НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

НИИСК
КИЕВ 1979

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одобрены секцией № 1 Научно-технического совета НИИСК
Госстроя СССР
Протокол № 4 от 19 апреля 1978 г.

НИИСК
КИЕВ 1979

УДК 624.046

Даны методические рекомендации по расчету элементов (преднапряженных и выполненных без предварительного напряжения) произвольного сечения, приводящегося к эквивалентному двутавровому, по прочности, трещиностойкости и деформациям.

Рекомендации основаны на результатах многолетних теоретических и экспериментальных исследований, отличаются общностью исходных предпосылок, используемых при решении отдельных задач, и могут рассматриваться в целом как определенный шаг в развитии инженерных методов расчета железобетонных конструкций.

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 докт.техн.наук А.Б.Голышевым, кандидатами техн.наук В.Я.Бачинским, А.Л.Мориным, инженерами И.В.Руденко, В.Ф.Усмановым, А.В.Харченко (лаборатория теории расчета железобетонных конструкций НИИСК Госстроя СССР), инж. Ю.А.Волковым (лаборатория конструкций из силикатных бетонов НИИСК Госстроя СССР), канд.техн.наук В.П.Полищуком (кафедра строительных конструкций Курского политехнического института), канд. техн. наук А.С.Залесовым (центральная лаборатория теории железобетона НИИЖБ Госстроя СССР – подразделы "Расчет по прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента" и "Расчет по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента").

Отзывы и замечания просим направлять по адресу: 252037 Киев-37, ул.И.Клименко, 5/2, НИИСК Госстроя СССР, лаборатория теории расчета железобетонных конструкций.

© Научно-исследовательский институт строительных конструкций Госстроя СССР (НИИСК), 1979

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЕ*

I.I. При расчете преднапряженных элементов по предельным состояниям определяются растягивающие напряжения в напрягаемой арматуре $A_н$ и $A'_н$, отвечающие рассматриваемой стадии работы элемента.

I.2. При определении растягивающих напряжений в напрягаемой арматуре учитываются потери предварительного напряжения, проявляющиеся до окончания обжатия бетона и после (в стадии эксплуатации).

При натяжении арматуры на упоры к первым потерям относятся потери от релаксации напряжений в арматуре, температурного перепада, деформаций анкеров и форм; ко вторым – потери от усадки и ползучести бетона.

При натяжении арматуры на бетон к первым потерям относятся потери от деформаций анкеров и трения арматуры о стенки каналов или поверхность бетона конструкции; ко вторым – потери от релаксации напряжений в арматуре и от усадки и ползучести бетона.

I.3. Равнодействующая сил в нижней и верхней напрягаемой арматуре, обжимающая приведенное сечение элемента, и эксцентриситет ее приложения относительно ц.т. указанного сечения определяются по формулам:

при учете первых потерь

$$N_{01}=\sigma_{01}F_н+\sigma'_{01}F'_н; \qquad (I.I)$$

$$e_{01}=\frac{\sigma_{01}F_н y_0-\sigma'_{01}F'_н y'_0}{N_{01}}; \qquad (I.2)$$

при учете всех потерь

$$N_{02}=\sigma_{02}F_н+\sigma'_{02}F'_н; \qquad (I.3)$$

---

* Принятые в работе обозначения даны в приложении 5.

$$e_{02}=\frac{\sigma_{02}F_н y_0-\sigma'_{02}F'_н y'_0}{N_{02}}. \qquad (I.4)$$

В этих формулах σ_{01} и σ'_{01} – предварительные напряжения в арматуре $A_н$ и $A'_н$, определяемые с учетом коэффициента точности натяжения и с учетом первых потерь; σ_{02} и σ'_{02} – то же, с учетом всех потерь.

I.4. Потери предварительного напряжения от релаксации напряжений в арматуре, температурного перепада, деформаций анкеров и форм и трения арматуры о стенки каналов или поверхность бетона конструкции определяются в соответствии с указаниями СНиП II-21-75, потери от усадки и ползучести бетона – в соответствии с пп.I.5-I.8 настоящих методических рекомендаций.

Учет длительных процессов усадки и ползучести осуществляется на основе технического варианта теории ползучести бетона – модернизированной теории старения.

I.5. Потери предварительного напряжения в нижней и верхней напрягаемой арматуре от усадки бетона определяются по формулам:

$$\sigma_п=\varepsilon_y E^н_a\,\frac{F+n^н_a F_н\rho}{F+n^н_a F_н\rho\gamma}; \qquad (I.5)$$

$$\sigma'_п=\varepsilon_y E^н_a\,\frac{F+n^н_a F'_н\rho'}{F+n^н_a F'_н\rho'\gamma}. \qquad (I.6)$$

I.6. Потери предварительного напряжения в нижней и верхней напрягаемой арматуре от ползучести бетона, вызванной длительным действием сил предварительного обжатия, определяются по формулам:

$$\sigma_п=n^н_a\sigma(1+\beta\sigma)\varphi\,\frac{F+n^н_a F_н\rho}{F+n^н_a F_н\rho[\gamma+2\beta\sigma(\gamma-1)]}; \qquad (I.7)$$

$$\sigma'_п=n^н_a\sigma'\varphi\,\frac{F+n^н_a F'_н\rho'}{F+n^н_a F'_н\rho'\gamma}. \qquad (I.8)$$

В этих формулах σ и σ' – напряжения в бетоне на уровне арматуры $A_н$ и $A'_н$ от кратковременного действия сил предварительного обжатия:

$$\sigma = \frac{N_{01}}{F_0}\left(1 + \frac{e_{c1} y_0}{r_0^2}\right); \qquad (I.9)$$

$$\sigma' = \frac{N_{01}}{F_0}\left(1 - \frac{e_{01} y_0'}{r_0^2}\right). \qquad (I.10)$$

I.7. Потери предварительного напряжения в нижней и верхней напрягаемой арматуре от ползучести бетона, вызванной длительным действием постоянных и длительных нагрузок, определяются по формулам:

$$\sigma_п = n_a^н \sigma \varphi \frac{F + n_a^н F_н \rho}{F + n_a^н F_н \rho \frac{y_0}{r_0}}; \qquad (I.11)$$

$$\sigma_п' = n_a^н \sigma' \varphi \frac{F + n_a^н F_н' \rho'}{F + n_a^н F_н' \rho' \frac{y_0'}{r_0}}. \qquad (I.12)$$

В этих формулах σ и σ' – напряжения в бетоне на уровне арматуры $A_н$ и $A_н'$ от кратковременного действия постоянных и длительных нагрузок:

$$\sigma = -\frac{M}{J_0} y_0; \qquad (I.13)$$

$$\sigma' = \frac{M}{J_0} y_0'. \qquad (I.14)$$

Примечание. Применительно к п.I.7 термин "потери" условен и принят ради единообразия (ползучесть бетона сопровождается возникновением напряжений одного знака с начальными).

I.8. Численные значения параметров ε_y и φ определяются в соответствии с приложением I настоящих рекомендаций, параметров γ и β – по таблицам приложения 2.

За начало отсчета времени при определении ε_y и φ принимаются, соответственно, момент окончания влажного хранения (термовлажностной обработки) элемента и момент нагружения элемента (силами предварительного обжатия, постоянными и длительными нагрузками).

2. РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПРОЧНОСТИ

2.I. Расчет по прочности железобетонных элементов производится для сечений, нормальных к продольной оси элемента (на действие изгибающего момента и на действие сил предварительного обжатия) и наклонных наиболее опасного направления.

Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии изгибающего момента

2.2. Определение предельных усилий в нормальном сечении при действии изгибающего момента производится на основе следующих предпосылок:

в качестве расчетного принимается сечение со средней высотой сжатой зоны x, соответствующей средним деформациям;

для средних деформаций бетона и арматуры считается справедливой гипотеза плоских сечений;

связь между напряжениями и деформациями бетона и напряжениями и деформациями арматуры принимается в виде диаграмм, показанных на рис.I;

сопротивление расчетного сечения считается исчерпанным, если деформации крайних сжатых волокон бетона или растянутой арматуры (или бетона и арматуры одновременно) достигают предельных значений.

Использование указанных предпосылок равносильно принятию эпюры нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны расчетного сечения в виде прямоугольной трапеции с высотой участка постоянных напряжений, равной λx, где:

при $R_{пр}/E < \varepsilon < \varepsilon_{пр}$ $\qquad \lambda = \frac{\varepsilon E - R_{пр}}{\varepsilon E}$;

при $\varepsilon = \varepsilon_{пр}$ $\qquad \lambda = \lambda_{пр} = \frac{\varepsilon_{пр} E - R_{пр}}{\varepsilon_{пр} E}$;

2.3. Проверка прочности нормальных сечений производится в зависимости от степени использования сопротивления сжатого бетона и растянутой арматуры. При этом возможны четыре случая исчерпания сопротивления: I-й случай отвечает полному

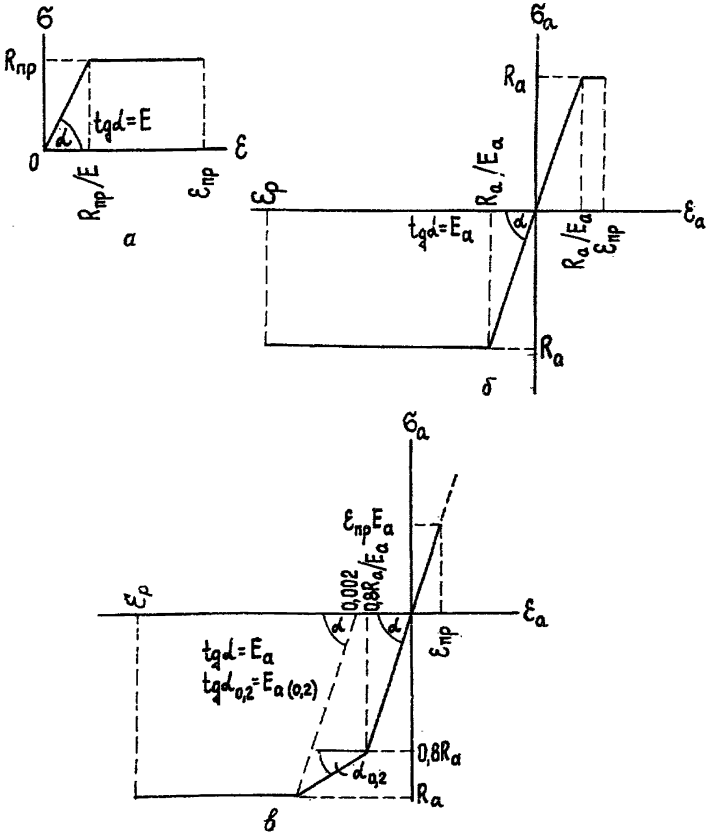


Рис.I. Диаграммы $\sigma - \varepsilon$: а – для бетона; б – для арматурной стали, имеющей физический предел текучести; в – для арматурной стали, не имеющей физического предела текучести.

использованию сопротивления арматуры, 2-й – полному использованию сопротивления арматуры и бетона, 3-й и 4-й – полному использованию сопротивления бетона при работе арматуры соответственно в упруго-пластической и упругой стадиях.

2.4. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (рис.2,а) преднапряженных элементов для I-го случая производится из условий:

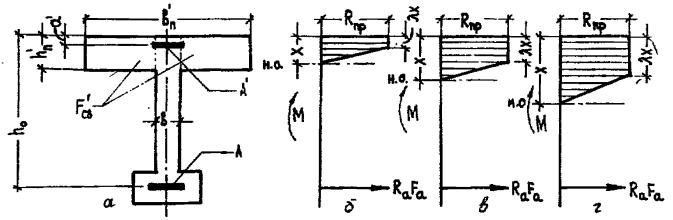


Рис. 2. К расчету по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии изгибающего момента (I-й случай): а - поперечное сечение; б, в, г - схемы действия усилий в сечении.

при $x \le h'_п$ (рис.2 ,б)

$$M \le 0{,}5 R_{пр} b'_п x\left[(1+\lambda)h_o - 0{,}33x(1+\lambda+\lambda^2)\right] + \sigma'_a F'_a (h_o - a'); \qquad (2.I)$$

при $x > h'_п$ и $\lambda x \le h'_п$ (рис.2 ,в)

$$M \le 0{,}5 R_{пр}\left\{b'_п x\left[(1+\lambda)h_o - 0{,}33x(1+\lambda+\lambda^2)\right] - \frac{(x-h'_п)^2(b'_п-b)}{x(1-\lambda)}\left[h_o - 0{,}33(x+2h'_п)\right]\right\} + \sigma'_a F'_a (h_o - a'); \qquad (2.2)$$

при $\lambda x > h'_п$ (рис.2 ,г)

$$M \le 0{,}5 R_{пр} bx\left[(1+\lambda)h_o - 0{,}33x(1+\lambda+\lambda^2)\right] + R_{пр} F'_{св}(h_o - 0{,}5h'_п) + \sigma'_a F'_a (h_o - a'). \qquad (2.3)$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле

$$x = \frac{A_2}{2A_1}\left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4A_1 A_3}{A_2^2}}\right), \qquad (2.4)$$

где

при $x \le h'_п$

$$A_1 = R_{пр} b'_п \left[1 + \frac{n_a R_{пр}}{2(\varepsilon_p E_a - \sigma_{o1})}\right]; \qquad (2.5)$$

$$A_2 = -\left[R_{пр} b'_п h_o \left(1 + \frac{n_a R_{пр}}{\varepsilon_p E_a - \sigma_{o1}}\right) + R_a F_a + (\varepsilon_p E_a - \sigma_{o1} + \sigma'_{o1}) F'_a\right]; \qquad (2.6)$$

$$A_3=\frac{n_a R_{np}^2 b_n' h_o^2}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}+R_a F_a h_o+\left[(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})a'+\sigma_{o1}' h_o\right]F_a'; \qquad (2.7)$$

при $x>h_n'$ и $\lambda x\le h_n'$

$$A_1=R_{np}b_n'\left[1+\frac{n_a R_{np}}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}\right]+\frac{1}{2n_a}(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})(b_n'-b); \qquad (2.8)$$

$$A_2=-\left[R_{np}b_n' h_o\left(1+\frac{n_a R_{np}}{\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1}}\right)+(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})\left(\frac{1}{n_a}F_{cb}'+F_a'\right)+R_a F_a+\sigma_{o1}' F_a'\right]; \qquad (2.9)$$

$$A_3=\frac{n_a R_{np}^2 b_n' h_o^2}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}+(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})\left(\frac{1}{2n_a}F_{cb}' h_n'+F_a' a'\right)+(R_a F_a+\sigma_{o1}' F_a')h_o; \qquad (2.10)$$

при $\lambda x>h_n'$

$$A_1=R_{np}b\left[1+\frac{n_a R_{np}}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}\right]; \qquad (2.11)$$

$$A_2=-\left\{R_{np}\left[\left(1+\frac{n_a R_{np}}{\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1}}\right)b h_o-F_{cb}'\right]+R_a F_a+(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1}+\sigma_{o1}')F_a'\right\}; \qquad (2.12)$$

$$A_3=R_{np}h_o\left[\frac{n_a R_{np} b h_o}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}-F_{cb}'\right]+R_a F_a h_o+\left[(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})a'+\sigma_{o1}' h_o\right]F_a'. \qquad (2.13)$$

В условиях прочности

$$\lambda=1-\frac{n_a R_{np}(h_o-x)}{(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})x}; \qquad (2.14)$$

$$\sigma_a'=\frac{n_a R_{np}(x-a')}{(1-\lambda)x}-\sigma_{o1}', \qquad (2.15)$$

при этом должно выполняться условие $\sigma_a'\le R_a$. Если указанное условие не выполняется, проверка прочности производится из условий (2.1)–(2.3) с учетом замены σ_a' на R_a; при $x\le h_n'$ высота сжатой зоны определяется по формуле

$$x=\frac{n_a R_{np}^2 b_n' h_o+(R_a F_a-R_a F_a')(\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}{R_{np}b_n'(0{,}5 n_a R_{np}+\varepsilon_p E_a-\sigma_{o1})}; \qquad (2.16)$$

при $x>h_n'$ и $\lambda x\le h_n'$ – по формуле (2.4), где

$$A_2=-\left[R_{пр}b'_п h_o\left(1+\frac{n_a R_{пр}}{\varepsilon_p E_a-\sigma_{01}}\right)+\frac{1}{n_a}(\varepsilon_p E_a-\sigma_{01})F'_{сб}+R_a F_a-R_a F'_a\right]; \quad (2.17)$$

$$A_3=\frac{n_a R^2_{пр} b'_п h^2_o}{2(\varepsilon_p E_a-\sigma_{01})}+\frac{1}{2n_a}(\varepsilon_p E_a-\sigma_{01})F'_{сб}h'_п+(R_a F_a-R_a F'_a)h_o; \quad (2.18)$$

при $\lambda x>h'_п$ – по формуле

$$x=\frac{n_a R^2_{пр} b'_п h_o+(R_a F_a-R_a F'_a-R_{пр}F'_{сб})(\varepsilon_p E_a-\sigma_{01})}{R_{пр}b'_п(0{,}5 n_a R_{пр}+\varepsilon_p E_a-\sigma_{01})}. \quad (2.19)$$

Коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.8).

Значения σ_{01} и σ'_{01} расшифрованы в п.I.3.

2.5. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (рис. 3,а), предварительно напряженных элементов для 2-го случая производится из условий:

при $x\le h'_п$ (рис.3,б)

$$M\le 0{,}5R_{пр}b'_п x[(1+\lambda_{пр})h_o-0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})]+\sigma'_a F'_a(h_o-a'); \quad (2.20)$$

при $x>h'_п$ и $\lambda_{пр}x\le h'_п$ (рис.3,в)

$$M\le 0{,}5R_{пр}\left\{b'_п x[(1+\lambda_{пр})h_o-0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})]-\right.$$
$$\left.-\frac{b'_п-b}{(1-\lambda_{пр})x}(x-h'_п)^2[h_o-0{,}33(x+2h'_п)]\right\}+\sigma'_a F'_a(h_o-a'); \quad (2.21)$$

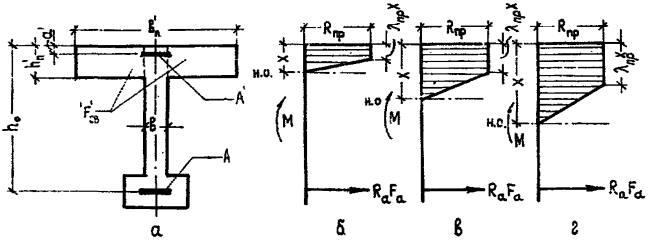


Рис.3. К расчету по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии изгибающего момента (2-ой случай): а – поперечное сечение; б, в, г – схемы действия усилий в сечении.

при $\lambda_{пр}x>h'_п$ (рис.3,г)

$$M\le 0{,}5R_{пр}bx[(1+\lambda_{пр})h_o-0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})]+$$
$$+R_{пр}F'_{сб}(h_o-0{,}5h'_п)+\sigma'_a F'_a(h_o-a'). \quad (2.22)$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле

$$x=\frac{A_2}{2A_1}\left(-1\pm\sqrt{1-\frac{4A_1A_3}{A_2^2}}\right). \qquad (2.23)$$

где

при $x\le h'_n$

$$A_1=0{,}5(1-\lambda_{np}^2)R_{np}b'_n; \qquad (2.24)$$

$$A_2=n_aR_{np}F'_a-(1-\lambda_{np})(R_aF_a+\sigma'_{oi}F'_a); \qquad (2.25)$$

$$A_3=-n_aR_{np}F'_a\alpha'; \qquad (2.26)$$

при $x>h'_n$ и $\lambda_{np}x\le h'_n$

$$A_1=0{,}5R_{np}(b-\lambda_{np}^2b'_n); \qquad (2.27)$$

$$A_2=R_{np}(F'_{cb}+n_aF'_a)-(1-\lambda_{np})(R_aF_a+\sigma'_{oi}F'_a); \qquad (2.28)$$

$$A_3=-R_{np}(0{,}5F'_{cb}h'_n+n_aF'_a\alpha'); \qquad (2.29)$$

при $\lambda_{np}x>h'_n$

$$A_1=0{,}5(1-\lambda_{np}^2)R_{np}b; \qquad (2.30)$$

$$A_2=n_aR_{np}F'_a+(1-\lambda_{np})(R_{np}F'_{cb}-R_aF_a-\sigma'_{oi}F'_a); \qquad (2.31)$$

коэффициент A_3 вычисляется по формуле (2.26).

Знак плюс в формуле (2.23) ставится при $A_2\ge 0$, знак минус – при $A_2<0$.

В формулах (2.20)-(2.22)

$$\sigma'_a=\frac{n_aR_{np}(x-a')}{(1-\lambda_{np})x}-\sigma'_{oi}, \qquad (2.32)$$

при этом должно выполняться условие $\sigma'_a\le R_a$. Если указанное условие не выполняется, проверка прочности производится из условий (2.20)-(2.22) с учетом замены σ'_a на R_a; при $x\le h'_n$ высота сжатой зоны определяется по формуле

$$x=\frac{R_aF_a-R_aF'_a}{0{,}5(1+\lambda_{np})R_{np}b'_n}; \qquad (2.33)$$

при $x>h'_n$ и $\lambda_{пр}x\le h'_n$ – по формуле (2.23), где

$$A_1=0{,}5(1+\lambda_{пр})R_{пр}b'_n; \qquad (2.34)$$

$$A_2=R_{пр}F'_{cв}-(1-\lambda_{пр})(R_aF_a-R_aF'_a); \qquad (2.35)$$

$$A_3=-0{,}5R_{пр}F'_{cв}h'_n; \qquad (2.36)$$

при $\lambda_{пр}x>h'_n$ – по формуле

$$x=\frac{R_aF_a-R_aF'_a-R_{пр}F'_{cв}}{0{,}5(1+\lambda_{пр})R_{пр}b}. \qquad (2.37)$$

2.6. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (рис. 4 ,а) предварительно напряженных элементов для 3-го случая производится из условий (2.20), (2.2I) или (2.22), в зависимости от положения н.о. относительно нижней грани сжатой полки (рис.4 ,б-г).

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести , напряжения в растянутой арматуре определяются по формуле

$$\sigma_a=\frac{n_{0,2}R_{пр}(h_o-x)}{(1-\lambda_{пр})x}+\sigma_{01}\frac{n_{0,2}}{n_a}+0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{0,2}}{n_a}\right), \qquad (2.38)$$

где

$$n_{0,2}=\frac{n_aR_a}{R_a+0{,}01E_a}, \qquad (2.39)$$

высота сжатой зоны – по формуле (2.23), где

при $x\le h'_n$

$$A_2=R_{пр}(n_{0,2}F_a+n_aF'_a)-(1-\lambda_{пр})\left\{\left[\sigma_{01}\frac{n_{0,2}}{n_a}+0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{0,2}}{n_a}\right)\right]F_a+\sigma'_{01}F'_a\right\}; \qquad (2.40)$$

$$A_3=-R_{пр}(n_{0,2}F_ah_o+n_aF'_aa'); \qquad (2.4I)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.24);

при $x>h'_n$ и $\lambda_{пр}x\le h'_n$

$$A_2=R_{пр}(F'_{cв}+n_{0,2}F_a+n_aF'_a)-(1-\lambda_{пр})\left\{\left[\sigma_{01}\frac{n_{0,2}}{n_a}+0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{0,2}}{n_a}\right)\right]F_a+\sigma'_{01}F'_a\right\}; \qquad (2.42)$$

$$A_3=-R_{пр}(0{,}5F'_{cв}h'_n+n_{0,2}F_ah_o+n_aF'_aa'); \qquad (2.43)$$

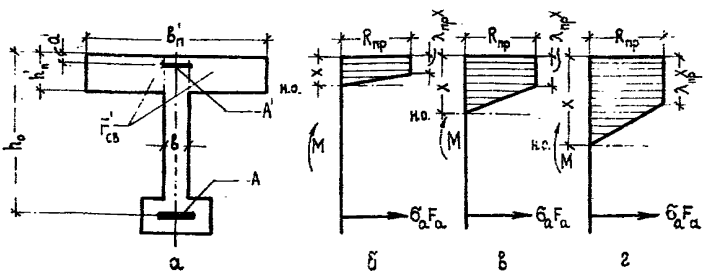


Рис.4. К расчету по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии изгибающего момента (3-й и 4-й случаи): а - поперечное сечение; б, в, г - схемы действия усилий в сечении.

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.27),

при $\lambda_{пр} x > h'_п$

$$A_2 = R_{пр}[(1-\lambda_{пр})F'_{сб} + n_{02}F_a + n_a F'_a] - \\ -(1-\lambda_{пр})\left\{\left[\sigma_{01}\frac{n_{02}}{n_a} + 0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{02}}{n_a}\right)\right]F_a + \sigma'_{01}F'_a\right\}; \qquad (2.44)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.30), коэффициент A_3 - по формуле (2.41).

Значения σ'_a определяются по формуле (2.32), при этом должно выполняться условие $\sigma'_a \le R_a$. Если указанное условие не выполняется, проверка прочности производится из условий (2.20)-(2.22) с учетом замены σ'_a на R_a; высота сжатой зоны определяется по формуле (2.23), где

при $x \le h'_п$

$$A_2 = n_{02}R_{пр}F_a - (1-\lambda_{пр})\left\{\left[\sigma_{01}\frac{n_{02}}{n_a} + 0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{02}}{n_a}\right)\right]F_a - R_a F'_a\right\}; \qquad (2.45)$$

$$A_3 = -n_{02}R_{пр}F_a h_o; \qquad (2.46)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.24),

при $x > h'_п$ и $\lambda_{пр} x \le h'_п$

$$A_2 = R_{пр}(F'_{сб} + n_{02}F_a) - (1-\lambda_{пр})\left\{\left[\sigma_{01}\frac{n_{02}}{n_a} + 0{,}8R_a\left(1-\frac{n_{02}}{n_a}\right)\right]F_a - R_a F'_a\right\}; \qquad (2.47)$$

$$A_3 = -R_{пр}(0{,}5F'_{сб}h'_п + n_{02}F_a h_o); \qquad (2.48)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.27),

при $\lambda_{np} x > h'_n$

$$A_2 = R_{np}\left[(1-\lambda_{np})F'_{a2} + n_{o2}F_a\right]; \qquad (2.49)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.30), коэффициент A_3 – по формуле (2.46).

При арматурной стали, имеющей физический предел текучести, значения σ_a и x, A_1, A_2, A_3 определяются по приведенным выше формулам с учетом $n_{o2} = n_a$.

2.7. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (см. рис.4, а) предварительно напряженных элементов для 4-го случая производится из условий (2.20), (2.21) или (2.22), в зависимости от положения н.о. относительно нижней грани сжатой полки (см. рис.4, б–г).

Напряжения в растянутой арматуре и высота сжатой зоны определяются по формулам п.2.6 при $n_{o2} = n_a$.

2.8. Граничные значения высоты сжатой зоны определяются по формулам

$$x_{гр(1-2)} = \frac{n_a R_{np} h_o}{n_a R_{np} + (\varepsilon_{np} E_a - \sigma_{o1})(1-\lambda_{np})}; \qquad (2.50)$$

при арматурной стали, не имеющей физического предела текучести,

$$x_{гр(2-3)} = \frac{n_a R_{np} h_o}{n_a R_{np} + (R_a + 0{,}002E_a - \sigma_{o1})(1-\lambda_{np})}; \qquad (2.51)$$

$$x_{гр(3-4)} = \frac{n_a R_{np} h_o}{n_a R_{np} + (0{,}8R_a - \sigma_{o1})(1-\lambda_{np})}; \qquad (2.52)$$

при арматурной стали, имеющей физический предел текучести,

$$x_{гр(2-3)} = x_{гр(3-4)} = \frac{n_a R_{np} h_o}{n_a R_{np} + (R_a - \sigma_{o1})(1-\lambda_{np})}. \qquad (2.53)$$

Цифры в скобках в левой части формул соответствуют случаям исчерпания сопротивления сечения (см.п.2.3).

2.9. Проверка прочности прямоугольных сечений производится по формулам пп.2.4–2.7 (в зависимости от рассматриваемого случая) с учетом $F'_{a2} = 0$ и $b'_n = b$.

2.10. Проверка прочности сечений элементов, выполненных без предварительного напряжения, производится по формулам пп.2.4.-2.8 при $\sigma_{01}=\sigma'_{01}=0$.

2.11. Расчетные значения модуля упругости бетона E (см. приложение 5) определяются в соответствии с приложением 3 настоящих рекомендаций.

Расчетные значения деформаций предельной растяжимости арматурной стали ε_p (см.пп.2.4 и 2.8) допускается принимать равными: при проволочной арматуре - 0,01; при стержневой арматуре - 0,02.

Расчетные значения коэффициента пластичности λ_{np} (см.пп.2.5, 2.6 и 2.8) определяются по формуле

$$\lambda_{np}=K_1-K_2R_{np}, \qquad (2.54)$$

где для трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях марок 150–800 величина $K_I=0,82$; $K_2=0,00075$; для мелкозернистых бетонов на плотном заполнителе марок 150–600 значение $K_I=0,77$; $K_2=0,00079$; для бетонов на пористых заполнителях и плотных силикатных бетонов марок 100–400* величина $K_I=0,63$; $K_2=0,0009$.

При высокопрочной арматурной стали классов А-IУ, Ат-IУ, А-У, Ат-У, Ат-УI, В-II, Вр-II и К-7 при соблюдении условия $x<x_{гр(2-3)}$ расчетное сопротивление R_a умножается на коэффициент условий работы m_{a4}, определяемый по формуле

$$m_{a4}=\bar{m}_{a4}-(\bar{m}_{a4}-1)\frac{x}{x_{гр(2-3)}}, \qquad (2.55)$$

где $\bar{m}_{a4}$ - максимальное значение коэффициента m_{a4}, принимаемое равным: для арматурной стали классов А-IУ и Ат-IУ - 1,4; для арматурной стали классов А-У, Ат-У, В-II, Вр-II, К-7 - 1,3; для арматурной стали класса Ат-УI - 1,2; x - высота сжатой зоны, подсчитываемая при значениях R_a без учета коэффициента m_{a4}.

При наличии сварных стыков в зоне конструкции с изгибающими моментами, превышающими $0,9M_{макс}$ (где $M_{макс}$ - максимальный расчетный момент), значение коэффициента m_{a4} для арматурной стали классов А-IУ и А-У принимается не более 1,1.

---

* Ориентировочно.

Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии сил предварительного обжатия

2.I2. Определение предельных усилий в нормальном сечении при действии сил предварительного обжатия производится на основе предпосылок, изложенных в п.2.2.

2.I3. При определении предельных усилий усилие обжатия определяется только от напрягаемой арматуры, расположенной в наиболее обжатой зоне.

Усилие напрягаемой арматуры $N_н$ вводится в расчет как внешняя нагрузка.

2.I4. Проверка прочности нормальных сечений производится в зависимости от степени использования сопротивления обжатого бетона и арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия силы $N_н$. При этом возможны три случая исчерпания сопротивления, соответствующие 2-му, 3-му и 4-му случаям п.2.3, т.е.полному использованию сопротивления арматуры и бетона, полному использованию сопротивления бетона при работе арматуры в упруго-пластической стадии и полному использованию сопротивления бетона при работе арматуры в упругой стадии.

2.I5. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (рис.5 ,а) обжатых элементов для 2-го случая производится из условий:

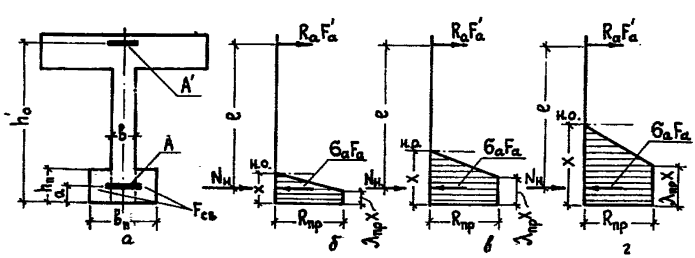


Рис.5. К расчету по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии сил предварительного обжатия (2-й случай): а - поперечное сечение; б, в, г - схемы действия усилий в сечении.

при $x \le h_п$ (рис.5 ,б)

$$N_н e \le 0{,}5 R_{пр} b_п x[(1+\lambda_{пр})h'_o - 0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})] + \sigma_a F_a (h'_o - a); \quad (2.56)$$

при $x > h_п$ и $\lambda_{пр} x \le h_п$ (см. рис.5 ,в)

$$N_н e \le 0{,}5 R_{пр}\Big\{ b_п x[(1+\lambda_{пр})h'_o - 0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})] - \frac{(b_п - b)(x-h_п)^2}{(1-\lambda_{пр})x}[h'_o - 0{,}33(x+2h_п)]\Big\} + \sigma_a F_a (h'_o - a); \quad (2.57)$$

при $\lambda_{пр} x > h_п$ (см. рис.5 , г)

$$N_н e \le R_{пр}\{0{,}5bx[(1+\lambda_{пр})h'_o - 0{,}33x(1+\lambda_{пр}+\lambda^2_{пр})] + F_{св}(h'_o - 0{,}5h_п)\} + \sigma_a F_a (h'_o - a). \quad (2.58)$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле (2.23), где

при $x \le h_п$

$$A_1 = 0{,}5(1-\lambda^2_{пр}) R_{пр} b_п; \quad (2.59)$$

$$A_2 = n_a R_{пр} F_a - (1-\lambda_{пр})(N_н + R_a F'_a); \quad (2.60)$$

$$A_3 = -n_a R_{пр} F_a a; \quad (2.61)$$

при $x > h_п$ и $\lambda_{пр} x \le h_п$

$$A_1 = 0{,}5 R_{пр}(b - b_п \lambda^2_{пр}); \quad (2.62)$$

$$A_2 = R_{пр}(F_{св} + n_a F_a) - (1-\lambda_{пр})(N_н + R_a F'_a); \quad (2.63)$$

$$A_3 = -R_{пр}(0{,}5 F_{св} h_п + n_a F_a a); \quad (2.64)$$

при $\lambda_{пр} x > h_п$

$$A_1 = 0{,}5(1-\lambda^2_{пр}) R_{пр} b; \quad (2.65)$$

$$A_2 = R_{пр}[(1-\lambda_{пр})F_{св} + n_a F_a] - (1-\lambda_{пр})(N_н + R_a F'_a); \quad (2.66)$$

коэффициент A_3 вычисляется по формуле (2.61).

В формулах (2.56)–(2.58)

$$\sigma_a = \frac{n_a R_{пр}(x-a)}{(1-\lambda_{пр})x}. \quad (2.67)$$

2.16. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (рис. 6 ,а) обжатых элементов для 3-го случая производится из условий (2.56), (2.57) или (2.58), в зависимости от положения н.о. относительно верхней грани сжатой полки (см.рис. 6 ,б–г).

При арматурной стали, не имеющей физического предела текучести, напряжения в арматуре, расположенной в зоне, растянутой от действия силы $N_н$, определяются по формуле

$$\sigma_a' = \frac{n_{0,2} R_{пр} (h_0' - x)}{(1-\lambda_{пр})x} + \sigma_{c1}' \frac{n_{0,2}}{n_a} + 0{,}8 R_a \left(1 - \frac{n_{0,2}}{n_a}\right); \qquad (2.68)$$

высота сжатой зоны – по формуле (2.23), где



Рис.6. К расчету по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии сил предварительного обжатия (3-й и 4-й случаи): а – поперечное сечение; б, в, г – схемы действия усилий в сечении.

при $x \le h_п$

$$A_2 = R_{пр}(n_a F_a + n_{0,2} F_a') - (1-\lambda_{пр})\left\{N_н + \left[\sigma_{01}' \frac{n_{0,2}}{n_a} + 0{,}8 R_a \left(1 - \frac{n_{0,2}}{n_a}\right)\right] F_a'\right\}; \qquad (2.69)$$

$$A_3 = -R_{пр}(n_a F_a a + n_{0,2} F_a' h_0'); \qquad (2.70)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.59);

при $x > h_п$ и $\lambda_{пр} x \le h_п$

$$A_2 = R_{пр}(F_{св} + n_a F_a + n_{0,2} F_a') - (1-\lambda_{пр})\left\{N_н + \left[\sigma_{01}' \frac{n_{0,2}}{n_a} + 0{,}8 R_a \left(1 - \frac{n_{0,2}}{n_a}\right)\right] F_a'\right\}; \qquad (2.71)$$

$$A_3 = -R_{пр}(0{,}5 F_{св} h_п + n_a F_a a + n_{0,2} F_a' h_0'); \qquad (2.72)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.62);

при $\lambda_{пр} x > h_п$

$$A_2 = R_{пр}\left[(1-\lambda_{пр}) F_{св} + n_a F_a + n_{0,2} F_a'\right] - (1-\lambda_{пр})\left\{N_н + \left[\sigma_{01}' \frac{n_{0,2}}{n_a} + 0{,}8 R_a \left(1 - \frac{n_{0,2}}{n_a}\right)\right] F_a'\right\}; \qquad (2.73)$$

коэффициент A_1 вычисляется по формуле (2.65), коэффициент A_3 – по формуле (2.70).

Значения σ_a определяются по формуле (2.67), значения n_{a2} – по формуле (2.39).

Значения σ'_{01} расшифрованы в п.I.3.

При арматурной стали, имеющей физический предел текучести, значения σ'_a и x, A_I, A_2, A_3 определяются по приведенным выше формулам с учетом $n_{a2} = n_a$.

2.I7. Проверка прочности тавровых и двутавровых сечений (см. рис.6 ,а) обжатых элементов для 4-го случая производится из условий (2.56), (2.57) или (2.58) в зависимости от положения н.о. относительно верхней грани сжатой полки (см. рис.6 , б–г).

Напряжения в арматуре, расположенной в зоне, растянутой от действия силы $N_н$, и высота сжатой зоны определяются по формулам п.2.I6 при $n_{a2} = n_a$.

2.I8. Граничные значения высоты сжатой зоны определяются по формулам п.2.8 при $\sigma_{01} = \sigma'_{01}$.

2.I9. Проверка прочности прямоугольных сечений производится по формулам пп.2.I5 или 2.I6 (в зависимости от рассматриваемого случая) с учетом $F_{cb} = 0$ и $b_п = b$.

2.20. Усилие напрягаемой арматуры определяется по формулам:

при натяжении на упоры

$$N_н = N'_{01} = \sigma_{01} F_н; \qquad (2.74)$$

при натяжении на бетон

$$N_н = \left(\sigma_{01} + \frac{n_a R_{пр}}{1-\lambda_{пр}} \cdot \frac{x-a}{x}\right) F_н, \qquad (2.75)$$

где x – высота сжатой зоны, подсчитываемая при $N_н = \left(\sigma_{01} + \frac{n_a R_{пр}}{1-\lambda_{пр}}\right) F_н$.

Значения σ_{01} расшифрованы в п.I.3 настоящих рекомендаций.

2.2I. Эксцентриситет приложения силы $N_н$ относительно н.т. сечения арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия указанной силы, e определяется в соответствии с указаниями СНиП II-2I-75.

6-962

2.22. Проверка прочности нормальных сечений при действии сил предварительного обжатия производится с учетом расчетного сопротивления бетона, соответствующего его передаточной прочности (см.СНиП II-21-75).

2.23. Расчетные значения коэффициента пластичности $\lambda_{пр}$ определяются по формуле (2.54) с учетом расчетного сопротивления бетона, соответствующего его передаточной прочности.

Расчет по прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента*

2.24. Определение усилий в наклонных сечениях производится на основе следующих предпосылок:

в качестве расчетной принимается схема, показанная на рис.7;

максимальные значения касательных напряжений $\tau_{xy} = R_{cp}$ в бетоне сжатой зоны сечения I-I определяются из критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии; коэффициент полноты эпюры в верхнем блоке принимается равным 0,35, в нижнем - 0,7;

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

растягивающие напряжения в продольной арматуре в месте пересечения ее наклонной трещиной и в сечении I-I принимаются не более расчетного сопротивления R_a ;

растягивающие напряжения в поперечной арматуре, пересекаемой наклонной трещиной, принимаются равными R_a;

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

в расчет вводятся силы зацепления верхнего и нижнего блоков вдоль наклонной трещины.

2.25. Проверка прочности наклонных сечений преднапряженных элементов (имеются в виду элементы тавровых и двутавровых сечений) производится из условия

---

* Терминология условная, принятая из соображений преемственности. По сути, речь идет о несущей способности железобетонных элементов при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы.

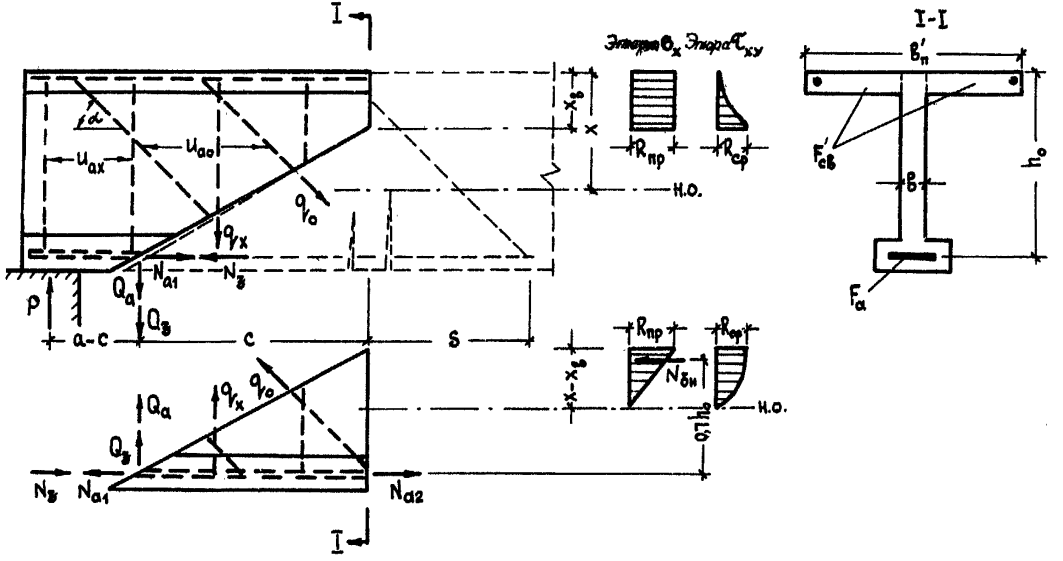


Рис.7. К расчету по прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента.

$$Q \le q_x c + q_o (c+s)\sin\alpha + 0{,}35 R_{cp}[2b(x-0{,}5x_в)+F'_{cв}], \qquad (2.76)$$

где Q – расчетная поперечная сила в сечении I–I;

$$q_x = R_a F_{a.x}/u_{a.x}; \qquad (2.77)$$

$$q_o = R_a F_{a.o}/u_{a.o}\sin\alpha; \qquad (2.78)$$

$$R_{cp} = 2{,}5 R_p\left(1+5\frac{\sigma_y}{R_{np}}\right), \text{ но не более } 0{,}5\, R_{np}; \qquad (2.79)$$

$$s = (h_o - 0{,}5x_в)\operatorname{ctg}\alpha. \qquad (2.80)$$

Длина проекции наклонной трещины на продольную ось элемента определяется по формуле

$$c = -\frac{Q_a+Q_з}{q_x+q_o\sin\alpha} + \sqrt{\left(\frac{Q_a+Q_з}{q_x+q_o\sin\alpha}\right)^2 + \frac{1{,}4N_{б.н}h_o + q_o s^2\sin\alpha}{q_x+q_o\sin\alpha}}, \qquad (2.81)$$

где

$$Q_a+Q_з = 0{,}35R_{cp}[2b(x-x_в)-(b'_п-b)x_в+F'_{cв}]; \qquad (2.82)$$

$$N_{б.н} = R_{np}[0{,}5b(x-x_в)-(b'_п-b)x_в+F'_{cв}]; \qquad (2.83)$$

$Q_з$ – вертикальная составляющая равнодействующей сил зацепления верхнего и нижнего блоков вдоль наклонной трещины.

При этом должны выполняться условия $c \ge h_o$ и $c \le 2h_o$. При невыполнении первого условия длина проекции наклонной трещины принимается равной h_o, при невыполнении второго условия – $2h_o$.

Высота сжатой зоны верхнего блока в сечении I–I определяется по формуле

$$x_в = \frac{M - 0{,}8R_{np}F'_{cв}h_o}{0{,}4R_{np}bh_e} - x, \qquad (2.84)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки в сечении I–I; высота сжатой зоны сечения I–I – по формуле

$$x = \frac{0{,}64n_a R^2_{np}F_a b h_o^3 + (M-0{,}8\sigma_{o1}F_a h_o)(M-0{,}8R_{np}F'_{cв}h_o)}{0{,}64R_{np}bh_o[(n_aR_{np}-\sigma_{o1})F_a h_o + 1{,}25M]}. \qquad (2.85)$$

При этом должно выполняться условие $M \le 0{,}8R_{np}h_o(0{,}4bh_o+F'_{cв})$. При невыполнении указанного условия момент M принимается равным $0{,}8R_{np}h_o(0{,}4bh_o+F'_{cв})$.

При $x_в > h'_п$ в формулах (2.82) и (2.83) принимается $b'_п = b$

и $F'_{c\ell} = 0$. При $x_\ell \le h'_п$ в формулах (2.84) и (2.85) принимается $в = в'_п$.

Ширина сжатой полки $в'_п$, вводимая в расчет, принимается не более $в + 3h'_п$. При армировании полки замкнутыми хомутами может учитываться полная ширина полки.

В формуле (2.79) σ_y – нормальные напряжения в бетоне на площадке, параллельной продольной оси элемента, от сил предварительного обжатия отогнутой напрягаемой арматурой, местного действия опорных реакций, сосредоточенных сил и распределенной нагрузки;

при действии сосредоточенных сил

$$\sigma_y = \frac{\rho}{вh_o}\left(1 - \frac{x_\ell}{h_o}\right); \qquad (2.86)$$

при действии равномерно распределенной нагрузки

$$\sigma_y = \frac{q}{в}\left(1 - \frac{x_\ell}{h_o}\right). \qquad (2.87)$$

При выполнении условия $Q \le 0{,}7N_{s,н}h_o/a$ или если при расчете по формуле (2.84) высота сжатой зоны верхнего блока получает отрицательные значения, расчет прочности наклонных сечений может не производиться.

2.26. Проверка прочности преднапряженных элементов прямоугольных сечений производится по формулам п.2.25 с учетом $F'_{c\ell} = 0$ и $в'_п = в$.

2.27. Проверка прочности элементов, выполненных без предварительного напряжения, производится по формулам п.2.25 при $\sigma_{oi} = 0$.

2.28. В качестве расчетных наклонных трещин при действии на элемент нагрузки в виде сосредоточенных сил рассматриваются трещины с вершинами под силами (рис.8 ,а), при равномерно распределенной нагрузке – трещина с вершиной на расстоянии от оси опоры a, равном $\ell/4$ (см. рис.8 ,б).

2.29. В железобетонных элементах с продольной арматурой без анкеров производится проверка прочности наклонных сечений, пересекающих зону анкеровки или зону передачи предварительных напряжений, с учетом снижения расчетного сопротивления указан-

ной арматуры в соответствии с указаниями п.3.39 СНиП II-21-75.

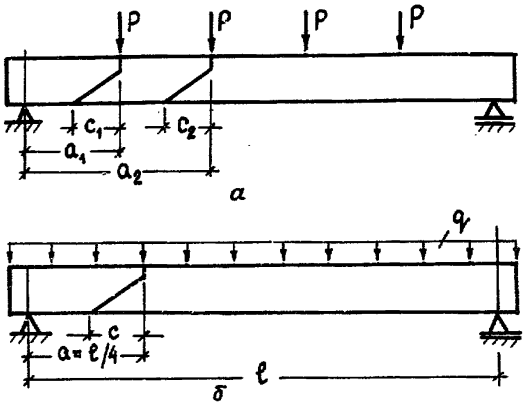


Рис.8. К определению расчетных наклонных трещин:
а - при действии нагрузки в виде сосредоточенных сил;
б - при действии равномерно распределенной нагрузки.

2.30. При расчете прочности наклонных сечений железобетонных элементов должно выполняться условие

$$Q \leq 0{,}35 R_{пр} b h_0. \qquad (2.88)$$

При этом значения $R_{пр}$ для бетонов проектных марок выше 400 принимаются как для бетона марки 400.

3. РАСЧЕТ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

3.1. Преднапряженные элементы в зависимости от предъявляемых к ним требований по трещиностойкости рассчитываются по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента и наклонных в зоне действия наибольших главных растягивающих напряжений.

3.2. Расчет по образованию нормальных и наклонных трещин производится в наиболее опасных местах по длине пролета в зависимости от вида эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и от изменения сечения элемента, включая и зону анкеровки арматуры, предварительные напряжения которой при отсутствии анкеров принимаются в соответствии с указаниями СНиП II-21-75.

Расчет по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента

3.3. Усилия, вызывающие появление трещин, нормальных к продольной оси элемента, определяются на основе следующих предпосылок:

для деформаций бетона и арматуры считается справедливой гипотеза плоских сечений;

связь между напряжениями и деформациями бетона принимается в виде диаграммы, показанной на рис.9;

наибольшие относительные удлинения крайних растянутых волокон бетона принимаются равными отношению нормативного сопротивления бетона осевому растяжению к его модулю упруго-пластичности.

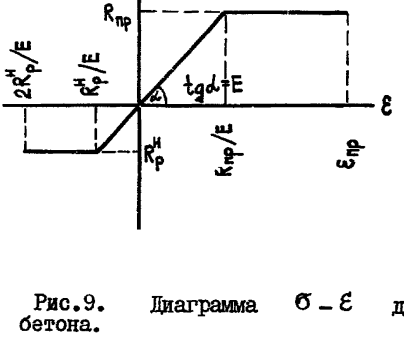


Рис.9. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ для бетона.

Использование указанных предпосылок равносильно принятию эпюры нормальных напряжений в бетоне растянутой зоны в виде прямоугольной трапеции с высотой участка постоянных напряжений, равной $0{,}5(h - x)$, а в бетоне сжатой зоны – в виде треугольника или прямоугольной трапеции с высотой участка постоянных напряжений, равной λx (см.п.2.2).

3.4. Расчет по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента, производится для зоны, растянутой от действия внешних нагрузок, и для зоны, растянутой от действия сил предварительного обжатия.

3.5. Расчет по образованию трещин в зоне, растянутой от действия внешних нагрузок (рис.10), производится из условия

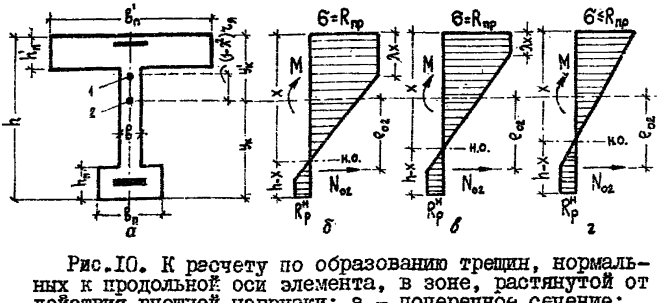


Рис.IO. К расчету по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента, в зоне, растянутой от действия внешней нагрузки: а – поперечное сечение; б, в, г – схемы действия усилий в сечении; I – ядровая точка; 2 – ц.т.приведенного сечения.

$$M \le M_T = N_{02}\left[e_{02}+(1-\lambda^2)r_a\right]+R_p^H \gamma_T W_0, \qquad (3.1)$$

где

$$\lambda = 1-\frac{R_{np}(h-x)}{2R_p^H x}; \qquad (3.2)$$

γ_T – коэффициент, определяемый по табл.I.

При этом должно выполняться условие $\lambda \le \lambda_{np}$ (см.рис.5).

Положение н.о. отыскивается по формуле

$$h-x=\frac{1}{2A_1}\left(-A_2+\sqrt{A_2^2+4A_1A_3}\right), \qquad (3.3)$$

где при $N_{02} \ge \frac{F_0}{h-h_n}\left[R_{np}\gamma_K - 2R_p^H(\gamma_K'-h_n')\right]$ (см. рис.IO ,б)

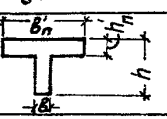
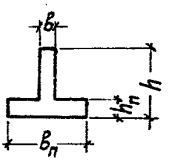
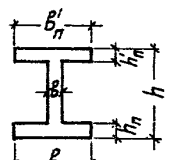
$$A_1 = 0{,}5\left[\left(1+\frac{R_{np}}{2R_p^H}\right)^2 b - 0{,}25 b_n\right]; \qquad (3.4)$$

$$A_2 = F_0-\left(1+\frac{R_{np}}{2R_p^H}\right)(bh+F_{cb}')+\frac{N_{02}}{2R_p^H}; \qquad (3.5)$$

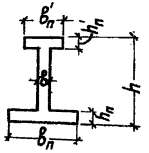
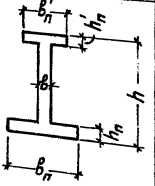
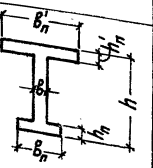
$$A_3 = S_0-0{,}5bh^2-F_{cb}'(h-0{,}5h_n'); \qquad (3.6)$$

при $\frac{F_0}{h}(R_{np}\gamma_K-2R_p^H\gamma_K') < N_{02} < \frac{F_0}{h-h_n'}\left[R_{np}\gamma_K-2R_p^H(\gamma_K'-h_n')\right]$ (см. рис.IO ,в)

Таблица I

Сечение: Вид и геометрия	Эскиз	$\gamma_т$
1	2	3
Прямоугольное		1,75
Тавровое с полкой, расположенной в сжатой зоне		1,75
Тавровое с полкой (уширением), расположенной в растянутой зоне:		
при $\frac{b_п}{b} \leq 2$ независимо от отношения $\frac{h_п}{h}$		1,75
при $\frac{b_п}{b} > 2$ и $\frac{h_п}{h} \geq 0,2$		1,75
при $\frac{b_п}{b} > 2$ и $\frac{h_п}{h} < 0,2$		1,5
Двутавровое симметричное (коробчатое):		
при $\frac{b'_п}{b} = \frac{b_п}{b} \leq 2$ независимо от отношения $\frac{h'_п}{h} = \frac{h_п}{h}$		1,75
при $2 < \frac{b'_п}{b} = \frac{b_п}{b} \leq 6$ независимо от отношения $\frac{h'_п}{h} = \frac{h_п}{h}$		1,5
при $\frac{b'_п}{b} = \frac{b_п}{b} > 6$ и $\frac{h'_п}{h} = \frac{h_п}{h} \geq 0,2$		1,5
при $6 < \frac{b'_п}{b} = \frac{b_п}{b} \leq 15$ и $\frac{h'_п}{h} = \frac{h_п}{h} < 0,2$		1,25
при $\frac{b'_п}{b} = \frac{b_п}{b} > 15$ и $\frac{h'_п}{h} = \frac{h_п}{h} < 0,1$		1,1

Продолжение табл. I

1	2	3
Двутавровое несимметричное: удовлетворяющее условию $\frac{b_п}{b} \leq 3$:		
при $\frac{b_п}{b} \leq 2$ независимо от отношения $\frac{h_п}{h}$		1,75
при $2 < \frac{b_п}{b}$ независимо от отношения $\frac{h_п}{h}$		1,5
при $\frac{b_п}{b} > 6$ и $\frac{h_п}{h} > 0,1$		1,5
Двутавровое несимметричное, удовлетворяющее условию $3 < \frac{b'_п}{b} < 8$:		
при $\frac{b'_п}{b} \leq 4$ независимо от отношения $\frac{h_п}{h}$		1,5
при $\frac{b_п}{b} > 4$ и $\frac{h_п}{h} \geqslant 0,2$		1,5
при $\frac{b_п}{b} > 4$ и $\frac{h_п}{h} < 0,2$		1,25
Двутавровое несимметричное, удовлетворяющее условию $\frac{b'_п}{b} \geqslant 8$:		
при $\frac{h_п}{h} > 0,3$		1,6
при $\frac{h_п}{h} \leq 0,3$		1,25

$$A_1 = 0{,}5\left[\left(1+\frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right)^2 b_п' - 0{,}25 b_п\right]; \qquad (3.7)$$

$$A_2 = F_o - \left(1+\frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right) b_п' h + \frac{N_{02}}{2R_p^н}; \qquad (3.8)$$

$$A_3 = S_o - 0{,}5 b_п' h^2. \qquad (3.9)$$

При $N_{02} \le \frac{F_o}{h}(R_{пр}y_к - 2R_p^н y_к')$ (см.рис.10 ,г) расчет по образованию трещин производится по формуле (3.1) с учетом $\lambda = 0$.

3.6. Расчет по образованию нормальных трещин в зоне, растянутой от действия сил предварительного обжатия (рис.11),производится из условия

$$N_{01}[e_{01} - (1-\lambda^2)r_я] \pm M \le R_p^н \gamma_т W_o. \qquad (3.10)$$

Коэффициент пластичности определяется по формуле (3.2), высота сжатой зоны – по формуле (3.3), где

при $N_{01} \ge \frac{F_o}{h-h_п'}[R_{пр}y_к' - 2R_p^н(y_к - h_п)]$ (см. рис.11,б)

$$A_1 = 0{,}5\left[\left(1+\frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right)^2 b - 0{,}25 b_п'\right] \qquad (3.11)$$

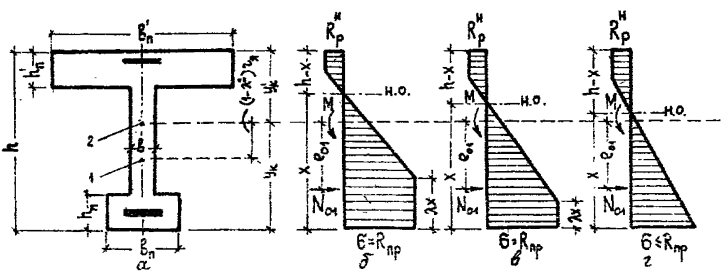


Рис.11. К расчету по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента, в зоне, растянутой от действия сил предварительного обжатия: а – поперечное сечение; б, в, г – схемы действия усилий в сечении; 1 – ядровая точка; 2 – ц.т. приведенного сечения.

$$A_2 = F_0 - \left(1 + \frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right)(\beta h + F_{св}) + \frac{N_{01}}{2R_p^н}; \qquad (3.12)$$

$$A_3 = S_0' - 0{,}5\beta h^2 - F_{св}(h - 0{,}5h_п); \qquad (3.13)$$

при $\frac{F_0}{h}(R_{пр}y_к' - 2R_p^н y_к) < N_{01} < \frac{F_0}{h - h_п}[R_{пр}y_к' - 2R_p^н(y_к - h_п)]$ (см. рис.II, в)

$$A_1 = 0{,}5\left[\left(1 + \frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right)^2 \beta_п - 0{,}25\beta_п'\right]; \qquad (3.14)$$

$$A_2 = F_0 - \left(1 + \frac{R_{пр}}{2R_p^н}\right)\beta_п h + \frac{N_{01}}{2R_p^н}; \qquad (3.15)$$

$$A_3 = S_0' - 0{,}5\beta_п h^2. \qquad (3.16)$$

При $N_{01} \le \frac{F_0}{h}(R_{пр}y_к' - 2R_p^н y_к)$ (см. рис.II, г) расчет по образованию трещин производится по формуле (3.10) с учетом $\lambda = 0$.

Момент от внешних нагрузок, действующих на элемент в процессе предварительного обжатия, транспортирования или монтажа, учитывается со знаком плюс, если совпадает по направлению с моментом от предварительного обжатия, и со знаком минус, если действует в противоположном направлении.

Нормативное сопротивление бетона растяжению и расчетное сопротивление сжатию определяются по передаточной прочности R_0, принятой для предварительного обжатия.

3.7. При расчете по образованию трещин на участках элемента с начальными трещинами в сжатой зоне (см.п.3.6) величина $M_т$ для зоны, растянутой от действия внешних нагрузок, определяется по формуле

$$M_т = N_{02}[e_{02} + (1 - \lambda^2)r_я] - M^*\left(\frac{W_0 x_0^*}{J_{0,т}^*} - 1\right) + R_p^н \gamma_т W_0. \qquad (3.17)$$

Значения λ и $\gamma_т$ расшифрованы в п.3.5, значения M^*, $J_{0,т}^*$ и x_0^* – в п.5.11.

3.8. Расчет по образованию трещин элементов прямоугольного сечения производится по формулам пп.3.5 и 3.6 с учетом $F_{св}' = F_{св} = 0$, $h_п' = h_п = 0$ и $\beta_п' = \beta_п = \beta$.

Расчет по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента

3.9. Усилия, вызывающие появление трещин, наклонных к продольной оси элемента, определяются на основе следующих предпосылок:

в момент, предшествующий образованию трещин, бетон работает как сплошной упругий материал;

в качестве места образования трещин принимается н.о.;

в качестве условия образования трещин принимается достижение касательными напряжениями на уровне н.о. нормативного сопротивления бетона осевому растяжению.

3.10. Расчет по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента, предусматривает два случая: 1-й случай отвечает условию $a \geq 2h_0$, когда влияние местных сжимающих напряжений, вызванных действием внешней нагрузки, сравнительно невелико; 2-й случай отвечает условию $a < 2h_0$, когда влияние указанных напряжений проявляется в такой степени, что его следует учитывать.

3.11. Расчет по образованию трещин для 1-го случая производится из условия

$$Q \leq Q_T = 1{,}5 R_p^H b x \sqrt{1 + \frac{n_{02} \sin\alpha}{R_p^H b u_0}}, \qquad (3.18)$$

где n_{02} – усилие преднапряжения в наклонных стержнях (отогнутой напрягаемой арматуре) с учетом всех потерь, заканчивающихся на участке u_0 длиной, равной $0{,}5h$, расположенном симметрично относительно рассматриваемого сечения 0–0 (рис.12).

Высота сжатой зоны x_0 отыскивается из уравнения (5.12) с учетом (5.14)–(5.16).

3.12. Расчет по образованию трещин для 2-го случая производится из условия

$$Q \leq Q_T = 0{,}5\left(A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4A_2}\right), \qquad (3.19)$$

где

$$A_1 = 2{,}25 R_p^H b x_0^2 (h_0 - 0{,}5a)\frac{1}{h_0^2}; \qquad (3.20)$$

$$A_2 = 2{,}25\left(R_p^н b x_o\right)^2\left(\frac{n_{o2}\sin\alpha}{R_p^н b u_o}+1\right) \qquad (3.21)$$

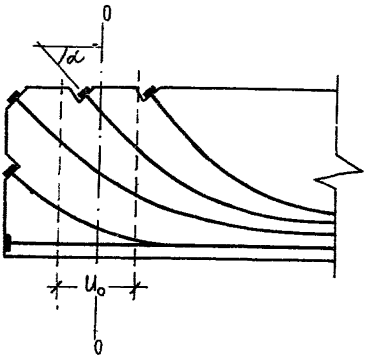


Рис.12. Отогнутая предвари - тельно напряженная арматура, учитываемая в расчете по обра - зованию трещин, наклонных к продольной оси элемента.

4. РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

4.1. Железобетонные элементы рассчитываются по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, наклонных, пересекающих продольную и поперечную арматуру, и наклонных, пересекающих поперечную арматуру (рис.13 ,а).

4.2. Расчет по раскрытию трещин производится для элементов, к трещиностойкости которых предъявляются требования 2-й категории (ограниченное по ширине кратковременное раскрытие трещин при условии их последующего надежного закрытия), и для элементов, к трещиностойкости которых предъявляются требования 3-й категории.

Определение полной ширины раскрытия трещин производится по формулам:

для элементов, к трещиностойкости которых предъявляются требования 2-й категории,

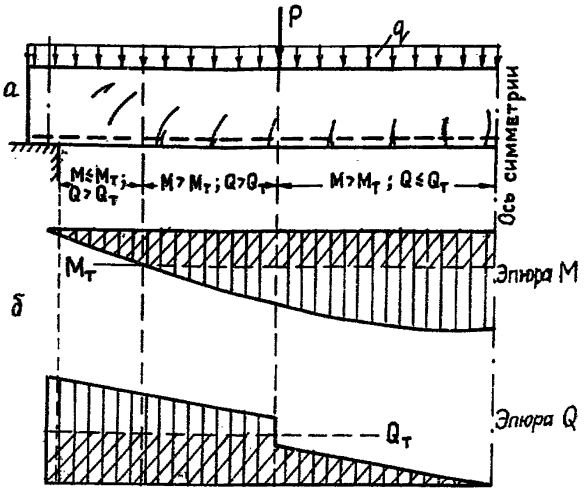


Рис.I3. К расчету по раскрытию трещин: а – типч трещин; б – эпюры моментов и поперечных сил.

$$a_т = a_{т1}; \qquad (4.1)$$

для элементов, к трещиностойкости которых предъявляются требования 3-й категории,

$$a_т = a_{т1} - a_{т2} + a_{т3}, \qquad (4.2)$$

где $a_{т1}$ – ширина раскрытия трещин от кратковременного действия всех нагрузок; $a_{т2}$ – ширина раскрытия трещин от постоянных и длительных нагрузок при их кратковременном действии;

$a_{т3}$ – то же, от длительного действия указанных нагрузок.

4.3. В основу расчета по раскрытию трещин положены следующие общие предпосылки:

раскрытие трещин представляет собой накопление относительных взаимных смещений арматуры и бетона на участках активного сцепления, расположенных по обе стороны от трещины (рис.I4), т.е.

$$a_т = 2\int_0^{l_a} [\varepsilon_a(u) - \varepsilon(u)]\,du; \qquad (4.3)$$

напряжения сцепления по поверхности контакта бетона с растя-

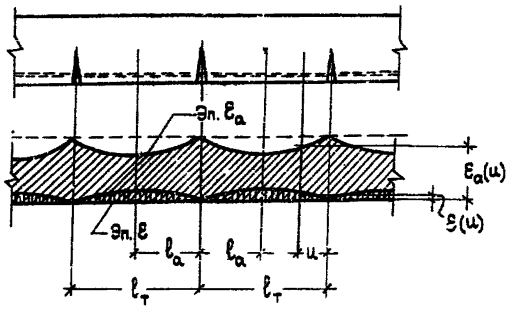


Рис.I4. Расчетная схема к уравнению (4.3).

нутой арматурой на участках между трещинами изменяются пропорционально относительным взаимным смещениям арматуры и бетона;

относительные удлинения бетона на уровне растянутой арматуры в сечении u $-\varepsilon(u)$ принимаются равными отношению напряжений в бетоне на указанном уровне к его модулю упругопластичности.

Определение ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента

4.4. Расчет по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, требуется, если на рассматриваемом участке (по длине элемента) при действии кратковременных нагрузок и кратковременном действии постоянных и длительных нагрузок $M > M_т$, $Q \leq Q_т$ (см. рис.I3,б).

4.5. При расчете по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, кроме общих предпосылок, изложенных в п.4.3, используются следующие дополнительные предпосылки:

эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны принимается в виде треугольника;

эпюра нормальных напряжений в бетоне растянутой зоны принимается изменяющейся от треугольной в сечении с трещиной до трапецоидальной в средних сечениях на участке между трещинами с максимальными напряжениями, равными нормативному сопро-

тивлению бетона осевому растяжению.

4.6. Ширина раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, определяется на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда арматуры.

4.7. Ширина раскрытия трещин на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия внешних нагрузок, определяется по формуле

$$a_т = 3{,}4 C_{дл} \eta K_1 K_2 \frac{M - N_{02}(e_{02} + z_a)}{P_a z G_a}, \qquad (4.4)$$

где $C_{дл}$ – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузок. При учете кратковременных нагрузок и кратковременного действия постоянных и длительных нагрузок $C_{дл} = I$. При учете длительного действия постоянных и длительных нагрузок коэффициент $C_{дл}$ принимается равным: для трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях, бетонов на пористых заполнителях и плотных силикатных бетонов – I,5; для мелкозернистых бетонов на плотном заполнителе – I,7; η - коэффициент, принимаемый равным для стержневой арматуры периодического профиля – I, для проволоки классов Вр–I и Вр–II, а также прядей и канатов – I,2, для гладких горячекатаных стержней – I,3, для проволоки классов В–I и В–II – I,4;

$$K_1 = 1 + \frac{y}{h_0 - x_0}; \qquad (4.5)$$

y – расстояние от ц.т. сечения арматуры А до ц.т. наиболее растянутого ряда;

$$K_2 = \frac{0{,}3[M - N_{02}(e_{02} + z_a)] + 1100 F_a z}{[M - N_{02}(e_{02} + z_a)](F - F'_{cв} + 2{,}3 n_a^н F_a)^2}(F - F'_{cв})^2; \qquad (4.6)$$

$$z = h_0 - x_0 + 0{,}67 \frac{b'_п x_0^3 - (b'_п - b)(x_0 - h'_п)^3}{b'_п x_0^2 - (b'_п - b)(x_0 - h'_п)^2}; \qquad (4.7)$$

G_a – модуль взаимного смещения арматуры и бетона на участках между трещинами

$$G_a = K_3 E^н; \qquad (4.8)$$

K_3 – коэффициент, определяемый по табл.2.

Таблица 2

Вид бетона		Уровень предварительного обжатия σ/R_0	Проектная марка бетона						
			I00	I50	200	300	400	600	800
На плотных заполнителях	трехкомпонентный	0	–	0,56	0,5I	0,45	0,42	0,39	0,37
		0,2	–	–	0,5	0,44	0,4I	0,38	0,36
		0,4	–	–	0,44	0,38	0,35	0,32	0,3
		0,6	–	–	0,35	0,29	0,27	0,24	0,22
		0,8	–	–	0,2	0,I8	0,I6	0,I3	0,II
	мелкозернистый	0	–	0,76	0,65	0,55	0,50	–	–
		0,2	–	–	0,64	0,53	0,48	–	–
		0,4	–	–	0,57	0,46	0,43	–	–
		0,6	–	–	0,45	0,35	0,33	–	–
		0,8	–	–	0,23	0,I8	0,I6	–	–
На пористых заполнителях		0	0,8	0,7	0,65	0,55	0,49	–	–
		0,2	–	–	0,64	0,53	0,48	–	–
		0,4	–	–	0,57	0,46	0,43	–	–
		0,6	–	–	0,44	0,35	0,33	–	–
		0,8	–	–	0,23	0,I8	0,I6	–	–
Плотный силикатный		0	–	0,97	0,79	0,65	0,57	–	–
		0,2	–	–	0,78	0,63	0,56	–	–
		0,4	–	–	0,7	0,54	0,5I	–	–
		0,6	–	–	0,54	0,4	0,39	–	–
		0,8	–	–	0,26	0,I9	0,I7	–	–

Примечания: I. Численные значения коэффициента K_3 для промежуточных марок бетонов и уровней предварительного обжатия определяются по интерполяции. 2. Значения σ расшифрованы в п.I.6.

Значения N_{02} и e_{02} расшифрованы в п.I.3, значение x_0 – в п.5.9.

Для элементов, выполненных без предварительного напряжения, в формуле (4.4) $N_{02} = 0$.

4.8. Со стороны менее обжатых волокон предварительно напряженных элементов допускается образование трещин при обжатии элемента.

Ширина раскрытия трещин на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия

сил предварительного обжатия, определяется по формуле

$$a_т = 3{,}4 C_{дл} \eta K_1' K_2' \frac{N_{01}(e_{01} - z_a) \pm M}{\rho_a' z' G_a}, \qquad (4.9)$$

где

$$K_1' = 1 + \frac{y'}{h_0' - x_0}; \qquad (4.10)$$

y' – расстояние от ц.т. сечения арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия силы N_{01}, до наиболее растянутого ряда указанной арматуры;

$$K_2' = \frac{0{,}3[N_{01}(e_{01} - z_a) \pm M] + 1100 F_a' z'}{[N_{01}(e_{01} - z_a) \pm M](F - F_{cв} + 2{,}3 n_a^н F_a')^2} (F - F_{cв})^2; \qquad (4.11)$$

F_a' и ρ_a' – площадь и периметр сечения арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия силы N_{01};

$$z' = h_0' - x_0 + 0{,}67 \frac{b_п x_0^3 - (b_п - b)(x_0 - h_п)^3}{b_п x_0^2 - (b_п - b)(x_0 - h_п)^2}. \qquad (4.12)$$

Значения $C_{дл}$, η, G_a расшифрованы в п.4.7, значения N_{01}, e_{01} и x_0 – соответственно в пп.I.3 и 5.I0.

Момент от внешних нагрузок, действующих на элемент в процессе предварительного обжатия, транспортирования или монтажа, принимается со знаком плюс, если совпадает по направлению с моментом от предварительного обжатия, и со знаком минус, если действует в противоположном направлении.

4.9. При расчете по раскрытию трещин на участках элементов с начальными трещинами в сжатой зоне (см.п.3.6) величина $a_т$ для зоны, растянутой от действия внешних нагрузок, определяется по формуле

$$a_т = 3{,}4 C_{дл} \eta K_1 K_2 \frac{M - N_{01}(e_{01} + z_a) + M^*(1 - W_0 x_0^* / J_{ст}^*)}{\rho_a z G_a}. \qquad (4.13)$$

Значения $C_{дл}$, η, K_1, K_2, G_a и N_{01}, e_{01} расшифрованы соответственно в пп.4.7 и I.3, значения M^*, $J_{ст}^*$, x_0^* – в п.5.II.

Определение ширины раскрытия трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих продольную и поперечную арматуру

4.10. Расчет по раскрытию трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих продольную и поперечную арматуру, требуется, если на рассматриваемом участке (по длине элемента) при действии кратковременных нагрузок и кратковременном действии постоянных и длительных нагрузок $M > M_т$, $Q > Q_т$ (см. рис. 13, б).

4.11. Ширина раскрытия трещин, пересекающих продольную и поперечную арматуру, определяется вдоль оси продольной арматуры и вдоль оси поперечной арматуры.

4.12. При определении ширины раскрытия трещин вдоль оси продольной арматуры используются предпосылки пп. 4.3 и 4.5.

4.13. Ширина раскрытия трещин вдоль оси продольной арматуры определяется на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда указанной арматуры.

4.14. Ширина раскрытия трещин на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда продольной арматуры определяется по формуле

$$a_т = 3{,}4 C_{g_A} \eta K_1 \left[\frac{M - N_{02}^{пр}(e_{02} + r_я)}{R_a z} K_2 + \frac{Q - N_{02}^{кр} \sin\delta}{2 J_0 b} S_p u_п \right] \frac{1}{E_a}, \qquad (4.14)$$

где M и Q – изгибающий момент и поперечная сила в нормальном сечении, проходящем через начало наклонной трещины; $N_{02}^{пр}$ и $N_{02}^{кр}$ – усилия предварительного напряжения в прямолинейной напрягаемой арматуре и в наклонных стержнях (отогнутой напрягаемой арматуре) в том же сечении с учетом всех потерь; b – ширина сечения элемента на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда арматуры; S_p – статический момент площади сечения арматуры A, приведенной к бетону, и площади защитного слоя бетона высотой $h - h_0$ относительно оси, проходящей через ц.т. приведенного сечения элемента; при расположении начала наклонной трещины между двумя стержнями поперечной арматуры (вертикальными, наклонными или вертикальным и наклонным) $u_п$ – расстояние между указанными стержнями, измеренное вдоль оси продольной арматуры на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда, а при расположении начала наклонной трещины между опорой и бли-

жайшим к ней наклонным стержнем u_n – расстояние между осью опоры и указанным стержнем, измеренное вдоль оси продольной арматуры на уровне ц.т. наиболее растянутого ряда.

Значения $C_{g\lambda}$, η, κ_1, κ_2, ρ_a, G_a, z расшифрованы в п.4.7, значение e_{02} – в п.I.3.

Для элементов, выполненных без предварительного напряжения, в формуле (4.I4) $N_{02}^{пр} = N_{02}^{кр} = 0$.

4.I5. Расчет ширины раскрытия трещин вдоль оси поперечной арматуры сводится к определению величины a_T, средней для рассматриваемого участка (имеется в виду максимальная величина a_T для всех стержней, пересекаемых наклонными трещинами на указанном участке).

4.I6. При определении ширины раскрытия трещин вдоль оси поперечной арматуры, кроме общих предпосылок, изложенных в п.4.3, используется дополнительная предпосылка о том, что после образования трещины бетон, вовлекаемый в работу каждым стержнем поперечной арматуры, находится в условиях осевого растяжения.

4.I7. Ширина раскрытия трещин вдоль оси поперечной арматуры определяется по формулам:

для вертикальных стержней

$$a_T = \frac{3C_{g\lambda}\eta K_{a.x}(Q - Q_\delta - N_{02}^{кр}\sin\alpha)E_{a.x}u_{a.x}u_{a.0}\sqrt{1-0{,}84\sin^2\alpha}}{(0{,}4F_{a.0}E_a u_{a.x} + F_{a.x}E_{a.x}u_{a.0}\sqrt{1-0{,}84\sin^2\alpha})c\rho_{a.x}G_{a.x}}\,F_x \qquad (4.I5)$$

для наклонных стержней

$$a_T = \frac{3C_{g\lambda}\eta K_{a.0}(Q - Q_\delta - N_{02}^{кр}\sin\alpha)E_a u_{a.0}u_{a.x}}{(2{,}5F_{a.x}E_{a.x}u_{a.0}\sqrt{1-0{,}84\sin^2\alpha} + F_{a.0}E_a u_{a.x})c\rho_{a.0}G_{a.0}\sin\alpha}\,F_0 \qquad (4.I6)$$

В этих формулах

$$K_{a.x} = \frac{1{,}3G_{a.x}\rho_{a.x}h_0 b u_{a.x}}{4E_{a.x}F_{a.x}bu_{a.x} + G_{a.x}\rho_{a.x}h_0(bu_{a.x} + 2n_{a.x}^{н}F_{a.x})}; \qquad (4.I7)$$

$$K_{a.0} = \frac{1{,}3G_{a.0}\rho_{a.0}h_0^2 b u_{a.0}\sin\alpha}{4aE_a F_{a.0}bu_{a.0}\sin^2\alpha + G_{a.0}\rho_{a.0}h_0^2(bu_{a.0}\sin\alpha + 2n_a^{н}F_{a.0})}; \qquad (4.I8)$$

Q – поперечная сила в нормальном сечении, в котором величина $Q - Q_T$ меняет знак; при равномерно распределенной нагрузке $Q = Q_T$;

$$Q_\delta = \frac{0{,}67Q}{\xi x_0^2}\left[0{,}76x_0^2(x_0-h'_n)+h'^2_n(x_0-0{,}5h'_n)\right]K_y; \qquad (4.19)$$

$N^{кр}_{02}$ – усилие предварительного напряжения в наклонных стержнях (отогнутой напрягаемой арматуре), пересекаемых наклонной трещиной, с учетом всех потерь; a – расстояние от оси опоры до нормального сечения, в котором величина $Q-Q_т$ меняет знак;

c – длина участка, ограниченного нормальным сечением, в котором $M = M_т$, и нормальным сечением, в котором величина $Q-Q_т$ меняет знак; b – ширина ребра элемента в нормальном сечении, в котором величина $Q-Q_т$ меняет знак; $G_{a.x} = 0{,}55G_a$; при $\alpha = 45^0$ величина $G_{a.o} = G_a$; при $\alpha = 30^0$ и 60^0 величина $G_{a.o} = 0{,}85G_a$.

В формуле (4.19)

$$K_y = 1 + K\frac{\sigma_y}{2{,}2R^н_{пр}}. \qquad (4.20)$$

При $\sigma_y \le \dfrac{0{,}5Q^2(x_0-h'_n)^2}{bx_0\xi(M+N_{02}e_a)}$ коэффициент K принимается равным 30, при несоблюдении указанного условия – II.

При действии сосредоточенных сил

$$\sigma_y = \frac{0{,}4P}{bh_0}\left(\frac{h_0}{x_0}-1\right) \quad \text{при} \quad x_0 < 0{,}4h_0; \qquad (4.21)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{bh_0}\left(1-\frac{x_0}{h_0}\right) \quad \text{при} \quad x_0 \geqslant 0{,}4h_0. \qquad (4.22)$$

При действии равномерно распределенной нагрузки

$$\sigma_y = \frac{q}{b}\left(1-\frac{x_0}{h_0}\right). \qquad (4.23)$$

При поперечной арматуре в виде вертикальных стержней и одного наклонного стержня (отогнутая напрягаемая арматура) в формулах (4.15) и (4.16) принимается $u_{a.o} = c$, а в формуле (4.18) – $u_{a.o} = \tau = 6d$, где d – диаметр стержня (каната, пучка).

Значения C_{qA}, η, G_a и ξ расшифрованы в п.4.7, значения N_{02} и x_0, e_a – в пп.1.3 и 5.9.

При расчете элементов прямоугольного сечения в формуле (4.19) $h'_n = x_0$.

С предельной величиной раскрытия трещин, установленной нормами, сравнивается большее значение $a_т$, полученное по формулам (4.15) и (4.16).

Определение ширины раскрытия трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих поперечную арматуру

4.18. Расчет по раскрытию трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих поперечную арматуру, требуется, если на рассматриваемом участке (по длине элемента) при действии кратковременных нагрузок и кратковременном действии постоянных и длительных нагрузок $M \le M_T$, $Q > Q_T$ (см. рис.13, б).

4.19. Ширина раскрытия трещин, пересекающих поперечную арматуру, определяется вдоль оси указанной арматуры.

4.20. Ширина раскрытия трещин вдоль оси поперечной арматуры определяется по формулам п.4.17, где

$$c = 0{,}6a; \tag{4.24}$$

$$Q_\delta = Q_{\delta.c} + Q_{\delta.p} + [illegible]; \tag{4.25}$$

$$Q_{\delta.c} = \frac{Q_c}{4J_o}\{b'_n h'^2_n (2y'_к - h'_n) K_{y1} +$$

$$+ 0{,}76(0{,}15h_o - h'_n)[b'_n h'_n (2y'_к - h'_n) + b(0{,}15h_o - h'_n)(2y'_к - h'_n - 0{,}15h_o)] K_{y2}\}; \tag{4.26}$$

$$Q_{\delta.p} = \frac{Q_p}{4J_o}\{b_n h_n^2 (2y_к - h_n) K_{y3} +$$

$$+ 0{,}76(x_p - h_n)[b_n h_n (2y_к - h_n) + b(x_p - h_n)(2y_к - h_n - x_p)] K_{y4}\}. \tag{4.27}$$

В формуле (4.26) Q_c – поперечная сила в нормальном сечении, в котором $M = M_T$;

$$K_{y1} = 1 + \frac{11\sigma_{y1}}{2{,}2R^н_{пр}}; \tag{4.28}$$

$$K_{y2} = 1 + \frac{11\sigma_{y2}}{2{,}2R^н_{пр}}; \tag{4.29}$$

при действии сосредоточенных сил

$$\sigma_{y1} = \frac{0{,}4P}{bh}\left(\frac{h}{h'_n} - 1\right)\left(1 - \frac{0{,}4a}{h'_n}\right); \tag{4.30}$$

$$\sigma_{y2} = \frac{0{,}4P}{bh}\left(\frac{h}{0{,}15h_o} - 1\right)\left(1 - \frac{0{,}4a}{0{,}15h_o}\right); \tag{4.31}$$

при действии равномерно распределенной нагрузки

$$\sigma_{y1}=\frac{q}{b}\left(1-\frac{h'_n}{h}\right); \qquad (4.32)$$

$$\sigma_{y2}=\frac{q}{b}\left(1-\frac{0{,}15h_0}{h}\right); \qquad (4.33)$$

b – ширина ребра элемента в нормальном сечении, в котором $M=M_T$.

В формуле (4.27) Q_p – поперечная сила в нормальном сечении, в котором $M=0{,}4M_T$;

$$K_{y3}=1+\frac{30\sigma_{y3}}{2{,}2R^n_{пр}}; \qquad (4.34)$$

$$K_{y4}=1+\frac{30\sigma_{y4}}{2{,}2R^n_{пр}}; \qquad (4.35)$$

$$\sigma_{y3}=\frac{0{,}4P}{bh}\left(\frac{h}{h_n}-1\right)\left(1-\frac{0{,}16a}{h_n}\right); \qquad (4.36)$$

$$\sigma_{y4}=\frac{0{,}4P}{bh}\left(\frac{h}{x_p}-1\right)\left(1-\frac{0{,}16a}{x_p}\right); \qquad (4.37)$$

b – ширина ребра элемента в нормальном сечении, в котором $M=0{,}4M_T$.

В формулах (4.30), (4.31) и (4.36), (4.37) величина a – расстояние от оси опоры до нормального сечения, в котором $M=M_T$.

Расстояние (по нормали) от вершины наклонной трещины, расположенной ниже ц.т. приведенного сечения, до нижней грани элемента x_p определяется по формуле

$$x_p=0{,}5\left(B_1\pm\sqrt{B_1^2-4B_2}\right), \qquad (4.38)$$

где

$$B_1=2y_к-\frac{1{,}5Q_pb_nh_n(2y_к-h_n)}{M_Tb}\mathcal{D}K_{y3}; \qquad (4.39)$$

$$B_2=-\frac{1}{b}\left\{F_{cв}(2y_к-h_n)+2n^n_aF_ay_a-0{,}22b'_nh_0(2y'_к-0{,}15h_0)+\right.$$

$$+\frac{3\mathcal{D}}{M_T}\left[(Q_c-Q_{\delta.c}-N_{02}^{кр}\sin\alpha)y_0+0{,}17Q_p b_n h_n^2(2y_к-h_n)K_{уз}\right]\Big\}; \qquad (4.40)$$

$$\mathcal{D}=\frac{0{,}4F_{a.0}E_a u_{a.x}\operatorname{ctg}\alpha}{0{,}4F_{a.0}E_a u_{a.x}+F_{a.x}E_{a.x}u_{a.0}\sqrt{1-0{,}84\sin^2\alpha}}; \qquad (4.41)$$

y_a – расстояние между ц.т. приведенного сечения элемента и ц.т. сечения арматуры А.

При поперечной арматуре в виде вертикальных и наклонных стержней или только наклонных стержней в формуле (4.38) ставится знак плюс, при поперечной арматуре в виде вертикальных стержней – знак минус.

При $0{,}15h_0 \le h'_n$ в формуле (4.26) принимается $\beta = 0$.

При расчете элементов прямоугольного сечения в формулах (4.26)–(4.39) $b'_n=b_n=b$, $h'_n=0{,}15h_0$ и $h_n=x_p=0{,}25h$, в формуле (4.40) $b'_n=b_n=b$ и $h_n = 0$.

5. РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ

5.1. Деформации железобетонных элементов (прогибы) определяются из расчета их на действие сил предварительного обжатия, кратковременных нагрузок, а также постоянных и длительных нагрузок. При этом учитывается, в необходимых случаях, увеличение деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок, вызванное ползучестью бетона (возникновение дополнительных деформаций).

5.2. Расчет деформаций осуществляется по формулам строительной механики с учетом рекомендаций настоящего раздела.

Учет влияния ползучести производится на основе технического варианта теории ползучести – модернизированной теории старения.

Определение кривизн участков элементов без трещин

5.3. Кривизна участков, в растянутой зоне которых при нагрузках, соответствующих стадии определения деформаций, не образуются трещины либо они закрыты, определяется как для сплошного упругого тела с учетом работы сжатой и растянутой зон; при этом в расчет вводится полное приведенное сечение элемента.

5.4. При расчете деформаций элементов от кратковременного действия внешних нагрузок кривизна участков без трещин определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_к} = \frac{M}{\kappa E^н J_o}, \qquad (5.1)$$

где κ – коэффициент, принимаемый равным: для бетонов на плотных заполнителях, на крупном пористом и мелком плотном заполнителе, а также для плотных силикатных бетонов – 0,85; для бетонов на пористых заполнителях – 0,7.

При расчете дополнительных деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок кривизна подсчитывается по формуле

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E^н J_o} \cdot \frac{F(y_б^2 + z^2)\varphi}{F(y_б^2 + z^2) + n_a^н (F_a + F_a')(y_a^2 + z_a^2)\gamma}. \qquad (5.2)$$

5.5. При расчете деформаций элементов от кратковременного действия сил предварительного обжатия кривизна участков без трещин определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_к} = \frac{N_{o1} e_{o1}}{\kappa E^н J_o}, \qquad (5.3)$$

при расчете дополнительных деформаций от длительного действия сил предварительного обжатия – по формуле

$$\frac{1}{\rho} = \frac{N_{o1} e_{o1}}{E^н J_o} \cdot \frac{F[(y_б^2 + z^2) e_{o1} + z^2 y_б]\varphi}{F(y_б^2 + z^2) + n_a^н (F_a + F_a')(y_a^2 + z_a^2)\gamma}. \qquad (5.4)$$

Значения N_{o1} и e_{o1} расшифрованы в п.1.3.

5.6. При расчете деформаций предварительно напряженных элементов от кратковременного действия внешних нагрузок кривизна участков с начальными трещинами в сжатой зоне (см.п.3.6) определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_к} = \frac{M J_{o,т}^* + M^* (J_o - J_{o,т}^*)}{\kappa E^н J_o J_{o,т}^*}, \qquad (5.5)$$

при расчете дополнительных деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок – по формуле

$$\frac{1}{\rho}=\frac{M J^{*}_{o,\tau}+M^{*}(J_o-J^{*}_{o,\tau})}{E^{H}J_o J^{*}_{o,\tau}}\cdot\frac{F(y_\delta^2+z^2)\varphi}{F(y_\delta^2+z^2)+n_a^{H}(F_a+F'_a)(y_a^2+z_a^2)\gamma}. \qquad (5.6)$$

Значения M^{*} и $J^{*}_{o,\tau}$ расшифрованы в п.5.II.

5.7. Значения параметров φ и γ, которые необходимо иметь при решении задач, предусмотренных пп.5.4–5.6, определяются в соответствии с приложениями I и 2 настоящих рекоменда - ций.

Определение кривизн участков элементов с трещинами

5.8. Кривизна участков элементов, в растянутой зоне которых при нагрузках, соответствующих стадии определения деформаций, имеются трещины, определяется на основе следующих предпосылок:

для средних деформаций сжатого бетона и арматуры считается справедливой гипотеза плоских сечений;

эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны принимается в виде треугольника;

учитывается частичная работа бетона растянутой зоны на участках между трещинами.

5.9. При расчете деформаций предварительно напряженных эле - ментов от кратковременного действия внешних нагрузок кривизна участков с трещинами определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_{к.т}}=\frac{N_{o2}e}{KE^{H}J_{o,\tau}}, \qquad (5.7)$$

при расчете дополнительных деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок – по формуле

$$\frac{1}{\rho_\tau}=\frac{N_{o2}e}{E^{H}J_{o,\tau}}\left(\frac{J_{o,\tau}\gamma}{J_\tau}-1\right). \qquad (5.8)$$

В этих формулах (рис.15)

$$e=\frac{M+N_{o2}e_a}{N_{o2}}; \qquad (5.9)$$

e_a – расстояние от точки приложения силы N_{o2} до ц.т. сече - ния арматуры А;

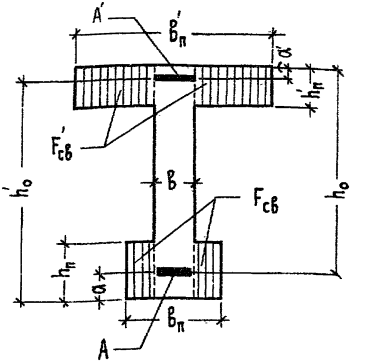


Рис.I5. К расчету деформаций участков элементов с трещинами.

$$J_{ст}=0{,}5\left[b'_п x_о^2(h_о-0{,}33x_о)-(b'_п-b)(x_о-h'_п)^2(h_о-0{,}67h'_п-0{,}33x_о)+2n''_а F'_а(x_о-a')(h_о-a')\right]; \quad (5.I0)$$

$$J_т=0{,}5\left[b'_п x^2(h_о-0{,}33x)-(b'_п-b)(x-h'_п)^2(h_о-0{,}67h'_п-0{,}33x)+2n''_а\gamma F'_а(x-a')(h_о-a')\right]. \quad (5.I1)$$

Высота сжатой зоны $x_о$ и x отыскивается из уравнений

$$x_о^3+A_{о1}x_о^2+A_{о2}x_о+A_{о3}=0; \quad (5.I2)$$

$$x^3+A_1x^2+A_2x+A_3=0, \quad (5.I3)$$

в которых

$$A_{о1}=-3(h_о-e); \quad (5.I4)$$

$$A_{о2}=-\frac{6}{b}\left\{F'_{сб}(h_о-0{,}5h'_п-e)+n''_а\left[F'_а(h_о-a'-e)-\frac{\psi F_а}{\psi_а}e\right]\right\}; \quad (5.I5)$$

$$A_{о3}=\frac{6}{b}\left\{0{,}5F'_{сб}h'_п(h_о-0{,}67h'_п-e)+n''_а\left[F'_а a'(h_о-a'-e)-\frac{\psi F_а}{\psi_а}eh_о\right]\right\}; \quad (5.I6)$$

$$A_1=A_{о1}; \quad (5.I7)$$

$$A_2=-\frac{6}{b}\left\{F'_{сб}(h_о-0{,}5h'_п-e)+n''_а\gamma\left[F'_а(h_о-a'-e)-\frac{\psi F_а}{\psi_а}e\right]\right\}; \quad (5.I8)$$

$$A_2=\frac{\delta}{\beta}\left\{0{,}5F'_{c\beta}h'_n(h_o-0{,}67h'_n-e)+n''_a\gamma\left[F'_a a'(h_o-a'-e)-\frac{\Psi F_a}{\Psi_a}eh_a\right]\right\}. \quad (5.19)$$

Значение N_{02} расшифровано в п.I.3; $\Psi = 0{,}9$.

При отсутствии предварительного напряжения все члены уравнений (5.I2) и (5.I3) необходимо разделить на e, в формулах (5.7) и (5.8) принять $N_{02}e = M$, а в формуле (5.9) $N_{02}=0$.

5.I0. При расчете деформаций элементов от кратковременного действия сил предварительного обжатия кривизна участков с трещинами (см.п.3.6) определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_{кт}}=\frac{N_{01}e'}{\kappa E^{н}J'_{от}}, \quad (5.20)$$

при расчете дополнительных деформаций от длительного действия сил предварительного обжатия – по формуле

$$\frac{1}{\rho_{т}}=\frac{N_{01}e'}{E^{н}J'_{о.т}}\left(\frac{J'_{о.т}\gamma}{J'_{т}}-1\right). \quad (5.2I)$$

В этих формулах (см.рис. I5)

$$e'=\frac{N_{01}e'_a\pm M}{N_{01}}, \quad (5.22)$$

e'_a – расстояние от точки приложения силы N_{01} до ц.т. сечения арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия указанной силы;

$$J'_{о.т}=0{,}5\left[b_п x_o^2(h'_o-0{,}33x_o)-(b_п-b)(x_o-h_п)^2(h'_o-0{,}67h_п-0{,}33x_o)+2n''_aF_a(x_o-a)(h'_o-a)\right]; \quad (5.23)$$

$$J'_{т}=0{,}5\left[b_п x^2(h'_o-0{,}33x)-(b_п-b)(x-h_п)^2(h'_o-0{,}67h_п-0{,}33x)+2n''_a\gamma F_a(x-a)(h'_o-a)\right]. \quad (5.24)$$

Высота сжатой зоны x_o и x отыскивается из уравнений (5.I2) и (5.I3), в которых

$$A_{01}=-3(h'_o-e'); \quad (5.25)$$

$$A_{02}=-\frac{\delta}{\beta}\left\{F_{c\beta}(h'_o-0{,}5h_п-e')+n''_a\left[F_a(h'_o-a-e')-\frac{\Psi F'_a}{\Psi_a}e'\right]\right\}; \quad (5.26)$$

$$A_{03}=\frac{6}{b}\left\{0{,}5F_{cb}h_n(h'_o-0{,}67h_n-e')+n''_a\left[F_a a(h'_o-a-e')-\frac{\psi F'_a}{\psi_a}e'h'_o\right]\right\}; \quad (5.27)$$

$$A_4=A_{04}; \quad (5.28)$$

$$A_2=-\frac{6}{b}\left\{F_{cb}(h'_o-0{,}5h_n-e')+n''_a\gamma\left[F_a(h'_o-a-e')-\frac{\psi F'_a}{\psi_a}e'\right]\right\}; \quad (5.29)$$

$$A_3=\frac{6}{b}\left\{0{,}5F_{cb}h_n(h'_o-0{,}67h_n-e')+n''_a\gamma\left[F_a a(h'_o-a-e')-\frac{\psi F'_a}{\psi_a}e'h'_o\right]\right\}. \quad (5.30)$$

Значение N_{01} расшифровано в п.I.3.

Момент от внешних нагрузок, действующих на элемент в процессе предварительного обжатия, транспортирования или монтажа, принимается со знаком плюс, если совпадает по направлению с моментом от предварительного обжатия, и со знаком минус, если действует в противоположном направлении.

5.II. При расчете деформаций преднапряженных элементов от кратковременного действия внешних нагрузок кривизна участков с начальными трещинами в сжатой зоне (см.п.3.6) определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_{кт}}=\frac{MJ^*_{o.т}+M^*(J_{o.т}-J^*_{o.т})}{KE''J_{o.т}J^*_{o.т}}, \quad (5.3I)$$

при расчете дополнительных деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок – по формуле

$$\frac{1}{\rho_т}=\frac{MJ^*_{o.т}+M^*(J_{o.т}-J^*_{o.т})}{E''J_{o.т}J^*_{o.т}}\left(\frac{J_{o.т}\gamma}{J_т}-1\right). \quad (5.32)$$

В этих формулах (см. рис.I5)

$$M^*=\frac{N_{o1}e'J^*_{o.т}(h-x_o)}{J'_{o.т}(h-x^*_o)}; \quad (5.33)$$

$$J^*_{o.т}=0{,}5[\beta_n x^{*2}_o(h'_o-0{,}33x^*_o)-(\beta_n-b)(x^*_o-h_n)^2(h'_o-0{,}67h_n-0{,}33x^*_o)+2n''_aF_a(x^*_o-a)(h'_o-a)]; \quad (5.34)$$

$$x^*_o=-0{,}5(A_{01}-\sqrt{A^2_{01}-4A_{02}}); \quad (5.35)$$

$$A_{01}=\frac{2}{b}\left[F_{cв}+n_a^н\left(\frac{\psi F_a'}{\psi_a}+F_a\right)\right]; \qquad (5.36)$$

$$A_{02}=-\frac{2}{b}\left[0{,}5F_{cв}h_п+n_a^н\left(\frac{\psi F_a'}{\psi_a}h_o'+F_a a\right)\right]. \qquad (5.37)$$

Значение N_{01} расшифровано в п.I.3, значения e', $J_{0т}'$ и x_o – в п.5.I0.

5.I2. Коэффициент ψ_a, учитывающий работу растянутого бетона на участках с трещинами, принимается равным:

при расчете деформаций от действия внешних нагрузок

$$\psi_a=1{,}25-\delta m-\frac{1-m^2}{(3{,}5-1{,}8m)e/h_o}, \qquad (5.38)$$

при расчете деформаций от действия сил предварительного обжатия

$$\psi_a=1{,}25-\delta m-\frac{1-m^2}{(3{,}5-1{,}8m)e/h_o}. \qquad (5.39)$$

В формуле (5.38)

$$m=\frac{R_p^н\gamma_т W_o}{M-N_{02}(e_{02}+r_я)}. \qquad (5.40)$$

В формуле (5.39)

$$m=\frac{R_p^н\gamma_т W_o}{N_{01}(e_{01}-r_я)\pm M}. \qquad (5.41)$$

Значения N_{01}, e_{01} и $\gamma_т$ расшифрованы в пп.I.3 и 3.5, значения e и e' – в пп.5.9 и 5.I0.

При кратковременном действии внешних нагрузок для арматуры в виде стальных стержней периодического профиля $\delta = 1{,}1$; для гладких стержней $\delta = 1$. При действии сил предварительного обжатия и длительном действии внешних нагрузок $\delta = 0{,}8$.

При отсутствии предварительного напряжения третий член правой части формулы (5.38) принимается равным нулю. Одновременно в формуле (5.40) необходимо принять $N_{02} = 0$.

5.I3. При расчете деформаций элементов прямоугольного сечения в формулах пп.5.9–5.II $F_{cв}' = F_{cв} = 0$, $h_п' = h_п = 0$ и $b_п' = b_п = b$.

5.I4. Значения параметров ползучести γ и φ, которые необходимо иметь при решении задач, предусмотренных пп.5.9-5.II, определяются в соответствии с приложениями I и 2 настоящих рекомендаций.

Определение деформаций

5.I5. Полные деформации участков железобетонных элементов без трещин принимаются равными алгебраической сумме деформаций от кратковременного действия сил предварительного обжатия и всех нагрузок и дополнительных деформаций от длительного действия сил предварительного обжатия, постоянных нагрузок и длительных нагрузок.

5.I6. Полные деформации участков железобетонных элементов с закрытыми трещинами принимаются равными алгебраической сумме деформаций от кратковременного действия сил предварительного обжатия, постоянных и длительных нагрузок, а также дополнительных деформаций от длительного действия сил предварительного обжатия и указанных выше нагрузок.

5.I7. Полные деформации участков железобетонных элементов с трещинами принимаются равными алгебраической сумме деформаций от кратковременного действия всех нагрузок и дополнительных деформаций от длительного действия постоянных и длительных нагрузок.

Приложение I

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСАДКИ И ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНОВ

I. В соответствии с СН 365-67 вводятся понятия "нормативное значение меры ползучести бетона $C^{н}$" и "нормативное значение деформаций усадки бетона $\varepsilon_{y}^{н}$".

Нормативные значения меры ползучести представляют конечную относительную величину деформаций ползучести, вызванную единичным напряжением, которое приложено в возрасте бетона 28 суток к элементу сечением I0xI0 см в условиях относительной влажности среды 70%.

Нормативные значения деформаций усадки бетона $\varepsilon_{y}^{н}$ представляют конечную относительную величину линейной деформации усадки, которая развивается с момента окончания влажного хранения в элементе сечением I0xI0 см в условиях относительной влажности 70%.

2. Величины нормативных значений меры ползучести и деформаций усадки определяются экспериментально, а при отсутствии опытных данных – по табл.I–3.

Примечания: I. Для мелкозернистых бетонов на плотном заполнителе $C^н$ и $\varepsilon_y^н$ в табл.I повышаются на 30%. 2. При использовании плотного мелкого заполнителя значения $C^н$ и $\varepsilon_y^н$ в табл.2 снижаются на 20%. 3. Для бетонов на плотных заполнителях, подвергнутых термовлажностной обработке по полному режиму, значения $C^н$ и $\varepsilon_y^н$ в табл.I и 2 снижаются на I5%, на пористых заполнителях – на 20%.

3. Вводимые в расчет конечные значения характеристик ползучести $\varphi_к$ и деформаций усадки $\varepsilon_{yк}$ вычисляются по формулам:
для бетонов на плотных и пористых заполнителях

$$\varphi_к = E^н C^н \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4; \qquad (I)$$

$$\varepsilon_{y.к} = \varepsilon_y^н \xi_3 \xi_4; \qquad (2)$$

для плотных силикатных бетонов

$$\varphi_к = E^н C^н \xi_3 \xi_4, \qquad (3)$$

где ξ_1, ξ_2, ξ_3 и ξ_4 – коэффициенты, учитывающие отклонения действительных условий работы бетона в элементе от принятых средних (определяются по табл.4–I3).

Примечания: I. Открытая удельная поверхность стержневых (немассивных) элементов вычисляется как отношение открытого периметра поперечного сечения к его площади. Участки поверхности (периметра сечения), находящиеся в условиях частичной изоляции (поверхности, закрытые полом или кровлей; гидроизолированные поверхности и т.п.), при подсчете величины открытой поверхности не учитываются, если изоляция осуществлена непосредственно после изготовления элемента. 2. Относительная влажность среды устанавливается по фактическим данным. При отсутствии таких данных, а также для типовых элементов допускается принимать $\xi_4 = I$. 3. При вычислении характеристик ползучести бетонов $\varphi_к$ по формуле (I) во всех случаях отличным от единицы принимается лишь один из первых двух коэффициентов: ξ_1 или ξ_2. При прочности бетона в момент нагружения, меньшей, чем его проектная марка, используют значения коэффициента ξ_1, принимая $\xi_2 = I$, а при нагружении бетона в возрасте более 28 суток (I месяц) учитывают изменения коэффициента ξ_2, полагая $\xi_1 = I$.

4. Величины характеристик ползучести и усадки бетонов в произвольный момент времени φ и ε_y рекомендуется определять по формулам

$$\varphi = \varphi_к [I - \exp(-\alpha t)]; \qquad (4)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y.к} [I - \exp(-\alpha t)], \qquad (5)$$

где t – время в сутках; α – параметр, характеризующий скорость нарастания ползучести и усадки бетонов.

Приближенные значения φ и ε_y в долях от $\varphi_к$ и $\varepsilon_{y.к}$ для

Таблица I

Нормативные величины параметров ползучести и усадки трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях

Характеристика подвижности (удобоукладываемости) бетонной смеси по ГОСТ I0I8I-76		Значение $C^н \cdot I0^6$ ($см^2$/кг) для бетона проектной марки							Значение $\varepsilon_y^н \cdot I0^5$ бетона проектной марки	
осадка конуса, см	жесткость по техническому вискозиметру, с	I50	200	300	400	500	600	800	I50-200	300-800
-	35-30	I4	I0,8	7,7	6,2	5,2	4,5	3,6	23	27
I-2	I5-I0	I6,2	I2,4	9	7,2	6	5,3	4,2	29	33
5-6	-	I8,2	I4	I0	8	6,8	6	4,6	35	40
9-I0	-	I9,2	I4,8	I0,7	8,5	7,2	6,3	5	38	43

Таблица 2

Нормативные величины параметров ползучести и усадки бетонов на пористых заполнителях

Характеристика подвижности (удобоукладываемости) бетонной смеси по ГОСТ I0I80-76		Значение $C^н \cdot I0^6$ ($см^2$/кг) для бетона проектной марки				Значение $\varepsilon_y^н \cdot I0^5$ для бетона проектной марки	
осадка конуса, см	жесткость по техническому вискозиметру, с	I50	200	300	400	I50-200	300-400
-	40-30	20	I5,6	9,2	7,4	42	48
I-2	20-I0	23	I8,2	II,5	8,6	54	60
5-6	-	27	20	I3,4	I0	66	72
9-I0	-	29	2I,6	I4,4	II	78	84

Таблица 3

Нормативные величины параметров ползучести и усадки плотных силикатных бетонов

Вид вяжущего	Значение $C^н \cdot 10^6$ ($см^2/кг$) для бетона проектной марки				Значение $\varepsilon_y^н \cdot 10^5$ для бетона проектной марки
	I50	200	300	400	I50–400
Известково-кварцевое	I8,2	I2,5	6,3	4,8	300
Известково-шлаковое	7,7	6,2	4,8	4	300

Значения коэффициентов ξ_1, ξ_2, ξ_3 и ξ_4 для трехкомпонентных бетонов на плотных заполнителях

Таблица 4

Кубиковая прочность бетона при нагружении в долях от проектной марки	ξ_1
0,6	I,5
0,7	I,4
0,8	I,25
0,9	I,I5
I и более	I

Таблица 5

Возраст бетона в момент нагружения, месяцы	ξ_2
I	I
I,5	0,9
2	0,85
3	0,75
6	0,6
I2 и более	0,5

Таблица 6

Открытая удельная поверхность элемента, I/см	ξ_3 для усадки	ξ_3 для ползучести
0,05 и менее	0,4	0,65
0,07	0,55	0,7
0,I	0,75	0,75
0,2	0,85	0,85
0,4	I	I
0,6 и более	I,I5	I,I5

Таблица 7

Относительная влажность среды, проц.	ξ_4 для усадки	ξ_4 для ползучести
40	I,4	I,4
50	I,3	I,3
60	I,I5	I,I5
70	I	I
80	0,75	0,85
90	0,4	0,7
I00	0	0,55

Значения коэффициентов ξ_1, ξ_2, ξ_3 и ξ_4 для бетонов на пористых заполнителях

Таблица 8

Кубиковая прочность бетона при нагружении в долях от проектной марки	ξ_1
0,6	I,5
0,7	I,3
0,8	I,2
0,9	I,I
I и более	I

Таблица 9

Возраст бетона в момент нагружения, месяцы	ξ_2
I	I
I,5	0,9
2	0,8
3	0,7
6	0,6
I2 и более	0,5

Таблица I0

Открытая удельная поверхность, I/см	ξ_3 для усадки	ξ_3 для ползучести
0,05 и менее	0,4	0,6
0,07	0,45	0,65
0,I	0,5	0,7
0,2	0,7	0,8
0,4	I	I
0,6	I,I	I,I5
0,8	I,2	I,35
I и более	I,4	I,55

Таблица II

Относительная влажность, проц.	ξ_4 для усадки	ξ_4 для ползучести
40	I,4	I,4
50	I,3	I,3
60	I,I5	I,I5
70	I	I
80	0,75	0,85
90	0,45	0,65
I00	0	0,45

Значения коэффициентов ξ_3 и ξ_4 для плотных силикатных бетонов

Таблица I2

Открытая удельная поверхность, I/см	ξ_3	
	для усадки	для ползучести
0,I	I	0,7
0,2	I	0,8
0,4	I	I
0,6	I	I,I5
0,8	I	I,35
I и более	I	I,55

Таблица I3

Относительная влажность, проц.	ξ_4	
	для усадки	для ползучести
40	I	0,9
40-70	I	I
70	I	I,I

конструкций из бетонов на плотных и пористых заполнителях, возводимых под открытым небом и работающих в условиях сезонного изменения окружающей среды, приведены в табл. I4.

Таблица I4

Значения $\varphi/\varphi_к$ и $\varepsilon_y/\varepsilon_{y,к}$

t, сут.	I0	30	60	90	I80	360	I080
Бетоны на плотных заполнителях	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	I
Бетоны на пористых заполнителях	0,3	0,5	0,65	0,75	0,85	0,95	I

Для условий, отличающихся от указанных выше, следует пользоваться формулами (4) и (5), где $\alpha = 0,0I$, если наиболее невыгодные значения усилий (напряжений) к рассматриваемому моменту времени получаются при минимальных значениях φ и ε_y, и $\alpha = 0,04$, если наиболее невыгодные значения усилий (напряжений) получаются при максимальных значениях φ и ε_y.

Применительно к плотным силикатным бетонам коэффициент α допускается принимать равным 0,05 во всех случаях.

Приложение 2

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ γ И β

Таблица I

φ	Значение γ при $\xi_1 \xi_2$									
	0,5	0,6	0,75	0,85	0,9	I	I,I5	I,25	I,4	I,5
0	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,25	I,4	I,3	I,3	I,3	I,3	I,3	I,2	I,2	I,2	I,2
0,5	I,8	I,7	I,6	I,6	I,5	I,5	I,5	I,5	I,4	I,4
0,75	2,2	2	I,9	I,9	I,8	I,8	I,7	I,7	I,7	I,7
I	2,5	2,4	2,2	2,I	2,I	2	2	2	I,9	I,9
I,25	2,9	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,2	2,I
I,5	3,3	3,I	2,8	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4
I,75	3,7	3,5	3,2	3	3	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6
2,0	4,I	3,8	3,5	3,3	3,3	3,3	3	3	2,9	2,9
2,25	4,5	4,I	3,8	3,6	3,6	3,4	3,3	3,2	3,2	3,I
2,5	4,9	4,5	4,I	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4
2,75	5,3	4,8	4,4	4,2	4,I	4	3,8	3,8	3,7	3,6
3	5,7	5,2	4,7	4,5	4,4	4,3	4,I	4	3,9	3,9
3,25	6,I	5,6	5,I	4,8	4,7	4,6	4,4	4,3	4,2	4,I
3,5	6,5	5,9	5,4	5,I	5	4,8	4,7	4,6	4,4	4,4
3,75	6,9	6,3	5,7	5,4	5,3	5,I	5	4,8	4,7	4,6
4	7,3	6,6	6	5,7	5,6	5,4	5,2	5,I	5	4,9

Таблица 2

σ/R_0	Значение β при марке бетона R, кг/см^2			
	≤ 200	300–400	500–600	> 600
0,4	0	0	0	0
0,5	0,002	0,00I5	0,00I	0,0005
0,6	0,0035	0,0025	0,00I5	0,00I
0,7	0,005	0,0035	0,0025	0,00I5
0,8	0,007	0,005	0,0035	0,002

Приложение 3

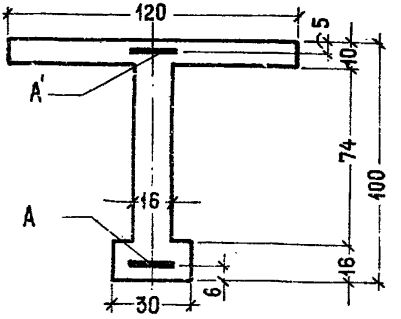
РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ БЕТОНОВ ПРИ СЖАТИИ $E \cdot 10^{-3}$, кгс/см^2, ПРИ ПРОЕКТНОЙ МАРКЕ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

Вид бетона		Марка	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
На плотных заполнителях	трехкомпонентный мелкозернистый	естественного твердения	-	130	150	167	182	194	205	215	225	242	260	270
		подвергнутый тепловой обработке при атмосферном давлении	-	115	135	150	165	176	186	196	205	218	235	245
		естественного твердения	-	106	122	137	150	161	171	-	-	-	-	-
		подвергнутый тепловой обработке при атмосферном давлении	-	96	110	121	134	143	151	-	-	-	-	-
На пористых заполнителях и поризованный в зависимости от объемной массы бетона, т/м^3		1,4	62	71	80	89	97	105	-	-	-	-	-	-
		1,8	78	90	100	108	115	122	128	-	-	-	-	-
		2,2	-	122	130	137	144	150	156	-	-	-	-	-
Плотный силикатный		на известково-песчаном вяжущем	-	75	90	105	120	130	140	-	152	161	-	-
		на известково-шлаковом вяжущем	-	85	105	125	142	153	163	-	180	191	-	-

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример I

Определить потери напряжений от ползучести бетона в нижней арматуре преднапряженной железобетонной балки (см.рисунок), вызванные длительным действием сил предварительного обжатия.



Поперечное сечение железобетонного элемента (размеры в см).

Исходные данные. Бетон марки 400 тяжелый с крупным заполнителем, естественного твердения; осадка конуса 5 см. До отпуска натяжных устройств (в возрасте бетона 28 суток) балка хранится во влажных условиях. Относительная влажность воздуха в процессе работы конструкции ~70%. Открытая удельная поверхность балки - 0,2 I/см. $F = 2864$ см^2; $J_z = 3,35 \cdot I0^6$ см^4; $r_z^2 = II70$ см^2; $y = 57,1$см; $\rho = 3,78$; $E^н_б = 3,5 \cdot I0^5$ кгс/см^2; $F_a = F'_a = F_н = I3$ см^2; $E^н_a = 2 \cdot I0^6$ кгс/см^2 (арматура класса А-У); $n^н_a = 5,7$; $F_0 = 3235$ см^2; $J_0 = 4,33 \cdot I0^6$ см^4; $r_0^2 = I338$ см^2; $y_0 = 52,5$ см; $y'_0 = 36,5$ см; $\sigma_{01} = \sigma_{02} = 6800$ кгс/см^2; $M = I00$ тс.м.

Решение. По формулам (I.I) и (I.2) определяем:

$$N_{01} = 6800(52+I3) = 442000 \text{ кгс};$$

$$e_{01} = \frac{6800(52 \cdot 52,5 - I3 \cdot 36,5)}{442000} = 34,7 \text{ см}.$$

По формуле (I.9) подсчитываем напряжения в бетоне на уровне арматуры $A_н$ от кратковременного действия сил предварительного обжатия

$$\sigma = \frac{442000}{3235}\left(I + \frac{34,7 \cdot 52,5}{I338}\right) = 323 \text{ кгс/см}^2.$$

По таблицам приложения I имеем: $C^н = 8,I \cdot I0^{-6}$; $\xi_1 = \xi_2 = I,0$; $\xi_3 = 0,8$; $\xi_4 = I,0$; $\varphi = 8,I \cdot I0^{-6} \cdot 3,5 \cdot I0^5 \cdot I,0 \cdot 0,8 \times I,0 = 2,3$.

По таблицам приложения 2 при $\varphi = 2,3$ и $\sigma/R_0 = 0,8$ находим: $\gamma = 3,5$; $\beta = 0,005$.

Потери напряжений в арматуре $A_н$ [формула (I.7)]: $\sigma_п = 5,7 \times 323 \cdot (I + 0,005 \cdot 323) \cdot 2,3$:

$$\frac{2864 + 5,7 \cdot 52 \cdot 3,78}{2864 + 5,7 \cdot 52 \cdot 3,78[3,5 + 2 \cdot 0,005 \cdot 323 \cdot (3,5 - I)]} = 2790 \text{ кгс/см}^2.$$

Пример 2

Определить несущую способность преднапряженной железобетонной балки при действии изгибающего момента (см.рисунок).

Исходные данные. Бетон тяжелый трехкомпонентный марки 400; $R_{пр}$= 175 кгс/см^2; E = 2,05·10^5 кгс/см^2; R_a= 6400 кгс/см^2; E_a= 2·10^6 кгс/см^2; n_a= 9,76; σ_{o1}= σ'_{o1} = 6800 кгс/см^2.

Решение. Определим граничные значения высоты сжатой зоны. В соответствии с формулой (2.54) коэффициент пластичности

$$\lambda_{пр}= 0,82 - 0,00075\cdot175 = 0,69.$$

По формулам (2.50)–(2.52) находим:

$$x_{гр(1-2)}= \frac{9,76\cdot175\cdot94}{9,76\cdot175+(0,62\cdot2\cdot10^6 - 6800)(1-0,69)} = 13,4 \text{ см};$$

$$x_{гр(2-3)}= \frac{9,76\cdot175\cdot94}{9,76\cdot175+(6400+0,62\cdot2\cdot10^6-6800)(1-0,69)} = 56,8 \text{ см};$$

$$x_{гр(3-4)}= \frac{9,76\cdot175\cdot94}{9,76\cdot175+(0,8\cdot6400-6800)(1-0,69)} = 135,3 \text{ см}.$$

Допустим, что исчерпание сопротивления происходит по случаю 3 (см.раздел 2 настоящих рекомендаций) при $\lambda_{пр}x > h'_п$. По формулам (2.39), (2.30), (2.44), (2.41) и (2.23) вычисляем высоту сжатой зоны сечения

$$n_{a2}= \frac{9,76\cdot6400}{6400+0,01\cdot2\cdot10^6} = 2,37;$$

$$A_1 = 0,5(1-0,69^2)\cdot175\cdot16 = 733,5;$$

$$A_2 = 175\left[(1-0,69)\cdot1040+2,37\cdot52+9,76\cdot13\right] - (1-0,69)\left\{\left[6800\frac{2,37}{9,76}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+0,8\cdot6400\left(1-\frac{2,37}{9,76}\right)\right]\cdot52+6800\cdot13\right\} = -16366;$$

$$A_3 = -175(2,37\cdot52\cdot94+9,76\cdot13\cdot5) = -2134095;$$

$$x = \frac{-16366}{2\cdot733,5}\left(-1-\sqrt{1+\frac{4\cdot733,5\cdot2134095}{16366^2}}\right) = 66,2 \text{ см}.$$

Поскольку условие $x_{гр(2-3)} < x < x_{гр(3-4)}$ выполняется, исчерпание сопротивления действительно происходит в соответствии с 3-м случаем.

Напряжения в арматуре A' определяем по формуле (2.32)

$$\sigma'_a= \frac{9,76\cdot175(66,2-5)}{(1-0,69)\cdot66,2} - 6800 = -1708 \text{ кгс/см}^2 < R_a .$$

Несущую способность балки определяем по формуле (2.22)

$$0,5\cdot175\cdot16\cdot66,2\left[(1+0,69)\cdot94-0,33\cdot66,2\,(1+0,69+0,69^2)\right] +$$
$$+ 175\cdot1040(94-5)-1708\cdot13(94-5) = 24562000 \text{ кгс}\cdot\text{см} \approx 246 \text{ тс}\cdot\text{м}.$$

Пример 3

Определить сопротивление преднапряженной железобетонной балки (см.рисунок) образованию нормальных трещин. Внешняя нагрузка прикладывается в возрасте, когда ползучестью бетона от действия этой нагрузки можно пренебречь. Влияние собственной массы балки не учитываем.

Исходные данные. W_o= 74300 см^3; $\gamma_т$ = 1,75; $r_я$ = 23 см;

$R_{пр}$= 225 кгс/см^2; N_{02}= 256000 кгс; e_{02}= 25,2 см; $y_к$ = = 58,5 см; $y'_к$= 41,5 см. Остальные данные приведены в примере I.

Решение. Так как N_{02}= 256000 кгс $< \frac{F_o}{h}(R_{пр}y_к - 2R''_р y'_к)$ = $= \frac{3235}{100}$ (225·58,5 – 2·25·41,5), эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны имеет вид треугольника (см.рис. 10,г).

При упругой работе сжатого бетона сопротивление сечения образованию нормальных трещин определяется по формуле (3.1) при λ = 0: $M_т$= 256000(25,2+23)+25·1,75·74300=15·10^4 кгс·м.

Пример 4

Определить ширину раскрытия нормальных трещин в обычной (выполненной без предварительного напряжения) железобетонной балке (см. рисунок).

Исходные данные: M = 6·10^{6}кгс.см; ρ_a = 70,4 см; y =2см. Остальные данные приведены в примерах 1 и 5.

Решение. Для рассматриваемой балки

$$\eta = 1;$$

x_0= 26,9 см; $J_{o.т}$ = 2,68·10^{6}см^4(см.пример 5);

$$K_1 = 1 + \frac{2}{94 - 26,9} = 1,03;$$

по формуле (4.7)

$$z = 94 - 26,9 + 0,67 \cdot \frac{120 \cdot 26,9^3 - (120-16)(26,9-10)^3}{120 \cdot 26,9^2 - (120-16)(26,9-10)^2} = 88,6 \text{ см}.$$

$$K_2 = \frac{0,3 \cdot 6 \cdot 10^6 + 1100 \cdot 52 \cdot 88,6}{6 \cdot 10^6 (2864 - 1040 + 2,3 \cdot 5,7 \cdot 52)^2}(2864 - 1040)^2 = 0,61;$$

по табл.2 находим K_3= 0,42;

по формуле (4.8) определяем G_a= 0,42·3,5·10^5=1,47·10^{5}кгс/см^2.

Так как кратковременная нагрузка отсутствует, $\alpha_т$ = $\alpha_{т3}$= 3,4·1,5·1·1,03·0,61 $\frac{6 \cdot 10^6}{70,4 \cdot 88,6 \cdot 1,47 \cdot 10^5}$ = 0,021 см.

Пример 5

Определить полный прогиб в середине пролета однопролетной свободноопертой железобетонной балки(см.рисунок) от длительного действия равномерно распределенной нагрузки.

Исходные данные. M = 60 тсм; L =20 м; $R^н_р$=25 кгс/см^2; ψ =1. Балка выполнена без предварительного напряжения. Остальные данные приведены в примерах 1,3 и 4.

Решение. По формулам п.5.12 определяем:

при расчете деформаций от кратковременного действия нагрузки

$$m = \frac{25 \cdot 1,75 \cdot 74300}{6 \cdot 10^6} = 0,54;$$

$$\psi_a = 1,25 - 1,1 \cdot 0,54 = 0,66,$$

то же, от длительного действия нагрузки

$$m = 0,54;$$

$$\psi_a = 1,25 - 0,8 \cdot 0,54 = 0,82$$

В соответствии с п.5.9 настоящих рекомендаций относительно ненапряженных элементов делим все члены уравнений (5.12) и (5.13) на e и принимаем в формуле (5.9) $N_{02} = 0$ (т.е. получаем $e = \infty$). Тогда для определения x_0 и x получаем квадратные уравнения с коэффициентами $A_{01} = 1$;

$$A_{02} = \frac{2}{b}\left[F'_{cb} + n''_a\left(F'_a + \frac{F_a\psi}{\psi_a}\right)\right] = \frac{2}{16}\left[1040 + 5,7\left(13 + \frac{52 \cdot 1}{0,66}\right)\right] = 195,4;$$

$$A_{03} = -\frac{2}{b}\left[0,5F'_{cb}h'^2_n + n''_a\left(F'_a a' + \frac{F_a\psi}{\psi_a}h_0\right)\right] = -\frac{2}{16}\left[0,5 \cdot 1040 \cdot 10 + 5,7\left(13 \cdot 5 + \frac{52 \cdot 1}{0,66} \cdot 94\right)\right] = -5973;$$

$$A_1 = 1;$$

$$A_2 = \frac{2}{b}\left[F'_{cb} + n''_a\gamma\left(F'_a + \frac{F_a\psi}{\psi_a}\right)\right] = \frac{2}{16}\left[1040 + 5,7 \cdot 3,5\left(13 + \frac{52 \cdot 1}{0,82}\right)\right] = 320,6;$$

$$A_3 = -\frac{2}{b}\left[0,5F'_{cb}h'^2_n + n''_a\gamma\left(F'_a a' + \frac{F_a\psi}{\psi_a}h_0\right)\right] = -\frac{2}{16}\left[0,5 \cdot 1040 \cdot 10 + 5,7 \times 3,5\left(13,5 + \frac{52 \cdot 1}{0,32} \cdot 94\right)\right] = -15677.$$

При кратковременном действии нагрузки

$$x_0 = -0,5\left(A_{02} - \sqrt{A_{02}^2 - 4A_{03}}\right) = -0,5\left(195,4 - \sqrt{195,4^2 + 4 \cdot 5973}\right) = 26,9 \text{ см};$$

$$J_{0,T} = 0,5[120 \cdot 26,9^2(94 - 0,33 \cdot 26,9) - (120 - 16)(26,9 - 10)^2(94 - 0,67 \times 10 - 0,33 \cdot 26,9) + 2 \cdot 5,7 \cdot 13(26,9 - 5)(94 - 5)] = 2,68 \cdot 10^6 \text{ см}^4;$$

$$\frac{1}{\rho_{k.T}} = \frac{6 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 3,5 \cdot 10^5 \cdot 2,68 \cdot 10^6} = 7,5 \cdot 10^{-6}\ \frac{1}{\text{см}}.$$

При длительном действии нагрузки

$$x = -0,5\left(A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_3}\right) = -0,5\left(320,6 - \sqrt{320,6^2 + 4 \cdot 15677}\right) = 43,1 \text{ см};$$

$$J_T = 0,5[120 \cdot 43,1^2(94 - 0,33 \cdot 43,1) - (120 - 16)(43,1 - 10)^2(94 - 0,67 \times 10 - 0,33 \cdot 43,1) + 2 \cdot 5,7 \cdot 3,5 \cdot 13(43,1 - 5)(94 - 5)] = 5,61 \cdot 10^6 \text{ см}^4.$$

$$\frac{1}{\rho_T} = \frac{6 \cdot 10^6}{3,5 \cdot 10^5 \cdot 2,68 \cdot 10^6}\left(\frac{2,68 \cdot 10^6 \cdot 3,5}{5,61 \cdot 10^6} - 1\right) = 4,3 \cdot 10^{-6}\ \frac{1}{\text{см}}.$$

Полный прогиб балки

$$f = \frac{5}{48}(7,5 + 4,3) \cdot 10^{-6} \cdot 2000^2 = 4,9 \text{ см}.$$

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Усилия

M и Q – изгибающий момент и поперечная сила;
P – сосредоточенная сила или опорная реакция от внешней нагрузки;
q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки.

Характеристики материалов

$R_{пр}$ – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;
$R^{н}_{р}$ – нормативное сопротивление бетона осевому растяжению;
$R_{о}$ – передаточная прочность бетона, принятая для предварительного обжатия;
$R_{а}$ и $R_{ах}$ – расчетные сопротивления продольной и поперечной растянутой арматуры;
E – расчетный модуль упругости бетона;
$E^{н}$ – нормативный модуль упругости бетона (определяется в соответствии со СНиП II-21-75);
$E^{н}_{а}$ – то же, продольной арматуры и поперечной арматуры в виде наклонных (отогнутых) стержней;
$E^{н}_{а.х}$ – то же, поперечной арматуры в виде вертикальных стержней (хомутов);

$$n_{а}=E_{а}/E;\quad n^{н}_{а}=E^{н}_{а}/E^{н};\quad n^{н}_{ах}=E^{н}_{а.х}/E^{н};$$

$\varepsilon_{пр}$ – расчетные относительные деформации предельной сжимаемости бетона;
$\varepsilon_{р}$ – расчетные относительные деформации предельной растяжимости арматурной стали;
φ, γ, β и $\varepsilon_{у}$ – параметры ползучести и усадки бетона.

Характеристики положения продольной арматуры в поперечном сечении

A и A' – обозначения арматуры, расположенной в зоне, растянутой от действия внешней нагрузки, и сжатой;
$A_{н}$ и $A'_{н}$ – обозначения напрягаемой части арматуры A и A'.

Геометрические характеристики

F и $F_{о}$ – площади бетонного и приведенного сечений элемента;
J и $J_{о}$ – моменты инерции бетонного и приведенного сечений элемента относительно их центров тяжести;
$J_{а}$ – момент инерции сечения всей арматуры относительно ее центра тяжести;

$$r^{2}_{о}=J_{о}/F_{о};\quad r^{2}=J/F;\quad r^{2}_{а}=J_{а}/(F_{а}+F'_{а});$$

$S'_{о}$ и $S_{о}$ – статические моменты приведенного сечения элемента относительно его верхнего и нижнего края;
$F'_{св}$ и $F_{св}$ – площади свесов сжатой и растянутой зоны бетонного сечения элемента;
$F'_{а}$ и $F_{а}$ – площади сечения арматуры A' и A;
$F_{н}$ и $F'_{н}$ – то же, арматуры $A_{н}$ и $A'_{н}$;
$F_{а.х}$ – площадь сечения поперечной арматуры в виде вертикальных стержней (хомутов), расположенной в одной нормальной к продольной оси элемента плоскости, пересекающей рассматриваемую наклонную трещину;

$F_{a.o}$ – то же, поперечной арматуры в виде наклонных (отогнутых) стержней, расположенной в одной наклонной к продольной оси элемента плоскости;

W_o – момент сопротивления приведенного сечения элемента относительно крайних растянутых волокон, определяемый как для упругого материала;

$r_я$ – расстояние от центра тяжести приведенного сечения элемента до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, $r_я = W_o / F_o$;

y_o и y'_o – расстояния от центра тяжести приведенного сечения элемента до точек приложения равнодействующей усилий в арматуре $A_н$ и $A'_н$;

$y_к$ и $y'_к$ – то же, до нижнего и верхнего края сечения;

y и y' – расстояния от центра тяжести бетонного сечения элемента до точек приложения равнодействующей усилий в арматуре $A_н$ и $A'_н$;

$\rho = 1 + y^2/r^2$; $\rho' = 1 + y'^2/r^2$;

$y_б$ – расстояние между центрами тяжести приведенного и бетонного сечений элемента;

y_a – расстояние между центром тяжести приведенного сечения элемента и центром тяжести сечения всей арматуры;

$u_{a.x}$ и $u_{a.o}$ – шаг вертикальных стержней (хомутов) и расстояние между наклонными (отогнутыми) стержнями, измеренное вдоль продольной оси элемента;

$p_a, p_{a.x}, p_{a.o}$ – периметр сечения продольной растянутой и поперечной арматуры в виде вертикальных и наклонных стержней (хомутов, отогнутых стержней), расположенной в одной плоскости;

a – пролет среза;

α – угол между осью арматуры и продольной осью элемента в рассматриваемом сечении.

Принятые сокращения

ц.т. – центр тяжести;
н.о. – нейтральная ось.

ЛИТЕРАТУРА. I. Боришанский М.С., Николаев Ю.А. Образование косых трещин в стенках преднапряженных балок и влияние преднапряжения на прочность под действием поперечных сил. "Прочность и жесткость железобетонных конструкций", сб. НИИЖБ. М., Стройиздат, 1968. 2. Волков Ю.А. Исследование ширины раскрытия наклонных трещин в железобетонных изгибаемых элементах в зоне действия наибольших главных растягивающих напряжений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук. Киев, 1978. 3. Голышев А.Б., Полищук В.П., Руденко И.В. Расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом фактора времени. Киев, "Будівельник", 1975. 4. Голышев А.Б., Бачинский В.Я., Морин А.Л., Харченко А.В. К расчету несущей способности железобетонных изгибаемых элементов по нормальным сечениям. Сб."Строительные конструкции", вып.XXXI. Киев,"Будівельник", 1978. 5. Залесов А.С. Новый метод расчета прочности железобетонных элементов по наклонным сечениям. Сб."Расчет и конструирование железобетонных конструкций".Труды НИИЖБ Госстроя СССР, вып.39. М., 1977. 6. Инструкция по проектированию конструкций из плотного силикатного бетона (СН 165-76). М., Стройиздат, 1976. 7. Мадатян С.А. К выбору браковочной величины относительного равномерного удлинения для высокопрочной стержневой арматурной стали. Сб. НИИЖБ Госстроя СССР "Теория железобетона". М., Стройиздат, 1972. 8. Мар-кус Я.И. Экспериментально-теоретическое исследование предварительно напряженных ребристых плит из тяжелого и легкого бетонов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук. Киев, 1976. 9. Международные рекомендации для расчета и осуществления обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций. М., ЕКБ, ФИП, 1970. 10. Методические указания по расчету потерь предварительного напряжения,вызванных ползучестью и усадкой бетона, в железобетонных конструкциях транспортных сооружений. ЦНИИС Минтрансстроя СССР.М., 1972. 11. Морозенский В.Л., Романчук В.Э. О методике расчета деформаций усадки и ползучести керамзитобетона. "Бетон и железобетон", 1975, № 8. 12. Пазюк Ю.В. Прочность и деформативность внецентренно сжатых колонн из мелкозернистого бетона на обогащенном песке. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук. М., 1976. 13. Ширадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. Издательство литературы по строительству. М., 1973. 14. Полищук В.П. Расчет железобетонных элементов по образованию трещин. Сб.трудов КАДИ "Несущая способность и деформативность железобетонных конструкций". Киев, "Вища школа", 1978. 15. Предельное состояние элементов железобетонных конструкций. М., Стройиздат,1976. 16. Рекомендации по определению потерь предварительного напряжения от усадки и ползучести шлакопемзобетона. УралНИИСтромпроект, Челябинск, 1974. 17. Рекомендации по экспериментальному определению деформаций усадки и ползучести бетонов. НИИСК Госстроя СССР, Киев, 1974. 18. Рекомендации по расчету сжатых железобетонных элементов из высокопрочных бетонов. НИИСК Госстроя СССР, Киев, 1973. 19. Рекомендации по расчету ширины раскрытия трещин в элементах железобетонных конструкций. НИИСК Госстроя СССР, Киев, 1974. 20. Сборные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона. Стройиздат, Москва, 1976. 21. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования "Бетонные и железобетонные конструкции" (СНиП II-21-75), Москва, 1976.

22. Тунгушбаев И.М., Залесов А.С., Сигалов Э.Е. Трещиностойкость и прочность железобетонных изгибаемых элементов в наклонных сечениях. Известия вузов "Строительство и архитектура", № 5, Новосибирск, 1976. 23. Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (СН 365-67). Москва, 1967. 24. Proposed Revision of ACI 613-54: Recommended Practice for selecting Proportions for Normal Weight Concrete, ACI Committee 211. Journal of the ACI, №2 Proceedings V. 67, 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
I. Определение напряжений в напрягаемой арматуре	3
2. Расчет железобетонных элементов по прочности	6
Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии изгибающего момента	6
Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, при действии сил предварительного обжатия	I6
Расчет по прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента	20
3. Расчет предварительно напряженных элементов по образованию трещин	24
Расчет по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента	25
Расчет по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента	3I
4. Расчет железобетонных элементов по раскрытию трещин .	32
Определение ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента	34
Определение ширины раскрытия трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих продольную и поперечную арматуру	38
Определение ширины раскрытия трещин, наклонных к продольной оси элемента, пересекающих поперечную арматуру	4I
5. Расчет железобетонных элементов по деформациям	43
Определение кривизн участков элементов без трещин ...	43
Определение кривизн участков элементов с трещинами ..	45
Определение деформаций	50
Приложение I. Методика расчетного определения параметров усадки и ползучести бетонов	50
Приложение 2. Значения коэффициентов γ и β	56
Приложение 3. Расчетные значения начальных модулей упругости бетонов при сжатии E	57
Приложение 4. Примеры расчета	58
Приложение 5. Принятые обозначения	62
Литература	64

Научно-исследовательский институт строительных конструкций
Госстроя СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Редактор А.И.Капитоненко
Корректор С.А.Куприенко

БФ 20124. Подписано к печати 19.12.1978 г. Формат бумаги 60x84 1/16. Печ.л. 4,25. Изд. № 7. Зак. 962. Тираж 295экз. Цена 20 коп.

Научно-исследовательский институт строительных конструкций Госстроя СССР,Киев-37, ул.И.Клименко 5/2

Фотопечатная лаборатория НИИСП Госстроя УССР, Киев-37, ул.И.Клименко, 5/2

gost.e-ecolog.ru