ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В.М. БОНДАРЕНКО, *академик РААСН, д-р техн. наук, профессор*;
Е.А. ЛАРИОНОВ, *д-р техн. наук, профессор*
Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства, 111024, Москва, ул. Старообрядческая, 30/32, migal-64@mail.ru

Реологические уравнения состояния материалов выводятся на основе принципа наложении частичных деформаций ползучести при условии их независимости от величины и длительности остальных приращений напряжения. Этот принцип впервые применил Больцман. Структурные повреждения порождались зависимостью этих деформаций от всех частичных приращений напряжения. На основе модификации принципа получено квазилинейное уравнение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, принцип, наложение, ползучесть, деформации

1. Материал элемента конструкции (бетон, арматура, дерево) рассматривается как неравновесная термодинамическая система, механическое состояние которой при одноосном нагружении описывается уровнями деформаций $\eta(\tau)=\varepsilon(\tau)/\varepsilon_R(\tau)$ и напряжений $S(\tau)=\sigma(\tau)/R(\tau)$. Аналогами этих параметров при статическом подходе являются ε и σ [1].

Элемент конструкции представляется объединением волокон (слоёв, звеньев) с статистически распределёнными прочностями $\sigma_i^*(\tau)$ и с одинаковым модулем упруго-пластических деформаций $E(t, \tau)$.

Возрастающее на нормальное сечение усилие $N(\tau)$ влечёт разрушение части волокон и сумму площадей нормальных сечений всех целых в начальный t_0 и текущий τ моменты времени волокон обозначим $A(t_0)$ и $A(\tau)$.

Силовое сопротивление оказывают лишь целые волокна, а потому усилие $N(\tau)$ воспринимается работоспособной площадью $A(\tau)$ и порождается нормальное напряжение

$$\sigma_c(\tau)=N(\tau)/A(\tau). \tag{1}$$

В приложениях полагается $A(\tau) = A(t_0)$ и используется расчётное напряжение

$$\sigma(\tau)=N(\tau)/A(t_0). \tag{2}$$

Согласно (1) и (2):

$$\sigma_c(\tau)=\frac{A(t_0)}{A(\tau)}\sigma(\tau)=S^0(\tau,t_0)\sigma(\tau). \tag{3}$$

Процесс структурных повреждений, описываемый функцией $S^0(\tau,t_0)$, порождает нелинейную зависимость деформаций от расчётных напряжений.

2. В случае линейной постановки, предполагающей отсутствие структурных повреждений $\left(S^0(\tau,t_0)=1\right)$, величина $\Delta\varepsilon(t,t_0)$, порождаемая приращением напряжения $\Delta\sigma(t)$, находится использованием принципа наложения деформаций, согласно которому она является суммой деформаций

$$\Delta\varepsilon(t,\tau_i)=\frac{\Delta\sigma(\tau_i)}{E(t,\tau_i)}, \tag{6}$$

отвечающих представлению напряжения $\Delta\sigma(t)$ в виде

$$\Delta\sigma(t)=\sum_{i=0}^{n}\Delta\sigma(\tau_i). \tag{7}$$

В силу (6) при дифференцируемой функции напряжений $\sigma(\tau)$

$$d\varepsilon(t,\tau) = \frac{d\sigma(\tau)}{E(t,\tau)}, \tag{8}$$

$$\Delta\varepsilon(t,t_0) = \int_{t_0}^{t} \frac{d\sigma(\tau)}{E(t,\tau)} \tag{9}$$

Существенно, что при $S^0(\tau,t_0)=1$ деформация $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ не зависит от величины и длительности действия других приращений $\Delta\sigma(\tau_\kappa)$, что не имеет места в нелинейной постановке, ибо структурные повреждения влекут перераспределение напряжений на работоспособную площадь $A(\tau)$ и увеличение этой деформации от действия всех $\Delta\sigma(\tau_\kappa)$; $\kappa \neq i$.

Рассмотрим, например, $\Delta\sigma(\tau)$, задаваемое выражением

$$\Delta\sigma(\tau) = \begin{cases} \Delta\sigma(\tau_1); \tau_1 \le \tau < \tau_2; \tau_1 = t_0 \\ \Delta\sigma(\tau_1) + \Delta\sigma(\tau_2); \tau_2 \le \tau \le t \end{cases}. \tag{10}$$

Поскольку $S^0(\tau_2,t_0) > S^0(\tau_1,t_0)$, то деформация от действия $\Delta\sigma(\tau_1)$ зависит и от $\Delta\sigma(\tau_2)$ и необходимо это учесть для применения принципа наложения. Найдём с этой целью условные простые нагружения $\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i)$, соответствующие $\Delta\sigma(\tau_i)$ и порождающие $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$.

Способная к силовому сопротивлению часть сечения $\{C(t)\}$ испытывает напряжение $\sigma_c(t) = S^0(t,t_0)\sigma(t)$, а потому постоянство $\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i)$ на интервале (τ_i,t) возможно, когда эта величина есть часть напряжения $\Delta\sigma_c(t) = S^0(t,t_0)\sigma(t)$ и тем самым

$$\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i) = \Delta\sigma_c(t,\tau_i), \tag{11}$$

$$\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i) = S^0(t,t_0)\cdot\Delta\sigma(\tau_i). \tag{12}$$

Соотношение (11) обеспечивается лишь при целостности структуры $\{C(\tau_i)\}$ на отрезке времени $[\tau_i,t]$, а поскольку $t_0 \le \tau_i < t$, то для его справедливости необходима целостность $\{C(t_0)\}$ для всех τ из $[t_0, t]$.

Напряжения $\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i)$, отвечающие предположению, что усилие $N(\tau_i)$ приложено к целой части $\{C(t)\}$, являются условными. Полагая $A(\tau) = A(t_0)$ $(t_0 \le \tau < t)$, считаем что $A(t_0)$ испытывает напряжение $\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i)$.

Существенно, что напряжение $\Delta\widetilde{\sigma}(t,\tau_i) = \Delta\sigma_c(t,\tau_i)$ влечёт деформацию $\{C(t_0)\}$ на величину $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$, ибо деформация

$$\Delta\varepsilon(t,t_0) = \sum_{i=0}^{n} \Delta\varepsilon(t,\tau_i) \tag{13}$$

порождена напряжением

$$\Delta\sigma(t) = \sum_{i=0}^{n} \Delta\sigma_c(t,\tau_i). \tag{14}$$

Напряжения $\Delta\sigma_c(\tau_i) = S^0(\tau_i,t_0)\cdot\Delta\sigma(\tau_i)$ достаточно лишь для деформирования целой в момент $\tau = \tau_i$ части сечения $\{C(\tau_i)\}$ на величину $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ в процессе перераспределения усилий на $A(\tau)$ при $\tau_i \le \tau \le t$. Для достижения этой же деформации при условии целостности $\{C(\tau_i)\}$ необходимо большее напряжение

$$\Delta\sigma_c(t,\tau_i) = S^0(t,t_0)\cdot\Delta\sigma(\tau_i).$$

Предполагая неизменность структуры $\{C(\tau_i)\}$, получим

$$\Delta\tilde{\varepsilon}(t,\tau_i)=\frac{S^0(\tau_i,t_0)\cdot\Delta\sigma(\tau_i)}{E(t,\tau_i)}. \qquad (15)$$

В действительности к моменту $\tau=t$ имеет место прирост $\Delta\tilde{\varepsilon}(t,\tau_i)$ до

$$\Delta\varepsilon(t,\tau_i)=\Delta\tilde{\varepsilon}(t,\tau_i)S^0(\tau_i,t_0). \qquad (16)$$

Согласно (15) и (16): $$\Delta\varepsilon(t,\tau_i)=\frac{\Delta\sigma(\tau_i)}{E(t,\tau_i)}\cdot S^0(\tau_i,t_0)\cdot S^0(t,\tau_i). \qquad (17)$$

Поскольку $S^0(\tau_i,t_0)\cdot S^0(t,\tau_i)=S^0(t,t_0)$, то $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)=\dfrac{S^0(t,t_0)}{E(t,\tau_i)}\Delta\sigma(\tau_i)$. (18)

На рис. 1 приводится интерпретация соотношений (15) и (18)

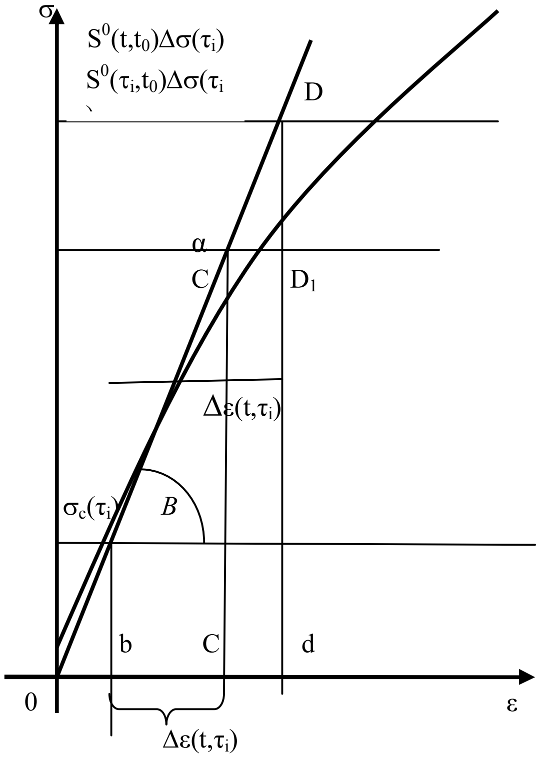

Рис. 1. К выводу соотношений (15) и (18)

Согласно рис. 1: $ctg\alpha=\dfrac{1}{E(t,\tau_i)}$;

$$\frac{\Delta\varepsilon(t,\tau_i)}{\Delta\tilde{\varepsilon}(t,\tau_i)}=\frac{A(\tau_i)}{A(t)}=S^0(t,\tau_i). \qquad (19)$$

Функция $S^0(t,\tau_i)$ задаёт меру прироста деформации $\Delta\tilde{\varepsilon}(t,\tau_i)$ вследствие структурных повреждений и описывает нелинейную зависимость $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ от $\Delta\sigma(\tau_i)$.

Деформации $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ целых к моменту $\tau=t$ волокон отвечает напряжение

$$\Delta\sigma_c(t,\tau_i)=\Delta\sigma_c(t,\tau_i)\frac{A(\tau_i)}{A(t)}=$$

$$=S^0(t,t_0)\cdot\Delta\sigma(\tau_i). \qquad (20)$$

3. Итак, величина $\Delta\varepsilon(t,t_0)$ рассматривается как сумма деформаций $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ целой части сечения $\{C(t)\}$ (с площадью $A(t)$) при условных простых нагружениях $\Delta\sigma_c(t,\tau_i)$, влекущих такие же деформации сечения $\{C(t_0)\}$ и эти деформации выражаются через условные напряжения $\Delta\sigma_c(t,\tau_i)$.

Такой подход позволяет применение принципа наложения деформаций при структурных повреждениях как в линейной постановке относительно условных приращений $\Delta\sigma_c(t,\tau_i)$.

Согласно нашему подходу приращение деформации, порождённое $d\sigma(\tau)$, представляется в виде $$d\varepsilon(t,\tau)=\frac{S^0(t,t_0)d\sigma(\tau)}{E(t,\tau)}, \qquad (21)$$

а тогда полное приращение $$\Delta\varepsilon(t,t_0)=S^0(t,t_0)\int_{t_0}^{t}\frac{d\sigma(\tau)}{E(t,\tau)}. \qquad (22)$$

4. В равенстве (22) мера деформаций

$$\frac{1}{E(t,\tau)}=\frac{1}{E(t)}+C^*(t,\tau), \qquad (23)$$

где $E(t)$ – модуль мгновенных упругих деформаций; $C^*(t,\tau)$ – мера простой ползучести в момент t при нагружении в момент τ. Согласно (22) и (23):

$$\Delta\varepsilon(t,t_0)=S^0(t,t_0)\int_{t_0}^{t}\left[\frac{1}{E(t)}+C^*(t,\tau)\right]d\sigma(\tau), \tag{24}$$

$$\Delta\varepsilon(t,t_0)=S^0(t,t_0)\left[\frac{\sigma(t)}{E(t,t)}-\frac{\sigma(t_0)}{E(t,t_0)}-\int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau\right]. \tag{25}$$

Учитывая, что начальное нагружение $\sigma(t_0)$ к моменту $\tau = t$ влечёт деформацию $S^0(t,t_0)\sigma(t_0)/E(t,t_0)$, получим уравнение механического состояния [2]

$$\varepsilon(t,t_0)=S^0(t,t_0)\sigma(t)\left[\frac{1}{E(t)}+C^*(t,t)-\int_{t_0}^{t}\frac{\sigma(\tau)}{\sigma(t)}\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau\right]. \tag{26}$$

Заметим, что в [2] уравнение (26) получено развитием подхода Ю.Н. Работнова [3] и С.В. Бондаренко [4] о квазилинейном представлении функции деформаций

$$\widetilde{S}[\varepsilon(t,t_0)]=\widetilde{S}^0\left[\frac{\varepsilon(t,t_0)}{\varepsilon_R(t)}\right]\varepsilon(t,t_0) \tag{27}$$

и функции напряжений

$$S[\sigma(t)]=S^0\left[\frac{\sigma(t)}{R(t)}\right]\sigma(t). \tag{28}$$

Предлагаемый нами подход проще и основан на приведённой выше модификации принципа наложения деформаций. Он не предполагает представление $\varepsilon(t,t_0)$ суммой мгновенных и запаздывающих деформаций и существование их раздельных функций нелинейности напряжений $S_м[\sigma(t)]$ и $S_n[\sigma(t)]$.

Ключевым моментом для принципа наложения деформаций является возможность представления $\Delta\varepsilon(t,t_0)$ суммой деформаций при простых нагружениях $\Delta\sigma(\tau_i)$, которые в дифференциальной форме задаются равенством [5]

$$d\varepsilon(t,\tau)=\frac{dS_м[\sigma(t)]}{E_м(t)}+C^*(t,\tau)dS_n[\sigma(\tau)]. \tag{29}$$

Согласно (29) $$\varepsilon(t,t_0)=\frac{S_м[\sigma(t)]}{E_м(t)}+C_0^*(t,t)S_n[\sigma(t)]-\int_{t_0}^{t}S_n[\sigma(t)]\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau, \tag{30}$$

а при $S_м[\sigma(\tau)]=S_м^0\left[\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)}\right]\cdot\sigma(\tau)$ и $S_n[\sigma(\tau)]=S_n^0\left[\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)}\right]\cdot\sigma(\tau)$

$$\varepsilon(t,t_0)=S_м^0\left[\frac{\sigma(t)}{R(t)}\right]\cdot\frac{\sigma(t)}{E_м(t)}+S_n^0\left[\frac{\sigma(t)}{R(t)}\right]\cdot\sigma(t)C^*(t,t)-\int_{t_0}^{t}S_n^0\left[\frac{\sigma(\tau)}{R(t)}\right]\frac{\sigma(\tau)\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau. \tag{31}$$

Функция $S^0[\sigma(\tau)/R(t)]$ получается [4], [6] осреднением $S_м^0[\sigma(t)/R(t)]$ и $S_n^0[\sigma(t)/R(t)]$ и тогда (31) сводится к виду (26).

5. Итак, причиной нелинейной зависимости деформаций от расчётных напряжений и взаимозависимости деформаций $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ при ступенчато- возрастающем нагружении является разрушение части волокон, влекущее перераспределение нормальных усилий на работоспособную площадь $A(\tau)$.

В процессе разгружения на промежутке $[t,t_p]$ разрушенные волокна не восстанавливаются, а их количество увеличивается лишь при превышающих $\sigma(t)$ нагружениях, а потому площадь $A(\tau)$ и функция $S^0(\tau)$ остаются постоянными.

В силу этого частичные разгружения $\Delta\widetilde{\sigma}(\tau_i)$ и порождённые ими деформации $\Delta\widetilde{\varepsilon}(t_p,\tau_i)$ взаимонезависимы и согласно принципу суперпозиции Л. Больцмана [8]
$$\Delta\widetilde{\varepsilon}(t_p,t)=\sum_{i=0}^{n}\Delta\widetilde{\varepsilon}. \qquad (32)$$

Соотношение (32) после некоторых преобразований и учёта НДС в момент t приводит к уравнению механического состояния бетона при режимном разгружении $\Delta\widetilde{\sigma}(\tau)$ от $\sigma(t_0)+\Delta\sigma(t)$ до $\sigma(t_0)$
$$\widetilde{\varepsilon}(t_p,t)=\widetilde{\sigma}(t_p)\left[\frac{1}{E(t_p)}+C^*(t_p,t_p)\right]-\int_t^{t_p}\widetilde{\sigma}(\tau)\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau. \qquad (33)$$

Деформация $\Delta\widetilde{\varepsilon}(t_p,t)$ по абсолютной величине равна обратимой части $\Delta\varepsilon(t,t_0)=K(t)\Delta\varepsilon(t,t_0)$ деформации $\Delta\varepsilon(t,t_0)$, где $K(t)$ - функция обратимости, зависящая от соотношения между удельной работой силового деформирования $\Delta W(t)$ и накопленной при этом удельной потенциальной энергией $\Delta\Phi(t)$, а также от параметров $E(t)$ и $C^*(t,\tau)$.

В линейной постановке, предполагающей отсутствие структурных повреждений
$$\Delta\Phi(t)=\Delta W(t). \qquad (34)$$

Выполнение наряду с (34) условий
$$E(\tau)=E;\; C^*(t,\tau)=C_0^*\left[1-\beta e^{-\gamma(t-\tau)}\right] \qquad (35)$$
влечёт полную обратимость $\Delta\varepsilon(t,t_0)$, что имеет место в линейной теории упругой наследственности Больцмана-Вольтерра.

В процессе старения удельная мера деформаций $1/E(t,\tau)$ уменьшается , а потому энергии $\Delta\Phi(t)$ уже недостаточно для полной обратимости $\Delta\varepsilon(t,t_0)$ и $K(t)<1$. При структурных повреждениях и старении бетона необратимая часть
$$\Delta\varepsilon_н(t,t_0)=[1-K(t)]\Delta\varepsilon(t,t_0) \qquad (36)$$
деформации $\Delta\varepsilon(t,t_0)$ наряду со слагаемым $\Delta\varepsilon_н(t,t_0)$, возникшим из-за старения, содержит слагаемое $\Delta\varepsilon_{нр}(t,t_0)$, порождённое вследствие затраты части $\Delta W(t)$ на разрушение волокон и тем самым
$$\Delta\varepsilon_н(t,t_0)=\Delta\varepsilon_{нр}(t,t_0)+\Delta\varepsilon_{нс}(t,t_0). \qquad (37)$$

В линейной теории наследственного старения Маслова-Арутюняна, пренебрегающей структурными повреждениями
$$\Delta\varepsilon_н(t,t_0)=\Delta\varepsilon_{нс}(t,t_0). \qquad (38)$$

Для зрелого и старого бетона, используемого в конструкциях, допустимо полагать выполнение условий (35), означающих инвариантность по τ модуля упругости и меры простой ползучести и тогда в нелинейной теории упругой наследственности
$$\Delta\varepsilon_н(t,t_0)=\Delta\varepsilon_{нр}(t,t_0). \qquad (39)$$

Согласно (26)
$$\widetilde{S}^0(t,t_0)\cdot\varepsilon(t,t_0)=\frac{\sigma(t)}{E(t)}+C^*(t,t)\sigma(t)-\int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau, \qquad (40)$$

где $\widetilde{S}^0(t,t_0)=1/S^0(t,t_0)$ – функция нелинейности деформаций. Множитель $\widetilde{S}^0(t,t_0)$ выделяет линейную часть $\varepsilon_л(t,t_0)=\widetilde{S}^0(t,t_0)\varepsilon(t,t_0)$ деформации $\varepsilon(t,t_0)$, а
$$\hat{\varepsilon}(t,t_0)=\left[1-\widetilde{S}^0(t,t_0)\right]\varepsilon(t,t_0) \qquad (41)$$
является её нелинейной частью, представляющую приращение $\varepsilon_л(t,t_0)$ вследствие перераспределения усилия $\Delta N(\tau)$ на $A(\tau)$, инициированного работой разрушения $W_g(\tau)$ части волокон.

Обратные деформации $\Delta\varepsilon_0(t,t_0)$ реализуются за счёт потенциальной энергии

$$\Delta\Phi(t) = \Delta W(t) - \Delta W_g(t)\,, \tag{42}$$

накопленной целыми до момента t волокнами, а на деформации $\Delta\varepsilon(t,t_0)$ затрачивается работа $\Delta W(t)$.

В силу этого обратимая часть $K(t)$ деформации $\varepsilon(t,t_0)$ при условиях (35) совпадает с недиссипированной частью $\Delta\Phi(t)/\Delta W(t)$ работы $\Delta W(t)$

$$K(t) = \Delta\Phi(t)/\Delta W(t)\,. \tag{43}$$

Поскольку $\Delta\Phi(t)$ и $\Delta W_g(t)$ пропорциональны соответственно площадям нормальных сечений целых и разрушенных волокон, то

$$\frac{\Delta\Phi(t)}{\Delta W(t)} = \frac{A(t)}{A(t_0)} = \widetilde{S}^0(t)\,. \tag{44}$$

Согласно (43) и (44): $$K(t) = S^0(t)\,, \tag{45}$$

а потому из (36), (37) и (45) следует, что в нелинейной теории упругой наследственности нелинейная часть деформации необратима, а линейная часть обратима. Заметим, что этот факт отмечен в работе [7].

В силу (40) и (45):

$$\varepsilon_0(t,t_0) = \sigma(t)\left[\frac{1}{E(t)} + C^*(t,t)\right] - \int_{t_0}^{t} \sigma(\tau)\frac{\partial C^*(t,\tau)}{\partial\tau}\,d\tau. \tag{46}$$

Это равенство с учётом (45) получается и умножением (26) на $K(t)$, ибо $\widetilde{S}^0(t)\cdot S^0(t) = 1$. В нелинейной постановке с учётом старения $\varepsilon_0(t,t_0) < \varepsilon_л(t,t_0)$ и $K(t) < \widetilde{S}^0(t)$, и тем самым равенством (46) определяется оценка сверху обратной деформации, а тогда величина

$$\varepsilon_н^*(t,t_0) = \left[1 - \widetilde{S}^0(t)\right]\varepsilon(t,t_0) \tag{47}$$

является лишь оценкой снизу необратимой части $\varepsilon_н(t,t_0)$.

Превышение $\varepsilon_н(t,t_0)$ над $\varepsilon_н^*(t,t_0)$ необходимо учитывать при расчётах на трещинообразование.

6. Итак, принцип суперпозиции Л. Больцмана [8] применим и в нелинейной теории

– при возрастающем нагружении как суперпозиция деформаций, условно порожденных воздействиями $\Delta\sigma_c(t,\tau_i) = S^0(t,t_0)\Delta\sigma(\tau_i)$;

– при разгружении как наложение деформаций, порожденных воздействиями $\Delta\sigma(\tau_i)$.

В работе [9] отмечена его применимость и в нелинейной постановке при необходимом для этого условии взаимонезависимости деформаций $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$.

В данной работе показано, что обеспечить это условие можно лишь при представлении $\Delta\varepsilon(t,\tau_i)$ как результат условных взаимонезависимых нагружений, реализуемых в условно-линейной постановке.

Литература

1. *Назаренко В.Г., Боровских А.В.* Диаграмма деформирования бетонов с учётом ниспадающей ветви// Бетон и железобетон», 1999, № 2, с. 18-22.
2. *Бондаренко В.М.* Фрагменты теории сопротивления бетона и железобетона// М.: ИПЦ МИКХиС, 2005, с. 10-15.
3. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций, М., 1966.
4. *Бондаренко С.В., Тутберидзе О.Б.* Инженерные расчёты ползучести строительных конструкций. – Изд-во ГАНАТЛЕБА, Тбилиси, 1988.

5. *Бондаренко В.М., Бондаренко С.В.* Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982.
6. *Боровских А.В., Назаренко В.Г.* Теория сопротивления сжатых железобетонных конструкций. – М.: ИД, 2000.
7. *Александровский С.В., Попкова О.М.* Исследования нелинейных деформаций ползучести бетона молодого возраста при ступенчато-изменяющихся напряжениях сжатия. – М.: Стройиздат, 1969
8. *Bolzmann L.* Zur Theorie dez elastishen Nach-Wirkung, Wiener, Ber. 10, 1874.
9. *Persoz B.* Le principe de superposition de Bolzmann, – Cahier Groupe franritudes rhicl, 1957, 2, № 1.

STRAINS SUPERPOSITION PRINCIPLE WHEN CONSTRUCTION ELEMENTS HAVE STRUCTURAL DAMAGES

Bondarenko V.M., Larionov E.A.

Rheological state equations of materials are obtained on the base of the principle of the superposition of fraction creep strains. Boltzmann the first applied this principle when the fraction strains were independent of the value and duration of the rest stresses increments. The structural damages generate the dependence of these strains on all fraction stress increments. The quasilinear rheological equation is obtained on the base of the Boltzmann principle modification.