НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА И ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ

НИИСК
КИЕВ 1980

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА И ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ

Одобрены секцией № 1 Научно-технического совета
НИИСК Госстроя СССР.
Протокол № 11 от 14 ноября 1979 г.

НИИСК
КИЕВ 1980

УДК 624.046

Изложены методические рекомендации по проверке несущей способности обычных и преднапряженных элементов тавровых и двутавровых (или приводящихся к ним) сечений.

Рекомендации основаны на результатах теоретических и экспериментальных исследований, выполненных у нас и за рубежом, отличаются четкостью исходных предпосылок, используемых при решении рассматриваемых задач, и позволяют проектировать конструкции, отвечающие современным требованиям.

Распространяются на элементы из бетонов на плотных заполнителях и цементном вяжущем, бетонов на пористых заполнителях и цементном вяжущем и плотных силикатных бетонов.

Рассчитаны на инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских организаций, а также студентов и аспирантов вузов и факультетов строительного профиля.

Разработаны инженерами В.И.Колчуновым, И.В.Руденко и докт. техн. наук А.Б.Голышевым (НИИСК Госстроя СССР) с использованием материалов НИИЖБ Госстроя СССР.

Отзывы и замечания направлять по адресу: 252180 Киев-180, ул. И.Клименко,5/2, НИИСК Госстроя СССР, лаборатория теории расчета железобетонных конструкций.

Изд. № 38-79

© Научно-исследовательский институт строительных конструкций (НИИСК) Госстроя СССР, 1980

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Расчет несущей способности железобетонных элементов при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы производится на основе следующих предпосылок:

в качестве расчетной принимается схема, показанная на рис. I;

связь между напряжениями и деформациями арматурной стали принимается в виде диаграмм, показанных на рис. 2, связь между нормальными напряжениями и продольными деформациями бетона - принимается в виде диаграммы, показанной на рис. 3,а, между касательными напряжениями и деформациями сдвига - в виде диаграммы, показанной на рис. 3,б, где при $a/h_o \leq 2$ $R_{cg}=0,5R_{np}$, а при $a/h_o \geq 2,5$ $R_{cg}=2,2R_p$ (для $2 < a/h_o < 2,5$ численные значения R_{cg} находятся по интерполяции);

для средних деформаций бетона и арматуры на участках между двумя ближайшими к сечению I-I трещинами считается справедливой гипотеза плоских сечений;

считается, что эпюра касательных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I-I ограничивается квадратной параболой с максимальной ординатой, расположенной на уровне вершины наклонной трещины;

напряжения в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной и в сечении I-I принимаются не более предельного сопротивления R_a ;

напряжения в поперечной арматуре, пересекаемой наклонной трещиной, принимаются равными предельному сопротивлению R_{ax} ;

в расчет вводится поперечное усилие в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной Q_a ;

несущая способность элемента считается исчерпанной, если деформации бетона в сечении I-I над наклонной трещиной по направлению главных сжимающих напряжений достигают предельных значений.

На рис. I λ - коэффициент пластичности бетона в условиях плоского напряженного состояния (см. п. 3.I).

I.2. Проверка несущей способности предусматривает два случая (см. рис. I). В I-м случае $\lambda > 0$, т.е. эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I-I принимается

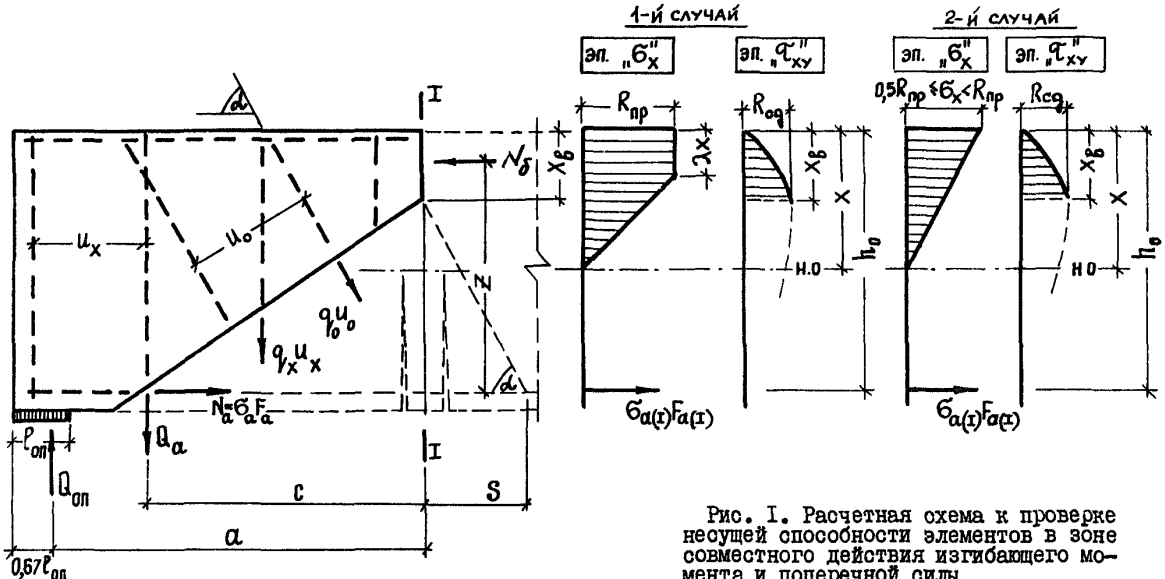


Рис. I. Расчетная схема к проверке несущей способности элементов в зоне совместного действия изгибающего момента и поперечной силы

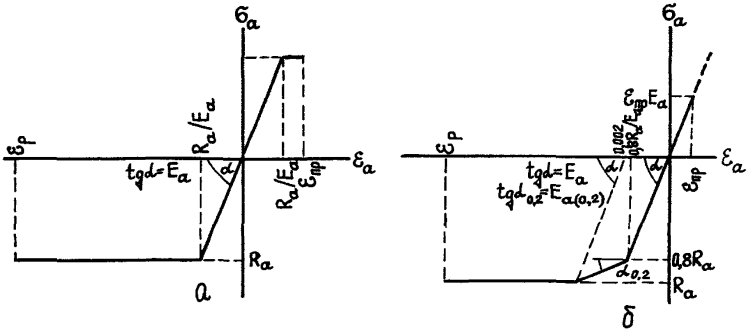


Рис. 2. Диаграммы "$\sigma - \varepsilon$" для арматурной стали, имеющей физический предел текучести (а) и не имеющей физического предела текучести (б)

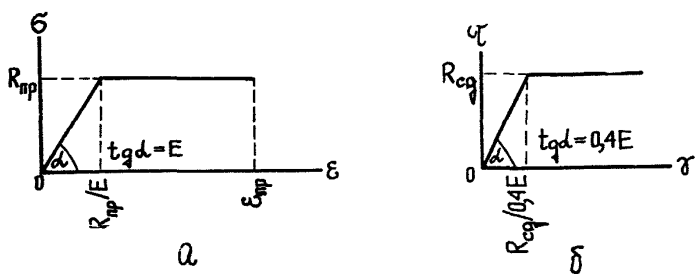


Рис. 3. Диаграммы "$\sigma - \varepsilon$" (а) и "$\tau - \gamma$" (б) для бетона

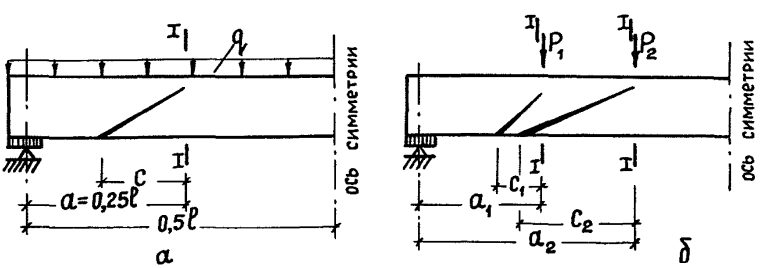


Рис. 4. К определению расчетных наклонных трещин

в виде прямоугольной трапеции; 2-й случай отвечает условию $\lambda \leq 0$, т.е. эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I–I принимается в виде треугольника.

Как в том, так и в другом случае расчет производится в зависимости от положения нейтральной оси в сечении I–I относительно нижней грани сжатой полки.

I.3. В качестве расчетных наклонных трещин рассматриваются: при действии равномерно-распределенной нагрузки – трещины с вершинами, расположенными на расстоянии $a=0{,}25\ell$ от осей опор (рис. 4,а), при действии нагрузки в виде сосредоточенных сил – трещины с вершинами под силами (рис. 4,б), при совместном действии сосредоточенных сил и равномерно-распределенной нагрузки – трещины с вершинами, расположенными на расстоянии от осей опор $a=0{,}25\ell$ и трещины с вершинами под силами.

2. ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.I. Проверка несущей способности для I-го случая производится в соответствии со следующими рекомендациями.

При $x \leq h'_п$ должно выполняться условие

$$M_x \leq M_{р(x)} = 0{,}7 R_{пр} b'_п x \left[h_o(1+\lambda) - 0{,}77x(1+\lambda+\lambda^2)\right], \qquad (I)$$

где M_x – изгибающий момент в сечении I–I (т.е. в нормальном сечении, проходящем через вершину наклонной трещины) от внешней нагрузки.

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле

$$x = \frac{A_2}{2A_1}\left(-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4A_1A_3}{A_2^2}}\right), \qquad (2)$$

где

$$A_1 = 0{,}7(1-\lambda^2) b'_п; \qquad (3)$$

$$A_2 = K_a\left[n - \frac{1-\lambda}{R_{пр}}\left(\sigma_{o1} + 0{,}008E_a\right)\right]F_{a(x)}; \qquad (4)$$

$$A_3 = -K_a n F_{a(x)} h_o; \qquad (5)$$

$$K_a = \frac{R_a}{R_a + 0{,}01E_a}. \qquad (6)$$

При этом должно выполняться условие

$$0{,}8R_a \le \left\{\sigma_{a(x)} = K_a\left[\frac{nR_{np}(h_o - x)}{(1-\lambda)x} + \left(\sigma_{o1} + 0{,}008E_a\right)\right]\right\} \le R_a . \qquad (7)$$

Если условие (7) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_7$ – по формулам (3)–(5) при $K_a = 1$ и $0{,}008E_a = 0$

Если условие (7) не выполняется справа,

$$x = \frac{2R_a F_{a(x)}}{[(1+\lambda)R_{np}b_n']} . \qquad (8)$$

При $A_2 \ge 0$ в формуле (2) ставится знак плюс, при $A_2 < 0$ – знак минус.

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле

$$x_\beta = \frac{B_2}{2B_1}\left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4B_1B_7}{B_2^2}}\right), \qquad (9)$$

где $$B_1 = 0{,}7R_{np}b_n' ; \qquad (10)$$

$$B_2 = 0{,}67R_{cq}b_n'c - R_{np}b_n'h_o - 0{,}7q_o\cos\alpha(c\sin\alpha + h_o\cos\alpha); \qquad (11)$$

$$B_7 = M_{p(x)}\mathcal{D} + 0{,}7\left[q_x c^2 + q_o(c\sin\alpha + h_o\cos\alpha)^2\right]. \qquad (12)$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам

$$Q_a = M_{p(x)}\frac{1-\mathcal{D}}{c} - 0{,}67R_{cq}b_n'x_\beta - q_x c - q_o(c+s)\sin^2\alpha \qquad (13)$$

и $$N_a = R_{np}b_n'x_\beta - 0{,}7q_o(c+s)\sin 2\alpha . \qquad (14)$$

При этом должны выполняться условия

$$Q_a \simeq M_{p(x)}\frac{1-\mathcal{D}}{10\,c} \qquad (15)$$

и $$N_a \le R_a F_a . \qquad (16)$$

В формулах (11)–(14):

$$q_x = \frac{R_{ax}F_x}{u_x} ; \qquad (17)$$

$$q_o = \frac{R_{ax} F_o}{u_o}; \tag{18}$$

$$S = (h_o - x_в) ctg \alpha. \tag{19}$$

В общем случае (при совместном действии сосредоточенных сил и равномерно-распределенной нагрузки)

$$\varphi = 1 - \frac{c}{a} + \frac{c}{\frac{2Q_{on}}{q} - a}. \tag{20}$$

При $x > h'_n$ и $x_в \le h'_n$ в зависимости от положения точки перелома эпюры нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I–I относительно нижней грани сжатой полки могут иметь место два подслучая.

При $\lambda x \le h'_n$ проверка несущей способности производится из условия

$$M_x \le M_{p(x)} = 0{,}5 R_{np} \left\{ B'_n x \left[h_o (1+\lambda) - 0{,}77 x (1 + \lambda + \lambda^2) \right] - \right.$$
$$\left. - \frac{B'_n - B}{(1-\lambda)x} (x - h'_n)^2 (h_o - 0{,}77x - 0{,}67 h'_n) \right\}. \tag{21}$$

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), где:

$$A_1 = 0{,}5 (B - \lambda^2 B'_n); \tag{22}$$

$$A_2 = \kappa_a \left[n - \frac{1-\lambda}{R_{np}} (\sigma_{o1} + 0{,}008 E_a) \right] F_{a(x)} + F'_{cв}; \tag{23}$$

$$A_3 = -\left[\kappa_a n F_{a(x)} h_o + 0{,}5 F'_{cв} h'_n \right]; \tag{24}$$

при этом должно выполняться условие (7).

Если условие (7) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (22)–(24) при $\kappa_a = 1$ и $0{,}008 E_a = 0$.

Если условие (7) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (22) и

$$A_2 = F'_{cв} - \frac{(1-\lambda) R_a F_{a(x)}}{R_{np}}; \tag{25}$$

$$A_3 = -0{,}5 F'_{cв} h'_n . \qquad (26)$$

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), коэффициенты $B_1 - B_3$ – по формулам (I0), (I2) и

$$B_2 = 0{,}67 R_{cq} \beta c - R_{пр} \beta'_n h_o - 0{,}5 q_o \cos\alpha (c \sin\alpha + h_o \cos\alpha). \qquad (27)$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам

$$Q_a = M_{p(x)} \frac{1-\varphi}{c} - 0{,}67 R_{cq} \beta x_в - q_x c - q_o (c+s) \sin^2\alpha \qquad (28)$$

и (I4), при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При $\lambda x \geq h'_n$ – проверка несущей способности производится из условия

$$M_I \leq M_{p(x)} = 0{,}5 R_{пр} \left\{ \beta x \left[(1+\lambda) h_o - 0{,}33 x (1+\lambda+\lambda^2) \right] + (2h_o - h'_n) F'_{cв} \right\}. \qquad (29)$$

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (5) и

$$A_1 = 0{,}5 (1-\lambda^2) \beta; \qquad (30)$$

$$A_2 = K_a \left[n - \frac{1-\lambda}{R_{пр}} (\sigma_{o1} + 0{,}008 E_a) \right] F_{a(x)} + (1-\lambda) F'_{cв}. \qquad (31)$$

При этом должно выполняться условие (7).

Если условие (7) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (30), (3I) и (5) при $K_a = 1$ и $0{,}008 E_a = 0$.

Если условие (7) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле

$$x = 2 \frac{R_a F_{a(x)} - R_{пр} F'_{cв}}{(1+\lambda) R_{пр} \beta}. \qquad (32)$$

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9) коэффициенты $B_1 - B_3$ – по формулам (I0), (27) и (I2).

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (28) и (I4),

при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При $x > h_n$ и $x_в > h_в$ в зависимости от положения точки перелома эпюры нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I–I относительно нижней грани сжатой полки могут иметь место два подслучая.

При $\lambda x \le h'_n$ проверка несущей способности производится из условия (2I).

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_5 – по формулам (22)-(24), при этом должно выполняться условие (7).

Если условие (7) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_7 – по формулам (22)-(24) при $\kappa_\alpha = 1$ и $0{,}008 E_\alpha = 0$.

Если условие (7) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_7 – по формулам (22), (25) и (26).

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), где:

$$B_1 = 0{,}7 R_{пр} в; \qquad (33)$$

$$B_2 = 0{,}67 R_{сд} в c - R_{пр}(в h_o - 0{,}7 F'_{св}) - 0{,}7 q_o \cos\alpha (c\sin\alpha + h_o \cos\alpha); \qquad (34)$$

$$B_7 = M_{p(x)} \mathcal{D} - R_{пр} F'_{св} h_o + 0{,}7\left[q_x c^2 + q_o (c\sin\alpha + h_o \cos\alpha)^2\right]. \qquad (35)$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (28) и

$$N_\alpha = R_{пр}(в x_в + F'_{св}) - 0{,}7 q_o (c+s)\sin 2\alpha, \qquad (36)$$

при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При $\lambda x > h'_n$ проверка несущей способности производится из условия (29).

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_7 – по формулам (30), (3I) и (5), при этом должно выполняться условие (7).

Если условие (7) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_7 – по фор-

мулам (30), (3I) и (5) при $\kappa_a=1$ и $0{,}008E_a=0$.

Если условие (7) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле (32).

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), коэффициенты $\beta_1-\beta_7$ – по формулам (33)–(35).

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (28) и (36), при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При арматурной стали, имеющей физический предел текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2) с учетом (3)–(5) или (30), (3I) и (5) при $\kappa_a=1$ и $0{,}008E_a=0$, а при $\sigma_{a(x)} > R_a$ – по формуле (2) с учетом (22), (25) и (26) или по формуле (32), в зависимости от положения нейтральной оси и точки перелома эпюры нормальных напряжений относительно нижней грани сжатой полки.

Величина β_n', вводимая в расчет (в этом пункте и во всех последующих), принимается в соответствии с п. 3.I6 СНиП II-2I-75.

При невыполнении условия (I5) необходимо изменить интенсивность поперечного армирования в виде вертикальных стержней (если нагельная сила Q_a больше правой части указанного условия – увеличить, если меньше – уменьшить) и уточнить значения x_β и N_a.

Интенсивность поперечного армирования в виде вертикальных стержней, удовлетворяющая условию (I5),– q_x^* –определяется по формуле

$$q_x^* = \frac{q_x c + Q_a - M_{p(x)}\frac{1-\Phi}{10\cdot c}}{c}. \qquad (37)$$

Изменение интенсивности достигается за счет изменения шага вертикальных стержней или площади их поперечного сечения (или того и другого одновременно).

При невыполнении условия (I6) необходимо уменьшить количество обрываемой (отгибаемой) арматуры.

П р и м е ч а н и е . При отсутствии обрывов (отгибов) продольной растянутой арматуры на участке длиной c условие (I6) не проверяется.

В заключение расчета следует при полученной по формуле (37)

интенсивности поперечного армирования уточнить (по графикам рис. 6) значение коэффициента K, а по формуле (59) – коэффициента λ. При значительной разнице в начальной величине и уточненной необходимо произвести полный перерасчет элемента.

2.2. Проверка несущей способности для 2-го случая производится в соответствии со следующими рекомендациями.

При $x \le h'_n$ должно выполняться условие

$$M_x \le M_{p(x)} = \frac{0{,}7KR_{np}b'_n x}{1-\lambda_{np}}(h_o - 0{,}77x). \qquad (38)$$

Значение M_x расшифровано в п. 2.1.

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_7$ – по формулам (5) и

$$A_1 = 0{,}7b'_n; \qquad (39)$$

$$A_2 = K_\alpha\left[n - \frac{1-\lambda_{np}}{KR_{np}}\left(\sigma_{o1} + 0{,}008E_\alpha\right)\right]F'_{a(x)}; \qquad (40)$$

при этом должно выполняться условие

$$0{,}8R_a < \left\{\sigma_{a(x)} = K_\alpha\left[\frac{nKR_{np}(h_o - x)}{(1-\lambda_{np})x} + \left(\sigma_{o1} + 0{,}008E_\alpha\right)\right]\right\} \le R_a. \qquad (41)$$

Если условие (41) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_7$ – по формулам (39), (40) и (5) при $K_\alpha = 1$ и $0{,}008E_\alpha = 0$.

Если условие (41) не выполняется справа,

$$x = \frac{2(1-\lambda_{np})R_a F_{a(x)}}{KR_{np}b'_n}. \qquad (42)$$

Численные значения K и λ_{np} определяются в соответствии с пп. 3.1–3.3, K_α – по формуле (6).

Значения M_x и σ_{o1} расшифрованы в п. 2.1.

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), коэффициенты $B_1 - B_7$ – по формулам (12) и

$$B_1 = \frac{0{,}7KR_{np}b'_n}{1-\lambda_{np}}; \qquad (43)$$

$$B_2 = 0{,}67R_{cq}b'_n c - \frac{KR_{np}b'_n h_o}{1-\lambda_{np}} - 0{,}5q_o\cos\alpha(c\sin\alpha + h_o\cos\alpha). \qquad (44)$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (I3) и

$$N_a = \frac{kR_{пр} b'_п x_в}{1-\lambda_{пр}} - 0{,}5 q_0 (c+s)\sin 2\alpha, \tag{45}$$

при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При $x > h'_п$ и $x_в \leq h'_п$ должно выполняться условие

$$M_x \leq M_{p(x)} = \frac{0{,}5kR_{пр}}{1-\lambda_{пр}}\left[b'_п x(h_0 - 0{,}33x) - \frac{b'_п - b}{x}(x-h'_п)^2(h_0 - 0{,}33x - 0{,}67h'_п)\right]. \tag{46}$$

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (24) и

$$A_1 = 0{,}5b; \tag{47}$$

$$A_2 = k_a\left[n - \frac{1-\lambda_{пр}}{kR_{пр}}(\sigma_{01} + 0{,}008E_a)\right]F_{a(x)} + (1-\lambda_{пр})F'_{cв}; \tag{48}$$

при этом должно выполняться условие (4I).

Если условие (4I) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (47), (48) и (24) при $k_a = 1$ и $0{,}008E_a = 0$.

Если условие (4I) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (47), (26) и

$$A_2 = F'_{cв} - \frac{(1-\lambda_{пр})R_a F_{a(x)}}{kR_{пр}}. \tag{49}$$

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), коэффициенты $B_1 - B_3$ – по формулам (43), (I2) и

$$B_2 = 0{,}67R_{cq}bc - \frac{kR_{пр}b'_п h_0}{1-\lambda_{пр}} - 0{,}5q_0\cos\alpha(c\sin\alpha + h_0\cos\alpha). \tag{50}$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (28) и (45), при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При $x > h'_п$ и $x_в > h'_п$ должно выполняться условие (46).

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2), коэффициенты $A_1 - A_3$ – по формулам (47), (48) и (24), при

этом должно выполняться условие (4I).

Если условие (4I) не выполняется слева, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_3 – по формулам (47), (48) и (24) при $\kappa_a=1$ и $0{,}008E_a=0$.

Если условие (4I) не выполняется справа, высота сжатой зоны определяется по формуле (2), коэффициенты A_1-A_3 – по формулам (47), (49) и (26).

Высота сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной определяется по формуле (9), где:

$$B_1=\frac{0{,}7KR_{пр}B}{1-\lambda_{пр}}; \qquad (5I)$$

$$B_2=0{,}67R_{сд}Bc-\frac{KR_{пр}(Bh_0-0{,}7F'_{сб})}{1-\lambda_{пр}}-0{,}5q_0\cos\alpha(c\sin\alpha+h_0\cos\alpha); \qquad (52)$$

$$B_3=M_{p(x)}\mathcal{D}-\frac{KR_{пр}F'_{сб}h_0}{1-\lambda_{пр}}+0{,}5\left[q_x c^2+q_0(c\sin\alpha+h_0\cos\alpha)^2\right]. \qquad (53)$$

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения её наклонной трещиной определяются по формулам (28) и

$$N_a=\frac{KR_{пр}(Bx_в+F'_{сб})}{1-\lambda_{пр}}-0{,}5q_0(c+s)\sin2\alpha; \qquad (54)$$

при этом должны выполняться условия (I5) и (I6).

При арматурной стали, имеющей физический предел текучести, высота сжатой зоны сечения I–I определяется по формуле (2) с учетом (39), (40) и (5) или (47), (48) и (24) при $\kappa_a=1$ и $0{,}008E_a=0$, а при $\sigma_{a(x)}>R_a$ – по формуле (42) или по формуле (2) с учетом (47), (49) и (26) в зависимости от положения нейтральной оси относительно нижней грани сжатой полки.

При невыполнении условия (I5) необходимо изменить интенсивность поперечного армирования в виде вертикальных стержней (если нагельная сила Q_a больше правой части указанного условия – увеличить, если меньше – уменьшить) и уточнить значения $x_в$ и N_a.

Интенсивность поперечного армирования в виде вертикальных стержней, удовлетворяющая условию (I5), – q^*_x – определяется по формуле (37). Изменение интенсивности достигается за счет изменения шага вертикальных стержней или площади их поперечного сечения (или того и другого одновременно).

При невыполнении условия (I6) необходимо уменьшить количество обрываемой (отгибаемой) арматуры.

Примечание. При отсутствии обрывов (отгибов) продольной растянутой арматуры на участке длиной c условие (I6) не проверяется.

В заключение расчета следует при полученной по формуле (37) интенсивности поперечного армирования уточнить (по графикам рис. 6) значение коэффициента K. При значительной разнице в начальной и уточненной величине указанного коэффициента необходимо произвести полный перерасчет элемента.

2.3. При расчете элементов тавровых и двутавровых сечений с слабо развитой высокой полкой в сжатой зоне (рис.5) допускается учитывать сопротивление бетона свесов сжатой полки сдвигу. Несущая способность таких элементов проверяется в соответствии с пп. 2.I и 2.2 с учетом замены в первых членах правой части формул (27),(34),(50),(52) и во втором члене правой части формулы (28) b на $b'_п$.

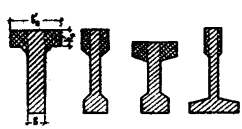


Рис. 5. Поперечные сечения к п. 2.3.

2.4. При отсутствии поперечной арматуры проверка несущей способности элементов производится по формулам пп. 2.I и 2.2 при $q_{1x} = q_{1o} = 0$. При этом должны выполняться условия (I5) и (I6). При невыполнении первого условия необходима постановка поперечной арматуры в виде вертикальных стержней; при невыполнении второго условия необходимо уменьшить количество обрываемой арматуры.

2.5. Проверка несущей способности элементов прямоугольного сечения производится по формулам (I)-(4) или (38)-(45) при $b'_п = b$.

2.6. Длина проекции расчетной наклонной трещины на продоль-

ную ось элемента определяется в зависимости от места расположения рассматриваемой трещины по длине элемента (см. п.I.3).

Если вершина трещины расположена на расстоянии от оси опоры, равном $0{,}25\ell$,

$$c = 2a\left(\sqrt{1 - \frac{0{,}75 M_T}{M_{p(x)}}} - 0{,}5\right); \qquad (55)$$

если под силой –

$$c_1 = \frac{M_{1,p(x)} - M_T}{M_{1,p(x)}} a_1 \qquad (56)$$

и

$$c_2 = \frac{M_{2,p(x)} - M_T}{M_{2,p(x)}} a_2. \qquad (57)$$

Как в том, так и в другом случае должно выполняться условие

$$h_0 \leq c \leq 2h_0. \qquad (58)$$

Если условие (58) не выполняется слева, величина c принимается равной h_0, если справа – $2h_0$.

Численные значения M_T определяются в соответствии со СНиП II-2I-75, численные значения $M_{p(x)}$ – по формулам (I), (2I), (29), (38) или (46) в зависимости от рассматриваемого случая и положения нейтральной оси относительно нижней грани сжатой полки.

2.7. При проверке несущей спосообности должно соблюдаться условие (6I) СНиП II-2I-75, обеспечивающее сопротивление ребра элемента между наклонными трещинами действию главных сжимающих напряжений.

2.8. Проверка несущей способности в соответствии с пп. 2.I и 2.2 не производится, если соблюдается условие (62) СНиП II-2I-75, обеспечивающее сопротивление ребра элемента образованию наклонных трещин.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА И АРМАТУРЫ

3.I. Численные значения коэффициента пластичности λ определяются по формуле

$$\lambda = 1 - \frac{1 - \lambda_{пр}}{K}, \qquad (59)$$

где $\lambda_{пр}$ – предельное значение λ (см. пп. 3.2 и 3.3) коэффициента $к$ – по графикам рис. 6, где:

$$q_в = \frac{R_{ax} F_o}{u_o} + \frac{R_{ax} F_x}{u_x} \sin\alpha. \qquad (60)$$

Примечание. На рис. 6 величины $к$ для промежуточных значений $\frac{R_a F_a}{\delta h_o + F'_{cb}}$ находятся по интерполяции.

3.2. При обработке результатов экспериментальных исследований и натурных испытаний численные значения модулей упругости бетона и арматурной стали (E и E_a), предельных сопротивлений бетона осевому сжатию и растяжению ($R_{пр}$ и R_p) и предельных сопротивлений продольной и поперечной арматуры (R_a и R_{ax}) определяются из опыта, коэффициента $\lambda_{пр}$ – из опыта, а при отсутствии надежных опытных данных – по формулам:

для трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях марок 150–800

$$\lambda_{пр} = 0{,}97 - 0{,}00077 R_{пр}; \qquad (61)$$

для мелкозернистых бетонов на плотном заполнителе марок 150–600

$$\lambda_{пр} = 0{,}88 - 0{,}0008 R_{пр}; \qquad (62)$$

для бетонов на пористых заполнителях и плотных силикатных бетонов марок 100–400[ж]

$$\lambda_{пр} = 0{,}71 - 0{,}001 R_{пр}. \qquad (63)$$

3.3. При проектировании конструкций численные значения модуля упругости бетона (E) определяются по таблице, модуля упругости арматурной стали (E_a) и предельных сопротивлений бетона и арматуры ($R_{пр}$, R_p и R_a, R_{ax}) – по табл. 29, 13, 22 и 23 СНиП II-21-75, коэффициента $\lambda_{пр}$ – по формулам:

для трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях марок 150–800

$$\lambda_{пр} = 0{,}97 - 0{,}0014 R_{пр}; \qquad (64)$$

для мелкозернистых бетонов на плотном заполнителе марок 150–600

$$\lambda_{пр} = 0{,}85 - 0{,}0017 R_{пр}; \qquad (65)$$

[ж] Ориентировочно.

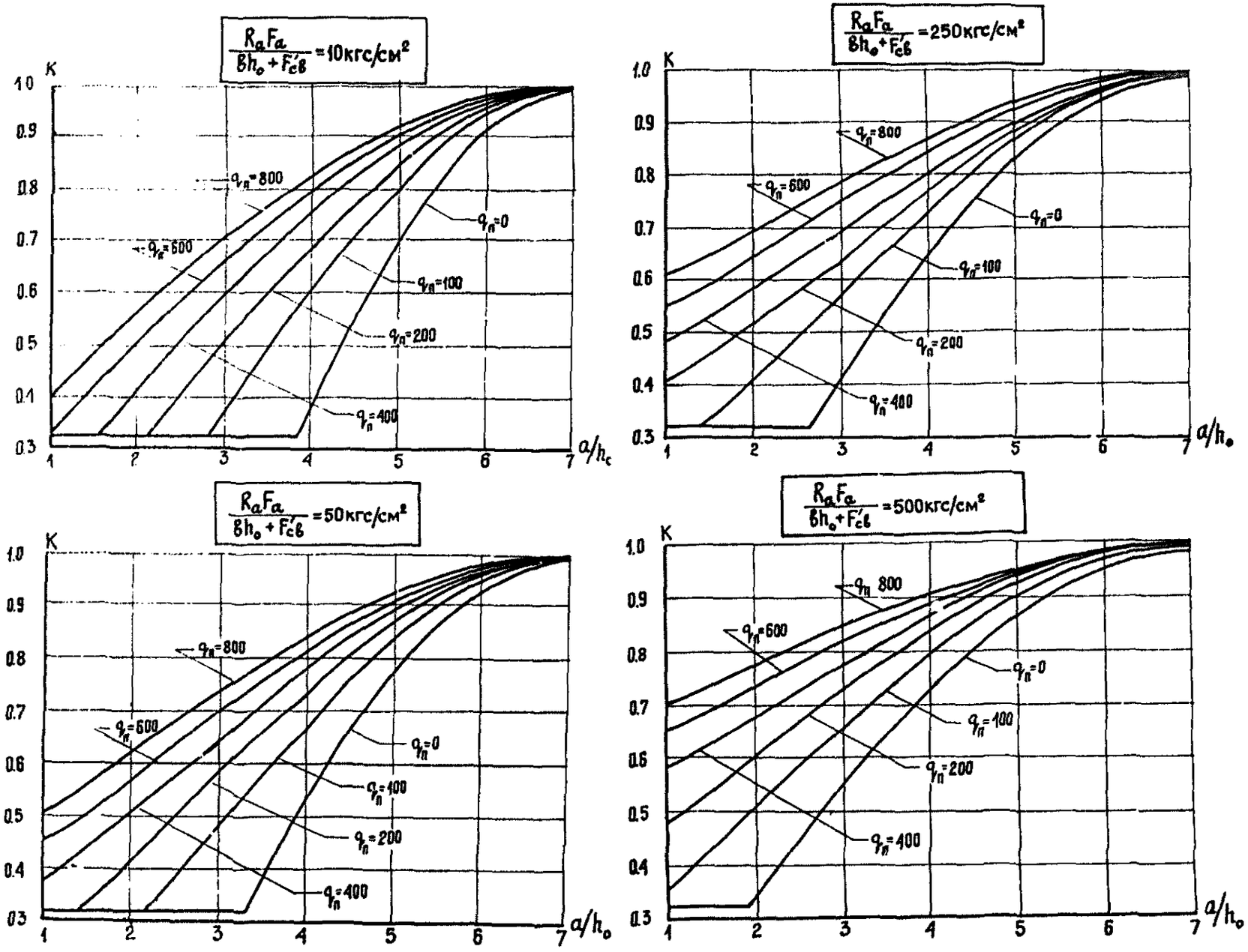


Рис. 6. Графики зависимости „K – a/h_o"

для бетонов на пористых заполнителях и плотных силикатных бетонов марок 100–400*

$$\lambda_{пр} = 0{,}60 - 0{,}0022 R_{пр}. \qquad (66)$$

Расчетные значения начальных модулей упругости бетонов при сжатии $E \cdot 10^5$, кгс/см², при проектной марке по прочности на сжатие

Вид бетона			Марка	М100	М150	М200	М250	М300	М350	М400	М450	М500	М600	М700	М800
На плотных заполнителях	Трехкомпонентный		Естественного твердения	–	125	145	160	175	185	200	208	217	230	237	240
			Подвергнутый тепловой обработке при атмосферном давлении	–	117	130	145	155	168	180	187	199	209	210	219
	Межкомпонентный		Естественного твердения	–	102	120	132	140	150	160	–	–	–	–	–
			Подвергнутый тепловой обработке при атмосферном давлении	–	93	105	117	125	132	140	–	–	–	–	–
На пористых заполнителях в зависимости от объемного веса бетона, тс/м³		1,4		57	63	70	75	81	87	–	–	–	–	–	–
		1,8		72	81	90	100	107	111	115	–	–	–	–	–
		2,2		–	102	111	120	130	135	141	–	–	–	–	–
Плотный силикатный			На известково-песчаном вяжущем	–	60	75	85	100	110	115	–	125	130	–	–
			На известково-шлаковом вяжущем	–	70	85	100	115	129	135	–	145	150	–	–

Приложение I

ПРИМЕР РАСЧЕТА. Определить несущую способность однопролетной свободно лежащей железобетонной балки (см. рисунок), загруженной в четвертях пролета двумя равными сосредоточенными силами, на участках совместного действия изгибающего момента и поперечной силы.

Исходные данные

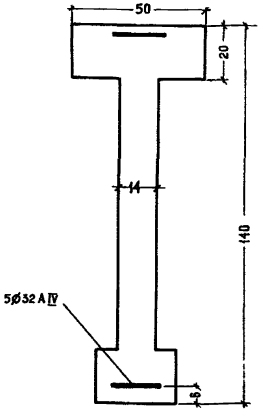
Расчетный пролет балки l = 1200 см. Бетон тяжелый естественного твердения марки 400; $R_{пр}$ = 175 кгс/см²; $R_р$ =12 кгс/см²; E = 2,05.10⁵ кгс/см². Продольная арматура А – предварительно напряженная площадью F_a = 40,2 см²; R_a = 5000 кгс/см²; E_a = 2.10⁶ кгс/см²; предварительное напряжение (с учетом первых потерь) σ_{0a} = 4000 кгс/см². Поперечная арматура в виде сварных хомутов из стали класса А-III диаметром 12 мм, шагом 10 см, по два в сечении (т.е. F_x = 2,26 см²); R_{ax} =2700 кгс/см2; E_x = 2.10⁶ кгс/см²; $M_т$ = 18,7.10⁶ кгс.см.

Решение

По формуле (64) находим

$$\lambda_{пр} = 0{,}82 - 0{,}00075.175 = 0{,}69.$$

* Ориентировочно.



Поперечное сечение балки (см)

По графикам рис. 6 при $a/h_o = 2,24$; $R_a F_a/(Bh_o + F'_{cb}) = 77,4$ кгс/см^2 и $q_п = 2700.2,26/10 = 610$ кгс/см имеем $K = 0,61$. С учетом сказанного /см. формулу (59)/ $\lambda = 1 - (1 - 0,69)/0,61 = 0,49$.

Так как $\lambda > 0$, имеет место I-й случай. Допустим, что нейтральная ось проходит в ребре и что $\lambda x < h'_п$, тогда /см. формулы (6),(22)-(24) и (2)/: $K_a = 5000/(5000+0,01.2.10^6) = 0,2$; $A_1 = 0,5(14-0,49^2.50) = 0,997$;

$$A_2 = 0,2\left[9,8 - \frac{1-0,49}{175}(4000+0,008.2.10^6)\right] 40,2 + 720 = 330,2;$$

$$A_3 = -(0,2.9,8.40,2.134+0,5.720.20) = -17760;$$

$$x = \frac{330,2}{2.0,997}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4.0,997.17760}{330,2^2}}\right) = 47.1 \text{см}.$$

Так как $\lambda x = 0,49.47,1 = 23,1 > h'_п$ (т.е. условие $\lambda x < h'_п$ не выполняется), необходимо пересчитать значение x /см. формулы (30), (31),(5) и (2)/. В результате: $A_1 = 0,5(1-0,49^2)14 = 5,32$;

$$A_2 = 0,2\left[9,8 - \frac{1-0,49}{175}(4000+0,008.2.10^6)\right] 40,2+(1-0,49)720 = -22,63;$$

$$A_3 = -0,2.9,8.40,2.134 = -10560;$$

$$x = \frac{-22,63}{2.5,32}\left(-1 - \sqrt{1 + \frac{4.5,32.10560}{22,63^2}}\right) = 46,7 \text{ см}.$$

Напряжения в арматуре в сечении I-I равны /см. неравенство (7)/:

$$\sigma_{a(I)} = 0,2\left[\frac{9,8.175(134-46,7)}{(1-0,49)46,7} + 4000 + 0,008.2.10^6\right] =$$

$$= 5257 \text{ кгс/см}^2 > R_a.$$

Так как условие (7) не выполняется, пересчитываем высоту

сжатой зоны X по формуле (32)

$$X = 2\,\frac{5000.40,2-175.720}{(1+0,49)175.14} = 41,1 \text{ см}$$

и определяем несущую способность элемента /правая часть неравенства (20)/ :

$$0,5.175\,\{14.41,1\,[(1+0,49)134-0,33.41,1\,x\ x\ (1+0,49+0,49^2)] + (2.134-20)720\} = 24495000 \text{ кгс.см} = 245 \text{ тс.м}.$$

Так как длина проекции наклонной трещины на продольную ось конструкции /см. формулу (56)/

$$c = \frac{(24495000 - 18700000)300}{24495000} = 71 \text{ см} < h_o,$$

принимаем $c = h_o = 134$ см.

Допустим теперь, что вершина наклонной трещины расположена в полке, т.е., что $x_в \le h'_п$. В этом случае высота сжатой зоны бетона сечения I–I над наклонной трещиной вычисляется по формуле (9) с учетом (20), (10), (27) и (12):

$$\varphi = 1 - \frac{134}{300} = 0,55;$$

$$B_1 = 0,5.175.50 = 4375;$$

$$B_2 = 0,67.58.14.134-175.50.134 = -1099600;$$

$$B_3 = 24495000.0,55+0,5.610.134^2 = 18948800;$$

$$x_в = \frac{-1099600}{2.4375}\left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4.4375.18948800}{1099600^2}}\right) = 18,6 \text{ см} < h'_п.$$

По формуле (28) определяем

$$Q_α = 24495000\,\frac{1-0,55}{134} - 0,67.58.14.18,6 - 610.134 = -9600 \text{ кгс}$$

Так как условие (15) не выполняется, необходимо изменить интенсивность поперечного армирования. По формуле (37) находим

$$q^*_x = \frac{610.134-9600-24495000(1-0,55)/(10.134)}{134} = 477 \text{ кгс/см}.$$

Если поставить хомуты через 12,5 см, то $q_x = 488$ кгс/см.

Уточняем высоту сжатой зоны сечения I–I над наклонной трещиной. Численные значения коэффициентов B_1 и B_2 не изменяются, а

$$B_3 = 24495000.0,55+0,5.488.134^2 = 17853500.$$

В результате /см. формулу (9)/:

$$x_в = \frac{-1099600}{2.4375}\left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4.4375.17853500}{1099600^2}}\right) = 17,4 \text{ см}.$$

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ. Усилия (напряжения): q – интенсивность равномерно-распределенной нагрузки; M – изгибающий момент; $M_т$ – изгибающий момент, вызывающий разрыв крайних растянутых волокон элемента в рассматриваемом сечении; $\sigma_{оп}$ – предварительное напряжение продольной растянутой арматуры с учетом первых потерь. Характеристики материалов: $R_{пр}$, $R_р$ и $R_{сд}$ – предельные сопрстивления бетона ссевому сжатию, осевому растяжению и сдвигу; $R_а$ и $R_{ах}$ – предельные сопротивления продольной и поперечной арматуры; E и $E_а$ – модули упругости бетона и арматурной стали; $n = E_а/E$; $\varepsilon_{пр}$ и $\varepsilon_р$ – относительные деформации предельной сжимаемости бетона и предельной растяжимости арматурной стали. Геометрические характеристики: $F'_{сб}$ – площадь свесов сжатой полки элемента; b, $b'_п$ и $h'_п$ – ширина ребра элемента и, соответственно, ширина и высота сжатой полки; $F_{а(х)}$ и $F_а$ – площади поперечных сечений продольной растянутой арматуры в сечении I–I и в месте пересечения ее наклонной трещиной; $F_х$ – площадь поперечного сечения поперечной арматуры в виде вертикальных стержней (хомутов), расположенной в одной, нормальной к оси элемента, плоскости, пересекающей наклонную трещину; $F_о$ – то же, поперечной арматуры в виде наклонных стержней (отгибов), расположенной в одной, наклонной к продольной оси элемента, плоскости.

О г л а в л е н и е

	стр.
I. Общие положения	3
2. Проверка несущей способности железобетонных элементов	6
3. Определение прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры	I6
Приложение I. Пример расчета	I9
Приложение 2. Условные обозначения	22

Научно-исследовательский институт строительных конструкций
Госстроя СССР

Владимир Иванович Колчунов,
Ирина Валентиновна Руденко,

Александр Борисович Голышев

Методические рекомендации по расчету несущей способности железобетонных изгибаемых элементов при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Редактор А.И.Капитоненко

Передано в произв. 25/П 1980 г. Подписано в печать 20/П 1980 г. БФ 19873. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Офсетная печать. 1,5 п.л., 1,869 усл.печ.л, 2,0 уч.-изд.л. Тираж 295 экз.
Зак. № 122. Цена 20 коп.

Научно-исследовательский институт строительных конструкций
Госстроя СССР
252180, Киев-180, ул. И.Клименко, 5/2

Полиграфическая лаборатория НИИСП Госстроя УССР, 252180, Киев-180, И.Клименко, 5/2

gost.e-ecolog.ru