ГИДРОПРОЕКТ ИМЕНИ С. Я. ЖУКА МИНЭНЕРГО СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
по учету ползучести бетона при определении напряженно-деформированного состояния бетонных сооружений

П-795-83
Гидропроект

Москва — 1984

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт "Гидропроект"
имени С.Я.Жука
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СЕКТОР
(НИС Гидропроекта)

"УТВЕРЖДАЮ"
Главный инженер института
П.П.Доценко
"____" _____ 1983 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО УЧЕТУ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

П-795-83
Гидропроект

Зам.начальника НИСа Гидропроекта по научной работе, докт.техн.наук, профессор — А.П.Кириллов

Начальник отдела бетонных сооружений, канд.техн.наук — Ю.Б.Мгалобелов

Ст.научн.сотр., канд.техн. наук — Е.А.Коган

Зав.группой — Л.Д.Соловьева

Москва - 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с расширением области применения бетона и железобетона за последние годы появилось много новых исследований, посвященных вопросу ползучести бетона в условиях повышенной температуры и сложного напряженного состояния, характерных для инженерных сооружений энергетических объектов. В то же время в связи с использованием ЭВМ увеличилась надежность расчетного прогнозирования напряженного состояния сложных сооружений, в том числе пространственно-работающих. Поскольку большинство сооружений энергетических объектов рассчитано на длительную эксплуатацию в течение 30 и более лет, учет длительных процессов, связанных с ползучестью бетона, приобретает важное значение.

В настоящей методической работе на основе анализа и обобщения экспериментальных данных по ползучести бетона, полученных за последние годы, разработаны рекомендации по учету ползучести бетона в практике расчетов и натурных исследований бетонных сооружений.

Среди новых факторов учтены результаты исследований последних лет, касающиеся сложного напряженного состояния, влияния повышенной температуры и длительного срока эксплуатации сооружений. В качестве аналогов представлены данные по ползучести бетона ряда крупных энергетических объектов, бетон которых исследовался в натуре или на крупномасштабных образцах.

Рекомендации предназначены для использования в практике проектирования, расчетов и натурных исследований бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений.

Работа выполнена в отделе бетонных сооружений в рамках задания по теме 0.55.08.07.НІ.

В разработке Рекомендаций принимали участие: канд. техн. наук Мгалобелов Ю.Б., канд. техн. наук Коган Е.А., инж. Соловьева Л.Д.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\sigma_x^*(t), \ldots, \tau_{xy}^*(t)$ ... – напряжения с учетом ползучести на момент времени t,

$\sigma_x(t), \ldots, \tau_{xy}(t)$ – напряжения упруго-мгновенной задачи,

$\delta(t,\tau)$ – полные удельные продольные деформации в условиях одноосного напряженного состояния,

$\delta_1(t,\tau)$ – полные удельные поперечные деформации, в тех же условиях,

$\delta_2(t,\tau)$ – полные удельные деформации чистого сдвига,

t – время; возраст бетона на рассматриваемый момент,

$(t-\tau)$ – длительность действия нагрузки,

$K_p(t,\tau)$ – коэффициент релаксации напряжений,

$C(t,\tau)$ – мера ползучести бетона,

$E(\tau)$ – модуль упругости,

$G(\tau)$ – модуль сдвига,

$\nu(t,\tau)$ – коэффициент Пуассона полных деформаций,

$\nu_1(\tau)$ – коэффициент Пуассона упругих деформаций,

$\nu_2(t,\tau)$ – коэффициент Пуассона деформаций ползучести,

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – компоненты тензора полных деформаций,

K – модуль средних (объемных) деформаций,

$E^K_{дев}$ – модуль девиаторных деформаций,

$\delta^E_{дев}$ – компоненты девиатора полных удельных деформаций,

$\delta_{ср}$ – мера полных средних (объемных) деформаций,

$C^{к}_{дев}(t,\tau)$ – компоненты девиатора деформаций ползучести,

$C_{ср}(t,\tau)$ – мера средних (объемных) деформаций ползучести.

I. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

I.I.Настоящие рекомендации относятся к случаям определения напряженно-деформированного состояния массивных либо изолированных от высыхания бетонных, трещиностойких и предварительно напряженных железобетонных конструкций энергетических сооружений, подвергающихся длительным воздействиям.

I.2. Рекомендации распространяются как на случай расчетного определения напряженно-деформированного состояния методами линейной теории ползучести, так и на случай экспериментального определения напряжений в сооружениях тензометрическим методом (включая натурные исследования).

I.3. В диапазоне напряжений от предела длительной прочности при растяжении ($\sim 0{,}6R_р$) до $0{,}5R_{пр}$ при одноосном сжатии, а в случае двух- и трехосного сжатия до $0{,}6R_{пр}$ учет ползучести бетона может производиться по линейной теории ползучести. В тех случаях, когда напряжения в эксплуатационный период превышают указанные пределы, необходим переход на нелинейную теорию ползучести с использованием рекомендаций работы [I3]. В данной работе вопросы нелинейной ползучести не рассматриваются.

I.4. В случае двух- и трехосного напряженного состояния, как показывает анализ экспериментальных данных [II, I9-22, 24-26], деформационные характеристики: модуль упругости, мера ползучести, коэффициент Пуассона могут приниматься независимыми от вида напряженного состояния и определяться по результатам одноосных испытаний.

Указанное положение имеет место в области линейной ползучести (при трехосном сжатии $\sigma < 0{,}6R_{пр}$). В этих условиях деформирование происходит в соответствии с обычным принципом суперпозиций,

что позволяет применять на практике выражения, основанные на обобщенном законе Гука для упругой деформации и им подобные для деформаций, развивающихся во времени.

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. При расчете конструкций или сооружений, для которых важно знать развитие напряжений с учетом собственных (технологических, температурно-усадочных и т.п.) напряжений, появляющихся, как правило, с раннего возраста бетона, необходимо применять теорию упруго-ползучего тела в ее современном модифицированном варианте [1,3,4].

При расчете напряженного состояния сооружений от длительных нагрузок и воздействий, прикладываемых в зрелом возрасте бетона, рекомендуется использовать теорию упругой наследственности, которая эквивалентна теории упруго-ползучего тела с инвариантными во времени свойствами упругости и ползучести [1,4].

2.2. В целом ряде практических случаев: обработка данных натурных наблюдений, обсчет результатов измерений деформаций в экспериментах, расчеты для однородных тел при действии вынужденных деформаций температурно-усадочного характера, расчет потерь предварительных напряжений и т.п. учет ползучести бетона должен производиться с помощью интегрального преобразования

$$\tilde{\sigma}_\kappa^*(t) = \sigma_\kappa(t) + E(t)\int_{\tau_1}^{t} \tilde{\sigma}_\kappa^*(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}\delta(t,\tau)\,d\tau, \qquad (2.1)$$

основанного на принципе Вольтерра - Арутюняна [3] и использующего понятие о напряжениях упруго-мгновенной задачи $\sigma_\kappa(t) = \varepsilon_\kappa(t)\cdot E(t)$, где: σ_κ, ε_κ - компоненты тензора напряжений и деформаций.

2.3. В случае расчетного определения напряженного состояния упруго-мгновенные напряжения $\sigma_к$ находятся для последовательного ряда моментов времени на основе решения квазистатических задач теории упругости. В случае натурных исследований упруго-мгновенные напряжения равны

$$\sigma_к(t) = \varepsilon_к^{пр}(t) E(t) , \qquad (2.2)$$

где $$\varepsilon_x^{пр} = \frac{\varepsilon_x(1-\nu) + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \qquad (2.3)$$

.....(x, y, z),

(x, y, z) – обозначает круговую замену индексов для остальных компонентов тензора напряжений;

ε_x, ε_y, ε_z – измеренные компоненты полных деформаций по трем взаимно ортогональным осям;

ν – коэффициент Пуассона.

2.4. Выражения (2.1) – (2.3) относятся к нормальным напряжениям, для касательных напряжений они остаются аналогичными с заменой:

$$\sigma(t,\tau) \text{ на } \sigma_2(t,\tau) = 2(1+\nu)\sigma(t,\tau);$$

$$E(t) \text{ на } G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \; ; \; \varepsilon_к^{пр} \text{ на } \gamma_{кл}$$

Касательные напряжения $\tau_{кл}$ упруго-мгновенной задачи равны:

$$\tau_{кл}(t) = \gamma_{кл}(t)\, G(t)$$

2.5. При разложении тензора напряжений на шаровую (среднюю) и девиаторную составляющие учет ползучести производится по выражению вида (2.1) с использованием соответствующих составляющих тензора напряжений с учетом ползучести и тензора упруго-мгновенных

напряжений, а также с заменой $E(t)$ и $\delta(t,\tau)$ на соответствующие функции удельных средних и девиаторных деформаций:

$$K(t)=\frac{E(t)}{1-2\nu}\ ,\quad E_{g^{\circ}B}(t)=\frac{E(t)}{1+\nu}=2\,G(t) \qquad (2.4)$$

$$\delta_{cp}(t,\tau)=(1-2\nu)\,\delta(t,\tau);\ \delta_{дев}(t,\tau)=(1+\nu)\,\delta(t,\tau) \qquad (2.5)$$

Коэффициент Пуассона ν в этих случаях может быть принят одинаковым для упругих и полных деформаций и постоянным во времени. При отсутствии опытных данных рекомендуется среднее для бетона значение $\nu = 0.2$.

2.6. Для инженерных расчетов в упрощенной форме учет ползучести бетона может производиться также с помощью коэффициентов релаксации напряжений $K_p(t,\tau)$ методом "ступенек" [6]:

$$\sigma^*(t)=\sigma_1 K_p(t,\tau_1)+\sum_{j=\tau_1}^{t}\Delta\sigma_j\ K_p(t,\xi_j), \qquad (2.6)$$

где $\xi_j=\frac{t_{j-1}+t_j}{2}$ – середина временного шага;

$\sigma_1=\varepsilon(\tau_1)\ E(\tau_1)$ – упругие напряжения в начальный момент времени τ_1, с которого начинается рассмотрение задачи;

$\Delta\sigma_j$ – приращение упругих напряжений, вычисленных без учета ползучести, но с учетом переменного во времени модуля упругости. В случае обработки натурных измерений они равны: $\Delta\sigma_j=E(\xi_j)\,\Delta\varepsilon_j^{пр}$. Метод коэффициентов релаксации рекомендуется применять, в основном, для решения задач о термонапряженном состоянии массивных бетонных сооружений.

2.7. В тех случаях, когда решение задачи с учетом ползучести производится для существенно неоднородного тела с различными свойствами упругости и ползучести или когда граничные условия на

контуре сильно зависят от деформированного состояния тела, учет ползучести не может производиться с использованием принципа Вольтерра -Арутюняна [3] на основе упруго-мгновенных решений и требует полного решения краевой задачи с изменяющимися во времени характеристиками упругости и ползучести: совместное решение уравнений равновесия, неразрывности и физического уравнения состояния в форме

$$\varepsilon_x(t) = \frac{\tilde{\sigma}_x^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^{t} \tilde{\sigma}_x^*(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \delta(t,\tau)\, d\tau \,, \qquad (x,y,z)$$

$$\gamma_{xy}(t) = \frac{\tau_{xy}^*(t)}{G(t)} + \int_{\tau_1}^{t} \tau_{xy}^*(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \delta_2(t,\tau)\, d\tau \qquad (x,y,z) \qquad (2.7)$$

где $\tilde{\sigma}_x^* = \sigma_x^* - \nu(\sigma_y^* + \sigma_z^*)$

В качестве приближенного метода решения таких сложных задач на практике может быть рекомендован шаговый метод решения краевой задачи, например, методом конечных элементов с изменением на каждом шаге характеристик деформативности с учетом развития деформаций ползучести, отыскиваемых в соответствии с предисторией деформирования и нагружения.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

3.1. В расчетах конструкций с учетом старения и ползучести бетона (см. выражения (2.1), (2,7)) используются:

- функция полных удельных деформаций, равная

$$\delta(t,\tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t,\tau) \qquad (3.1)$$

и коэффициент Пуассона полных деформаций

$$\nu(t,\tau) = \nu_1(\tau) = \nu_2(t,\tau) = const \qquad (3.2)$$

3.2. Модуль упругости, мера ползучести и коэффициент Пуассона бетона определяются экспериментально при одноосном напряженном состоянии (как правило, при сжатии). Испытания должны производиться на пароизолированных образцах по методике ГОСТ 24544-81 [8] и ГОСТ 24452-80 [9].

3.3. Определение характеристик упругости и ползучести в ответственных случаях[x] должно производиться прямым экспериментальным методом, предусматривающим испытания образцов, приготовленных из реального (производственного) состава бетона, либо элементов, выделенных и нагружаемых непосредственно в теле сооружения (как правило, при проведении натурных наблюдений за напряженным состоянием сооружения с помощью розеток тензометров). Возможно также использование образцов бетона (кернов), отобранных на стройплощадке при их хранении в условиях полной пароизоляции.

3.4. Зависимость модуля упругости стареющего бетона от его возраста рекомендуется описывать в следующей форме

$$E(\tau) = E_0\left(1 - \alpha e^{-m\tau} - \beta e^{-n\tau}\right), \qquad (3.3)$$

где E_0 – предельное значение модуля упругости бетона зрелого возраста;

α, β, m, n – коэффициенты, подбираемые по опытным данным.

3.5. Семейство экспериментальных кривых меры ползучести стареющего бетона рекомендуется описывать выражением, предложенным С.В.Александровским [1]:

$$C(t,\tau) = \varphi(\tau) - \psi(t)\frac{e^{\gamma\tau} - A_2}{e^{\gamma t} - A_2} - \Delta(\tau)e^{-\alpha(t-\tau)}, \qquad (3.4)$$

---

x) Сооружения I и II классов на стадии окончательного проектирования, строительства и эксплуатации.

где $\psi(t) = \varphi(t) - \Delta(t)$,

$\varphi(t), \Delta(t)$ – функции старения для предельных и быстронатекающих деформаций ползучести, которые рекомендуется описывать соответственно в форме:

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau} + \varphi_2 e^{-\gamma_2 \tau},$$
$$\Delta(\tau) = \Delta_0 + \Delta_1 e^{-\gamma_3 \tau} + \Delta_2 e^{-\gamma_4 \tau}, \qquad (3.5)$$

φ_0, Δ_0 – предельные значения функций $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$;

$\alpha, \Delta_2, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \Delta_1, \Delta_2, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – коэффициенты, подбираемые по опытным данным.

3.6. В случае, если по каким-либо причинам имеется только одна экспериментальная кривая меры ползучести, можно пользоваться методикой, предложенной С.В.Александровским [4]. Эта методика исходит из экспериментального факта, показывающего, что при загружении бетона в различном возрасте до одинакового относительного уровня напряжений сжатия $\eta(\tau) = \sigma(\tau)/R_{пр}(\tau)$ относительные деформации ползучести

$$S(t-\tau) = \frac{\varepsilon(t,\tau)}{\eta(\tau)}. \qquad (3.6)$$

за один и тот же интервал времени оказываются практически одинаковыми независимо от возраста бетона к моменту загружения. Исходя из кривой $S(t-\tau)$ и зависимости $R_{пр}(\tau)$ можно получить полное семейство кривых меры ползучести

$$C(t,\tau) = \frac{S(t-\tau)}{R_{пр}(\tau)}, \qquad (3.7)$$

которое потом рекомендуется аппроксимировать по формуле (3.4).

3.7. Если длительность рассматриваемого воздействия составляет 2-3 года, для описания кривой меры ползучести бетона зрелого возраста рекомендуется использовать выражение, получаемое из фор-

мулы (3.4) путем предельного перехода:

$$C(\bar{t}) = \psi_0(1-e^{-\beta\bar{t}}) + \Delta_0(1-e^{-\alpha\bar{t}}), \qquad (3.8)$$

где: $\psi_0 = \varphi_0 - \Delta_0$,

$\bar{t} = (t-\tau)$ - длительность воздействия.

3.8. В случае рассмотрения длительных воздействий, продолжающихся десятки лет, описание кривой меры ползучести бетона зрелого возраста должно осуществляться по формуле:

$$C_{g\Lambda}(\bar{t}) = \varphi_0 + a_1[(\bar{t})^{n_1} - (\bar{t}_*)^{n_1}], \qquad (3.9)$$

где:

φ_0 - предельное значение меры ползучести бетона при длительности воздействия нагрузки 2-3 года;

a_1, n_1 - коэффициенты, подбираемые по опытным данным;

$\bar{t}_* = 730 - 1100$ сут. , длительность, до которой возможно использование выражения (3.8).

Второй член в формуле (3.9) в логарифмическом масштабе по обеим осям вырождается в прямую линию. Эта формула применима для длительности действия нагрузки до 30 лет [12,19,23] .

3.9. Значения a_1 и n_1 в формуле (3.9) подбираются из условия наилучшего соответствия выражения

$$C(\bar{t}) = a_1(\bar{t})^{n_1}$$

опытной кривой меры ползучести бетона зрелого возраста, полученной для данного сооружения в течение не менее 2-3 лет. Коэффициенты a_1 и n_1 определяются по выражениям

$$\lg a_1 = \frac{\lg \bar{t}_1 \lg \varphi_0 - \lg \bar{t}_* \lg C_1}{\lg \bar{t}_1 - \lg t_*} , \qquad (3.10)$$

$$n_1 = \frac{\lg C_1 - \lg \varphi_0}{\lg \bar{t}_1 - \lg \bar{t}_*} , \qquad (3.11)$$

где $\bar{t}_1$ – произвольная длительность, равная приблизительно 30 суткам;

C_1 – соответствующее значение меры ползучести.

3.I0. В случае, если имеются опытные данные по ползучести бетона при сложном напряженном состоянии, определение меры ползучести $C(t,\tau)$ и коэффициента Пуассона деформаций ползучести $\nu_2(t,\tau)$ следует производить по выражениям:

$$C(t,\tau) = \frac{2\,C_{дев}(t,\tau) + C_{ср}(t,\tau)}{3}\,, \qquad (3.I2)$$

$$\nu_2(t,\tau) = \frac{C_{дев}(t,\tau) - C_{ср}(t,\tau)}{2\,C_{дев}(t,\tau) + C_{ср}(t,\tau)}\,, \qquad (3.I3)$$

где: $C_{дев} = \frac{C^{1}_{дев} + C^{2}_{дев} + C^{3}_{дев}}{3}$ *),

$C^{\kappa}_{дев} = \frac{\varepsilon_\kappa - \varepsilon_{ср}}{\sigma_\kappa - \sigma_{ср}} \qquad (\kappa = 1,2,3)$,

$C_{ср} = \frac{\varepsilon_{ср}}{\sigma_{ср}}$,

$\varepsilon_{ср} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}$; $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$.

Указанная методика предусматривает независимое определение двух деформационных характеристик материала непосредственно по опытным данным при трехосном напряженном состоянии общего вида $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

3.II. В менее ответственных случаях **) определение характеристик упругости и ползучести может производиться методом аналогов с корректировкой при необходимости конечных значений меры ползучести в соответствии с известными рекомендациями по нормированию модуля

к) В случае, если какая-либо компонента девиатора напряжений близка к нулю, осреднение должно производиться по двум остальным компонентам.

хх) Сооружения Ш, IУ класса на любой стадии и I и П класса на предварительных стадиях проектирования.

упругости [I4] и меры ползучести бетона [5,I3,I6] . Для удобства практического использования аналоговых данных в табл.I и 2 приложения I представлены численные значения констант в формулах (3.3)-(3.5)и (3.9) для ряда бетонов марок 200-500, применявшихся на конкретных энергетических объектах [I0] . При корректировке конечных значений меры ползучести бетона с помощью методики нормирования [I6] поправочный множитель вводится только к величинам: φ_0, φ_1, φ_2, Δ_0, Δ_1, Δ_2.

3.I2. Для сооружений, длительное время эксплуатируемых при повышенной (до I00°С) температуре в условиях, обеспечивающих отсутствие заметных потерь влаги из бетона, его ползучесть и модуль упругости должны быть откорректированы на соответствующие условия.

В ответственных случаях такая корректировка должна осуществляться по результатам специальных исследований ползучести рассматриваемого бетона в условиях повышенной температуры. В менее ответственных случаях в бетоне зрелого возраста корректировка может осуществляться по формулам:

$$C^T = C^{20}\left[1 + 0.03\,4(T - 20^\circ)\right], \qquad (3.I4)$$

$$E^T = E^{20}\left[1 - 0.05\,(T - 20)\right], \qquad (3.I5)$$

где: C^{20}, E^{20} – мера ползучести и модуль упругости при нормальной температуре (~ 20°С);

C^T, E^T – то же при повышенной температуре;

T – температура (средняя за длительный период) в °С.

Приведенные зависимости относятся к случаю, когда сооружение начинает подвергаться повышенной температуре незадолго до начала

воздействия длительной нагрузки, так как не учитывают влияние повышенной температуры на процесс твердения (старения) бетона [I9, 22] .

3.I3. В бетоне раннего возраста, испытывающем воздействие экзотермического разогрева, влияние повышенной температуры на ползучесть и модуль упругости бетона при расчетах термонапряженного состояния бетонной кладки в строительный период может не учитываться если максимальная температура бетона не превышает 40°С [2,I5] . В противном случае требуется такой учет на основе специальных экспериментально-теоретических исследований [7].

3.I4. Расчет кривых релаксации напряжений $K_p(t,\tau)$ рекомендуется выполнять численным методом по выражению [I0] :

$$K_p(t_k,\tau_1) = K_p(t_{k-1},\tau_1) - \frac{C(t_k,\tau_1)+\sum_{i=1}^{k-2}\delta(t_k,\xi_i^{i+1})[K_p(t_{i+1},\tau_1)-K_p(t_i,\tau_1)]}{\delta(t_k,\xi_{k-1}^{k})}, \quad (3.16)$$

где

$$\delta(t_k,\xi_i^{i+1}) = \delta\left(t_k,\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right) = \frac{1}{E\left(\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right)} + C\left(t_k,\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right),$$

t_k - возраст бетона на момент отыскания напряжения;

τ_1 - фиксированный возраст бетона в момент изменения напряжений.

Модуль упругости и мера ползучести вводятся в расчет в виде выражений (3.3)-(3.5).

Для бетона старого возраста расчет коэффициентов релаксации может выполняться по формуле [I]:

$$H^*(t) = 1 - \frac{A_1}{\rho_1}\left(1-e^{-\rho_1 t}\right) - \frac{A_2}{\rho_2}\left(1-e^{-\rho_2 t}\right), \quad (3.17)$$

где $A_1 = \frac{E_0}{\rho_1-\rho_2}\left\{\left(\gamma\psi_0+\alpha\Delta_0\right)\left[E_0\left(\gamma\psi_0+\alpha\Delta_0\right)-\rho_2\right]+\alpha^2\Delta_0+\gamma^2\psi_0\right\}$,

$A_2 = E_0\left(\gamma\psi_0+\alpha\Delta_0\right) - A_1$,

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2}\left\{\alpha+\gamma+E_0\left(\gamma\psi_0+\alpha\Delta_0\right) \pm \pm\sqrt{E_0^2\left(\gamma\psi_0+\alpha\Delta_0\right)^2+(\alpha-\gamma)^2-2E_0\left(\gamma\psi_0-\alpha\Delta_0\right)(\alpha-\gamma)}\right\}$$

В приложении 1 (табл.3-5) приведены значения коэффициентов релаксации напряжений для бетона М200-450, которые могут использоваться в качестве аналоговых данных.

4. ПРОГРАММЫ ДЛЯ УЧЕТА ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА В ПРАКТИКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ НА ЭВМ

4.1. Для автоматизации обработки экспериментальных данных и расчетов напряженного состояния предлагаются программы, разработанные для ЭВМ БЭСМ-6. Программы написаны на языках АЛГОЛ и Фортран, сданы в фонд алгоритмов и программ НИСа Гидропроекта. Алгоритмы, тексты программ и инструкции по их использованию приведены в приложениях 2-6.

4.2. Аппроксимация зависимости модуля упругости от возраста бетона в форме (3.3) выполняется по программе АППРЕ (приложение 2). Программа позволяет получать значения коэффициентов, входящих в формулу (3.3), и предельное значение модуля упругости бетона. Могут быть рассчитаны значения модуля упругости на любые заданные моменты времени.

4.3. Аппроксимацию экспериментальных кривых меры ползучести рекомендуется выполнять по формулам (3.4),(3.5) с помощью программы АКРИП (приложение 3), которая позволяет определять значения коэффициентов и функций, входящих в нее, на базе метода наименьших квадратов с использованием всех экспериментальных точек. Подобная аппроксимация, выполнявшаяся ранее на базе ручных расчетов, из-за своей трудоемкости не позволяла отыскивать оптимальное сочетание указанных коэффициентов, что делало эту процедуру неточной.

После подбора коэффициентов в программе производится вычисление значений $C(t,\tau)$ для исходных по опытам значений τ, что дает

возможность легко контролировать результаты аппроксимации.

Программа АКРИП позволяет расчитать значения $C(t,\tau)$ для любых значений t и τ, что необходимо при расчетах напряженного состояния с учетом ползучести численными методами.

4.4. Для расчета меры ползучести без предварительной аппроксимации по имеющимся значениям коэффициентов в формуле (3.4) может использоваться программа МЕРАПЗ (приложение 4).

4.5. Для расчета кривых релаксации напряжений $K_p(t,\tau)$ по формулам (3.I6)-(3.I7) рекомендуется программа РЕЛАКС (приложение 5), в которой осуществлена численная реализация процедуры перехода от $C(t,\tau)$ к $K_p(t,\tau)$. При этом учитывается также переменный модуль упругости бетона $E(\tau)$. В программе РЕЛАКС предусмотрен также расчет $K_p(t-\tau)$ для бетона старого возраста по формуле (3.I7). В целом программа РЕЛАКС позволяет рассчитывать неограниченное число кривых релаксации, что дает возможность на практике широко пользоваться простым инженерным методом учета ползучести бетона на основе упругих решений краевых задач.

4.6. Напряжения с учетом ползучести бетона по заданным в данной точке полным деформациям позволяет рассчитать программа НАПР (приложение 6), которая использует меру ползучести в форме (3.4) и модуль упругости в виде (3.3). Алгоритм программы разработан на основе метода Л.В.Швецова [I7].

В качестве исходных данных кроме деформаций на определенные моменты времени задаются значения коэффициентов, входящих в зависимости (3.3)-(3.5). Если известны упруго-мгновенные напряжения для ряда моментов времени, то они делятся на значения модуля упругости для тех же моментов времени и полученные деформации вводятся в программу в качестве исходных (заданных) деформаций.

Программа может быть использована для обработки результатов экспериментов, в которых замерены полные (длительные) деформации бетона, в том числе и для обсчета натурных наблюдений за состоянием сооружений с помощью розеток тензометров. В этом случае заданные деформации определяются по формуле (2.3). Свободные температурно-влажностные деформации при этом должны быть исключены (например, с помощью измерения деформаций в ненапряженных элементах - "усадочных конусах").

4.7. Программа НАПР относится непосредственно к одномерной задаче теории упруго-ползучего тела, но может использоваться также в общем случае трехмерного поля напряжений, если известны три ортогональные компоненты тензора полных деформаций. В этом случае по выражению (2.3) вычисляются "приведенные" деформации по каждой оси, а процедура вычислений напряжений остается прежней. Здесь как и обычно в теории ползучести используется соотношение (3.2), что предполагает задание еще одной константы - коэффициента Пуассона.

4.8. Программа НАПР может применяться и в чисто расчетных задачах для однородной области. Здесь может встречаться ряд случаев. Если граничные условия заданы только в виде усилий (напряжений), то в линейной области решение в напряжениях с учетом ползучести в точности равно решению упруго-мгновенной задачи, а перемещения в любой точке изменяются во времени в соответствии с изменением меры ползучести. В этом случае учет ползучести для напряжений не требуется.

Если задача связана с воздействием квазистационарных вынужденных деформаций (температура, усадка, осадка опор и т.п.), а условия на контуре заданы в виде свободного или жестко защемленного края, то полные деформации будут постоянными во времени и могут

быть найдены из упругого решения краевой задачи. Подставляя найденные таким образом деформации в программу НАПР в виде временного ряда значений для каждой точки отдельно, мы в итоге получим затухание напряжений за счет ползучести бетона. Это затухание зависит от истории заданных воздействий.

В общем более сложном случае, когда граничные условия не совпадают с описанными выше (упруго-податливая опора и т.д.), или если речь идет о контактной задаче теории ползучести (кусочно-однородное упруго-ползучее тело) расчеты напряжений с учетом ползучести требуют более общего подхода, не связанного с принципом Вольтерра-Арутюняна [3] . Подобное положение в общем случае имеет место и в нелинейной области ползучести. Во всех этих случаях программа НАПР может быть использована только для приближенных решений.

..9. Расчет потерь предварительного напряжения вследствие ползучести бетона по методике А.В.Швецова [18] в центрально обжатых железобетонных элементах сводится к решению интегрального уравнения теории ползучести по программе НАПР при следующих дополнительных указаниях:

- усадочные деформации принимаются нулевыми;
- вычисляется параметр армирования

$$\rho = \frac{1}{\mu_a E_a + \mu_n E_n}, \qquad (4.1)$$

где μ_a – коэффициент обычного армирования,

E_a – модуль упругости обычной арматуры,

μ_n, E_n – то же для предварительно напряженной арматуры;

- вычисляются значения деформаций ползучести бетона от постоянного (условно) предварительного напряжения $\sigma_b(\tau_0)$, приложенного центрально в возрасте бетона τ_0

$$\varepsilon(t_n) = -\sigma_b(\tau_0) \cdot C(t_n, \tau_0), \qquad (4.2)$$

где $\sigma_б(\tau_0)=\frac{M_н\,\sigma_н(\tau_0)}{1+n_a\mu_a}$; $n_a=\frac{E_a}{E_б(\tau_0)}$,

$\sigma_н(\tau_0)$ – начальные напряжения в напрягаемой арматуре при натяжении на бетон,

$\sigma_н(\tau_0)=\frac{\sigma_0(1+n_a\mu_a)}{1+n_a\mu_a+n_н\mu_н}$; $n_н=\frac{E_н}{E_б(\tau_0)}$ – то же при натяжении на упоры с напряжением до отпуска, равным σ_0,

– вводится новая функция

$$\tilde{\delta}(t,\tau)=\rho+\delta(t,\tau), \qquad (4.3)$$

отличающаяся от обычной функции полных удельных деформаций бетона постоянным слагаемым ρ.

Уравнение относительно напряжений в бетоне, вызванных предварительным напряжением, по А.В.Швецову с учетом выше введенных обозначений имеет вид:

$$\sigma_б(t_n)=\sigma_б(t_{n-1})+\frac{1}{\tilde{\delta}(t_n,\tau)^{n}_{n-1}}\Big\{-\sigma_б(\tau_0)C(t_n,\tau_0)-$$

$$-\sum_{i=1}^{n-1}\Delta\sigma_i^{*}\,\tilde{\delta}(t_n,\tau)^{i}_{i-1}\Big\} \qquad (4.4)$$

Выражение (4.4) с учетом (4.2) тождественно зависимости (I) в программе НАПР.

Напряжения в предварительно напряженной арматуре на любой момент времени равны:

$$\sigma_н(t_n)=\frac{\sigma_б(t_n)+\mu_a\sigma_a(t_n)}{\mu_н}, \qquad (4.5)$$

$$\sigma_a(t_n)=E_a\,\frac{\sigma_б(\tau_0)+\sigma_б(t_n)}{2}\cdot\delta(t_n,\tau_0),$$

а потери напряжений составляют

$$\Delta\sigma_н(t_n)=\sigma_н(\tau_0)-\sigma_н(t_n).$$

Таким образом, для расчета потерь предварительного напряжения в центрально обжатых элементах по программе НАПР достаточно ввести нетрудоемкое изменение функции $\delta(t,\tau)$ на $\tilde{\delta}(t,\tau)$, например, путем введения фиктивного модуля упругости

$$\tilde{E}(\tau) = \frac{E(\tau)}{1+\rho E(\tau)}$$

и вычислить предварительно ряд значений деформаций ползучести по выражению (4.2), считая их в дальнейшем заданными вынужденными деформациями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. Стройиздат,1973, с.432.

2. Александровский С.В., Коган Е.А. Экспериментально-теоретические исследования термонапряженного состояния бетонных брусьев, защемленных по торцам, с учетом ползучести. В кн.Проблемы ползучести и усадки бетона. М., Стройиздат, 1974, с. 206-219

3. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М., 1952, с.323.

4. Арутюнян Н.Х, Александровский С.В. Современное состояние развития теории ползучести бетона. В сб.Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. Под ред.С.В.Александровского. М., Стройиздат, 1976, с.5-96.

5. Берг С.Я., Щербаков Е.Н., Кичигина Г.И. Опыт практического приложения теории ползучести в нормативных документах по проектированию железобетонных мостов. Сб.научных трудов ЦНИИСа, вып.77 "Проблемы ползучести и усадки бетона". Изд.ЦНИИСа, 1974 с.4-9.

6. Васильев П.И. Приближенный способ учета деформаций ползучести при определении температурных напряжений в бетонных массивных плитах. Известия ВНИИГ, т.47, 1952.

7. Васильев П.И., Гавриилин Б.А. Влияние температуры на ползучесть старещего бетона. В сб.Ползучесть и усадка бетона. Стройиздат, 1969, с.9-20.

8. ГОСТ 24544-81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. Изд-во стандартов, 1981 .

9. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Изд-во стандартов, 1980.

10. Коган Е.А. О релаксации напряжений в бетоне массивных гидротехнических сооружений. Гидротехническое строительство, №9, 1980, с.24-27.

11. Коган Е.А. Ползучесть бетона при многоосном сжатии. Гидротехническое строительство, №9, 1983, с.22-25.

12. Невилль А.М. Свойства бетона. Стройиздат, М., 1972, (сокращ. перевод с англ.), с.344.

13. Методические рекомендации по исследованию усадки и ползучести бетона. НИИЖБ, М., 1975.

14. СНиП П-21-75 "Бетонные и железобетонные конструкции". М.1976.

15. Соловьева Л.Д. Экспериментальное исследование термонапряженного состояния защемленных бетонных блоков. Труды коорд. совещаний по гидротехнике, вып.103, Л., "Энергия", 1975, с.211-215.

16. Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. СН 365-67, М. Стройиздат, 1967, 145с.

17. Швецов А.В. Приближенный способ определения собственных напряжений в бетоне с учетом переменности его деформативных свойств Гидротехническое строительство, №8, 1952.

18. Швецов А.В. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций при длительно действующих нагрузках. Ч.I. Центрально и внецентренно растянутые элементы. Госэнергоиздат, 1962, 63с

19. Browne R.D., Blundell R. The Behaviour of Concrete in Prestressed Concrete Pressure Vessels. Nuclear Engineering and Design, 20(1972), pp. 428-475.

20. Copalakrishnan K.S., Neville A.M., Ghali A. Creep Poisson's Ratio of Concrete under Multiaxial Compression. Journal of ACI, N 12, V. 66, Dec. 1969, pp. 1008-1020.

21. Hannant D.Y., Creep and Creep Recovery Subjected to multiaxial Compressive Stress. Journal of ACI, May 1969, N5, Proc., V. 66, pp 391-394

22. Hannant D.Y. Strain Behaviour of Concrete up to 95°C under Compessive Stresses. Conf. on P.C.P. Vs, I.C.E Longon, 1968, (Group C, Paper 17).

23. Higginson E.C., Townsend C.L. Properties of Mass Concrete to 22 years age and their Influence on the Design of large Concrete Dams VIII International Congress on Large Dams, Q. 30, R. 5, vol. 3, Edinburg, 1964.

24. I.J. Jordaan, J.M. Illston. The Creep of sealed Concrete under Multiaxial Compressive Stresses. Magazine of Concrete Research, V. 21, N. 69, Dec. 1969, pp 195-204

25 J.M Illston, I.J Jordaan. Three-dimensional Creep measurements in young Concrete. Materials and Structures, Research and Testing, RILEM, V. 4, N. 24, XI-XII, 1971, pp 371-378.

26. I.J Jordaan, J.M. Illston. Time-dependent Strains in Sealed Concrete under Systems of Variable Multiaxial Stress. Magazine of Concrete Research, V. 23, N. 75-76, 1971, pp 79-88.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Аналоговые данные по ползучести, модулю упругости и коэффициентам релаксации напряжений

Таблица I

Коэффициенты к формуле (I.3) для описания изменения модуля упругости старекщего бетона (данные НИСа Гидропроекта)

Марка бетона	Модуль упругости					Объект
	$E_0 \times 10^{-5}$	a	b	m	n	
	МПа	-	-	I/сут	I/сут	
200	0.425	0.2573	0.627	0.0063	0.1965	Плотина Токтогульской ГЭС (проект)
250	0.404	0.5035	0.2965	0.0591	0.751	Андижанская плотина
250	0.4	0.207	0.336	0.00605	0.135	Плотина Мансур Эддахби (Марокко)
300	0.432	0	0.595	0	0.0534	Токтогульская плотина (внутренняя зона)
400	0.32	0.47	0	0.0967	0	Защитная оболочка НБ АЭС, отм. 37 м.
450	0.41	0.1508	0.3719	0.0062	0.12	Ингурская плотина (внутренняя зона)
500	0.375	0.345	0	0.0443	0	Защитная оболочка НБ АЭС, отм. 15 м

Таблица 2

Коэффициенты для описания семейства кривых меры ползучести старящего бетона и бетона зрелого возраста (данные НИСа Гидропроекта)

Марка бетона	Характеристика бетона	Возраст бетона до 2÷3 лет-выражение (3.4)													Возраст бетона выше 2 ÷ 3 лет		Объект
		φ_0	φ_1	φ_2	Δ_0	Δ_1	Δ_2	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ	A_2	α	a_1	n_1	
		в долях 10^{-5} $(МПа)^{-1}$						1/сут.							$(МПа)^{-1}$ сут$^{n_1-1}$	–	
200	ПЦ М400 215кг/м³ в/ц = 0.56 Дмакс = 100мм	2	13.09	3.614	0.95	14.18	0.582	0.2441	0.0084	0.329	0.0136	0,018	0,8	0,5	0,845	0,1459	Плотина Токтогульской ГЭС (проект)
250	АПЦ М300 244кг/м³ в/ц =0.52 Дмакс = 80 мм	1.2	11.96	2.035	0.3	10.8158	0.2265	0.4805	0.0109	0.4782	0.0044	0.001	0,95	1.5	0,0556	0,5207	Андижанская плотина
250	Цемент 200 кг/м³ в/ц =575 Дмакс = 120 мм	1,0	22,095	2.72	0,4	16.97	1.243	0.2453	0.01048	0.3102	0.01235	0.014	0.85	5	0,3062	0,20	Плотина Маноур Эдлахби (Марокко)
300	ПЦ М400 200кг/м³ в/ц=0.465 Дмакс=130мм	1,15	4.461	2.692	0.35	3.3	0.292	0.1657	0.0134	0.1906	0.0055	0.007	0.85	5	0,1621	0,3321	Токтогульская плотина (внутренняя зона)
400	ПЦ М500 530кг/м³ в/ц = 0.415 Дмакс=40 мм	2.5	7.48	0.2	0,65	1.97	0.08	0.0926	0.0077	0.0937	0.0077	0,013	0.25	1	0,4843	0,2782	Защитная оболочка, отм.37м НВ АЭС
450	ИПЦ М400 270 кг/м³ в/ц =0.45 Дмакс=120 мм	1.5	5.004	2.366	0.5	2.346	0.76	0.183	0.0098	0.151	0.015	0.002	0.95	1.5	0,1454	0,3956	Интурская плотина (внутренняя зона, проект)
500	ПЦ М600 480 кг/м³ в/ц =0.395 Дмакс = 20 мм	3.4	1.951	0.2	0.8	0.469	0,045	0.0658	0.0077	0.0516	0.0045	0.004	0.5	0.5	0,2337	0.4538	Защитная оболочка НВ АЭС, отм 15 м

Таблица 3

Коэффициенты релаксации напряжений для бетона проектного состава плотины Токтогульской ГЭС (М 200)

t, Сутки	Возраст бетона в сутках на момент приращения напряжений																				
	3	7	10,5	14	21	28	45	60	75	90	105	120	150	180	210	240	300	360	480	600	720
3	I																				
7	0,394	I																			
10,5	0,354	0,49	I																		
14	0,324	0,433	0,556	I																	
21	0,286	0,363	0,454	0,534	I																
28	0,266	0,334	0,399	0,461	0,566	I															
45	0,246	0,286	0,342	0,388	0,441	0,497	I														
60	0,239	0,272	0,321	0,358	0,399	0,432	0,543	I													
75	0,235	0,266	0,312	0,345	0,373	0,40	0,469	0,564	I												
90	0,233	0,262	0,307	0,338	0,366	0,384	0,429	0,491	0,581	I											
105	0,232	0,26	0,305	0,334	0,361	0,371	0,407	0,449	0,509	0,594	I										
120	0,232	0,259	0,303	0,330	0,357	0,368	0,394	0,425	0,467	0,525	0,604	I									
150	0,231	0,258	0,301	0,33	0,354	0,363	0,381	0,40	0,425	0,456	0,496	0,549	I								
180	0,231	0,257	0,30	0,329	0,352	0,36	0,375	0,39	0,408	0,428	0,453	0,482	0,568	I							
210	0,231	0,257	0,30	0,329	0,352	0,36	0,373	0,386	0,401	0,416	0,431	0,456	0,503	0,582	I						
240	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,372	0,384	0,397	0,411	0,425	0,44	0,474	0,52	0,592	I					
300	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,383	0,395	0,407	0,419	0,431	0,455	0,479	0,507	0,545	I				
360	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,382	0,394	0,406	0,418	0,430	0,451	0,47	0,488	0,506	0,56	I			
480	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,382	0,394	0,406	0,418	0,429	0,449	0,467	0,482	0,495	0,515	0,535	I		
600	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,382	0,394	0,406	0,418	0,429	0,449	0,467	0,482	0,494	0,513	0,525	0,545	I	
720	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,382	0,394	0,406	0,418	0,429	0,449	0,467	0,482	0,494	0,512	0,524	0,535	0,549	I
900	0,231	0,257	0,30	0,328	0,351	0,359	0,371	0,382	0,394	0,406	0,418	0,429	0,449	0,467	0,482	0,494	0,512	0,524	0,535	0,539	0,542

t - возраст бетона на момент вычисления напряжений с учетом ползучести.

Таблица 4

Коэффициенты релаксации напряжения для бетона Токтогульской плотины (М 300)

t, сутки	Возраст бетона в сутках на момент приращения напряжений																				
	1	3	7	10,5	14	21	28	45	60	75	90	105	120	150	180	210	240	300	360	480	600	720
1	1																					
3	0,578	1																				
7	0,529	0,589	1																			
10,5	0,49	0,546	0,663	1																		
14	0,457	0,508	0,615	0,705	1																	
21	0,405	0,448	0,54	0,617	0,686	1																
28	0,369	0,407	0,488	0,554	0,613	0,716	1															
45	0,317	0,35	0,414	0,466	0,518	0,585	0,647	1														
60	0,294	0,322	0,38	0,425	0,463	0,522	0,572	0,692	1													
75	0,279	0,305	0,359	0,401	0,435	0,486	0,523	0,622	0,715	1												
90	0,27	0,294	0,345	0,384	0,416	0,461	0,486	0,576	0,653	0,734	1											
105	0,264	0,287	0,335	0,373	0,404	0,445	0,475	0,544	0,611	0,68	0,749	1										
120	0,258	0,28	0,327	0,365	0,394	0,432	0,46	0,522	0,58	0,641	0,701	0,762	1									
150	0,252	0,274	0,32	0,355	0,381	0,417	0,44	0,492	0,54	0,59	0,639	0,686	0,734	1								
180	0,249	0,27	0,315	0,348	0,373	0,407	0,429	0,473	0,515	0,559	0,60	0,641	0,68	0,756	1							
210	0,247	0,268	0,311	0,344	0,369	0,40	0,42	0,461	0,50	0,536	0,576	0,612	0,645	0,703	0,771	1						
240	0,245	0,266	0,309	0,341	0,366	0,396	0,415	0,455	0,488	0,524	0,539	0,592	0,621	0,676	0,728	0,782	1					
300	0,243	0,263	0,306	0,338	0,362	0,392	0,409	0,443	0,476	0,509	0,539	0,568	0,593	0,637	0,677	0,714	0,752	1				
360	0,242	0,262	0,304	0,336	0,359	0,388	0,405	0,438	0,469	0,50	0,529	0,555	0,575	0,618	0,65	0,678	0,704	0,765	1			
480	0,241	0,261	0,303	0,335	0,358	0,386	0,402	0,434	0,463	0,492	0,519	0,544	0,566	0,602	0,628	0,648	0,664	0,692	0,725	1		
600	0,241	0,261	0,303	0,334	0,357	0,386	0,402	0,433	0,462	0,49	0,517	0,541	0,562	0,598	0,62	0,638	0,651	0,669	0,634	0,731	1	
720	0,241	0,261	0,303	0,334	0,357	0,385	0,401	0,433	0,461	0,49	0,516	0,54	0,561	0,594	0,618	0,635	0,647	0,661	0,67	0,689	0,734	1
900	0,241	0,261	0,303	0,334	0,357	0,385	0,401	0,432	0,46	0,489	0,516	0,54	0,560	0,593	0,617	0,634	0,645	0,658	0,665	0,671	0,681	0,706

t – возраст бетона на момент вычисления напряжений с учетом ползучести.

Таблица 5

Коэффициенты релаксации напряжений для бетона Ингурской плотины (М 450), проект

t_1, сутки	Возраст бетона в сутках на момент приращения напряжений																				
	1	3	7	10,5	14	21	28	45	60	75	90	105	120	150	180	210	240	300	360	480	600	720
1	I																					
3	0,545	I																				
7	0,495	0,539	I																			
10,5	0,459	0,504	0,569	I																		
14	0,428	0,474	0,558	0,622	I																	
21	0,378	0,426	0,509	0,569	0,621	I																
28	0,342	0,391	0,474	0,531	0,578	0,656	I															
45	0,282	0,333	0,42	0,472	0,513	0,574	0,626	I														
60	0,256	0,316	0,394	0,442	0,48	0,533	0,575	0,675	I													
75	0,242	0,295	0,376	0,424	0,459	0,51	0,541	0,624	0,711	I												
90	0,222	0,264	0,364	0,411	0,445	0,487	0,518	0,589	0,654	0,722	I											
105	0,219	0,275	0,355	0,402	0,434	0,474	0,502	0,563	0,62	0,679	0,74	I										
120	0,213	0,267	0,349	0,395	0,423	0,463	0,489	0,544	0,594	0,647	0,70	0,754	I									
150	0,205	0,26	0,34	0,385	0,414	0,449	0,471	0,516	0,558	0,601	0,645	0,689	0,732	I								
180	0,198	0,253	0,334	0,378	0,406	0,44	0,459	0,499	0,534	0,574	0,59	0,646	0,683	0,754	I							
210	0,195	0,25	0,33	0,374	0,402	0,433	0,452	0,486	0,518	0,551	0,584	0,616	0,646	0,71	0,769	I						
240	0,191	0,247	0,326	0,371	0,399	0,429	0,445	0,477	0,506	0,535	0,565	0,588	0,623	0,678	0,73	0,78	I					
300	0,187	0,243	0,322	0,366	0,394	0,422	0,437	0,466	0,49	0,515	0,541	0,561	0,589	0,635	0,677	0,717	0,755	I				
360	0,185	0,24	0,32	0,363	0,39	0,418	0,432	0,457	0,48	0,503	0,525	0,547	0,569	0,609	0,644	0,678	0,708	0,768	I			
480	0,182	0,237	0,317	0,36	0,387	0,414	0,427	0,449	0,468	0,489	0,507	0,527	0,545	0,578	0,607	0,633	0,656	0,697	0,736	I		
600	0,180	0,236	0,315	0,358	0,385	0,412	0,424	0,440	0,462	0,480	0,498	0,515	0,532	0,562	0,587	0,61	0,628	0,66	0,689	0,75	I	
720	0,179	0,235	0,315	0,358	0,384	0,41	0,422	0,442	0,457	0,476	0,493	0,509	0,525	0,554	0,577	0,596	0,612	0,639	0,661	0,703	0,756	I
900	0,178	0,234	0,314	0,357	0,383	0,409	0,420	0,439	0,455	0,472	0,489	0,504	0,519	0,545	0,567	0,589	0,60	0,621	0,638	0,662	0,694	0,735

t – возраст бетона по моменту вычисления напряжений с учетом ползучести.

Приложение 2

ПРОГРАММА
АППРОКСИМАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА (АППРЕ)

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ АППРЕ

Программа предназначена для аппроксимации кривой нарастания модуля упругости бетона во времени (в зависимости от возраста бетона τ). В основу положена двухчленная экспонента вида (I.3). Программа предусматривает задание исходных данных для пяти моментов времени, при этом первая точка соответствует условию: E(0)=0 при τ =0. Таким образом, из опытов необходимо располагать четырьмя значениями модуля упругости, охватывающих ранний, средний и зрелый возраст бетона (например: 3; 7; 28 и I80 суток).

Алгоритм программы построен на основе выражения (I.3), представляемого в виде:

$$E(\tau) = K \cdot E_{\varphi}(5) \cdot \left(1 - ae^{-m\tau} - be^{-n\tau}\right), \qquad (1)$$

где $K \cdot E_{\varphi}(5) = E_{o}$ – предельное значение модуля упругости,

$E_{\varphi}(5)$ – исходное значение модуля упругости при наибольшем из опыта значении τ ,

K – коэффициент, автоматически определяемый программой методом последовательных приближений для наилучшего описания опытных данных (K>I).

В начале счета программа задает K=I и последовательно уточняет его до тех пор, пока расхождение между двумя ближайшими значениями K не становится менее 0.00I. После вычисления пяти эмпирических коэффициентов в выражении (I) K, a , m , b , n программа вычисляет аппроксимированные значения модуля упругости для следующего массива значений возраста бетона:

$$T(I) = T(1) + \Delta T \cdot N \qquad (2)$$

где $T(1)$ – любое значение начального возраста бетона, например T(I)=0;

ΔT - Минимальный шаг выдачи значений модуля упругости (сутки); например $\Delta T = 1$;

N - счетчик, который постепенно увеличивает временной шаг выдачи значений модуля упругости (в приведенном тексте программы $N=1$, максимальное количество выдаваемых значений E(I) 50).

Параметры T(I), ΔT , N задаются в тексте программы в виде операторов присвоения.

Исходные данные задаются двумя массивами чисел:[x)]

ЕФ - пять опытных значений модуля упругости в формате 5F5.2;

ТФ - пять соответствующих значений возраста бетона в формате 5F5.0.

Выдача результатов:

I) печатается массив значений T(I) и соответствующий ему массив аппроксимированных значений модуля упругости E(I),

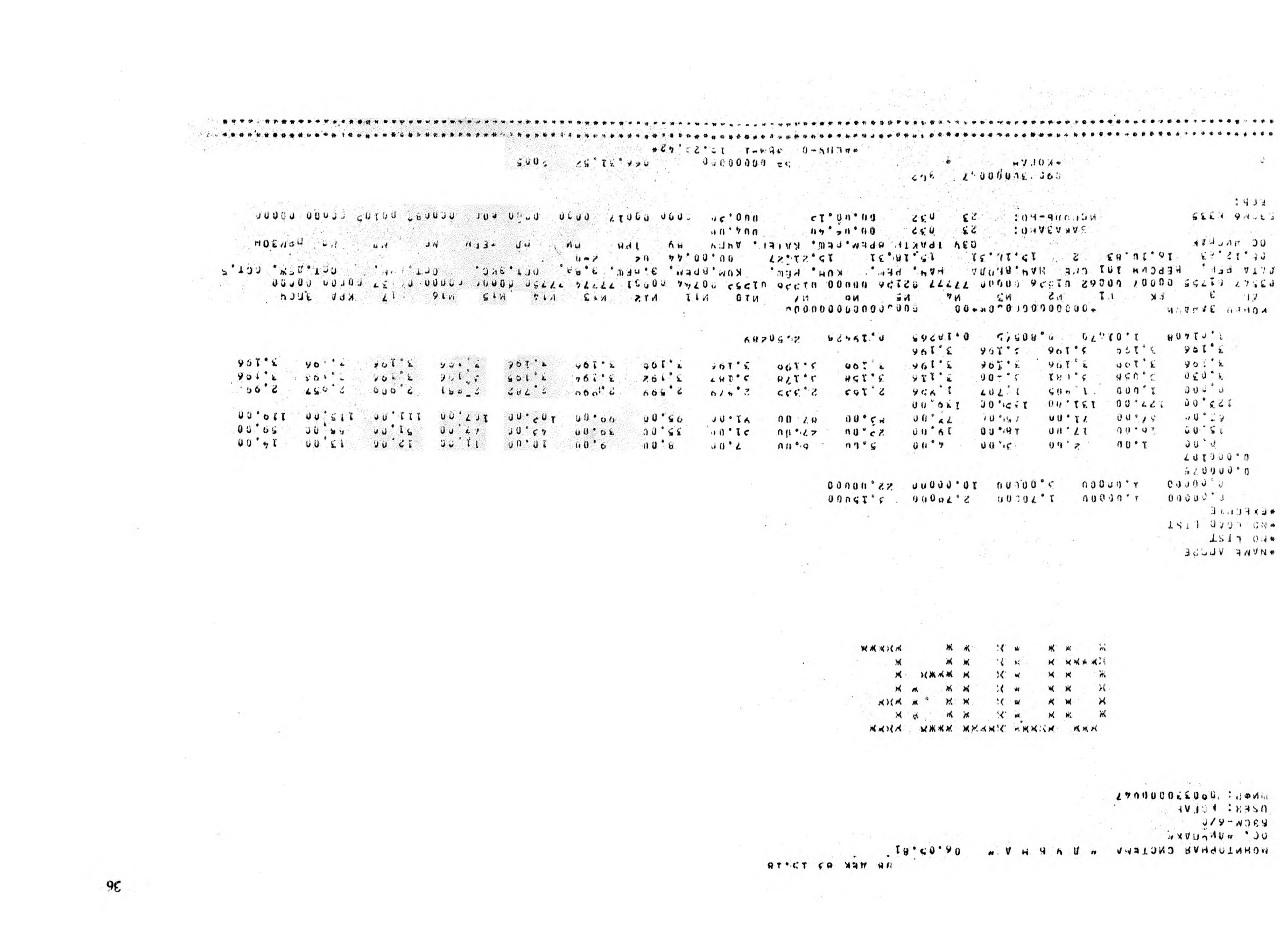
2) печатаются в строку эмпирические коэффициенты: K (два последних значения в ходе итераций), a , m , b , n .

Текст программы и пример расчета приводятся ниже.

---

x) Опытные данные предварительно обрабатываются так, чтобы они лежали приблизительно на плавной кривой.

```
0001  *NAME APPPE
0002  *NO LIST
0003  *NO LOAD LIST
0004        PROGRAM APPPE
0005        DIMENSION E0(5),T0(5)
0006        DIMENSION F(5),F1(5),F2(5)
0007        DIMENSION E(50),T(50)
0008        REAL K,K1
0009        IF(IFOVFL(77),EQ,1)GOTO 100
0010        READ 1,E0
0011      1 FORMAT(5F5,2)
0012        PRINT 12,E0
0013        READ 2,T0
0014      2 FORMAT(5F5,0)
0015        PRINT 12,T0
0016        DO 3 I=1,5
0017      3 F(I)=E0(I)/E0(5)
0018        F1(3)=0,
0019     10 F (3)=F (3)+0,001
0020        K=1,
0021        K1=1,
0022      4 K=(K1+K)/2,
0023        B=ALOG((F(3)-K*K*F1(3))/(F(4)-K))/(T0(4)-T0(3))
0024        A=(K-F(4))/(K*EXP(-B*T0(4)))
0025        K1=1,/(1,-A*EXP(-B*T0(5)))
0026        DOF=ABS(K-K1)
0027        IF(DOF,GT,0,001)GOTO 4
0028        DO 5 I=1,5
0029      5 F2(I)=A*EXP(-B*T0(I))
0030        D=ALOG((1,-F2(1)-F(1)/K1)/(1,-F2(2)-F (2)/K1))/
0031       * (T0(2)-T0(1))
0032        C=(1,-F2(2)-F(2)/K1)/EXP(-D*T0(2))
0033        F11   =C*EXP(-D*T0(3))
0034        PRINT 14,F11
0035     14 FORMAT(3X,F8,6)
0036        IF((A+C),GE,1,0)GOTO 10
0037        T(1)=0,
0038        DT=1,
0039        N=1
0040        DO 7 I=2,50
0041        N=N+1,
0042        IF(I,GT,20)GOTO 15
0043        GOTO 7
0044     15 N=N+3
0045      7 T(I)=T(1)+DT*(N-1)
0046        DO 8 I=1,50
0047      8 E(I)=K1*(1,-A*EXP(-B*T(I))-C*EXP(-D*T(I)))*E0(5)
0048        PRINT 9,(T(I),I=1,50)
0049      9 FORMAT(3X,15F8,2)
0050        PRINT11,(E(I),I=1,50)
0051     11 FORMAT(3X,15F8,3)
0052    100 PRINT 12,K,K1,A,D,C,D
0053     12 FORMAT(3X,6F10,5)
0054        STOP
0055        END
0056  *EXECUTE
0057  *END FILE
```



Приложение 3

ПРОГРАММА

АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ МЕРЫ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА ПО ФОРМУЛЕ С.В.АЛЕКСАНДРОВСКОГО

(АКРИП)

I. ВВЕДЕНИЕ

В расчетах термонапряженного состояния бетонных сооружений по теории упруго-ползучего тела используется мера ползучести бетона, для чего экспериментальные кривые $C(t,\tau)$ аппроксимируются аналитическим выражением (3.4) [I] .

Для снижения трудозатрат при выполнении аппроксимации разработана программа для ЭВМ БЭСМ-6. Методика аппроксимации принята аналогичной методике , приведенной в работе [I] .

Программа составлена в отделе бетонных сооружений зав. группой Соловьевой Л.Д. на языке АЛГОЛ-60.

2. АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ

Кривые меры ползучести бетона $C(t,\tau)$ описываются выражением [1] :

$$C(t,\tau)=\varphi(\tau)-\psi(t)\frac{e^{\gamma\tau}-A_2}{e^{\delta t}-A_2}\,\Delta(\tau)e^{-\alpha(t-\tau)}, \qquad (1)$$

где τ – возраст загружения бетона,

t – продолжительность действия нагрузки,

$$\varphi(\tau)=\varphi_0+\varphi_1 e^{-\gamma_1\tau}+\varphi_2 e^{-\gamma_2\tau}, \qquad (2)$$

$$\Delta(\tau)=\Delta_0+\Delta_1 e^{-\gamma_3\tau}+\Delta_2 e^{-\gamma_4\tau}, \qquad (3)$$

$$\psi(t)=\varphi(t)-\Delta(\tau),$$

$\varphi(\tau),\Delta(\tau),\psi(t)$ – функции старения, быстро убывающие с ростом τ ,

φ_0,Δ_0 – предельные значения функций $\varphi(\tau)$, $\Delta(\tau)$,

$\gamma_1,\dots\gamma_4,\varphi_1,\varphi_2,\Delta_1,\Delta_2,A_2,\delta,\alpha$ – эмпирические коэффициенты.

Экспериментальные кривые $C(t,\tau)$ обычно имеют вид, приведенный на рис.1а.

По этим данным строятся функции $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$, которые соответственно равны

$$\varphi(\tau)=C(\infty,\tau)$$

$$\Delta(\tau)=C(\tau+1,\tau)$$

и имеют вид, показанный на рис.1б.

Так как обычно экспериментальные кривые $C(t,\tau)$ получают в кратковременных опытах, т.е. условие $t\to\infty$ не выполняется, поэтому $\varphi(\tau)$ рекомендуется принимать по экстраполяции до момента кажущегося затухания деформаций ползучести.

Функция $\Delta(\tau)$ отражает изменение быстронатекающих деформаций ползучести. Их значения принимаются на момент $t-\tau$ =1сут.

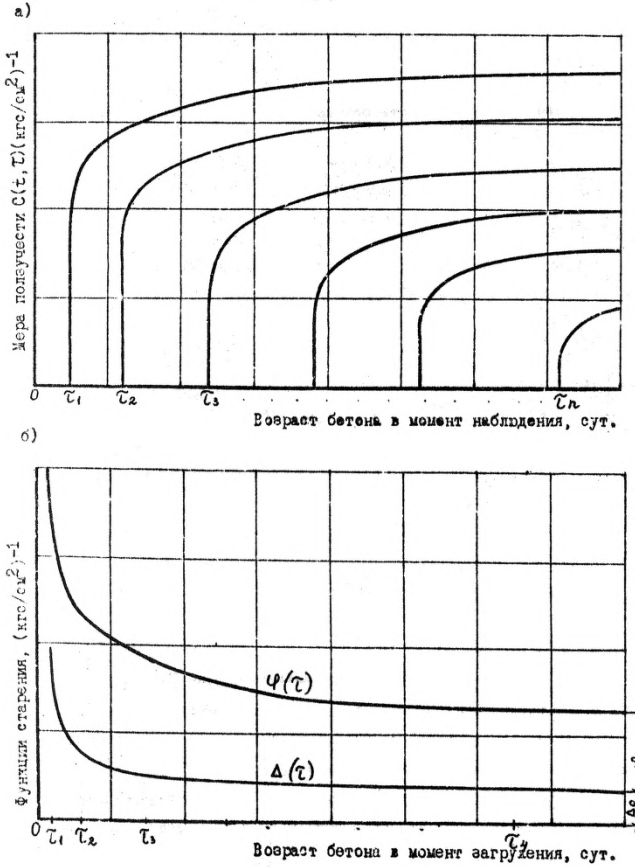


Рис. 1 Мера ползучести бетона $C(t,\tau)$ (а) и функции старения $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$ (б)

Функции $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$ представляют собой монотонно убывающие кривые. Такой же вид должна иметь кривая $\psi(\tau)$, чего можно достигнуть некоторой корректировкой функции $\Delta(\tau)$.

Аппроксимируем функцию $\psi(\tau)$ с помощью выражения (2). Параметр φ_0 принимаем равным минимальному значению $\varphi(\tau)$. На кривой выделяем пологий участок и аппроксимируем его с помощью выражения, имеющего один экспоненциальный член:

$$\varphi'(\tau) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau} \qquad (4)$$

Составляем систему уравнений для двух различных моментов времени загружения бетона τ_3 и τ_4, находящихся на этом участке:

$$\varphi'(\tau_3) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau_3}$$
$$\varphi'(\tau_4) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau_4}$$

Решая ее, получим значения φ_1 и γ_1. По выражению (4) подставляя коэффициенты φ_1 и γ_1, вычисляем значения функции $\varphi'(\tau)$ на моменты времени τ_1 и τ_2, находящиеся на крутом участке. Разница между вычисленными значениями $\varphi'(\tau_1)$ и $\varphi'(\tau_2)$ и экспериментальными величинами $\varphi(\tau)$ на эти же моменты описывается с помощью второй быстро убывающей экспоненты:

$$\varphi(\tau_1) - (\varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau_1}) = \varphi_2 e^{-\gamma_2 \tau_1}$$
$$\varphi(\tau_2) - (\varphi_0 + \varphi_1 e^{-\gamma_1 \tau_2}) = \varphi_2 e^{-\gamma_2 \tau_2}$$

Решая эту систему, получим коэффициенты φ_1 и γ_1.

Аппроксимация кривой $\Delta(\tau)$ выполняется аналогично по выражению (3).

После этого методом наименьших квадратов подбираются коэффициенты α, A_2, γ, входящие в выражение (1).

Из экспериментальных данных известно, что эти коэффициенты меняются в пределах:

A_2 от 0.5 до 1,

α от 0.5 до 3,

γ от 0.001 до 0.04.

Путем перебора всех значений A_2, α, γ с небольшим шагом определяются суммы квадратов разности вычисленных зна-

чений $C(t,\tau)$ и экспериментальных по всем кривым с определенным шагом. Искомые значения коэффициентов α, A_2 и γ соответствуют минимальному значению суммы квадратов. Минимально необходимое число кривых меры ползучести для одного состава бетона 4. Количество рассматриваемых точек на каждой кривой не менее 20.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

3.1. Исходная информация

FO - предельное значение функции $\varphi(\tau)$;

Л1, Л2, Л3, Л4 - исходные экспериментальные значения, взятые с кривой $\varphi(\tau)$;

DO - предельное значение функции $\Delta(\tau)$;

Б1, Б2, Б3, Б4 - исходные экспериментальные значения, взятые с кривой $\Delta(\tau)$;

ТТ1, ТТ2, ТТ3, ТТ4 - значения возраста бетона, соответствующие исходным данным по $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$.

Эти значения выбираются исходя из характера кривых, и могут не соответствовать значениям τ экспериментальных кривых $C(t,\tau)$.

ТМ - максимальная продолжительность действия нагрузки, принимаемая одинаковой для всех значений τ;

N - количество аппроксимируемых кривых;

М - количество точек, рассматриваемых на каждой аппроксимируемой кривой;

DT - массив интервалов времени, через которые вводятся экспериментальные значения $C(t,\tau)$, равный М числам, одинаковы для всех значений τ;

ТТ - массив τ - возрастов загружения бетона, равный N числам (экспериментальные кривые);

ТР - массив τ - возрастов загружения бетона, равный Р числам (расчетные кривые);

C1 – экспериментальные значения $C(t,\tau)$, их количество равно $N \times M$;

НТ – продолжительность действия нагрузки в расчетных кривых;

Р – количество расчетных кривых $C(t,\tau)$.

3.2. Вывод информации

Выдаются на печать подобранные значения коэффициентов, входящих в уравнения (2) и (3), а также рассчитанные по этим выражениям значения функций $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$ и их разница $\psi(\tau)$.

Дальше печатаются подобранные коэффициенты A_2, α, γ, входящие в выражение (1), и значение минимальной суммы квадратов.

Расчетные значения $C(t,\tau)$ выдаются с переменным интервалом: в первые 10 суток после загружения через 1 сутки, в последующие 20 суток через 2 суток и дальше до 100 суток через 5 суток. После 100 суток до заданного НТ значения $C(t,\tau)$ выдаются через 20 суток.*) Печать выполняется в два столбца. Количество выдаваемых за один раз расчетных кривых $C(t,\tau)$ по условиям печати может быть не более 6.

---

*) Для полной выдачи результатов расчета число $\frac{НТ-100}{20}$ должно быть четным.

```
0001 -BEGIN -INTEGER I,J,M,N,TM,TX,TCX,TT1,TT2,TT3,TT4,HT,P
*0001 ;≡
0002 -INTEGER B,MT;≡
0003 -REAL Φ1,Φ2,Φ3,Φ4,F0,F1,F2,D0,D1,D2,Φ2,Φ3,Φ4,≡
0004 FF1,FF2,DD1,DD2,A,A2,C2,MIN,A22,AA,FF,≡
0005 CX,CCX,C3,F,S1,S2,S3,S4,S,S1;≡
0006 INPUT(F0,D1,D2,D3,D4,D0,S1,S2,S3,S4,TT1,TT2,TT3,TT4);≡
0007 INPUT(TM,HT,N,M,P);≡
0008 -BEGIN -ARRAY F[1:N],D[1:N],KCH[1:N],≡
0009 T[1:N,1:M],K[1:N,1:M],DT[1:M],C1[1:N,1:M],≡
0010 C[1:N,1:M],C2[1:P,1:HT/2),C3[1:P,1:HT/2);≡
0011 -INTEGER -ARRAY TI[1:P,0:HT),TC[1:P,1:HT),TT[1:N),TP[1
*0011 :P);≡
0012 INPUT(DT,TT,C1,TP);≡
0013 MAP(0,128,0,0,0,0);≡
0014 MET:Φ1:=LN((S3-F0)/(S4-F0))/(TT4-TT3);≡
0015 F1:=(S3-F0)/EXP(-Φ1×TT3);≡
0016 FF1:=F0+F1×EXP(-Φ1×TT1);≡
0017 FF2:=F0+F1×EXP(-Φ1×TT2);≡
0018 Φ2:=LN((S1-FF1)/(S2-FF2))/(TT2-TT1);≡
0019 F2:=(S1-FF1)/EXP(-Φ2×TT1);≡
0020 Φ3:=LN((S3-D0)/(S4-D0))/(TT4-TT3);≡
0021 D1:=(S3-D0)/EXP(-Φ3×TT3);≡
0022 DD1:=D0+D1×EXP(-Φ3×TT1);≡
0023 DD2:=D0+D1×EXP(-Φ3×TT2);≡
0024 Φ4:=LN((S1-DD1)/(S2-DD2))/(TT2-TT1);≡
0025 D2:=(S1-DD1)/EXP(-Φ4×TT1);≡
0026 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN ≡
0027 F[I]:=F0+F1×EXP(-Φ1×TT[I])+F2×EXP(-Φ2×TT[I]);≡
0028 D[I]:=D0+D1×EXP(-Φ3×TT[I])+D2×EXP(-Φ4×TT[I]);≡
0029 KCH[I]:=F[I]-D[I]_END ;≡
0030 -FOR I:=2_STEP 1_UNTIL N_DO ≡
0031 -IF (KCH[I-1]-KCH[I])<0_THEN _GOTO M3M;≡
0032 OUTPUT('T','      Φ1          Φ2          Φ3
*0032  Φ4≡
0033            F1          F2          D1          D2');≡
0034 OUTPUT('2/');≡
0035 OUTPUT('Z8-30,4D2B',Φ1,Φ2,Φ3,Φ4,F1,F2,D1,D2);≡
0036 OUTPUT('2/');≡
0037 OUTPUT('T','TAU');≡
0038 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO ≡
0039 OUTPUT('Z8B3D',TT[I]);≡
0040 OUTPUT('2/');≡
0041 OUTPUT('T','F(TAU)=','Z3D3D,4D',F,'/','T','D(TAU)=',≡
0042 'Z3D3D,4D',≡
0043 D,'/','T','KCH(TAU)=',Z3B3D,4D',KCH,'2/');≡
0044 -GOTO DPO;≡
0045 M3M:B1:=B1-B1/100;≡
0046 B2:=B2-B2/100;_GOTO MET;≡
0047 DPO:MIN:=100;≡
0048 -FOR A2:=0,5_STEP 0,05_UNTIL 1_DO _BEGIN ≡
0049 -FOR A:=0,5_STEP 0,5_UNTIL 3_DO _BEGIN ≡
0050 -FOR F:=0,001_STEP 0,001_UNTIL 0,04_DO _BEGIN ≡
0051 J:=1;
0052 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN ≡
0053 T[I,J]:=TT[I]+DT[J];≡
0054 C[I,J]:=F[I]-KCH[I]×(EXP(F×(T[I])-A2)/≡
0055 (EXP(F×T[I,J])-A2)-D[I]×EXP(-A×(T[I,J]-TT[I]));≡
0056 K[I,J]:=C[I,J]-C1[I,J];≡
0057 -END ;≡
```



```
0058 -FOR J:=2_STEP 1_UNTIL M-1_DO _BEGIN ≡
0059 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN ≡
0060 T[I,J]:=T[I,J-1]+DT[J];≡
0061 C[I,J]:=F[I]-KCH[I]×(EXP(F×TT[I])-A2)/≡
0062 (EXP(F×T[I,J])-A2)-D[I]×EXP(-A×(T[I,J]-TT[I]));≡
0063 K[I,J]:=C[I,J]-C1[I,J]≡
0064 -END ;≡
0065 -END ;≡
0066 S1:=0;-FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN ≡
0067 S:=0;
0068 -FOR J:=1_STEP 1_UNTIL M-1_DO _BEGIN ≡
0069 S:=S+K[I,J]↑2
0070 -END ;≡
0071 S1:=S1+S-END ;≡
0072 -IF S1<MIN_THEN _BEGIN MIN:=S1;A22:=A2;AA:=A;FF:=F≡
0073 -END ;
0074 -END ;
0075 -END ;-END ;≡
0076 OUTPUT('T','      A2          A           F
*0076 MIN');≡
0077 OUTPUT('/');≡
0078 OUTPUT('4D-30,4D2B',A22,AA,FF,MIN);≡
0079 OUTPUT('2/');≡
0080 A2:=A22;A:=AA;F:=FF;≡
0081 OUTPUT('T','BREMS');≡
0082 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL P_DO ≡
0083 OUTPUT('Z833D8D',TP[I]);≡
0084 OUTPUT('2/');≡
0085 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL P_DO _BEGIN ≡
0086 TI[I,0]:=TP[I];≡
0087 -FOR J:=1_STEP 1_UNTIL 11_DO ≡
0088 TI[I,J]:=TI[I,J-1]+1;≡
0089 -FOR J:=11_STEP 1_UNTIL 21_DO ≡
0090 TI[I,J]:=TI[I,J-1]+2;≡
0091 -FOR J:=21_STEP 1_UNTIL 35_DO ≡
0092 TI[I,J]:=TI[I,J-1]+5;≡
0093 MT:=35+(HT-100)+20;≡
0094 -FOR J:=35_STEP 1_UNTIL MT_DO TI[I,J]:=TI[I,J-1]+20;≡
0095 -END ;≡
0096 B:=MT+2+1;≡
0097 -FOR I:=1_STEP 1_UNTIL MT+2_DO _BEGIN ≡
0098 -FOR J:=1_STEP 1_UNTIL P_DO _BEGIN ≡
0099 F[I]:=F0+F1×EXP(-Φ1×TP[I])+F2×EXP(-Φ2×TP[I]);≡
0100 D[I]:=D0+D1×EXP(-Φ3×TP[I])+D2×EXP(-Φ4×TP[I]);≡
0101 C2[I,J]:=F[I]-(F[I]-D[I])×(EXP(F×TP[I])-A2)/≡
0102 (EXP(F×TI[I,J])-A2)-D[I]×EXP(-A×(TI[I,J]-TP[I]));≡
0103 TX:=TI[I,J];≡
0104 CX:=C2[I,J];≡
0105 TC[I,J]:=TI[I,B];≡
0106 C3[I,J]:=F[I]-(F[I]-D[I])×(EXP(F×TP[I])-A2)/≡
0107 (EXP(F×TC[I,J])-A2)-D[I]×EXP(-A×(TC[I,J]-TP[I]));≡
0108 TCX:=TC[I,J];≡
0109 CCX:=C3[I,J];≡
0110 OUTPUT('Z83D8',TX,'Z0D.DD',CX,'Z83D8',TCX,'Z0D.DD',CCX
*0110 );≡
0111 -END ;≡
0112 B:=B+1;≡
0113 OUTPUT('/')_END ≡
0114 -END -END ≡
0115 Φ2
```

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Имеется пять экспериментальных кривых мер ползучести бетона М 250 Андиканской ГЭС. Возраст бетона в момент загружения 3, 7, 28, 180 и 340 суток.

Построив кривые $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$, записываем исходную информацию в порядке ввода по программе:

1) данные для аппроксимации функций $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$

1.2; 6.0; 3.5; 2.7; 1.25; 0.3; 3.1; 0.9; 0.5; 0.3;

3; 7; 28; 340;

2) 500; 500; 5; 46; 6;

3) Массив DT

0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.5, 0.5,
0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 5, 5, 5,
5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, 20, 20, 20, 20, 20, 50, 50,
50, 50, 50, 50;

Массив TT

3, 7, 28, 180, 340;

Массив C1

0.69, 1.38, 2.07, 2.75, 2.8, 2.85, 2.9, 2.95, 3.01, 3.07,
3.11, 3.15, 3.2, 3.25, 3.3, 3.35, 3.4, 3.47, 3.5, 3.6, 3.67,
3.72, 3.8, 3.85, 4.0, 4.12, 4.25, 4.35, 4.45, 4.55, 4.67, 4.8,
4.92, 5.0, 5.1, 5.25, 5.4, 5.5, 5.6 , 5.67, 5.8, 5.87, 5.9,
5.9, 5.9, 5.9,

0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.012, 1.024, 1.036. 1.05, 1.06, 1.07,
1.085, 1.1, 1.12, 1.15, 1.17, 1.2, 1.22, 1.25, 1.27, 1.3,
1.35, 1.38, 1.43, 1.47, 1.55, 1.62, 1.68, 1.75, 1.82, 1.87,
1.97, 2.07, 2.1, 2.25, 2.3, 2.42, 2.53, 2.63, 2.75, 2.82,
3.02, 3.15, 3.22, 3.27, 3.3, 3.33,

0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.512, 0.525, 0.537, 0.55, 0.57,
0.6, 0.625, 0.65, 0.66, 0.67, 0.72, 0.75, 0.78. 0.82. 0.85.
0.87, 0.92, 0.97, 1, 1.03, 1.12, I.2, I.25, I,3, I.35, I.4, I.5,
1.57, 1.65, 1.7, 1.75, 1.85, 1.95, 2.05, 2.13, 2.2, 2.3, 2.35,
2.4, 2.42, 2.45, 2.47,

0.06, 0.12, 0.18, 0.2 5 , 0.255, 0.26, 0.265, 0.27, 0.295,
0.32, 0.336, 0.35, 0. 36, 0.37, 0.4, 0.42, 0.43, 0.45, 0.46,
0.48, 0.49, 0.5, 0.51, 0.52, 0.53, 0.55, 0.56, 0.57, 0.58,
0.59, 0,61, 0.63, 0.65, 0.66, 0.67, 0.7, 0.75, 0.77, 0.8, 0.35,
0.92, 0.97, 1.02, 1.07, 1.12, 1.17,

0.06, 0.12, 0.18, 0.25, 0.255, 0.26, 0.265, 0.27, 0.285, 0.3,
0.31, 0.32, 0.335, 0.35, 0.36, 0.37, 0.38, 0.4, 0.41, 0.42,
0.13, 0.435, 0.44, 0. 445, 0.45, 0.47, 0.5, 0.51, 0.52, 0.55,
0.57, 0.62, 0.65, 0.67, 0.7, 0.74, 0.77, 0.8, 0.83, 0.85, 0.92,
0.97, 1.05, 1.07, 1.1, 1.15;

Массив TP

3, 7, 28, 180, 340, 500;

Реаультаты расчетов даны ниже.

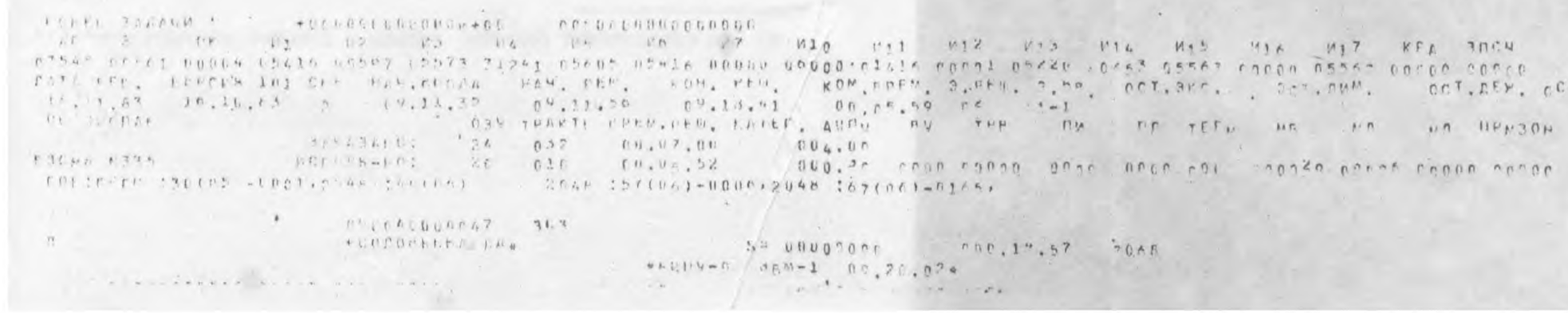
СЧЕТ ПО КОНТРОЛЮ

Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Т2	F2	D1	D2
0.0109	0.4865	0.4844	0.4782	2.0134	11.5618	0.2265	10.8186

ТАБ	3	7	28	168	340
FITAV1=	4.0000	3.5000	2.7000	1.4961	2.2000
DITAV1=	2.1000	0.9000	0.5000	0.4018	0.3500
KONETAV1=	2.5018	2.6690	2.2000	1.0043	0.9000

Z2	A	T	MIN
0.9000	4.2000	0.1040	5.0730

FREQ	3		7		28		168		340		500			
4	3.44	73	4.30	8	0.72	77	1.95	29	0.41	98	2.31	181	0.32	250	0.65	341	0.27	410	0.80	501	0.23	570	0.45
5	3.50	78	4.35	9	0.80	82	2.00	30	0.91	103	2.38	182	0.36	255	0.66	342	0.34	415	0.51	502	0.31	575	0.45
6	3.15	83	4.40	10	0.85	87	2.04	31	0.95	108	2.38	183	0.41	260	0.67	343	0.35	420	0.52	503	0.33	580	0.46
7	3.60	88	4.44	11	0.89	92	2.08	32	0.97	113	1.41	184	0.42	265	0.69	344	0.36	425	0.53	504	0.33	585	0.47
8	3.93	93	4.50	12	1.02	97	2.14	33	0.50	118	2.42	185	0.42	270	0.70	345	0.36	430	0.54	505	0.33	590	0.48
9	3.77	98	4.55	13	1.04	102	2.17	34	0.00	123	2.48	186	0.43	275	0.71	346	0.36	435	0.55	506	0.34	595	0.48
10	3.79	103	4.57	14	1.05	107	2.19	35	0.02	128	2.51	187	0.43	280	0.72	347	0.37	440	0.55	507	0.34	600	0.49
11	3.81	113	4.71	15	1.08	112	2.32	36	0.03	138	2.01	188	0.44	300	0.73	348	0.37	460	0.49	508	0.34	620	0.52
12	3.83	118	4.82	16	1.10	117	2.42	37	0.05	138	2.70	189	0.44	320	0.91	349	0.37	480	0.62	509	0.34	640	0.54
13	3.36	123	4.92	17	1.12	122	2.51	38	0.06	148	2.78	190	0.44	340	0.85	350	0.37	500	0.64	510	0.34	660	0.57
14	3.41	103	5.01	18	1.17	127	2.59	40	0.09	208	1.85	192	0.45	360	0.88	352	0.38	520	0.67	512	0.35	680	0.59
15	3.45	203	5.08	21	1.20	207	2.66	42	0.72	218	1.91	194	0.46	380	0.91	354	0.38	540	0.69	514	0.35	700	0.61
16	3.48	223	5.15	23	1.24	227	2.72	44	0.75	228	1.96	196	0.47	400	0.94	356	0.39	560	0.72	516	0.35	720	0.64
17	3.34	243	5.20	25	1.28	247	2.77	46	0.78	248	2.01	198	0.48	420	0.97	358	0.39	580	0.74	518	0.35	740	0.66
18	3.52	253	5.25	26	1.32	257	2.81	48	0.81	258	2.05	210	0.48	440	0.98	360	0.40	600	0.76	520	0.36	760	0.67
20	3.57	263	5.31	28	1.35	267	2.86	50	0.83	268	2.09	202	0.49	460	1.02	362	0.40	620	0.78	522	0.37	780	0.69
22	3.61	273	5.34	31	1.38	277	2.89	52	0.86	278	2.12	204	0.50	480	1.04	364	0.41	640	0.79	524	0.37	800	0.71
24	3.66	283	5.38	33	1.42	287	2.93	54	0.88	288	2.15	206	0.51	500	1.06	366	0.41	660	0.81	526	0.37	820	0.73
26	3.68	293	5.41	35	1.45	297	2.96	56	0.91	298	2.18	208	0.51	520	1.07	368	0.42	680	0.83	528	0.38	840	0.74
28	3.76	303	5.46	37	1.48	307	2.99	58	0.93	308	2.21	210	0.52	540	1.09	370	0.42	700	0.84	530	0.39	860	0.76
30	3.85	313	5.47	42	1.55	317	3.01	63	0.99	318	2.23	215	0.54	560	1.11	375	0.43	720	0.86	532	0.39	880	0.77
32	3.92	323	5.52	47	1.62	327	3.04	68	1.04	328	2.25	220	0.55	580	1.14	380	0.44	740	0.87	540	0.40	900	0.78
34	4.00	333	5.57	52	1.69	337	3.06	73	1.09	338	2.28	225	0.57	600	1.17	385	0.45	760	0.88	545	0.41	920	0.80
36	4.07	343	5.62	57	1.75	347	3.10	78	1.14	348	2.29	230	0.59	620	1.19	390	0.46	780	0.90	550	0.41	940	0.81
38	4.13	353	5.67	62	1.80	357	3.13	83	1.19	358	2.31	235	0.60	640	1.18	395	0.47	800	0.91	555	0.42	960	0.82
40	4.19	363	5.72	67	1.86	367	3.18	88	1.23	368	2.33	240	0.62	660	1.17	400	0.48	820	0.92	560	0.43	980	0.83
42	4.25	373	5.78	72	1.91	377	3.22	93	1.27	378	2.34	245	0.63	680	1.19	405	0.49	840	0.93	565	0.44	000	0.84



Приложение 4

ПРОГРАММА

РАСЧЕТА КРИВЫХ МЕРЫ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

(МЕРАПЗ)

Введение

Алгоритм записан на языке АЛГОЛ-60.

Методика расчета и назначение программы

Кривые меры ползучести бетона рассчитываются по формуле:

$$C(t,\tau)=\varphi(\tau)-\psi(t)\frac{e^{\gamma\tau}-A_2}{e^{\gamma t}-A_2}-\Delta(\tau)e^{-\alpha(t-\tau)}, \qquad (1)$$

где $\psi(t)=\varphi(t)-\Delta(t)$,

$\alpha \gg \gamma > 0, \quad 0 \leq A_2 < 1,$

$$\varphi(\tau)=\varphi_0+\varphi_1 e^{-\beta_1\tau}+\varphi_2 e^{-\beta_2\tau}, \qquad (2)$$

$$\Delta(\tau)=\Delta_0+\Delta_1 e^{-\beta_3\tau}+\Delta_2 e^{-\beta_4\tau}, \qquad (3)$$

τ - возраст загружения, сут.;

t - возраст наблюдения, сут.;

$\varphi(\tau)$ - предельная деформация ползучести бетона при $t\to\infty$;

$\Delta(\tau)$ - быстронатекающая деформация;

$\gamma, A_2, \alpha, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ - коэффициенты, подбираемые по экспериментальным данным.

Программа позволяет рассчитывать кривые $C(t,\tau)$ для шести возрастов загружения τ *) до заданного возраста наблюдения t. Интервал Δt, с которым производится расчет, равен I сут.

---

*) Это ограничение связано только с печатью результатов.

Исходными данными задачи являются коэффициенты, входящие в формулы (1), (2) и (3).

Значение основных идентификаторов:

ТТ[1:N] - массив времени загружения τ ;

F0 = φ_0

F1 = φ_1

F2 = φ_2

Ф1 = f^1

Ф2 = f^2

Д0 = Δ_0

Д1 = Δ_1

Д2 = Δ_2

Ф3 = f^3

Ф4 = f^4

А = α

А2 = A_2

Г = γ

ТМ - максимальный текущий возраст, до которого рассчитываются кривые $C(t,\tau)$.

Пример

Кривые меры ползучести рассчитываются для бетона Ингури ГЭС. Исходные данные (в порядке ввода в машину):

```
P0 = I.65;
PI = I.5686;
P2 = 2.IOI;
Д0 = 0.42;
ДI = 0.989;
Д2 = 0.584I;
ФI = 0.I2I8;
Ф2 =0.0I45;
Ф3 = 0.I536;
Ф4 = 0.0I63;
 A = 5;
 Г = 0.0I;
A2 = 0.9;
 N = 6;
TM = I00;
TT = 3, 7, I4, 28, 90, I80;
```

Результаты расчета выдаются в виде таблицы.

```
_BEGIN _INTEGER I,J,N,TM;
_INTEGER TX,TCX;
_REAL CX,CCX;
_REAL F0,F1,F2,D0,D1,D2,Ф1,Ф2,Ф3,Ф4,A,Г,A2;
INPUT(F0,F1,F2,D0,D1,D2,Ф1,Ф2,Ф3,Ф4,A,Г,A2);
INPUT(N,TM);
_BEGIN _INTEGER _ARRAY T[1:N,0:TM],
TT[1:N],TC[1:N,1:TM/2];
_ARRAY C[1:N,1:TM/2],CC[1:N,1:TM/2],FT[1:N,1:TM],
DT[1:N,1:TM],F[1:N],D[1:N];INPUT(TT);
MARG(0,128,0,0,0,0);
OUTPUT('T','ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ    ');
OUTPUT('ZD.3D2B',F0,F1,F2,D0,D1,D2,Ф1,Ф2,Ф3,Ф4,A,Г,A2);
OUTPUT('2/');
_FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
T[I,0]:=TT[I];
_FOR J:=1_STEP 1_UNTIL TM_DO
T[I,J]:=T[I,J-1]+1_END ;
OUTPUT('T','ЧЕРЕЗ СТАРЕНИЯ    ');
_FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
F[I]:=F0+F1*EXP(-Ф1*TT[I])+F2*EXP(-Ф2*TT[I]);
D[I]:=D0+D1*EXP(-Ф3*TT[I])-D2*EXP(-Ф4*TT[I]);
OUTPUT('ZDD.3D2B',F[I],D[I])_END ;OUTPUT('2/');
OUTPUT('T','    ВРЕМЯ  ');
_FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO
OUTPUT('Z863DD',TT[I]);
OUTPUT('2/');
_FOR J:=1_STEP 1_UNTIL TM/2_DO _BEGIN
_FOR I:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
FT[I,J]:=F0+F1*EXP(-Ф1*T[I,J])+F2*EXP(-Ф2*T[I,J]);
DT[I,J]:=D0+D1*EXP(-Ф3*T[I,J])+D2*EXP(-Ф4*T[I,J]);
C[I,J]:=F[I]-(FT[I,J]-DT[I,J])*(EXP(Г*TT[I])-A2)/
(EXP(Г*T[I,J])-A2)-D[I]*EXP(-A*(T[I,J]-TT[I]));
TX:=T[I,J];
CX:=C[I,J];
TC[I,J]:=TM/2+T[I,J];
FT[I,J]:=F0+F1*EXP(-Ф1*TC[I,J])+F2*EXP(-Ф2*TC[I,J]);
DT[I,J]:=D0+D1*EXP(-Ф3*TC[I,J])+D2*EXP(-Ф4*TC[I,J]);
CC[I,J]:=F[I]-(FT[I,J]-DT[I,J])*(EXP(Г*TT[I])-A2)/
(EXP(Г*TC[I,J])-A2)-D[I]*EXP(-A*(TC[I,J]-TT[I]));
TCX:=TC[I,J];
CCX:=CC[I,J];
OUTPUT('Z83DD',TX,'ZDD.DD',CX,'Z83DD',TCX,'ZDD.DD',CCX)
_END ;
OUTPUT('/')_END
_END _END
```

СЧЕТ БЕЗ КОНТРОЛЯ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ 1,650 1,569 2,101 0,420 0,989 0,984 0,122 0,011 0,154 0,016 5,000 0,010 0,900

ФУНКЦИИ СТАРЕНИЯ 4,750 1,600 4,217 1,279 3,650 1,000 3,102 0,803 2,220 0,555 1,804 0,461

ВРЕМЯ	3				7				14				28				90				180			
4	1,87	54	4,44	8	1,49	58	3,84	15	1,14	65	3,10	29	0,89	79	2,54	91	0,58	141	1,52	181	0,47	231	1,08	
5	2,13	55	4,45	9	1,69	59	3,85	16	1,28	66	3,21	30	0,97	80	2,55	92	0,62	142	1,53	182	0,48	232	1,09	
6	2,34	56	4,45	10	1,86	60	3,86	17	1,41	67	3,22	31	1,05	81	2,56	93	0,65	143	1,54	183	0,50	233	1,10	
7	2,53	57	4,46	11	2,01	61	3,87	18	1,52	68	3,23	32	1,13	82	2,57	94	0,68	144	1,55	184	0,52	234	1,11	
8	2,69	58	4,47	12	2,15	62	3,88	19	1,63	69	3,24	33	1,19	83	2,58	95	0,71	145	1,56	185	0,54	235	1,11	
9	2,84	59	4,48	13	2,28	63	3,89	20	1,73	70	3,24	34	1,26	84	2,59	96	0,73	146	1,57	186	0,55	236	1,12	
10	2,97	60	4,48	14	2,39	64	3,90	21	1,81	71	3,25	35	1,30	85	2,60	97	0,76	147	1,57	187	0,57	237	1,13	
11	3,08	61	4,49	15	2,49	65	3,90	22	1,90	72	3,26	36	1,38	86	2,61	98	0,79	148	1,58	188	0,58	238	1,14	
12	3,19	62	4,50	16	2,59	66	3,91	23	1,98	73	3,27	37	1,44	87	2,62	99	0,81	149	1,59	189	0,60	239	1,14	
13	3,28	63	4,50	17	2,67	67	3,92	24	2,05	74	3,28	38	1,49	88	2,63	100	0,84	150	1,60	190	0,61	240	1,15	
14	3,37	64	4,51	18	2,75	68	3,92	25	2,11	75	3,29	39	1,54	89	2,64	101	0,87	151	1,61	191	0,63	241	1,16	
15	3,45	65	4,51	19	2,82	69	3,93	26	2,18	76	3,29	40	1,59	90	2,65	102	0,89	152	1,62	192	0,64	242	1,17	
16	3,52	66	4,52	20	2,89	70	3,94	27	2,24	77	3,30	41	1,64	91	2,66	103	0,91	153	1,63	193	0,66	243	1,17	
17	3,58	67	4,52	21	2,95	71	3,94	28	2,29	78	3,31	42	1,68	92	2,67	104	0,94	154	1,64	194	0,67	244	1,18	
18	3,64	68	4,53	22	3,01	72	3,95	29	2,34	79	3,32	43	1,72	93	2,68	105	0,96	155	1,64	195	0,69	245	1,19	
19	3,70	69	4,53	23	3,06	73	3,96	30	2,39	80	3,32	44	1,77	94	2,69	106	0,98	156	1,65	196	0,70	246	1,20	
20	3,75	70	4,54	24	3,11	74	3,96	31	2,44	81	3,33	45	1,80	95	2,69	107	1,00	157	1,66	197	0,71	247	1,20	
21	3,79	71	4,54	25	3,16	75	3,97	32	2,48	82	3,34	46	1,84	96	2,70	108	1,02	158	1,67	198	0,73	248	1,21	
22	3,84	72	4,55	26	3,20	76	3,97	33	2,52	83	3,34	47	1,88	97	2,71	109	1,04	159	1,68	199	0,74	249	1,22	
23	3,88	73	4,55	27	3,24	77	3,98	34	2,56	84	3,35	48	1,91	98	2,71	110	1,06	160	1,68	200	0,75	250	1,22	
24	3,91	74	4,56	28	3,28	78	3,98	35	2,60	85	3,36	49	1,94	99	2,72	111	1,08	161	1,69	201	0,77	251	1,23	
25	3,95	75	4,56	29	3,32	79	3,99	36	2,63	86	3,36	50	1,98	100	2,73	112	1,10	162	1,70	202	0,78	252	1,24	
26	3,98	76	4,56	30	3,35	80	3,99	37	2,67	87	3,37	51	2,01	101	2,73	113	1,12	163	1,71	203	0,79	253	1,24	
27	4,01	77	4,57	31	3,38	81	4,00	38	2,70	88	3,37	52	2,04	102	2,74	114	1,14	164	1,71	204	0,80	254	1,25	
28	4,04	78	4,57	32	3,41	82	4,00	39	2,73	89	3,38	53	2,06	103	2,75	115	1,16	165	1,72	205	0,82	255	1,25	
29	4,07	79	4,58	33	3,44	83	4,01	40	2,76	90	3,38	54	2,09	104	2,75	116	1,18	166	1,73	206	0,83	256	1,26	
30	4,09	80	4,58	34	3,47	84	4,01	41	2,78	91	3,39	55	2,12	105	2,76	117	1,19	167	1,73	207	0,84	257	1,27	
31	4,12	81	4,59	35	3,49	85	4,01	42	2,81	92	3,39	56	2,14	106	2,77	118	1,21	168	1,74	208	0,85	258	1,27	
32	4,14	82	4,59	36	3,52	86	4,02	43	2,84	93	3,40	57	2,17	107	2,77	119	1,23	169	1,75	209	0,86	259	1,28	
33	4,16	83	4,59	37	3,54	87	4,02	44	2,86	94	3,40	58	2,19	108	2,78	120	1,24	170	1,75	210	0,88	260	1,28	
34	4,18	84	4,59	38	3,56	88	4,03	45	2,88	95	3,41	59	2,21	109	2,78	121	1,26	171	1,76	211	0,89	261	1,29	
35	4,20	85	4,60	39	3,58	89	4,03	46	2,90	96	3,41	60	2,23	110	2,79	122	1,27	172	1,76	212	0,90	262	1,30	
36	4,22	86	4,60	40	3,60	90	4,03	47	2,93	97	3,42	61	2,25	111	2,79	123	1,29	173	1,77	213	0,91	263	1,30	
37	4,24	87	4,60	41	3,62	91	4,04	48	2,95	98	3,42	62	2,28	112	2,80	124	1,30	174	1,78	214	0,92	264	1,31	
38	4,25	88	4,61	42	3,64	92	4,04	49	2,97	99	3,43	63	2,29	113	2,80	125	1,32	175	1,78	215	0,93	265	1,31	
39	4,27	89	4,61	43	3,66	93	4,04	50	2,98	100	3,43	64	2,31	114	2,81	126	1,33	176	1,79	216	0,94	266	1,32	
40	4,28	90	4,61	44	3,67	94	4,05	51	3,00	101	3,43	65	2,33	115	2,81	127	1,35	177	1,79	217	0,95	267	1,32	
41	4,30	91	4,61	45	3,69	95	4,05	52	3,02	102	3,44	66	2,35	116	2,82	128	1,36	178	1,80	218	0,96	268	1,33	
42	4,31	92	4,62	46	3,70	96	4,05	53	3,04	103	3,44	67	2,37	117	2,82	129	1,37	179	1,80	219	0,97	269	1,33	
43	4,33	93	4,62	47	3,72	97	4,06	54	3,05	104	3,44	68	2,38	118	2,83	130	1,39	180	1,81	220	0,98	270	1,34	
44	4,34	94	4,62	48	3,73	98	4,06	55	3,07	105	3,45	69	2,40	119	2,83	131	1,40	181	1,82	221	0,99	271	1,34	
45	4,35	95	4,62	49	3,75	99	4,06	56	3,08	106	3,45	70	2,42	120	2,84	132	1,41	182	1,82	222	1,00	272	1,35	
46	4,36	96	4,63	50	3,76	100	4,06	57	3,10	107	3,45	71	2,43	121	2,84	133	1,42	183	1,83	223	1,01	273	1,35	
47	4,37	97	4,63	51	3,77	101	4,07	58	3,11	108	3,46	72	2,45	122	2,85	134	1,44	184	1,83	224	1,02	274	1,36	
48	4,38	98	4,63	52	3,78	102	4,07	59	3,12	109	3,46	73	2,46	123	2,85	135	1,45	185	1,84	225	1,03	275	1,36	
49	4,39	99	4,63	53	3,79	103	4,07	60	3,14	110	3,46	74	2,47	124	2,85	136	1,46	186	1,84	226	1,04	276	1,37	
50	4,40	100	4,63	54	3,80	104	4,07	61	3,15	111	3,47	75	2,48	125	2,86	137	1,47	187	1,85	227	1,05	277	1,37	
51	4,41	101	4,64	55	3,82	105	4,08	62	3,16	112	3,47	76	2,50	126	2,86	138	1,48	188	1,85	228	1,05	278	1,38	
52	4,42	102	4,64	56	3,83	106	4,08	63	3,17	113	3,47	77	2,51	127	2,86	139	1,49	189	1,85	229	1,06	279	1,38	
53	4,43	103	4,64	57	3,84	107	4,08	64	3,18	114	3,48	78	2,53	128	2,87	140	1,50	190	1,86	230	1,07	280	1,39	

Приложение 5

ПРОГРАММА

РАСЧЕТА КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ

(РЕЛАКС)

1. ВВЕДЕНИЕ

Для снижения трудозатрат при расчетном определении коэффициентов релаксации напряжений в бетоне $Kp(t,\tau)$ разработана программа расчета их на ЭВМ БЭСМ-6.

Определение коэффициентов релаксации выполняется путем перехода от значений меры ползучести $C(t,\tau)$ и модуля упругости $E(\tau)$ с применением линейной теории упруго-ползучего тела.

Методика расчета коэффициентов релаксации рассмотрена применительно к случаю учета ползучести бетона путем пересчета напряжений по упруго-мгновенной задаче в напряжения с учетом длительности воздействий.

Программа составлена в отделе бетонных сооружений зав. группой Соловьевой Л.Д. на языке АЛГОЛ-60.

2. АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ

Расчет значений $Kp(t;\tau)$ выполняется численным методом по выражению [1]:

$$Kp(t_к,\tau_1)=Kp(t_{к-1},\tau_1)-\frac{C(t_к,\tau_1)+\sum_{0}^{к-2}\delta(t_к,\xi_i^{i+1})[Kp(t_{i+1},\tau_1)-Kp(t_i,\tau_1)]}{\delta(t_к,\xi_{к-1}^{к})},\quad(1)$$

где

$$\delta(t_к,\xi_i^{i+1})=\delta\left(t_к,\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right)=\frac{1}{E\left(\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right)}+C\left(t_к,\frac{t_{i+1}+t_i}{2}\right),$$

$t_к$ – возраст бетона на момент отыскания напряжения;

τ_1 – фиксированное значение возраста бетона в момент изменения напряжений; суммирование ведется по i от 0 до К-2;

$\delta(t,\tau)$ – полные удельные деформации бетона;

$C(t,\tau)$ – мера ползучести;

$E(\tau)$ – модуль упругости;

t – возраст бетона на рассматриваемый момент времени;

τ – возраст бетона в начальный момент времени, начиная с которого действует рассматриваемое приращение напряжений.

Экспериментальные данные $E(\tau)$ и $C(t,\tau)$ для введения в расчеты аппроксимируются аналитическими выражениями. Для модуля упругости используется зависимость:

$$E(\tau) = E_0(1 - a\,e^{-m\tau} - b\,e^{-n\tau}), \qquad (2)$$

где τ – возраст бетона;

E_0 – предельное значение модуля упругости;

a, b, m, n – эмпирические коэффициенты.

для меры ползучести – формула С.В.Александровского [2]:

$$C(t,\tau) = \varphi(\tau) - \psi(t)\frac{e^{\gamma\tau} - A_2}{e^{\gamma t} - A_2} - \Delta(\tau)e^{-\alpha(t-\tau)} \qquad (3)$$

где $$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-\beta_1\tau} + \varphi_2 e^{-\beta_2\tau} \qquad (4)$$

$$\Delta(\tau) = \Delta_0 + \Delta_1 e^{-\beta_3\tau} + \Delta_2 e^{-\beta_4\tau} \qquad (5)$$

$$\psi(t) = \varphi(t) - \Delta(t) \qquad (6)$$

$\varphi(\tau), \Delta(\tau), \psi(t)$ – функции старения, убывающие с ростом τ;

φ_0, Δ_0 – предельные значения $\varphi(\tau)$ и $\Delta(\tau)$;

$\beta_1, \beta_2, \varphi_1, \varphi_2, \Delta_1, \Delta_2, \alpha, A_2, \gamma$ – эмпирические коэффициенты.

Расчет кривых $Kp(t,\tau)$ для бетона старого возраста выполняется по приближенной формуле [2]:

$$H^*(t) = 1 - \frac{A_1}{\rho_1}(1 - e^{-\rho_1 t}) - \frac{A_2}{\rho_2}(1 - e^{-\rho_2 t}), \qquad (7)$$

где $$A_1 = \frac{E_0}{\rho_1 - \rho_2}\left\{(\gamma\psi_0 + \alpha\Delta_0)\left[E_0(\gamma\psi_0 + \alpha\Delta_0) - \rho_2\right] + \alpha^2\Delta_0 + \gamma^2\psi_0\right\}, \qquad (8)$$

$$A_2 = E_0(\gamma\psi_0 + \alpha\Delta_0) - A_1, \qquad (9)$$

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2}\left\{\alpha + \gamma + E_0(\gamma\psi_0 + \alpha\Delta_0) \pm \right.$$
$$\left. \pm \sqrt{E_0^2(\gamma\psi_0 + \alpha\Delta_0)^2 + (\alpha - \gamma)^2 - 2E_0(\gamma\psi_0 - \alpha\Delta_0)(\alpha - \gamma)}\right\} \qquad (10)$$

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

3.1. Исходная информация

F0, F1, F2 – значения $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ по (4);
D0, D1, D2 – значения $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ по (5);
$\phi 1, \ldots, \phi 4$ – значения $f_1, \ldots, f_4$ по (4) и (5);
E0, AA, B, MM, NN – соответственно E_0, α, β, m, n по (3);
N – количество расчетных точек на кривой релаксации;
M – количество расчетных кривых релаксации напряжений;
DT – массив интервалов времени, через которые выдаются значения $Kp(t, \tau)$;
TT0 – массив значений τ (соответствует числу M).

3.2. Вывод информации

Может быть посчитано и выдано на печать неограниченное количество кривых релаксации напряжений $Kp(t, \tau)$.

Для каждого значения TAU выдается массив расчетных моментов времени, на которые определяются коэффициенты релаксации, и их значения..

В конце аналогично выдается значения $Kp(t)$ для стареющего бетона по приближенной формуле (7).

```
--- 14.11.83 ---------- 001 ---------- РЕЛАКС --

0001  _REAL S,R,FF,DD,C,C1,CC,D1,D2,F0,F1,F2,M1,M2,M3,M4,B,T
*0001 T,A,A2;
0002  F,E0,AA,M,NN,A4,B5,P1,P2,P3,P4,FT,OUT;
0003  INPUT(F0,F1,F2,DD,D1,D2,M1,M2,M3,M4,EE,A4,N,MM,NN,T,A2
*0003 ,A);
0004  INPUT(N,M);
0005  _BEGIN _ARRAY HH[0:N],DT[1:N],TT0[1:M],T[0:N];
0006  INPUT(DT,TT);
0007  WAPG(0,129,0,0,0,0);
0008  HH(0):=1; _FOR Z:=1_STEP 1_UNTIL M_DO _BEGIN
0009  J:=0;T(J):=TT0[Z];
0010  OUTPUT('200','T',,'TAG= ','Z30',TT0(Z),'T',' ET','(2/')
*0010 ;
0011  _FOR J:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
0012  T(J):=T(J-1)+DT(J)_END
0013  J:=1;TT:=(T(J)+T(J-1))/2;
0014  E:=E0*(1-AA*EXP(-MM*TT)-B*EXP(-NN*TT));
0015  FF:=F0+F1*EXP(-M1*TT)+F2*EXP(-M2*TT);
0016  DD:=D0+D1*EXP(-M3*TT)+D2*EXP(-M4*TT);
0017  FT:=F0+F1*EXP(-M1*T(J))+F2*EXP(-M2*T(J));
0018  DDT:=D0+D1*EXP(-M3*T(J))+D2*EXP(-M4*T(J));
0019  C:=FF-(FT-DDT)*(EXP(T*TT)-A2)/(EXP(T*T(J))-A2)-DD*
0020  EXP(-A*(T(J)-TT));
0021  C:=1/E*C;
0022  FF:=F0+F1*EXP(-M1*TT0(Z))+F2*EXP(-M2*TT0(Z));
0023  DD:=D0+D1*EXP(-M3*TT0(Z))+D2*EXP(-M4*TT0(Z));
0024  C1:=FF-(FT-OUT)*(EXP(T*TT0(Z))-A2)/
0025  (EXP(T*T(J))-A2)-DD*EXP(-A*(T(J)-TT0(Z)));
0026  HH(J):=HH(J-1)-C1/6;
0027  _FOR J:=2_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
0028  TT:=(T(J)+T(J-1))/2;
0029  E:=E0*(1-AA*EXP(-MM*TT)-B*EXP(-NN*TT));
0030  FF:=F0+F1*EXP(-M1*TT)+F2*EXP(-M2*TT);
0031  DD:=D0+D1*EXP(-M3*TT)+D2*EXP(-M4*TT);
0032  FT:=F0+F1*EXP(-M1*T(J))+F2*EXP(-M2*T(J));
0033  DDT:=D0+D1*EXP(-M3*T(J))+D2*EXP(-M4*T(J));
0034  C:=FF-(FT-DDT)*(EXP(T*TT)-A2)/(EXP(T*T(J))-A2)-DD*
0035  EXP(-A*(T(J)-TT));
0036  S:=1/E*C;
0037  FF:=F0+F1*EXP(-M1*TT0(Z))+F2*EXP(-M2*TT0(Z));
0038  DD:=D0+D1*EXP(-M3*TT0(Z))+D2*EXP(-M4*TT0(Z));
0039  C1:=FF-(FT-OUT)*(EXP(T*TT0(Z))-A2)/(EXP(T*T(J))-A2)
0040                    -DD*EXP(-A*(T(J)-TT0(Z)));
0041  S:=S; FOR K:=1_STEP 1_UNTIL J-1_DO _BEGIN
0042  TT:=(T(K)+T(K-1))/2;
0043  E:=E0*(1-AA*EXP(-MM*TT)-B*(EXP(-NN*TT)));
0044  FF:=F0+F1*EXP(-M1*TT)+F2*EXP(-M2*TT);
0045  DD:=D0+D1*EXP(-M3*TT)+D2*EXP(-M4*TT);
0046  C:=FF-(FT-DDT)*(EXP(T*TT)-A2)/(EXP(T*T(J))-A2)-DD*
0047  EXP(-A*(T(J)-TT));
0048  S:=1/E*C;
0049  S:=S+(HH(K)-HH(K-1))*S _END ;
0050  HH(J):=HH(J-1)-(C1+S)/6 _END ;
0051  OUTPUT('T','(TAU=DT)',,'Z40,4D20',T,'2/','T',
0052  'HD=',MOMENT PEЛАКСАЦИИ','/',,'Z40,4D20',HH,'2/');
0053  _END ;
0054  J:=N;T(J):=0;
0055  _FOR J:=N-1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
0056  T(J):=T(J-1)+DT(J) _END ;
0057  FF:=F0+F1*(A*EXP(-E0*(T-T0)+B*EXP(-((EE*2*(T-(F0-DD)

--- 14.11.83 ---------- 002 ---------- РЕЛАКС --

0058  +A*DD)**2+(A-F)**2-2*EE*(F*(F0-DD)-E*DD)*(A-F)))**0.5));
0059  PZ:=0.5*((B*F+E0*(F*(F0-DD)+E*DD))-((E0**2*(F*(F0-DD)
0060  +A*DD)**2+(A-F)**2-2*EE*(F*(F0-DD)-E*DD)*(A-F)))**0.5));
0061  P3:=(E0/(P1-P2))*((F*(F0-DD)+A*DD)-(E0*(F*(F0-DD)
0062  +A*DD)-PZ)*A1/2*DD+F*2*(F0-DD)));
0063  P4:=E0*(1*(F0-DD)*E*E0)-P3;
0064  _FOR J:=1_STEP 1_UNTIL N_DO _BEGIN
0065  HH(J):=P1-P3*(1-EXP(-P1*T(J)))*1/P1-P4
0066  *(1-EXP(-P2*T(J)))*1/P2_END ;
0067  OUTPUT('<ФОРМАТ','Т','=ВЕТОР ОТКРОГО ВЫЗРАСТАЮЩЕГО, ФОРМА
0068  С ВЫРАЖЕНИЕМ ОБРАТНОГО')','2/');
0069  OUTPUT('T',,'(DT)',,'/',,'Z40.4D20',,'Z','2/','T',
0070  'ВЕКТОРА ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ','/', 'Z40.4D20',,'HH','2/');
0071  _END !_END
```

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Вычислить значения коэффициентов релаксации напряжений в бетоне $Kp(t,\tau)$ для возрастов загружения бетона 1, 7, 14, 28 и 180 суток.

Экспериментальные значения меры ползучести $C(t,\tau)$ описываются выражениями (3-6), в которых:

$\gamma=0.001$, $A_2=0.95$, $\alpha=1.5$, $\varphi_0=1.2$, $\varphi_1=2.0354$, $\varphi_2=11.9618$, $\Delta_0=0.3$, $\Delta_1=0.2265$, $\Delta_2=10.8166$, $f_1=0.0109$, $f_2=0.4805$, $f_3=0.0044$, $f_4=0.4782$,

а значения модуля упругости выражением (2) при

$E_0=0.404$, $a=0.5035$, $b=0.2965$, $m=0.0591$, $n=0.751$.

Интервалы, через которые выдаются значения $Kp(t,\tau)$ принимаем переменные: 0.25 суток после приложения нагрузки и далее постепенно возрастают до 50 суток в более позднем возрасте. Всего расчетных точек 46 (массив DT).

На перфокартах исходные данные пробиваются в порядке их ввода в программе:

1) данные, характеризующие меру ползучести и модуль упругости:

1.2; 2.0354; 11.9618; 0.3; 0.2265; 10.8166; 0.0109; 0.4805; 0.0044; 0.4782; 0.404; 0.5035; 0.2965; 0.0591; 0.751; 0.001; 0. 95; 1.5;

2) 46; 5;

3) Массив T

0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1 ,1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, 20,20,20,20,20, 50,50, 50, 50, 50,50;

4) Массив TTO

1, 7, 14, 28, 180;

Результаты расчетов приведены ниже.

TAU= 14 CYT

(TAU+DT)

14.0000	14.4500	14.5000	14.7500	15.0000	15.2500	15.5000	15.7500	16.0000	16.5000	17.0000
17.5000	18.0000	18.5000	19.0000	20.0000	21.0000	22.0000	23.0000	24.0000	26.0000	28.0000
30.0000	32.0000	34.0000	39.0000	44.0000	49.0000	54.0000	59.0000	64.0000	74.0000	84.0000
94.0000	104.0000	114.0000	124.0000	154.0000	174.0000	194.0000	214.0000	264.0000	314.0000	364.0000
414.0000	464.0000	514.0000								

КОЭФФИЦИЕНТ РЕЛАКСАЦИИ

1.0000	0.9432	0.9086	0.8838	0.8667	0.8545	0.8455	0.8386	0.8331	0.8245	0.8175
0.8112	0.8059	0.7993	0.7742	0.7635	0.7552	0.7483	0.7538	0.7446	0.7274	0.7113
0.6963	0.6825	0.6696	0.6415	0.6176	0.5976	0.5807	0.5563	0.5540	0.5343	0.5195
0.5080	0.4991	0.4921	0.4818	0.4748	0.4700	0.4665	0.4539	0.4596	0.4572	0.4556
0.4546	0.4528	0.4532								

TAU= 28 CYT

(TAU+DT)

28.0000	28.2500	28.5000	28.7500	29.0000	29.2500	29.5000	29.7500	30.0000	30.5000	31.0000
31.5000	32.0000	32.5000	33.0000	34.0000	35.0000	36.0000	37.0000	38.0000	40.0000	42.0000
44.0000	48.0000	48.0000	53.0000	58.0000	63.0000	68.0000	73.0000	78.0000	88.0000	98.0000
108.0000	118.0000	128.0000	148.0000	168.0000	188.0000	208.0000	228.0000	278.0000	328.0000	378.0000
428.0000	478.0000	528.0000								

КОЭФФИЦИЕНТ РЕЛАКСАЦИИ

1.0000	0.9408	0.9018	0.8757	0.8561	0.8457	0.8369	0.8302	0.8251	0.8171	0.8109
0.8053	0.8002	0.7952	0.7904	0.7811	0.7720	0.7634	0.7550	0.7469	0.7317	0.7174
0.7041	0.6917	0.6801	0.6545	0.6325	0.6138	0.5976	0.5837	0.5716	0.5519	0.5366
0.5246	0.5150	0.5074	0.4958	0.4873	0.4821	0.4778	0.4746	0.4693	0.4662	0.4641
0.4627	0.4616	0.4607								

TAU= 180 CYT

180.0000	180.2500	180.5000	180.7500	181.0000	181.2500	181.5000	181.7500	182.0000	182.5000	183.0000
183.5000	184.0000	184.5000	185.0000	186.0000	187.0000	188.0000	189.0000	190.0000	192.0000	194.0000
196.0000	198.0000	200.0000	205.0000	210.0000	215.0000	220.0000	225.0000	230.0000	240.0000	250.0000
260.0000	270.0000	280.0000	300.0000	320.0000	340.0000	360.0000	380.0000	430.0000	480.0000	530.0000
580.0000	630.0000	680.0000								

КОЭФФИЦИЕНТ РЕЛАКСАЦИИ

1.0000	0.9496	0.9171	0.8958	0.8818	0.8725	0.8664	0.8622	0.8593	0.8556	0.8535
0.8510	0.8506	0.8495	0.8483	0.8461	0.8440	0.8419	0.8398	0.8378	0.8338	0.8300
0.8262	0.8226	0.8190	0.8106	0.8047	0.7994	0.7885	0.7820	0.7760	0.7650	0.7552
0.7465	0.7386	0.7316	0.7195	0.7094	0.7009	0.6937	0.6875	0.6750	0.6656	0.6583
0.6525	0.6477	0.6437								

БЕТОН СТАРОГО ВОЗРАСТА(ПРИБЛИЖ. Ф-ЛА С.В.АЛЕКСАНДРОВСКОГО)

(DT)

0.0000	0.2500	0.5000	0.7500	1.0000	1.2500	1.5000	1.7500	2.0000	2.5000	3.0000
3.5000	4.0000	4.5000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000	12.0000	14.0000
16.0000	18.0000	20.0000	25.0000	30.0000	35.0000	40.0000	45.0000	50.0000	60.0000	70.0000
80.0000	90.0000	100.0000	140.0000	180.0000	220.0000	260.0000	300.0000	350.0000	400.0000	450.0000
400.0000	450.0000	500.0000								

КОЭФФИЦИЕНТ РЕЛАКСАЦИИ

1.0000	0.9628	0.9384	0.9223	0.9117	0.9047	0.9001	0.8971	0.8931	0.8928	0.8917
0.8912	0.8908	0.8906	0.8904	0.8901	0.8898	0.8896	0.8893	0.8890	0.8886	0.8878
0.8873	0.8867	0.8862	0.8847	0.8834	0.8820	0.8806	0.8792	0.8779	0.8751	0.8725
0.8699	0.8673	0.8648	0.8598	0.8549	0.8502	0.8455	0.8410	0.8363	0.8270	0.8180
0.8021	0.7938	0.7861								

Приложение 6

ПРОГРАММА

РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ (НАПР)

Введение

Алгоритм записан на языке АЛГОЛ-60.

Методика расчета и назначение программы

Методика расчета основана на теории упруго-ползучего тела и позволяет одновременно учитывать переменные во времени модуль упругости и ползучесть бетона.

Программа определяет на любой момент времени напряжения по заданным деформациям и известным свойствам бетона.

Формула для расчета напряжений при начальном условии $\sigma^*(\tau_1)=0$ имеет вид:

$$\sigma^*(t_n)=\sigma^*(t_{n-1})+\frac{1}{\delta(t_n,\xi)^{n}_{n-1}}\left\{\varepsilon(t_n)-\sum_{i=1}^{n-1}\Delta\sigma_i^*\,\delta(t_n,\xi)^{i}_{i-1}\right\}, \qquad (1)$$

где $\Delta\sigma_i^*=\sigma(t_i)-\sigma(t_{i-1})$;

$i = 1,2,3,\ldots(n-1)$ - последовательный ряд предшествующих моментов времени;

$\sigma^*(t_{n-1})$ - напряжения с учетом ползучести бетона на предшествующий момент времени;

$\varepsilon(t_n)$ - полная деформация в момент времени t_n;

$\xi = \frac{t_i + t_{i-1}}{2}$;

$\delta(t_n,\xi)^{i}_{i-1}$ - полные удельные (продольные) деформации бетона в возрасте t_n при загружении его в возрасте ξ.

Полные удельные деформации бетона определяются выражением:

$$\delta(t,\tau)=\frac{1}{E(\tau)}+C(t,\tau), \qquad (2)$$

где $E(\tau)$ - модуль упруго-мгновенных деформации;

$C(t,\tau)$ - удельные деформации ползучести.

Зависимость модуля упругости бетона от времени имеет вид:

$$E(\tau) = E_0(1 - ae^{-m\tau} - be^{-n\tau}), \qquad (3)$$

где E_0 - модуль упругости старого бетона,

a, b, m, n - коэффициенты, подбираемые по экспериментальным данным.

Мера ползучести бетона описывается формулой:

$$C(t,\tau) = \varphi(\tau) - \psi(t)\frac{e^{\gamma\tau} - A_2}{e^{\gamma t} - A_2} - \Delta(\tau)e^{-\alpha(t-\tau)}, \qquad (4)$$

где
$$\psi(t) = \varphi(t) - \Delta(t), \qquad (5)$$

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 + \varphi_1 e^{-f_1\tau} + \varphi_2 e^{-f_2\tau}, \qquad (6)$$

$$\Delta(\tau) = \Delta_0 + \Delta_1 e^{-f_3\tau} + \Delta_2 e^{-f_4\tau}, \qquad (7)$$

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, f_1, f_2, f_3, f_4$ - коэффициенты, подбираемые по экспериментальным данным.

Исходными данными являются коэффициенты, входящие в формулы (3, 4, 6, 7), массив времени, для которого задаются деформации и вычисляются напряжения, а также массив деформации.

Значение основных идентификаторов:

T[-1:N] - массив времени ;

EE[0:N] - массив деформаций;

Д0 = Δ_0	Ф1 = f_1	M = m
Д1 = Δ_1	Ф2 = f_2	NN = n
Д2 = Δ_2	Ф3 = f_3	E0 = E_0
F0 = φ_0	Ф4 = f_4	Г = γ
F1 = φ_1	AA = a	A2 = A_2
F2 = φ_2	B = b	A = α

Пример

Расчет производится для бетона Токтогульской ГЭС. Экспериментальный блок размером 50х50х210 см.

Исходные данные (в порядке ввода в машину)

Д0 = 0.95;)

Д1 = 1.647;

Д2 = 0.289;

F0 = 1.95;

F1 = 5.83;

F2 = 1.12;

Ф1 = 0.2855;

Ф2 = 0.01487;

Ф3 = 0.33;

Ф4 = 0.0624;

AA= 0.395;

B = 0.305;

M = 0,155;

NN= 0.01032;

E0 = 0.48;

Г = 0.02;

A2 = 0.9;

A = 5;

N= 25;

T = , 0.75, 1.5, 2.25, 3,3.75, 4.6, 5.25, 6, 6.75, 7.5, 8.25, 10, 11.75, 13.5, 15.25, 17, 18.75, 20.5, 22.25, 24, 25.75, 29.75, 33.75, 37.75, , 41.75, 45.75;

EE = , 0, 73.5, 63, 46.5, 37.5, 29.5, 24.5, 22.25, 21.25, 20.5, 19.75, 18, 16, 14, 12.75, 11, 9.25, 7, 4.5, 0.75, -3, -7.25, -8.75, -9.75, -10, -10;

СЧЕТ БЕЗ КОНТРОЛЯ

```
 1.  BEGIN INTEGER N,K,I; REAL S,E,FF,ДД,Г,Д0,
 2.  Д1,Д2,F0,F1,F2,S,TT,ф1,ф2,ф3,ф4,A,A2,Г,T,ОДТ;
 3.  REAL E0,M,B,NN,AA,ББ;
 4.  INPUT(Д0,Д1,Д2,F0,F1,
 5.  F2,ф1,ф2,ф3,ф4,AA,B,M,NN,E0,Г,A2,A);
 6.  INPUT(N); BEGIN ARRAY CC[0:N],T[0:N],ЕЕ[0:N];
 7.  INPUT(T,EE);
 8.  CC[0]:=0;
 9.  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL N DO BEGIN
10.  TT:=(T[I]+T[I-1])/2;
11.  E:=E0×(1-AA×EXP(-M×TT)-B×EXP(-NN×TT));
12.  ГГ:=F0+F1×EXP(-ф1×TT)+F2×EXP(-ф2×TT);
13.  ДД:=Д0+Д1×EXP(-ф3×TT)+Д2×EXP(-ф4×TT);
14.  FT:=F0+F1×EXP(-ф1×T[I])+F2×EXP(-ф2×T[I]);
15.  ОДТ:=Д0+Д1×EXP(-ф3×T[I])+Д2×EXP(-ф4×T[I]);
16.  C:=FF-(FT-ОДТ)×(EXP(Г×TT)-A2)/(EXP(Г×T[I])
17.  -A2)-ДД×EXP(-A×(T[I]-TT));
18.  B:=1/E+C;
19.  S:=0; FOR K:=1 STEP 1 UNTIL I-1 DO BEGIN
20.  TT:=(T[K]+T[K-1])/2;
21.  E:=E0×(1-AA×EXP(-M×TT)-B×EXP(-NN×TT));
22.  ГГ:=F0+F1×EXP(-ф1×TT)+F2×EXP(-ф2×TT);
23.  ДД:=Д0+Д1×EXP(-ф3×TT)+Д2×EXP(-ф4×TT);
24.  FT:=F0+F1×EXP(-ф1×T[I])+F2×EXP(-ф2×T[I]);
25.  ОДТ:=Д0+Д1×EXP(-ф3×T[I])+Д2×EXP(-ф4×T[I]);
26.  C:=FF-(FT-ОДТ)×(EXP(Г×TT)-A2)/(EXP(Г×T[I])
27.  -A2)-ДД×EXP(-A×(T[I]-TT));
28.  B[I]:=1/E+C; S:=S+(CC[K]+CC[K-1])×ББ; END ;
29.  CC[I]:=CC[I-1]+1/B×(EE[I]-S) END ;
30.  OUTPUT('208','T','В Р Е М Я ','2/','Z8-30.402B',T);OUTPUT('2/','208','T','Д Е Ф О Р М А Ц И И ',
31.  '2/','Z8-30.402B',FS);
32.  OUTPUT('2/','208','T','Н А П Р Я Ж Е Н И Я',
33.  '2/','Z8-30.402B',CC)
34.  END END
```

В Р Е М Я

0,7500	1,5000	2,2500	3,0000	3,7500	4,6000	5,4500	6,0000	6,7500
7,5000	8,2500	10,0000	11,7500	13,5000	15,2500	17,0000	18,7500	20,5000
22,2500	24,0000	25,7500	29,7500	33,7500	37,7500	41,7500	46,0000	

Д Е Ф О Р М А Ц И И

0,0000	73,5000	63,0000	46,5000	37,5000	29,5000	24,0000	22,2500	21,2500
20,5000	19,7500	18,0000	16,0000	14,0000	12,7500	11,0000	9,2500	7,0000
4,5000	0,7500	-3,0000	-7,2500	-8,7500	-9,7500	-10,0000	-10,0000	

Н А П Р Я Ж Е Н И Я

0,0000	0,9204	0,9846	1,1002	1,6225	0,3259	-0,4752	-0,7166	-0,7714
-0,8099	-0,8711	-1,0677	-1,3772	-1,7199	-1,9057	-2,2342	-2,5726	-3,0448
-3,5824	-4,4431	-5,2937	-6,0136	-6,2026	-6,2321	-6,1035	-5,9391	

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Предисловие	3
Перечень условных обозначений	4
1. Общие указания	6
2. Основные расчетные положения	7
3. Определение характеристик упругости и ползучести	10
4. Программы для учета ползучести бетона в практике инженерных расчетов на ЭВМ	17
Список использованных источников	23
Приложения	26

50

Зак. 587. Тир. 200.

Типография ин-та «Гидропроект».

gost.e-ecolog.ru