

## ЭКСПОЗИЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.М. БОНДАРЕНКО, *д-р тех. наук, профессор*  
*НИИСФ РААСН*  
*127238, Москва, Локомотивный пр-д, д.21*

*Предлагается расчетный способ оценки экспозиции эффективного преднапряжения железобетона, учитывающий анизотропию, нелинейность и неравновесность силового сопротивления коррозионных повреждений.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** экспозиция преднапряжения арматуры, железобетон, анизотропия, коррозионные повреждения.

Силовое сопротивление бетона, как и другие его свойства: проницаемость, теплопроводность, коррозионная стойкость и т.п. анизотропно и зависит от знака, уровня и режима изменения во времени действующих напряжений, которые, наряду с технологическими особенностями изготовления, формируют структуру бетона [1].

В железобетонных конструкциях недостаточная прочность бетона на растяжение компенсируется армированием. Это, в частности, обуславливает возможность эксплуатации железобетонных конструкций после появления поперечных трещин в растянутых зонах сечений, хотя и снижает их изгибную жесткость.

Между тем, существует класс железобетонных конструкций, эксплуатация которых требует отсутствия трещин. Известны несколько технологических способов повышения трещиностойкости железобетона. Одним из распространенных способов повышения трещиностойкости является обжатие бетона растянутой части сечения. В большинстве случаев такое обжатие осуществляется натяжением арматуры с последующей передачей усилий обжатия бетону.

После этого бетон и предварительно напряженная арматура существуют и работают во взаимодействии, т.е. совместно. Такая совместность приводит к обмену их влияния на напряженно-деформируемое состояние железобетона, что в реальных условиях эксплуатации проявляется в отличии силового и антикоррозионного сопротивления бетона и арматуры.

Вместе с тем, процессы развития указанных сопротивлений неравновесны во времени и нелинейны в связях между причинами и следствиями их развития: неравновесность силового сопротивления проявляется в ползучести бетона и арматурной стали, получающей предварительное натяжение<sup>1</sup> (при стесненном деформировании ползучесть приводит к релаксации напряжений); нелинейность связи между напряжениями и силовыми деформациями при неубывающем нагружении и линейность этой связи при разгрузении [1,6] обуславливают необратимость силового деформирования и, в целом, соответствующие потери энергии отпорности, снижая энергетический потенциал силового сопротивления. При этом возможные повреждения материалов и, в частности коррозионные повреждения снижают силовое сопротивление и увеличивают рассеивание энергии при деформировании<sup>2</sup>. Решение рассматриваемой задачи осуществляется в рамках диссипативной теории железобетона [3], в частности, с учетом

<sup>1</sup> Ползучесть свойственна жестким высокопрочным высокоуглеродным сталям, именно они применяются для предварительного натяжения; у мягких сталей (при температурах до 300°С) ползучесть отсутствует.

<sup>2</sup> В данном исследовании рассматривается только энтропийно затухающее (т.н. кольтационное) продвижение фронта коррозионных повреждений [2,3].

необратимого рассеяния энергии деформирования и необратимости коррозионных повреждений, в нелинейной и неравновесной постановке с использованием следующих посылок:

-считается, что коррозионные воздействия начинаются после полного нагружения конструкций и формирования напряженно-деформированного состояния (с возможными изменениями свойств материалов в режиме «медленного времени» [7]);

-применяется квазилинейная форма реологического уравнения силового сопротивления при нагружении [3] и линейная связь между напряженными деформациями при разгрузении [4];

-предполагается геометрически сопряженная форма фигуры распространения коррозионных повреждений по глубине бетонного тела [5];

-отмечается совместность деформирования бетона и арматуры и справедливость гипотезы плоских сечений, а также применимость других гипотез механики твердого тела и теории железобетона.

В качестве объекта исследования принимается свободный от внешней нагрузки железобетонный брус с центрально осевым расположением преднапрягаемой арматуры (при этом принимаются обозначения  $\sigma_s(t_0)$  – начальные напряжения арматуры,  $A_s$  и  $A_b$  - площади поперечного сечения арматуры и бруса,  $R_b(t)$  и  $R_s$ - прочность бетона и арматуры,  $E_{epл}(t, t_0)$  и  $E_s(t)$  – модули реологического деформирования бетона и арматуры стали:  $K^*$ ,  $\omega^*$  - коэффициенты сохранения силового сопротивления при коррозионных повреждениях бетона и арматуры [2]: функция нелинейности деформирования (2) по Граффу [1]; знак « $\rightarrow$ » при нагружении, знак « $\leftarrow$ » при разгрузении).

Из сказанного следует линейное уравнение силового сопротивления для арматуры:

$$\varepsilon_s(t) = \frac{\sigma_s(t)}{E_s(t)}, \quad (1)$$

квазилинейное уравнение силового сопротивления бетона [3]:

$$\varepsilon_b(t, t_0) = \bar{a}(t, t_0)[\sigma_b(t)]^{\bar{b}}, \quad (2)$$

где 
$$\bar{a}(t, t_0) = \frac{1+\bar{v}}{E_{epл}(t, t_0)[R(t)]^{\bar{b}-1}}; \bar{b} = 1 + \frac{1}{e_n \gamma} e_n \frac{1+\bar{v}\bar{m}}{1+\bar{v}},$$

$$\bar{v} = S^0(1) - 1; \bar{m} = \frac{1}{e_n \gamma} e_n \frac{S^0(\gamma)-1}{\nu}; S^0 = 1 + \nu \left[ \frac{\sigma_b(t)}{R(t)} \right]^m, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_s$  - полная относительная деформация арматуры,  $\varepsilon_b$ - полная относительная деформация бетона,  $\sigma_s$  - напряжения в арматуре,  $\sigma_b$  напряжения бетоне,  $R_b$  - предел прочности бетона,  $E_s$  - модуль упругости арматуры,  $E_{врл}$  - временный линейный модуль деформации бетона [1],  $S_0$ - функция нелинейности деформирования по П.И. Васильеву для исходного реологического уравнения [5],  $\nu$  и  $m$  - параметры этого уравнения [1];  $\bar{v}$ ,  $\bar{m}$  и  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  - аналогичные параметры для квазилинейного деформирования [4,8],  $\gamma = (0,7)$  для  $\frac{\sigma}{R}$  - ордината фиксированной точки совпадения нелинейности по Граффу (2) и по П.И. Васильеву (3)[2,3],  $t_0, \tau, t$  - время начала наблюдений, текущее время, время окончания наблюдения.

Влияние коррозионных повреждений на силовое сопротивление бетона учитывается введение коэффициента сохранения  $K^*$ [2,3], т.е. устанавливается

$$R^*(t) = K^*R(t), E^*_{epл}(t, t_0) = K^*E_{epл}(t, t_0), \quad (4)$$

где  $K^*$  принимается средним по глубине повреждения в бетоне бруса, например,

$$\bar{a}^*(t, t_0) = \frac{(1+\bar{v})}{E^*_{epл}(t, t_0)[R^*(1)]^{\bar{b}-1}}. \quad (5)$$

Влияние коррозионных повреждений на силовое сопротивление арматуры учитывается введением коэффициента сохранения:

$$\omega^* < 1; A_s^* = \omega_s^* A_s. \quad (6)$$

Далее. Условия равновесия:  $N_s(t) = N_6(t)$  или  $\sigma_s(t)A_s = \sigma_b(t)A_b$ ; (7)  
условие совместности деформаций:

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_b(t) \text{ или } \frac{\sigma_s(t)}{E_s(t)} = \bar{a}(t, t_0)[\sigma_b(t)]^{\bar{b}}. \quad (8)$$

Из (7) следует, что 
$$\sigma_b(t) = \frac{A_s}{A_b} \sigma_s(t); \sigma_b(t_0) = \frac{A_s}{A_b} \sigma_s(t_0). \quad (9)$$

Приращение деформаций и приращение напряжений к моменту  $t$  по отношению к моменту  $t_0$ :

$$\Delta\varepsilon_s(t) = \varepsilon_s(t_0) - \varepsilon_s(t); \Delta\sigma_s(t) = \sigma_s(t_0) - \sigma_s(t), \quad (10)$$

$$\Delta\varepsilon_b(t) = \varepsilon_b(t_0) - \varepsilon_b(t); \Delta\sigma_b(t) = \sigma_b(t_0) - \sigma_b(t). \quad (11)$$

Подстановка (10) и (11) приводит к разрешающему уравнению для искомого  $\sigma_s(t)$ :

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_s(t) &= \Delta\varepsilon_b(t), & (12) \\ \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s(t_0)} - \frac{1}{E_s(t)} [\sigma_s(t_0) - \sigma_s(t)] &= \\ &= \bar{a}(t, t_0) \left(\frac{A_s}{A_b}\right)^{\bar{b}} [\sigma_s(t_0)]^{\bar{b}} - \bar{a}(t, t_0) \left(\frac{A_s}{A_b}\right)^{\bar{b}} [\sigma_s(t_0) - \sigma_s(t)]^{\bar{b}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Уровень потерь предварительного напряжения арматуры  $P$  рассчитывается по формулам в долях

$$P = \frac{\sigma_s(t_0) - \sigma_s(t)}{\sigma_s(t_0)} = 1 - \frac{\sigma_s(t)}{\sigma_s(t_0)} \text{ или } P\% = [1 - \frac{\sigma_s(t)}{\sigma_s(t_0)}] \cdot 100. \quad (14)$$

Заметим, что, как правило, уровень потерь преднапряжения арматуры регламентируется, т.е. он не должен превышать некоторую нормируемую величину  $|P|$ . В интересах практического применения рассмотрим 4 варианта решаемой задачи:

1. Общая нелинейно-квадратичная постановка:  $\bar{v} > 0; \bar{a} = \bar{\alpha}; \bar{b} = \bar{\beta} = 2$ .
2. Общая линейная постановка:  $\bar{v} = 0; \bar{a} = \bar{\alpha}; \bar{b} = \bar{\beta}$ . (15)
3. Смешанная постановка:  $\bar{v} > 0; \bar{v} = 0; \bar{a} \neq \bar{\alpha}; \bar{b} = 2, \bar{\beta} = 1$ .
4. Промежуточная постановка:  $\bar{v} > 0; \bar{v} = 0; \bar{a} \neq \bar{\alpha}; 1 < \bar{b} < 2; \bar{\beta} = 1$ .

При этом из (3) запишем:

$$\text{при } b = 1: \quad \bar{a}(t, t_0) = \frac{(1+\bar{v})}{E_{\text{грл}}(t, t_0)}; \bar{a}(t_0, t_0) = \frac{(1+\bar{v})}{E_{\text{грл}}(t_0)}, \quad (16)$$

$$\text{при } b = 2: \quad \bar{a}(t, t_0) = \frac{(1+\bar{v})}{E_{\text{грл}}(t, t_0)R(t)}; \bar{a}(t_0, t_0) = \frac{(1+\bar{v})}{E_{\text{грл}}(t_0, t_0)R(t_0)}, \quad (17)$$

$$\text{где } E_{\text{грл}}(t, t_0) = \frac{E_{\text{мгн}}(t)}{1 + E_{\text{мгн}}(t) \cdot C^0(t, t_0)}; E_{\text{грл}}(t_0, t_0) = \frac{E_{\text{мгн}}(t_0)}{1 + E_{\text{мгн}}(t_0) \cdot C^0(t_0, t_0)}. \quad (18)$$

Здесь  $E_{\text{мгн}}$  - модуль мгновенной деформации бетона,  $C^0(t_0, t_0)$  - мера простой ползучести бетона<sup>3</sup>.

Решения (13) имеют записи.

$$\text{Задача 1. } (\bar{v} > 0; \bar{a} = \bar{\alpha}; \bar{b} = \bar{\beta} = 2), \quad \sigma_s(t) = \frac{-u \pm \sqrt{u^2 - 4qc}}{2q}, \quad (19)$$

$$q = \frac{(1+\bar{v}) \left(\frac{A_s}{A_b}\right)^2}{E_{\text{грл}}(t, t_0)R(t)}; \quad r = \frac{1}{E_s(t)} - \frac{2(1+\bar{v})\sigma_s^2(t_0)}{E_{\text{грл}}(t, t_0)R(t)} \left(\frac{A_s}{A_b}\right)^2, \quad (20)$$

$$c = \frac{\sigma_s(t_0)}{E_s(t_0)} - \frac{\sigma_s(t)}{E_s(t)} + (1 + \bar{v}) \left(\frac{A_s}{A_b}\right)^2 \sigma_s^2(t_0) \left[ \frac{1}{E_{\text{грл}}(t, t_0)R(t)} - \frac{1}{E_{\text{грл}}(t_0, t_0)R(t_0)} \right]. \quad (21)$$

<sup>3</sup>  $C^0(t_0, t_0) > 0$  -мера быстро натекающей ползучести

Задача 2. ( $\bar{\nu} = 0; \bar{b} = \bar{b} = 1$ )

$$\sigma_s(t) = \frac{\frac{1}{E_s(t)} - \frac{1}{E_s(t_0)} + (1+\bar{\nu}) \left[ \frac{1}{E_{epл}(t_0, t_0)} - \frac{1}{E_{epл}(t, t_0)} \right] \frac{A_s}{A_b}}{\frac{1}{E_s(t)} - (1+\bar{\nu}) \left( \frac{A_s}{A_b} \right) \frac{1}{E_{epл}(t, t_0)}} \sigma_s(t_0) \quad (22)$$

Задача 3. ( $\bar{\nu} > 0; \bar{\nu} = 0; \bar{b} = 2, \bar{b} = 1$ )

$$\sigma_s(t) = \frac{\frac{1}{E_s(t)} - \frac{1}{E_s(t_0)} + (1+\bar{\nu}) \left[ \frac{1}{E_{epл}(t_0, t_0)} - \frac{\sigma_s(t_0)}{R(t_0)} - \frac{1}{E_{epл}(t, t_0)} \right]}{\frac{1}{E_s(t)} - (1+\bar{\nu}) \left( \frac{A_s}{A_b} \right) \frac{1}{E_{epл}(t, t_0)}} \sigma_s(t_0) \quad (23)$$

Задача 4. ( $\bar{\nu} > 0; \bar{\nu} = 0; \bar{a} \neq \bar{a}; 1 < \bar{b} < 2; \bar{b} = 1$ ).

Аналитическое решение заменяется графоинтерполяционным приближением по  $\bar{b}$  (рис 1). В координатах  $P$  и  $t$  выстраиваются кривые  $P$  (14) при (19), (22), (23) и далее методом графо интерполяции между кривыми 2 и 3 выстраивается линия 4, ординаты которой соответствуют искомым значениям  $P_4$ .

На рис. 1 даны кривые уровня снижения исходного преднапряжения  $P$  при различных сочетаниях параметров  $\bar{b}$  и  $\bar{b}$  и соответствующие значения экспозиции эффективного преднапряжения  $t_{экс}$ , отсчитываемой от  $t_0$  (начала обжатия бетона). Как и следовало ожидать, экспозиция эффективного предварительного напряжения  $t_{экс,1} < t_{экс,3} < t_{экс,4} < t_{экс,2}$  уменьшается с ростом нелинейности формирования, увеличением ползучести материалов и коррозионных повреждений. Таким образом, предложен расчетный аппарат оценки и прогноза изменения во времени предварительного напряжения арматуры преднапряженных железобетонных конструкций, отражающий влияние нелинейности ползучести бетона и релаксации напряжений в арматуре и способ расчета экспозиция эффективного обжатия бетона.

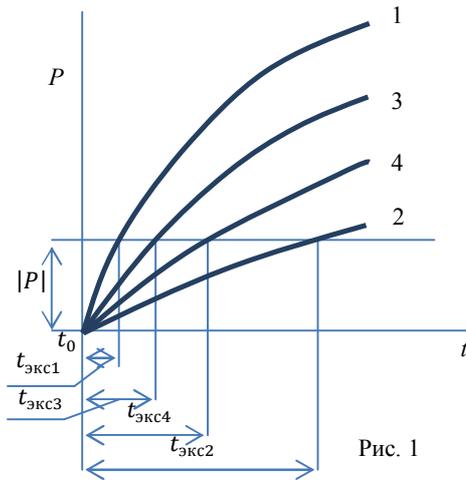


Рис. 1

Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Харьков: изд. ХГУ, 1968. – 324 с.
2. Бондаренко В.М. Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 2. – С. 11-17.
3. Бондаренко В.М. Элементы диссипативной теории силового сопротивления железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 2. С. 47-57.
4. Бондаренко С.В., Санжаровский Р.С. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. – М.: Стройиздат. – 1990. – 352 с.

5. Васильев П.И. Некоторые вопросы пластического деформирования бетона. - Изд. ВНИИГ, т. 49. – 1983. – С. 27-29.

6. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 880 с.

7. Митропольский Ю.А. Нестационарные процессы в нелинейных колебательных системах. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 284 с.

8. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкции. – НИИЖБ. Стройиздат. 1985.

9. Чернышев Е.М., Дьяченко С.Н., Макеев А.Н. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов. - Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2012. – 98с.

References

1. Bondarenko VM (1968). *Nekotorye Voprosy Nelinejnoj Teorii Zhelezobetona*. Har'kov: izd. HGU, 324 p.

2. Bondarenko VM (2010). Nekotorye fundamental'nye voprosy razvitija teorii zhelezobetona. *Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*, № 2, p. 11-17.
3. Bondarenko VM (2014). Jelementy dissipativnoj teorii silovogo soprotivlenija zhelezobetona. *Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*, № 2, p. 47-57.
4. Bondarenko SV, Sanzharovskij RS (1990). *Usilenie Zhelezobetonnyh Konstrukcij pri REkonstrukcii Zdanij*. M.: Strojizdat, 352 p.
5. Vasil'ev PI (1983). Nekotorye voprosy plasticheskogo deformirovanija betona. *Izd. VNIIG, t. 49*, p. 27-29.
6. Vol'mir AS (1963). *Ustojchivost' Uprugih Sistem*. M. Fizmatgiz, 880 p.
7. Mitropol'skij JuA (1955). *Nestacionarnye Processy v Nelinejnyh Kolebatel'nyh Sistemah*. Kiev: Izd-vo AN USSR, 284 p.
8. *Rekomendacii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij*. NIIZhB. Strojizdat. 1985.
9. Chernyshev EM, Djachenko SN, Makeev AN (2012). *Neodnorodnost' Struktury i Soprotivlenie Razrusheniju Konglomeratnyh Stroitel'nyh Kompozitov*. Voronezh: Voronezhskij GASU, 98 p

### THE EXPOSITION OF EFFECTIVE PRE-STRESSING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V.M. Bondarenko  
*NIISF RAASN, Moscow*

A method of estimation of the exposition of effective pre-stressing of reinforced concrete structures that takes the anisotropy, nonlinearity, and non-equilibrium of force resistance of damages into account is presented.

KEY WORDS: exposition of effective pre-stressing of reinforcing, reinforced concrete, anisotropy, corrosion damages.

