

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

С. Г. ПОПКОСЯН, А. А. ГЮЛЗАДЯН

К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
 ПО ВТОРОЙ ГРУППЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

В [1] и в Руководствах [2, 3] предложен приближенный метод расчета деформаций обычных и предварительно напряженных железобетонных изгибаемых элементов, основанный на оценке граничных значений  $\frac{l}{h_0}$  ( $l$  — пролет элемента,  $h_0$  — полезная высота), соответствующих условию неперевышения прогибами заданных допустимых величин. При выполнении условия

$$\frac{l}{h_0} < \lambda_{гр}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{гр}$  — граничное значение отношения пролета к рабочей высоте, проверку прогибов можно не производить. При этом, значения  $\lambda_{гр}$  будут зависеть в зависимости от параметра  $\rho n$ , где  $\rho = \frac{F_s}{F_b}$  — коэффициент

армирования,  $n = \frac{E_s}{E_b}$  — отношение модулей упругости арматуры и бетона. Это, однако, означает, что такая проверка может быть выполнена лишь после подбора рабочей арматуры  $F_s$ , и если условие (1) не выполняется, то сечение элемента необходимо изменить.

В [4, 5] для железобетонных элементов без преднапряжения предлагается вариант изложенного выше способа, в котором на основе параметра  $\frac{l}{h_0}$  прогибы могут оцениваться независимо от коэффициента армирования, поэтому такая оценка может быть выполнена предварительно, до подбора рабочей арматуры.

Нами предлагается общий метод предварительной оценки прогибов и трещиностойкости изгибаемых обычных и предварительно напряженных элементов, позволяющий отказаться в стадии проектирования от расчетов по второй группе предельных состояний и существенно упростить процесс подбора сечений.

Рассмотрим свободно опертую преднапряженную балку прямоугольного сечения, загруженную равномерно распределенной нагрузкой (рис. 1). Размеры сечения балки —  $b$  и  $h_0$ , пролет —  $l$ . Категория требо-

ваний к трещиностойкости — 3-я, т. е. в стадии эксплуатации допускаются как кратковременное, так и длительное раскрытие трещин. При одиночном армировании несущая способность сечения будет равна

$$M_{\text{сеч}} = R_s F_a h_0 \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{нр}}} \cdot \mu \right), \quad (2)$$

откуда

$$\frac{M_{\text{сеч}}}{bh_0} = R_s \mu \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{нр}}} \cdot \mu \right). \quad (3)$$

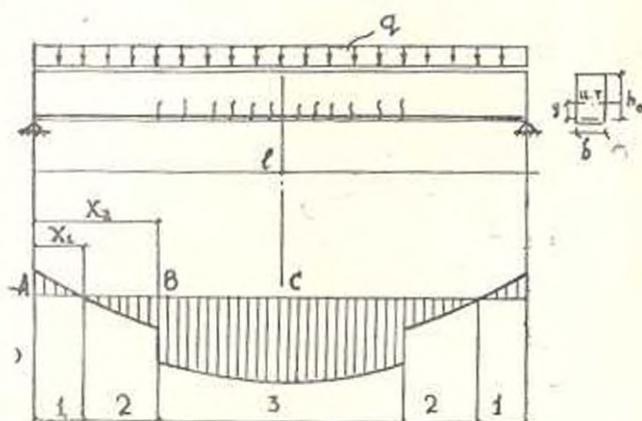


Рис. 1. Эпюра  $\frac{1}{\rho}$  для изгибаемого преднапряженного элемента, работающего с трещинами в растянутой зоне.

Момент в середине пролета будет

$$M = 0,125ql^2, \quad (4)$$

что также можно представить

$$\frac{M}{bh_0^2} = \frac{0,125ql^2}{bh_0^2}. \quad (5)$$

Приравняв (3) и (5), получим

$$\frac{q}{b} = \frac{8R_s \mu \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{нр}}} \cdot \mu \right)}{\left( \frac{l}{h_0} \right)^2}. \quad (6)$$

Далее рассмотрим расчет прогибов балки, работающей с трещинами в растянутой зоне. Эпюра кривизны будет иметь три характерных участка:

участки 1, где кривизна сечений  $\frac{1}{\rho} < 0$ ;

участки 2, где  $\frac{1}{\rho} \geq 0$  при  $M < M_7$ ;

участок 3, где  $\frac{1}{\rho} > 0$  при  $M > M_1$ ,

здесь  $M_1$  — момент трещинообразования.

Кривизна  $\frac{1}{\rho}(x)$  на каждом участке без трещин и с трещинами определяется по формулам норм [3] с учетом кратковременного и длительного воздействия нагрузок и изгиба.

Кривизна сечения в точке А будет

$$\frac{1}{\rho_A} = \frac{B_1}{E_s h_0}$$

где  $B_1 = \frac{k_1 \cdot n \cdot \sigma_{cr} + 0,85 \sigma_1 \cdot z}{0,85 z}$ ,  $\sigma_{cr}$  — предельное напряжение в арматуре с

учетом полных потерь;  $k_1 = \frac{\psi}{h_0} z_1 = z_1 \cdot z_2 + z_3$ , [3];  $z = \frac{I_{cr}}{bh_0^2}$ ;

$I_{cr}$  — момент инерции приведенного сечения.

Кривизна сечения в точке В при отсутствии и наличии трещин определяется соответственно:

$$\frac{1}{\rho_B} = \frac{B_2}{E_s h_0}, \quad \frac{1}{\rho_B} = \frac{B_3}{E_s h_0}$$

где

$$B_2 = \frac{M_1 (2 - k_1) - bh_0^2 (k_2 n \sigma_{cr} + 0,85 \sigma_1 z)}{0,85 bh_0^2 z}$$

$$B_3 = \frac{M_1}{z_1 bh_0} \left[ \frac{k_1 (\psi_{2,cr} - \psi_{2,dl}) - \psi_{2,dl}}{n} + \frac{\sigma_1 n}{z_1} \left( \frac{1 - k_1}{\psi_{2,dl}} + \frac{k_1}{\psi_{кр}} \right) \right] - z_2 [k_1 (\psi_{2,cr} - \psi_{2,dl}) - \psi_{2,dl}] - z_3 \quad (7)$$

где  $k_1 = \frac{M_{кр}^n}{M}$ ;  $M_{кр}^n$  — нормативный (расчетный при коэффициенте перегрузки  $n_{пер} = 1$ ) момент от кратковременно действующей части нагрузки;  $M^n$  — нормативный момент от полной нагрузки;  $z_1$  — плечо внутренней пары [3];  $\psi_{2,cr}$  и  $\psi_{2,dl}$  — значения коэффициента  $\psi_2$ , определенные от кратковременно и длительно действующих частей нагрузок;  $\psi_{кр} = 0,45$ ;  $\psi_{dl} = 0,15$  [3].

Наконец, кривизна сечения в точке С будет равна  $\frac{1}{\rho_C} = \frac{B_4}{E_s h_0}$ , где  $B_4$  определяется по выражению (7), при этом вместо  $M_1$  подставляется значение нормативного момента от полной нагрузки  $M^n$ .

При вычислениях значение  $M_1$  заменялось соответствующим выражением по [1], а  $M^n$  принималось равным  $\frac{M_{кр}^n}{n_{пер}}$  по формуле (2).

Зависимость  $\sigma_{02} = f(\sigma_0, R, \mu)$  с учетом потерь преднапряжения оценивалась по методике [6], значения  $\sigma_0$  принимались наибольшими для заданного класса арматуры.

Произведя необходимые вычисления по формуле Максвелла-Мора получим выражение для определения прогиба в середине пролета

$$f = f^2 \frac{A}{h_0}, \quad (8)$$

где  $A = f(E_1, B_1, B_2, B_3, B_4, a, b)$ ;  $a = \frac{x_1}{l}$ ;  $b = \frac{x_2}{l}$  (рис. 1).

Из (8) можно написать:

$$\frac{l}{h_0} = \frac{f}{l} \cdot \frac{1}{A}, \quad (9)$$

при этом, подставив в (9) вместо  $\frac{f}{l}$  предельные значения  $\left| \frac{f}{l} \right|$ , получим выражение (10) для определения граничного  $\frac{l}{h_0}$ , соответствующего условию равенства относительного прогиба предельному

$$\frac{l}{h_0} = \left| \frac{f}{l} \right| \cdot \frac{1}{A}. \quad (10)$$

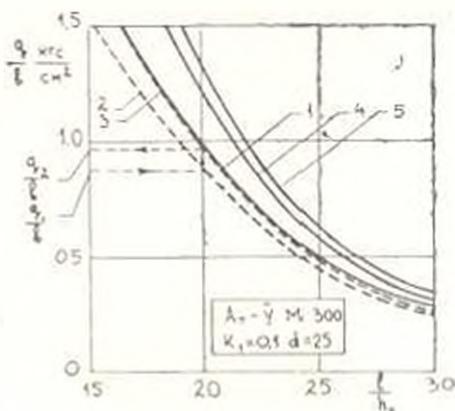
Рассмотрим формулы (10) и (6) совместно. При известных марке бетона, классе арматуры и  $\left| \frac{f}{l} \right|$  каждому значению коэффициента армирования  $\mu$  будет соответствовать одна пара значений  $\frac{l}{h_0}$  и  $\frac{q}{b}$ , определяемых по (10) и (6). Меняя значение  $\mu$  от минимально допустимого при изгибе и до наибольшего, определяемого из условия достижения границы персармирования, можно построить кривые зависимости  $\frac{q}{b} = f\left(\frac{l}{h_0}\right)$ . На рис. 2 показана указанная зависимость при

$\left| \frac{f}{l} \right| = \frac{1}{200}$  и  $k_1 = 0,1$  для элемента из бетона М300, армированного арматурой класса Ат-V (кривая 1). Если при проектировании значение  $\frac{q}{b}$  известно и допустимый прогиб равен  $\frac{1}{200} \cdot l$ , то приняв

$\frac{l}{h_0}$  не более, чем соответствующая абсцисса построенной кривой, расчет прогибов при указанных выше параметрах конструкции можно не производить, т. к. прогиб не будет превышать принятое ранее значение  $\frac{1}{200} \cdot l$ .

Рис. 2. Зависимость  $\frac{q}{b}$  от  $\frac{l}{h_0}$  для напряженного элемента, удовлетворяющего требованиям 3-ей категории по трещиностойкости:

- 1 —  $\left[\frac{f}{l}\right] = \frac{1}{200}$ ; 2 —  $[a_{t, \text{дл}}] = 0,30 \text{ мм}$   
 3 —  $[a_{t, \text{кр}}] = 0,15 \text{ мм}$ ; 4 —  $[a_{t, \text{дл}}] = 0,30 \text{ мм}$ ;  
 5 —  $[a_{t, \text{кр}}] = 0,40 \text{ мм}$



Рассмотрим расчеты по раскрытию трещины. На основе [7] при требованиях 3-й категории ширина кратковременного и длительного раскрытия трещины определяется:

$$a_{t, \text{кр}} = 1,5 \left[ \frac{R_s \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{уп}}} \cdot \mu \right) (1 - 0,333k_1)}{n_{\text{пер}} \cdot k_2} - \sigma_{02} \right] L; \quad (11)$$

$$a_{t, \text{дл}} = 1,5 \left[ \frac{R_s \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{уп}}} \cdot \mu \right) (1 - k_1)}{n_{\text{пер}} \cdot k_2} - \sigma_{02} \right] L; \quad (12)$$

где  $k_2 = \frac{z_1}{h_0}$ ;  $l = \gamma_1 \frac{2l(3,5 - 100sl)^2 \sqrt{d}}{E_1}$ ;  $\mu = \frac{F_2}{F_0}$ , но не более 0,02 [3].

Из (12) получим:

$$R_s \left( 1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{\text{уп}}} \cdot \mu \right) \cdot \mu = \frac{n_{\text{пер}} \cdot k_2 \cdot \mu \cdot \left( \frac{a_{t, \text{дл}}}{1,5L} + \sigma_{02} \right)}{1 - k_1}; \quad (13)$$

а из совместного решения (13) и (6)

$$\frac{q}{b} = \frac{8n_{\text{пер}} \cdot k_2 \cdot \mu \cdot \left( \frac{a_{t, \text{дл}}}{1,5L} + \sigma_{02} \right)}{\left( \frac{l}{h_0} \right)^2 \cdot (1 - k_1)}; \quad (14)$$

Аналогично, для кратковременного раскрытия трещины получим

$$\frac{q}{b} = \frac{8n_{\text{пер}} \cdot k_2 \cdot \mu \cdot \left( \frac{a_{t, \text{кр}}}{1,5L} + \sigma_{02} \right)}{\left( \frac{l}{h_0} \right)^2 \cdot (1 - 0,333k_1)}; \quad (15)$$

Рассматривая выражения (14) и (15) совместно с (10), можно построить кривые, соответствующие предельно допустимой ширине для длительного и кратковременного раскрытия трещин. На рис. 2 указанная зависимость построена для допустимых значений  $a_{т.кр} = 0,4$  мм,  $a_{т.дл} = 0,3$  мм, что согласно [3] предусмотрено для конструкций, армированных арматурой Аг—V и эксплуатируемых в нормальных условиях (кривые 4 и 5).

При совместном рассмотрении требований по прогибам и раскрытию трещин для каждого элемента на графике  $\frac{q}{b} = f\left(\frac{l}{h_0}\right)$  будут три кривые: одна — полученная из условия обеспечения прогиба и две — из условия обеспечения кратковременного и длительного раскрытия трещин. Решающим из них при подборе  $\frac{l}{h_0}$  будет кривая, расположенная ниже остальных, в данном случае кривая 1, соответствующая предельному прогибу. Если та же конструкция будет эксплуатироваться в агрессивной среде и допустимые значения для раскрытия трещин будут меньше, например,  $a_{т.дл} = 0,05$  мм,  $a_{т.кр} = 0,15$  мм, решающим при подборе  $\frac{l}{h_0}$  будет уже кривая 2, полученная из условия обеспечения трещиностойкости. В этом случае при заданном  $\frac{q_1}{b}$  значение  $\frac{l}{h_0}$  подбирается по кривой 2, а расчет прочности производится по нагрузке  $\frac{q_1}{b}$ , соответствующей при том же  $\frac{l}{h_0}$  кривой 1. Таким образом, формально арматура подбирается по условию прочности, но в случае относительно жестких требований по трещиностойкости в расчет вводится не фактическая расчетная нагрузка, а условно повышенная нагрузка, которая учитывает необходимость увеличения арматуры для обеспечения трещиностойкости.

Следует отметить, что на рис. 2 каждому значению  $\frac{l}{h_0}$  на кривой 1 соответствует свой процент армирования, удовлетворяющий при заданном  $\left[\frac{l}{l}\right]$  равенству (10). При этом, если нагрузка будет меньше, чем это соответствует ординате кривой 1, то будут меньше и процент армирования и прогиб элемента, т. е. вся область ниже кривой 1 удовлетворяет условиям прогибов. Что же касается ширины раскрытия трещин, то известно, что с уменьшением процента армирования она растет. Этот вопрос рассмотрим несколько подробнее.

Введем параметр  $\Psi$ , равный отношению  $\frac{q_1}{q_1}$  (рис. 2) и учитывающий необходимость условного увеличения расчетной нагрузки. Из (6) и (14) получим

$$\theta = \frac{R_s \left(1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{np}} \cdot \mu\right) (1 - k_1)}{n_{пер} \cdot b \left(\frac{a_{т.т.}}{1,5l} + \tau_{02}\right)} \quad (16)$$

Аналогично, из (6) и (15):

$$H = \frac{R_s \left(1 - 0,5 \frac{R_s}{R_{np}} \cdot \mu\right) (1 - 0,333k_1)}{n_{пер} \cdot k_2 \left(\frac{a_{т.т.}}{1,5l} + \tau_{02}\right)} \quad (17)$$

По формуле (6) для разных значений  $\frac{l}{h_0}$  построим зависимость  $\frac{a}{b}$  и  $\mu$  (рис. 3), при этом наибольшее  $\mu$  при заданном  $\frac{l}{h_0}$  и  $\left|\frac{f}{l}\right|$  будет то, которое соответствует равенству (10). На этом же рисунке показана зависимость  $H$  от  $\mu$  при разных требованиях по трещиностойкости. Практический интерес представляют только значения  $H \geq 1$ .

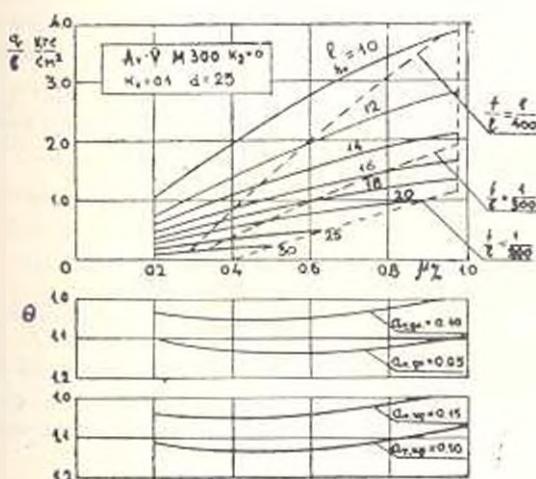
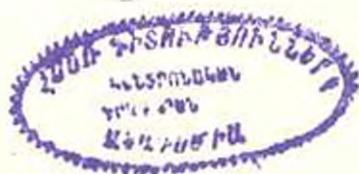


Рис. 3. График для подбора сечения арматуры с учетом обеспечения деформации и трещиностойкости.

Соотношение между  $\frac{q_1}{b}$  и  $\frac{q_2}{b}$  при заданном  $\frac{l}{h_0}$  можно построить по формулам (6) и (14), (15), меняя в них  $\mu$  от минимального значения до максимального из условия обеспечения прогибов. Это позволит при выбранном из условия прогибов  $\frac{l}{h_0}$  и при известных требованиях по трещиностойкости для каждого  $\frac{q_1}{b}$  иметь соответствующую



щес  $\frac{q_2}{b}$  и при проектировании ограничиться только лишь расчетом прочности под условно увеличенной нагрузкой  $\frac{q_0}{b}$ .

ЕрИИ им. К. Маркса

Поступило 25.VI.1981

Ս. Պ. ԻՆՆԻՍՅԱՆ, Շ. Շ. ՊՅՈՒՐԱՊՅԱՆ

ՐՈՏ ԵՐԿՐՈՐԴ ԽՄԲԻ ՈԱՇՄԱՆԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ԵՐԿԱԹՐԵՏՈՆԵ  
ՎՈՆՈՏՐՈՒԿՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՎԵՐԱԵՐԵՏԱԼ

Ո Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Առաջարկվում է սովորական և նախապես շարված երկաթբետոնե ծափոց էլեմենտների համար ըստ երկրորդ խմբի սահմանային վիճակների հաշվարկները (գեֆորմացիա և ճարակայունություն) կապել  $\frac{l}{h_0}$  պարամետրի հետ, որտեղ  $l$ -ը էլեմենտի թափշն է, իսկ  $h_0$ -ն՝ հատվածի օգտակար բարձրությունը: Ամբողջ րնտրության համար մտցվում է հաշվարկային բևսի նշված արժեք: Կա հնարավորություն է ստեղծում այլևս շիտատրեյ ըստ երկրորդ խմբի սահմանային վիճակների հաշվարկները, բանի որ ճարակայունության և գեֆորմացիաների պահանջները նախապես ապահովվում են: Առաջարկված մոտեցումը արմատապես պարզեցնում է հատվածի հաշվարկը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Залесов А. С., Филаретский В. В. Практический метод расчета железобетонных конструкций по деформациям. М., Стройиздат, 1976.
2. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения). М., Стройиздат, 1977.
3. Руководство по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона. М., Стройиздат, 1977.
4. Verby A. W. Span/effective depth ratios. Concrete, vol. 13, № 2, 1979.
5. British Standard Institution. The structural use of concrete. British Standard Code of Practice, CP110, 1972.
6. Байков В. И., Складнев Н. И. Оптимальное проектирование предварительно напряженных ж. б. конструкций. Докл. на VIII конгр. ФНИИ. М., изд. МИСН, 1978.
7. Нокнисян С. Г., Гюлябян А. А. К расчету предварительно напряженных ж. б. конструкций по раскрытию трещин. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXIII, № 5, 1980.

