучести находили вычитанием из полных деформаций нагруженных образцов их упругих деформаций при нагружении и средних температурно-усадочных деформаций, определяемых в предположении аддитивности усадки и ползучести на незагруженных образцах — эталонах: трех изолированных и трех неизолированных.

По результатам длительных испытаний образцов при двух уровнях напряжений были построены экспериментальные кривые относительных деформаций ползучести (фиг. 2а), по которым затем определяли кривые мер линейных $S(t - \tau_1)$ и нелинейных $S_n(t - \tau_1)$ деформаций ползучести [2] (фиг. 2б, в). Экспериментальные кривые мер ползучести аппроксимировались в форме:

$$\begin{aligned} S(t - \tau_1) &= \Delta\Phi[1 - e^{-\gamma_1(t - \tau_1)}] + \Delta S[1 - e^{-\gamma_2(t - \tau_1)}] \\ S_n(t - \tau_1) &= \Delta\Phi_n[1 - e^{-\gamma_{1n}(t - \tau_1)}] + \Delta S_n[1 - e^{-\gamma_{2n}(t - \tau_1)}] \end{aligned} \quad (1.1)$$

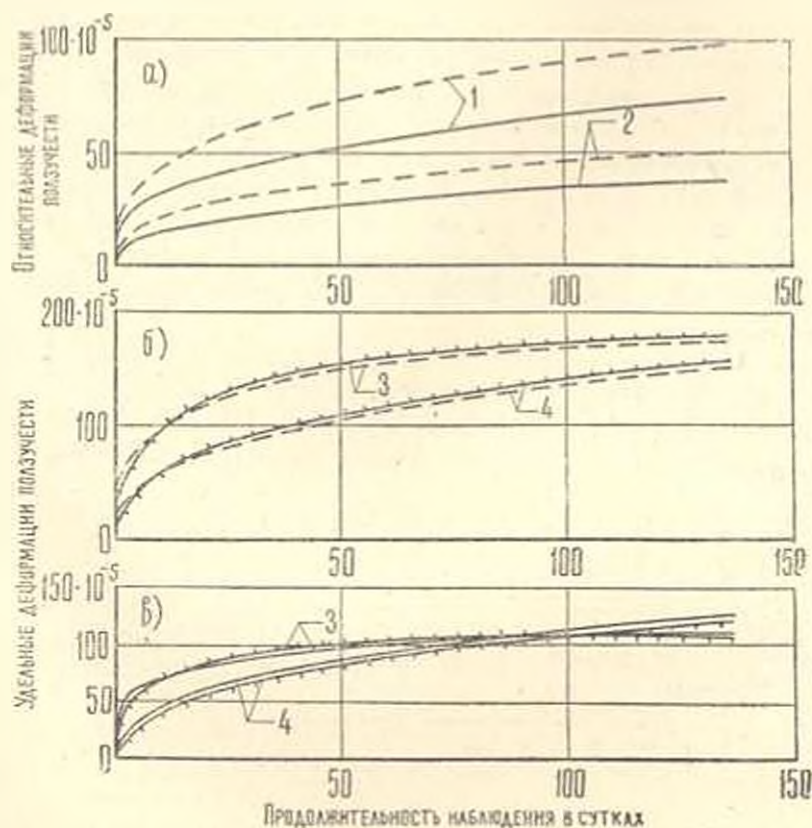
при значениях параметров, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Значение параметров, входящих в формулу 1

Вид бетона	Предельные значения составляющих мер ползучести 10^5				Параметры γ и γ_n в $(сут)^{-1}$			
	$\Delta \Phi$	ΔS	$\Delta \Phi_n$	ΔS_n	γ_1	γ_2	γ_{1n}	γ_{2n}
Без изоляции	165	50	90	90	0.0075	0.4	0.022	0.25
С изоляцией	120	37	80	70	0.01	0.266	0.007	0.63

Аппроксимирующие кривые мер ползучести были близки к опытным и имели среднеквадратическое отклонение ординат до 5%, фиг. 26.



Фиг. 2. Относительные (а) и удельные деформации ползучести по отношению к постоянному уровню напряжений $\gamma = \frac{\sigma}{R_{np}} = \text{const}$: неизолированный (б) и изолированный (в) образцов: б — нелинейные $S_n(t - \tau_1)$ и а — линейные $S(t - \tau_1)$.

Экспериментальные кривые: — неизолированный бетон; — изолированный бетон; ···· соответствующие аппроксимирующие кривые.

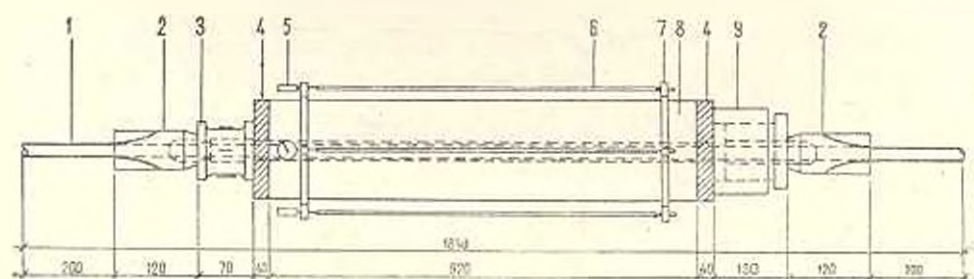
Ползучесть арматуры не исследовалась. Ее влияние на потери напряжений устраняли путем предварительной вытяжки арматуры до напряжений, равных 0.9 от нормативного предела прочности. После вытяжки арма-

тура имела модуль упругости $E_a = 0.192 \cdot 10^4$ МПа. Вытяжка арматуры повысила ее предел упругости на 54% и поэтому во всех преднапряженных образцах арматура работала только в упругой стадии.

Исследование напряженно-деформированного состояния центрально-обжатых элементов из высокопрочного бетона проводили на образцах с размерами $10 \times 10 \times 100$ см, изолированных и не изолированных от высыхания. Образцы представляли собой бетонные призмы со стальными оголовками толщиной 4 см. Предварительно напряженная арматура из стали класса А-У $\varnothing 28$ мм располагалась без сцепления с бетоном в канале $= \varnothing 34$ мм, по оси призмы. Натяжение арматуры проводилось методом «на упоры» на горизонтальной машине Амслер-500.

Величины потерь усилий в предварительно напряженной арматуре от ползучести и усадки бетона были малы по сравнению с усилиями в ней ($\approx 10\%$), поэтому требовалась большая точность их измерения. Для этого вели одновременный четырехкратный контроль за усилиями в арматуре: по шкале горизонтальной машины, с помощью электротензодатчиков, наклеенных на арматуре; тарированному электротензометрическому динамометру и по деформациям бетона в момент его обжатия, измеряемым с помощью индикаторов часового типа. Электротензометрический динамометр представлял собой полый цилиндр из Ст. 45 с наклеенными тензодатчиками. Перед установкой динамометра производилась его тарировка на прессе, результаты которой учитывались при контроле усилия предварительного напряжения арматуры.

Усилие натяжения арматуры передавали на бетон через анкера, динамометр и резьбовую муфту, при помощи которой выбирался зазор от удлинения арматуры при натяжении. Схема центрально-обжатого образца приведена на фиг. 3. Анкера представляли собой цилиндры из Ст. 3, которые



Фиг. 3. Схема центрально-обжатого образца: 1 — арматура $\varnothing 28$ мм; 2 — опрессованный цилиндр; 3 — электротензометрический динамометр; 4 — стальной оголовок; 5 — индикатор часового типа; 6 — удлинитель $l = 700$ мм; 7 — рамка для крепления индикаторов; 8 — бетонная призма $10 \times 10 \times 100$ см с отверстием по оси; 9 — резьбовая муфта.

одевали на арматуру и опрессовывали в специальных штампах на прессе, в результате чего происходило полное заполнение периодического профиля арматуры, обжимаемой сталью. Результаты пробных испытаний анкеров на

выдергивание показали, что их разрушение происходит из-за разрыва арматуры вне зоны анкеровки.

Начальные уровни обжатия бетона в опытах составляли в долях от призмочной прочности: для изолированного бетона: 0.431; 0.511; 0.55; 0.57, а для неизолированного бетона: 0.46; 0.52; 0.56; 0.60.

Деформации бетона предварительно напряженных образцов измеряли стационарно установленными индикаторами часового типа с точностью $1.43 \cdot 10^{-5}$.

По деформациям бетона предварительно напряженных образцов (за вычетом деформаций упругого обжатия) подсчитывались опытные величины потерь предварительного напряжения по формуле:

$$\sigma_s(t) = \frac{\Delta \varepsilon_s(t) E_s m_s}{1 + \nu_s n_s m_s + \frac{k E_s F_s}{l_s}} \left(1 + \nu_s n_s m_s + \frac{k E_s F_s}{l_s} \right) \quad (1.2)$$

где $\Delta \varepsilon_s(t)$ — экспериментальные величины деформаций бетона образцов от его ползучести;

$$\nu_s = \frac{F_s}{F_t}, \quad n_s = \frac{E_s}{E_t}, \quad m_s = \frac{l_t}{l_s}$$

k — тарировочная постоянная муфты, характеризующая ее деформативные свойства.

Определялись также «конечные» значения потерь предварительного напряжения арматуры по разности начального и конечного усилия в арматуре N_{03} , определяемого экспериментально, путем растяжения образца до $\sigma_s = 0$ по формуле

$$\sigma_s = \frac{N_{01} - N_{03}}{F_s} \quad (1.3)$$

где

$$N_{01} = N_{00} + \varepsilon_{00} \frac{l_s}{l_a} E_s F_s + N_{00} \left(\frac{l_s}{F_s E_s l_a} + \frac{k}{l_s} \right)$$

Здесь N_{00} — экспериментальная величина усилия в бетоне в момент обжатия; ε_{00} — деформация упругого обжатия бетона. Конечные величины потерь, подсчитанные по формулам 2 и 3, отличались не более, чем на 5%.

Кривые деформаций ползучести бетона предварительно напряженных образцов показаны на фиг. 4.

Теоретические значения потерь предварительного напряжения вычисляли по нелинейной теории упруго-ползучего тела. Исследования проводили на бетоне зрелого возраста ($\tau \geq 44$ сут.) и, как видно из фиг. 1 и 2, изменение характеристик его прочностных и деформативных свойств было незначительным (до 10%); поэтому в расчетах они принимались постоянными и равными: для изолированного бетона $R_{np} = 74.7$ МПа; $E_s = 4.05 \cdot 10^4$ МПа; для изолированного бетона $R_{np} = 72.8$ МПа; $E_s = 3.56 \cdot 10^4$ МПа.

Связь между напряжениями и деформациями в бетоне принималась в форме интегрального уравнения [2]

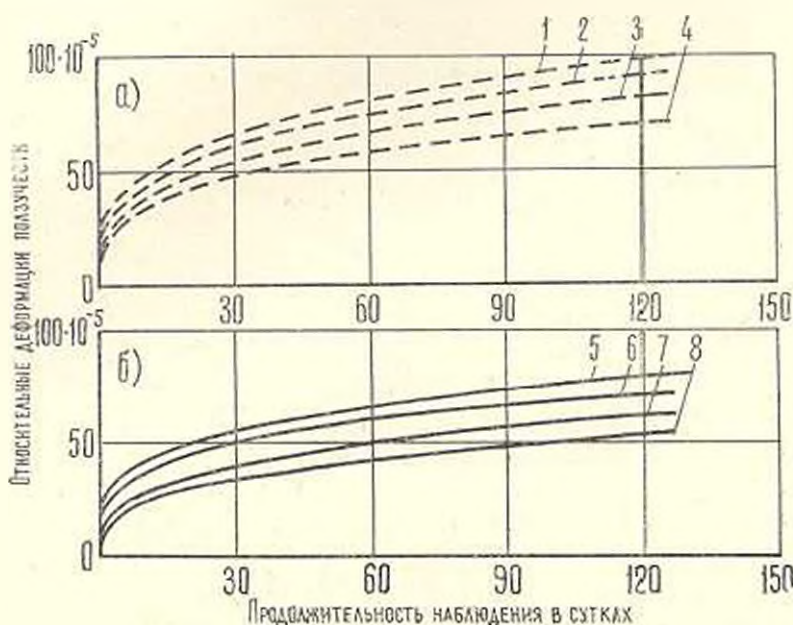
$$\varepsilon_6(t) E_6 = \sigma_6(t) + \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) K_3(t-\tau) d\tau + \int_{\tau_1}^t \sigma_6(\tau) f\left[\frac{\sigma_6(\tau)}{\sigma_0}\right] K_4(\tau-\tau_1) d\tau \quad (1.4)$$

где

$$K_3(t-\tau) = -\frac{E_6}{K_{np}} \frac{\partial}{\partial \tau} S(t-\tau) \quad (1.5)$$

$$K_4(\tau-\tau_1) = -\frac{E_6}{K_{np}} \frac{\partial}{\partial \tau} [S_n(t-\tau_1) - S_n(\tau-\tau_1)]$$

— соответственно линейное и нелинейное ядра ползучести, а σ_0 — единичные напряжения в выбранной системе единиц измерений. При этом (и запас) принято в духе теории старения, что нелинейная составляющая деформаций ползучести полностью необратима, то есть величина потерь усилия обжатия несколько преувеличивалась.



Фиг. 4. Деформации центрально-обжатых образцов после обжатия бетона (за вычетом деформаций усадки): неизолированный бетон (а); изолированный бетон (б): 1 — $\varepsilon_0 = 0.61$; 2 — $\varepsilon_0 = 0.56$; 3 — $\varepsilon_0 = 0.52$; 4 — $\varepsilon_0 = 0.48$; 5 — $\varepsilon_0 = 0.60$; 6 — $\varepsilon_0 = 0.55$; 7 — $\varepsilon_0 = 0.51$; 8 — $\varepsilon_0 = 0.45$.

Уравнения равновесия усилий и совместности деформаций в образцах были получены с учетом неравенства длин бетона и арматуры в связи с наличием стальных проставок между анкерами арматуры и бетонным образцом:

$$N_0(t) = N_a(t) = N_{rp}(t) = N(t) \quad (1.6)$$

$$\Delta_0 = \Delta_a(t) + \Delta_b(t) + \Delta_p(t) + \Delta_m(t)$$

где $N_{i,j}(t)$ — усилие к текущему моменту времени t , соответственно, в бетоне, в арматуре и проставке; Δ — абсолютная начальная деформация удлинения арматуры от усилия предварительного напряжения. $\Delta l_{i,j}(t)$ — абсолютная деформация к текущему моменту времени t , соответственно: a — арматуры; b — бетона; p — резьбовой муфты; m — сплошных проставок.

Абсолютные деформации проставок вычислялись отдельно для резьбовой муфты $\Delta l_p(t)$ и для частей проставки сплошного сечения (оголовков, динамометра, анкеров): $\Delta l_m(t)$.

Уравнения (1.6), с учетом (1.4) можно привести к одному нелинейному интегральному уравнению, устанавливающему связь между начальным усилием обжатия Q и текущим усилием в образце $N(t)$ с учетом ползучести бетона:

$$Q = N(t) + \int_0^t N(\tau) K_1(t-\tau) d\tau + \int_0^t N(\tau) f \left| \frac{N(\tau)}{N_0} \right| K_2(\tau-\tau_1) d\tau \quad (1.7)$$

здесь

$$Q = \frac{N_0}{1 + \nu_a n_a m_a + \nu_b n_b m_b + \frac{k E_a F_a}{l_a}} \quad (1.8)$$

а

$$K_1(t-\tau) = \frac{\nu_a n_a m_a}{1 + \nu_b n_b m_b + \nu_a n_a m_a + \frac{k E_a F_a}{l_a}} K_2(t-\tau) \quad (1.9)$$

$$K_2(\tau-\tau_1) = \frac{\nu_a n_a m_a}{1 + \nu_b n_b m_b + \nu_a n_a m_a + \frac{k E_a F_a}{l_a}} K_4(\tau-\tau_1) \quad (1.10)$$

— соответственно, линейное и нелинейное ядра; а

$$f \left| \frac{N(\tau)}{N_0} \right| = \frac{N(\tau)}{N_0}$$

где N_0 , с учетом указанного выше выбора ε_0 , численно равно F_0 .

После ряда преобразований уравнение (1.7) было приведено к виду, удобному для его вычисления по методу последовательных приближений

$$N(t) = N_1(t) - \int_0^t N_1(\tau) f \left| \frac{N_1(\tau)}{N_0} \right| Z(t-\tau) d\tau \quad (1.11)$$

где

$$N_1(t) = Q \left| 1 - \int_0^t H_1(t-\tau) d\tau \right| \quad (1.12)$$

— решение соответствующего линейного интегрального уравнения с ядром $K_1(t-\tau)$, получаемого из (1.7) при $K_2(\tau-\tau_1)=0$, принимаемое в дальнейшем за первое приближение:

$$Z(t-\tau) = K_2(\tau-\tau_1) \left| 1 - \int_0^t H_1(t-\tau) d\tau \right| \quad (1.13)$$

— ядро интегрального уравнения (1.11);

$$H_1(t-\tau) = D_1 e^{-p_1(t-\tau)} + D_2 e^{-p_2(t-\tau)} \quad (1.14)$$

— резольвента ядра $K_1(t-\tau)$;

p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения:

$$p^2 - (a_1 + a_2 + A_1 + A_2)p + (a_1 a_2 + a_1 A_2 + a_2 A_1) = 0 \quad (1.15)$$

$$D_1 = \frac{(A_1 + A_2)(A_1 + A_2 - p_2) + a_1 A_1 + a_2 A_2}{p_1 - p_2} \quad (1.16)$$

$$D_2 = -\frac{(A_1 + A_2)(A_1 + A_2 - p_1) + a_1 A_1 + a_2 A_2}{p_1 - p_2} \quad (1.17)$$

$$A_1 = \frac{a_1 \Delta \Phi E_6 \mu_6 n_a m_a}{R_{np} \left(1 + \mu_a n_a m_a + \mu_6 n_6 m_6 + \frac{k E_a P_a}{I_a} \right)} \quad (1.18)$$

$$A_2 = \frac{A_1}{a_1 \Delta \Phi} a_2 \Delta S \quad (1.19)$$

$a_1, a_2, \Delta \Phi, \Delta S$ — параметры меры ползучести $S(t-\tau)$ (табл. 1).

Полное решение нелинейного интегрального уравнения (1.7) равно

$$N(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} N_n(t) \quad (1.20)$$

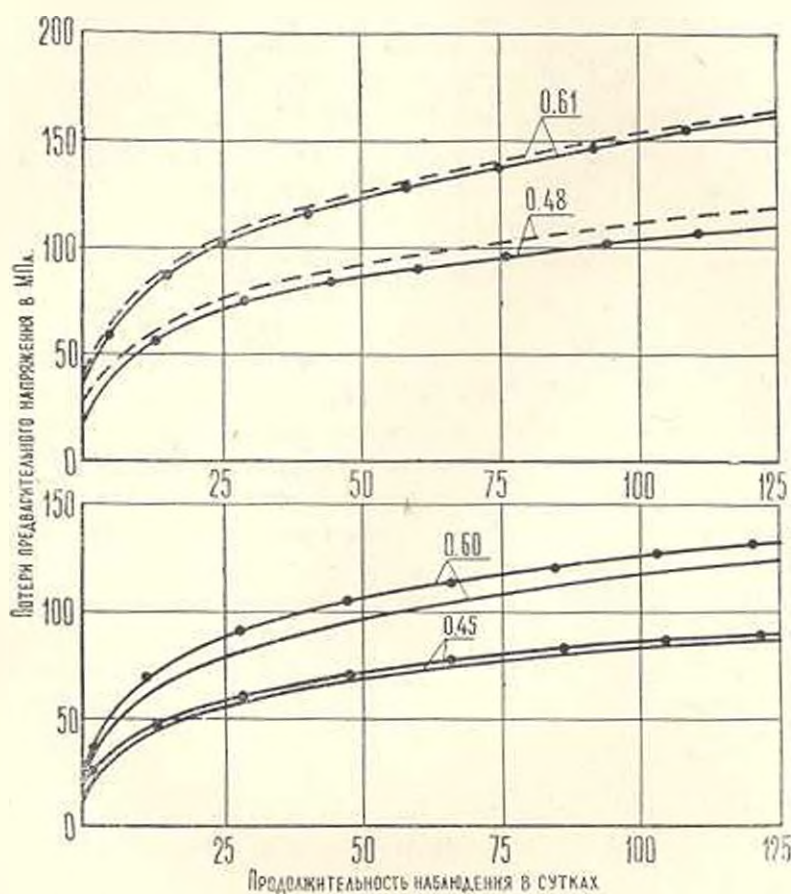
где « n »-ое приближение:

$$N_n(t) = N_1(t) - \int_0^t N_{n-1}(\tau) f \left| \frac{N_{n-1}(\tau)}{N_0} \right| Z(t-\tau) d\tau \quad (1.21)$$

Теоретические же величины самих потерь усилий предварительного натяжения арматуры от усадки и ползучести бетона определяли по формуле, аналогичной (1.3):

$$\Delta N_{\sigma}(t) = N_{\sigma 0} - N(t) \left(1 + \nu_{\sigma} n_{\sigma} m_{\sigma} + \nu_{\sigma} n_{\sigma} m_{\sigma} + \frac{k E_{\sigma} F_{\sigma}}{l_{\sigma}} \right) \quad (1.22)$$

По вышеприведенным формулам были рассчитаны теоретические потери усилий обжатия от ползучести бетона изолированных и не изолированных от высыхания образцов, по которым были вычислены соответствующие потери напряжений и сравнены с опытными данными, подсчитанными по формуле (1.2) (фиг. 5 и табл. 2).



Фиг. 5. Кривые потерь напряжений в арматуре центрально-обжатых образцов $10 \times 10 \times 100$ см при $l_{\sigma} = 0.7 l_{\sigma}$.

— экспериментальные кривые; — теоретические кривые по нелинейной теории упруго-ползучего тела а) неизолированный бетон; б) изолированный бетон.

Примечание: цифры на кривых указывают начальный уровень напряжений обжатия бетона в долях от R_{σ} .

В табл. 2 σ^r , σ^0 — потери предварительного напряжения в МПа соответственно: теоретическое по теории упруго-ползучего тела и опытные, найденные по формуле (1.2), а $\delta = \frac{\sigma^r - \sigma^0}{\sigma_n}$ в %. Как видно из фиг. 5, ординаты теоретических и опытных кривых потерь усилия обжатия от пол-

Таблица 2

Сравнение теоретических и экспериментальных величин потерь напряжений предварительного обжатия бетона от его ползучести

Вид бетона	Начальный уровень обжатия σ_0 , %	Потери напряжений σ_n	Величины потерь σ_n в МПа при продолжительности наблюдений t сут				
			5	15	30	70	126
Испролвоний	0.48	30.0	45.3	62.5	74.7	98.7	119.1
			38.3	55.7	73.4	91.1	110.2
			18.2	12.2	1.8	8.3	8.1
	0.61	30.0	62.8	87.7	104.2	136.4	162.8
			61	87	106.3	134.9	160.1
			3	0.8	-2	1.1	1.7
	0.45	30.0	32.9	45	54.6	73.2	87.3
			35.2	45.6	59.1	71.7	89.4
			-6.5	-3.4	-7.6	-2	-2.3
	0.60	30.0	49.4	66	79.2	105.1	124.4
			62.8	76.9	92.9	111	133.6
			-21	-14	-15	-5.3	-7

зучести бетона отличаются друг от друга не более, чем на 15%. Таким образом, разработанный метод оценки потерь предварительного напряжения арматуры от ползучести высокопрочного бетона дает надежные результаты, основан на точном учете физико-механических и реологических свойств бетона и арматуры и может быть рекомендован, как «точный» метод при расчете преднапряженных конструкций и сооружений. В дальнейшем на основе этого «точного» метода следует разработать инженерный метод расчета потерь предварительного напряжения от ползучести бетона, наиболее полно учитывающий физико-механические и реологические свойства бетона и арматуры.

НИИЖБ Госстроя СССР

Поступила 15 VII 1976

П. Ф. ԱԼԵՔՍԱՆԴՐՈՎՍԿԻ, Պ. Ֆ. ՈՒՐԵՆՅՈՎ

ԲԱՐՁՐ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՐԵՏՈՆԻՑ ԿԵՏՐՈՆԱՇՐՋԱՍԵՂՄՎԱԾ
ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ԼԱՐՎԱԾ-ԴԵՅՈՐՄԱՑՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ ՓՈՐՁԱԿԱՆ ԵՎ
ՏԵՍԱԿԱՆ ՌԻՍՈՒՄԵԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Վ Ր Ո Փ Ո Վ

Ա. Վ. Ալեքսանդրովսկու ոչ գծային սողրի տեսության հիման վրա րերված են փորձնական և տեսական ուսումնասիրության արդյունքները կենտրոնային շրջանղմված ամրաթել բետոնե էլեմենտներին ղեֆորմացված լարվածային վիճակի ճշգրիտ հաշվարկի համար Այդ հաշվարկի փորձնական ստուգումը ցույց է տալիս նրա բարձր ճշտությունը և հուսալիությունը:

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH IN
STRESS-STRAIN RELATIONS FOR HIGH-STRENGTH
CONCRETE AXIALLY TENSIONED ELEMENTS

S. V. ALEXANDROVSKY, P. F. URENEV

S u m m a r y

The results of experimental and theoretical investigation are presented and a precise method to estimate stress-strain relations is developed for high-strength concrete axially tensioned elements in terms of the theory of creep suggested by S. V. Alexandrovsky.

An experimental verification of this calculation method confirmed its high accuracy and reliability.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона. М., НИИЖБ Госстроя СССР, 1975.
2. Александровский С. В. Об одной интересной форме уравнений теории упруго-ползучего тела. Проблемы ползучести и усадки бетона. Материалы Второго Всесоюзного совещания. Ереван, 1974, подготовленные к печати НИИЖБ Госстроя СССР, Стройиздат, М., 1974.
3. Дмитриев С. А., Калатуров Б. А. Расчет предварительно-напряженных железобетонных конструкций. Стройиздат, 1965.