

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНОВ
ПРИ РАСЧЕТЕ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ
СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

НИИСК
КИЕВ 1983

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОССТРОЯ СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНОВ
ПРИ РАСЧЕТЕ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ
СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИИ

Одобрены секцией № 1 Научно-технического совета
НИИСК Госстроя СССР
Протокол № 10 от 18 августа 1982 г.

НИИСК
КИЕВ 1983

Изложены инженерные методы оценки влияния ползучести бетонов, вызванной длительным действием нагрузок (собственный вес сборных элементов и монолитного бетона, внешние нагрузки, силы предварительного обжатия) и деформаций (мгновенное смещение опор, усадка бетонов) на напряженно-деформированное состояние статически определимых и статически неопределимых сборно-монолитных конструкций; приведены формулы для определения напряжений в сечениях, нормальных к продольной оси конструкции, и усилий в многопролетных неразрезных балках, а также формулы для расчета по образованию трещин, нормальных к продольной оси конструкции, ширине раскрытия и закрытию таких трещин; даны рекомендации по определению параметров усадки и ползучести бетонов.

Задачи решаются для области линейной ползучести. В основу решений положен технический вариант феноменологической теории ползучести - модернизированная теория старения.

В качестве иллюстрации приведены числовые примеры.

Рекомендации распространяются на конструкции из тяжелых бетонов и легких бетонов плотной структуры.

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

Разработаны Курским ЦИ (канд. техн. наук В.А. Полищук, инж. И.Г. Чернушил), НИИСК (докт. техн. наук А.Б. Гольшев, канд. техн. наук В.Ф. Усманов) и ЦНИИС Минтрансстроя СССР (канд. техн. наук Е.Н. Шербakov - раздел 8).

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

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. В методических рекомендациях рассматриваются с.о.к. и с.н.к. ^{х)}, состоящие из заранее изготовленных предварительно напряженных сборных элементов, рассчитанных на восприятие нагрузок, возникающих в период строительства, и монолитного (дополнительно уложенного) бетона (рис. 1).

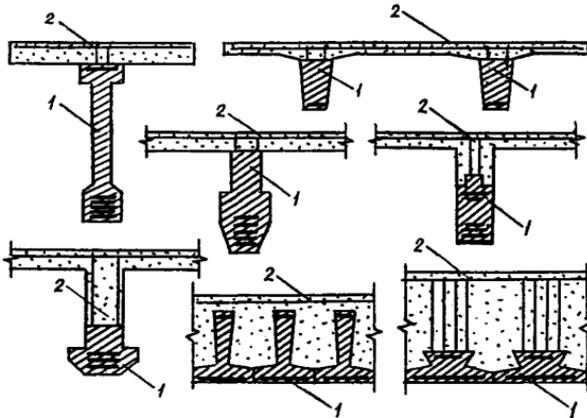


Рис. 1. Поперечные сечения с.о.к. и пролетных участков с.н.к.
1 - предварительно напряженные сборные элементы; 2 - монолитный бетон

На надопорных участках с.н.к. (ограничиваемых в ту и другую сторону от рассматриваемой опоры нулевыми точками на эпюре изгибающих моментов) монолитный бетон выходит на растянутую грань конструкции. В качестве растянутой рабочей арматуры надопорных участков используются напрягаемые или ненапрягаемые стальные стержни (рис. 2).

1.2. Расчет на ползучесть производится для двух стадий работы конструкции:

^{х)} См. с. 5П.

до приобретения монолитным бетоном заданной прочности (учет влияния ползучести, вызванной действием нагрузок и деформаций, возникающих в период строительства);

после приобретения монолитным бетоном заданной прочности (учет влияния ползучести, вызванной действием нагрузок и деформаций, возникающих в период строительства и в процессе эксплуатации сооружения).

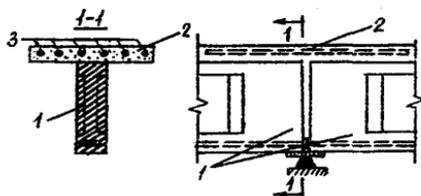


Рис. 2. Надпорные участки с.н.к.

1 - предварительно напряженные сборные элементы; 2 - монолитный бетон; 3 - надпорная или ненапрягаемая арматура

Оценка влияния ползучести на напряженно-деформированное состояние до приобретения монолитным бетоном заданной прочности выполняется в соответствии с рекомендациями работы [3], после приобретения монолитным бетоном заданной прочности - в соответствии с настоящими методическими рекомендациями.

Примечание. Применительно к с.н.к. под "приобретением монолитным бетоном заданной прочности" подразумевается замыкание системы, т.е. создание неразрезности конструкции.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1 На участках, где не образуются нормальные трещины, напряжения от усадки бетонов определяются по формулам:

в арматуре

$$\sigma_{ay} = n_a \left(\frac{N_y}{F} \pm \frac{M_y}{J} y_a^* \right); \quad (2.1)$$

в монолитном бетоне

$$\sigma_{my} = \frac{n_m}{\gamma_m} \left(\frac{N_y}{F} \pm \frac{M_y}{J} y_m^* - \epsilon_{my} E_c \right); \quad (2.2)$$

в бетоне сборных элементов

$$\sigma_{cy} = \frac{1}{\delta_c} \left(\frac{N_y}{F} + \frac{M_y y_c^*}{J} - \epsilon_{cy} \epsilon_c \right). \quad (2.3)$$

В этих формулах:

$$N_y = \epsilon_{my} E_M F_M \frac{\delta_e}{\delta_M} + \epsilon_{cy} E_c F_c; \quad (2.4)$$

$$M_y = \epsilon_{my} E_M F_M i_M \frac{\delta_e}{\delta_M} + \epsilon_{cy} E_c F_c; \quad (2.5)$$

$$F = n_M F_M \frac{\delta_c}{\delta_M} + F_c + n_a \Sigma F_a \delta_c; \quad (2.6)$$

$$J = n_M (J_M + F_M i_M^2) \frac{\delta_c}{\delta_M} + J_c + F_c i_c^2 + n_a \Sigma (F_a i_a^2) \delta_c; \quad (2.7)$$

$$i_M = h - y^* - y'_M; \quad (2.8)$$

$$i_c = y^* - y_c; \quad (2.9)$$

$$i_a = y^* - y_a; \quad (2.10)$$

$$y^* = \frac{S}{F}; \quad (2.11)$$

$$S = n_M F_M (h - y'_M) \frac{\delta_e}{\delta_M} + F_c y_c + n_a \Sigma (F_a y_a) \delta_c; \quad (2.12)$$

y_M^* - расстояние от точки O^* (рис. 3) до рассматриваемых волокон монолитного бетона;

y_c^* - то же, бетона сборных элементов;

F_a и y_a^* - площадь поперечного сечения арматуры на уровне рассматриваемого ряда и расстояние от точки O^* до центра тяжести сечения указанной арматуры;

y_a - расстояние от нижней грани сечения конструкции до ц.т. сечения арматуры рассматриваемого ряда;

δ_M и δ_c - функции линейной ползучести бетонов, отражающие используемый вариант технической теории ползучести (см. п. 2.4 настоящих методических рекомендаций).

Верхние знаки в формулах (2.1)-(2.3) принимаются, если рассматриваемый ряд арматуры или рассматриваемые волокна бетона расположены выше точки O^* (см. рис. 3), нижние - если ниже. Положение точки O^* определяется по формуле (2.11).

Здесь и везде в дальнейшем сжимающим напряжениям присваивается знак плюс, растягивающим - минус.

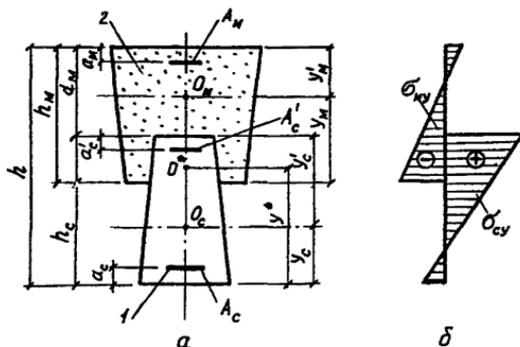


Рис. 3. Напряженное состояние сечений от усадки бетонов

а - поперечное сечение; б - эпюры напряжений в бетонах; 1 - сборный элемент; 2 - монолитный бетон

2.2. На участках, где не образуются нормальные трещины, напряжения от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности, определяются по формулам:

а) от предварительного обжатия сборных элементов (рис. 4)

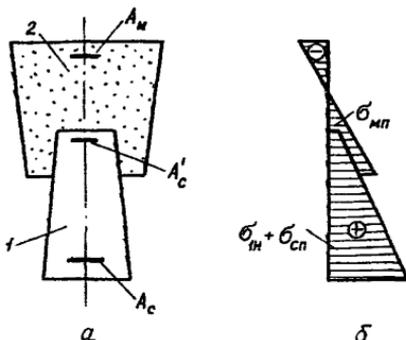


Рис. 4. Напряженное состояние сечений с.о.к. и пролетных участков с.н.к. от предварительного обжатия сборного элемента

а - поперечное сечение; б - эпюры напряжений в бетонах; 1 - сборный элемент; 2 - монолитный бетон

в арматуре

$$\sigma_{an} = n_a \frac{N_{1,0}}{F_{1,n}} \left[\frac{F_I}{F} \mp \frac{S_I}{J} y_a^* - \frac{e_{1,n}}{2_{1,n}} \left(\frac{S_{II}}{F} \pm \frac{J_I}{J} y_a^* \right) \right]; \quad (2.13)$$

в монолитном бетоне

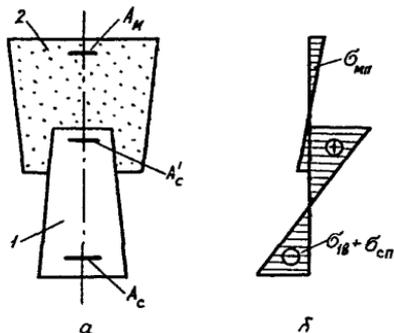
$$\sigma_{mн} = \frac{n_m}{\gamma_m} \cdot \frac{N_{1,0}}{F_{1,n}} \left[\frac{F_I}{F} \mp \frac{S_I}{J} y_m^* - \frac{e_{1,n}}{2_{1,n}} \left(\frac{S_{II}}{F} \pm \frac{J_I}{J} y_m^* \right) \right]; \quad (2.14)$$

в бетоне сборных элементов

$$\sigma_{сн} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\frac{N_{1,0}}{F_{1,n}} \left[\frac{F_I}{F} \mp \frac{S_I}{J} y_c^* - \frac{e_{1,n}}{2_{1,n}} \left(\frac{S_{II}}{F} \pm \frac{J_I}{J} y_c^* \right) \right] - \sigma_{1,n} \varphi_c \right]; \quad (2.15)$$

б) от собственного веса бетонов и от внешних нагрузок (рис. 5)

Рис. 5. Напряженное состояние сечений с.о.к. и пролетных участков с.н.к. от собственного веса и внешних нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности
 а — поперечное сечение; б — эпюра напряжений в бетонах; 1 — сборный элемент; 2 — монолитный бетон



в арматуре

$$\sigma_{an} = n_a \frac{M_1}{J_{1,n}} \left(\frac{S_I}{F} \pm \frac{J_I}{J} y_a^* \right); \quad (2.16)$$

в монолитном бетоне

$$\sigma_{mн} = \frac{n_m}{\gamma_m} \cdot \frac{M_1}{J_{1,n}} \left(\frac{S_{II}}{F} \pm \frac{J_I}{J} y_m^* \right); \quad (2.17)$$

в бетоне сборных элементов

$$\sigma_{сн} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\frac{M_{II}}{J_{II}} \left(\frac{S_{II}}{F} + \frac{J_I y_c^*}{J} \right) - \sigma_{I,II} \varphi_c \right] \quad (2.18)$$

В этих формулах: $F_I = F_c \varphi_c$; $S_I = F_c i_c \varphi_c$;
 $S_{II} = F_c l_1 \varphi_c$; $J_I = (J_c - F_c i_c^2) \varphi_c$;

$\sigma_{I,II}$ - напряжения в бетоне сборных элементов (на рассматриваемом уровне) к моменту приобретения монолитным бетоном заданной прочности от предварительного обжатия;

$\sigma_{I,II}$ - то же, от собственного веса бетонов и от длительно действующей части внешних нагрузок.

Верхние знаки в формулах (2.13)-(2.18) принимаются, если рассматриваемый ряд арматуры или рассматриваемые волокна бетона расположены выше точки O^* (см. рис. 3), нижние - если ниже.

2.3. На участках, где не образуются нормальные трещины, полные напряжения^{х)} от нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности, определяются по формулам:

а) от предварительного обжатия надопорных участков с.н.к. (рис. 6)

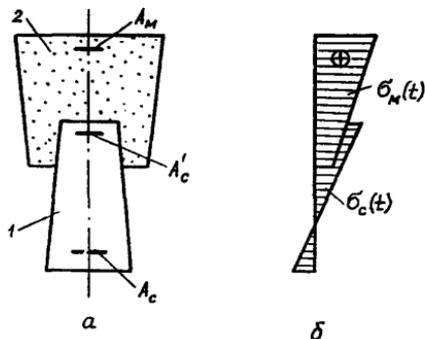


Рис. 6. Напряженное состояние сечений надопорных участков с.н.к. от предварительного обжатия указанных участков

а - поперечное сечение; б - эпюра напряжений в бетонах; 1 - сборный элемент; 2 - монолитный бетон

х) Под полными имеются в виду напряжения, равные алгебраической сумме начальных напряжений, возникших в момент нагружения, и дополнительных, вызванных ползучестью бетона

в арматуре

$$\sigma_a(t) = \sigma_{aH} + n_a \frac{N_0}{F_n} \left[\frac{F_{IV}}{F} \pm \frac{S_{III}}{J} y_a^* + \frac{e_H}{z_n^2} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_a^* \right) \right]; \quad (2.19)$$

в монолитном бетоне

$$\sigma_M(t) = \sigma_{MH} \left(1 - \frac{\varphi_M}{\delta_M} \right) + \frac{n_M}{\delta_M} \cdot \frac{N_0}{F_n} \left[\frac{F_{IV}}{F} \pm \frac{S_{III}}{J} y_M^* + \frac{e_H}{z_n^2} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_M^* \right) \right]; \quad (2.20)$$

в бетоне сборных элементов

$$\sigma_c(t) = \sigma_{cH} \left(1 - \frac{\varphi_c}{\delta_c} \right) + \frac{N_0}{\delta_c F_n} \left[\frac{F_{IV}}{F} \pm \frac{S_{III}}{J} y_c^* + \frac{e_H}{z_n^2} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_c^* \right) \right]; \quad (2.21)$$

б) от внешних нагрузок (рис. 7)

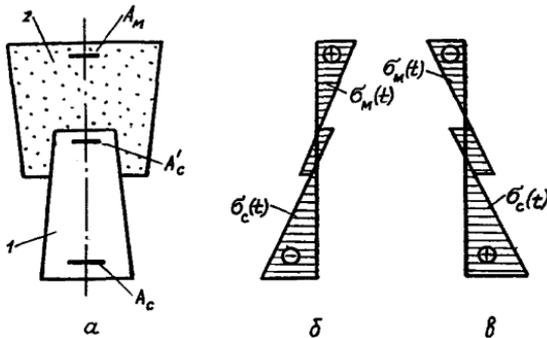


Рис. 7. Напряженное состояние сечений от внешних нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности

а - поперечное сечение; б - эпюры напряжений в бетонах с.о.к. и на пролетных участках с.н.к.; в - то же, на надпорных участках с.н.к.; 1 - сборный элемент; 2 - монолитный бетон

в арматуре

$$\sigma_a(t) = \sigma_{a\beta} + n_a \frac{M_{gA}}{J_n} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_a^* \right); \quad (2.22)$$

в монолитном бетоне

$$\sigma_M(t) = \sigma_{M\beta} \left(1 - \frac{\varphi_M}{\delta_M} \right) + \frac{n_M}{\delta_M} \cdot \frac{M_{gA}}{J_n} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_M^* \right); \quad (2.23)$$

в бетоне сборных элементов

$$\sigma_c(t) = \sigma_{c\beta} \left(1 - \frac{\varphi_c}{\delta_c} \right) + \frac{M_{gA}}{\delta_c J_n} \left(\frac{S_{IV}}{F} \pm \frac{J_{IV}}{J} y_c^* \right). \quad (2.24)$$

В этих формулах:

- $\sigma_{a\beta}$ - контролируемые напряжения арматуры на уровне рассматриваемого ряда (за вычетом первых потерь);
- $\sigma_{M\beta}$ и $\sigma_{c\beta}$ - начальные напряжения обжатия монолитного бетона и бетона сборных элементов на рассматриваемом уровне;
- $\sigma_{a\beta}$ - начальные напряжения в арматуре на уровне рассматриваемого ряда от длительно действующей части внешних нагрузок;
- $\sigma_{M\beta}$ и $\sigma_{c\beta}$ - то же, в монолитном бетоне и бетоне сборных элементов на рассматриваемом уровне;

$$F_{IV} = n_M F_M \varphi_M \frac{\delta_c}{\delta_M} + F_c \varphi_c; \quad (2.25)$$

$$S_{IV} = n_M F_M i_{M0} \varphi_M \frac{\delta_c}{\delta_M} - F_c i_{c0} \varphi_c; \quad (2.26)$$

$$S_{III} = n_M F_M i_M \varphi_M \frac{\delta_c}{\delta_M} - F_c i_c \varphi_c; \quad (2.27)$$

$$J_{IV} = n_M (J_M + F_M i_{M0} i_M) \varphi_M \frac{\delta_c}{\delta_M} + (J_c + F_c i_{c0} i_c) \varphi_c. \quad (2.28)$$

Верхние знаки в формулах (2.19)-(2.24) принимаются, если рассматриваемый ряд арматуры или рассматриваемые волокна бетона расположены выше точки O^* (см. рис. 3), нижние - если ниже.

2.4. Численные значения параметров ϵ_{Mu} , φ_M , ϵ_{cu} , φ_c определяются в соответствии с настоящими методическими рекомендациями (раздел 8).

За начало отсчета времени при определении $\epsilon_{му}$, φ_M , $\epsilon_{су}$, φ_c в п. 2.1 и φ_M , φ_c в п. 2.2 принимается момент приобретения монолитным бетоном заданной прочности, за начало отсчета времени при определении φ_M и φ_c в п. 2.3 – момент нагружения после приобретения монолитным бетоном заданной прочности.

Численные значения коэффициентов γ_M и γ_c в зависимости, соответственно, от φ_M и φ_c и в зависимости от возраста бетона к началу отсчета времени τ_1 , принимаются по табл. I.

Таблица I

φ_M / φ_c	Возраст бетона к началу отсчета времени τ_1 , сут.								
	3	7	14	28	45	60	90	180	365 и более
0	I	I	I	I	I	I	I	I	I
0,5	1,45	1,47	1,48	1,52	1,55	1,58	1,62	1,68	1,73
1,0	1,92	1,96	1,99	2,05	2,13	2,18	2,26	2,38	2,47
1,5	2,41	2,46	2,52	2,60	2,71	2,78	2,91	3,08	3,22
2,0	2,90	2,98	3,05	3,17	3,30	3,40	3,56	3,79	3,97
2,5	3,41	3,51	3,58	3,73	3,90	4,01	4,22	4,50	4,72
3,0	3,92	4,03	4,12	4,29	4,49	4,63	4,88	5,21	5,47

Примечание. Промежуточные значения γ_M и γ_c определяются по линейной интерполяции.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗН

3.1. На участках, где не образуются нормальные трещины, кривизна от усадки бетонов определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_y} = \frac{M_y}{E_c J} \quad (3.1)$$

Значения M_y и J расшифрованы в п. 2.1 настоящих методических рекомендаций.

3.2. На участках, где не образуются нормальные трещины, кривизна от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности, определяется по формулам:

от предварительного обжатия сборных элементов

$$\frac{1}{\rho_n} = - \frac{1}{\rho_{1.0}} \varphi, \quad (3.2)$$

где $\frac{1}{\rho_{1.0}}$ – начальная (упруго-мгновенная) кривизна сборных элементов до приобретения монолитным бетоном заданной прочности [6],[3];

$$\varphi = \frac{1}{J} (J_I + S_I \frac{\tau_{I,n}^2}{e_{I,n}}); \quad (3.3)$$

от собственного веса бетонов и от длительно действующей части внешних нагрузок

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{\rho_{1,8}} \varphi, \quad (3.4)$$

где $\frac{1}{\rho_{1,8}}$ — начальная (упруго-мгновенная) кривизна сборных элементов до приобретения монолитным бетоном заданной прочности [6], [3];

$$\varphi = \frac{J_I}{J}. \quad (3.5)$$

Значения S_I , J_I и J расшифрованы в пп. 2.1 и 2.2.

3.3. На участках, где не образуются нормальные трещины, полная кривизна^{х)} от нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности, определяется по формулам: от предварительного обжатия надпорных участков с.н.к.

$$\frac{1}{\rho(t)} = \frac{1}{\rho_0} (1,18 + \varphi), \quad (3.6)$$

где

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{N_0 e_n}{E_c J_n}; \quad (3.7)$$

$$\varphi = \frac{1}{J} (J_{IV} + S_{III} \frac{\tau_{II}^2}{e_n}); \quad (3.8)$$

от внешних нагрузок

$$\frac{1}{\rho(t)} = \frac{1}{\rho_8} (1,18 + \varphi), \quad (3.9)$$

где

$$\frac{1}{\rho_8} = \frac{M_{0,8}}{E_c J_n}; \quad (3.10)$$

$$\varphi = \frac{J_{IV}}{J}. \quad (3.11)$$

Значения J , J_{IV} и S_{III} расшифрованы в пп. 2.1 и 2.3.

х) Под полной имеется в виду кривизна, равная сумме начальной кривизны, возникающей в момент нагружения, и дополнительной, вызванной ползучестью бетонов.

3.4. При определении кривизн участков с нормальными трещинами следует предусматривать три случая:

с.о.к., пролетные участки с.н.к. - трещины образуются от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности;

с.о.к., пролетные участки с.н.к. - трещины образуются от нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности;

надпорные участки с.н.к. - трещины образуются от нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности.

3.5. Для первого случая на участках, где образуются нормальные трещины, полная кривизна определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho(t)} = \frac{1}{\rho} (1,18 + \varphi), \quad (3.12)$$

где

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{gA}}{E_c J_n} k_T; \quad (3.13)$$

$$\varphi = \frac{J_{1,0,T}(1+m_T)(1+\varphi_c) - \sum J_T m_{1,T}}{J_{1,0,T}(1+m_{0,T}) - \sum J_{0,T} m_{1,T}} \cdot \frac{\sum J_{0,T}}{\sum J_T} - 1; \quad (3.14)$$

$$k_T = (1+m_{0,T}) \frac{J_n}{\sum J_{0,T}} - m_{1,T} \frac{J_n}{J_{1,0,T}}; \quad (3.15)$$

$$m_{0,T} = \frac{1}{M_{gA}} (M_1 - N_{1,0} e_{1,0} + C_0); \quad (3.16)$$

$$m_T = \frac{1}{M_{gA}} (M_1 - N_{1,0} e_1 + C); \quad (3.17)$$

$$m_{1,T} = \frac{1}{M_{gA}} [M_1 - N_{1,0} (d_{1H} - x_1)]; \quad (3.18)$$

$$C_0 = E_c \left\{ n_M [J_M + F_M (x_1 + d_M - y'_M)(x_0 - y'_M)] + n_A F_{AM} (x_1 + d_M - a_M)(x_0 - a_M) \right\} \frac{1}{\rho_1}; \quad (3.19)$$

$$C = E_c \left\{ \frac{n_M}{1+\varphi} [J_M + F_M (x_1 + d_M - y'_M)(x - y'_M)] + n_A F_{AM} (x_1 + d_M - a_M)(x - a_M) \right\} \frac{1}{\rho_1}; \quad (3.20)$$

$e_{1,0}$ и e_1 - расстояния от точки приложения силы $N_{1,0}$ до н.о. соответственно в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени t (см. п. 3.8);

$$\sum J_{o,t} - J_{o,t,c} + n_m J_{o,t,m} + n_a J_{o,t,a}; \quad (3.21)$$

$$\sum J_T = J_{T,c} + n_m J_{T,m} \frac{1+\psi_c}{1+\psi_m} + n_a J_{T,a} (1+\psi_c); \quad (3.22)$$

$J_{o,t,c}$ и $J_{T,c}$ - моменты инерции площади сечения сжатой зоны бетона сборных элементов относительно н.о. соответственно в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени t (см. п. 3.8);

$J_{o,t,m}$ и $J_{T,m}$ - то же, сжатой зоны монолитного бетона;

$$J_{o,t,a} = F_{aM}(x_0 - a_M)^2 + F'_{ac}(x_0 - d_M - a'_c)^2 + \frac{1}{\psi_0} F_{ac}(h_0 - x_0)^2; \quad (3.23)$$

$$J_{T,a} = F_{aM}(x - a_M)^2 + F'_{ac}(x - d_M - a'_c)^2 + \frac{1}{\psi} F_{ac}(h_0 - x)^2; \quad (3.24)$$

$d_{1,0}$ - расстояние от точки приложения силы $N_{1,0}$ до верхней грани сборного элемента;

$J_{1,0,t}$ - момент инерции площади приведенного сечения сборных элементов с трещинами относительно н.о. при высоте сжатой зоны x_1 [3];

x_1 - высота сжатой зоны сечения сборных элементов от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности [6, 3];

$\frac{1}{\rho_1}$ - начальная (упруго-мгновенная) кривизна сборных элементов к моменту приобретения монолитным бетоном заданной прочности [6, 3];

ψ_0 и ψ - коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры на длине участка с трещинами соответственно в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени t (см. п. 3.8).

Высота сжатой зоны x_0 и x отсчитывается из уравнений:

$$\frac{\sum S_{o,t}}{\sum J_{o,t}} = \frac{N_{1,0} + D_0}{M_{g,t} + M_1 - N_{1,0} e_{1,0} + C_0} \quad (3.25)$$

и

$$\frac{\sum S_T}{\sum J_T} = \frac{N_{1.0} + D}{M_{gA} + M_1 - N_{1.0} e_1 + C}, \quad (3.26)$$

где

$$D_0 = E_c [n_m F_M (x_1 + d_M - y'_M) + n_a F_{aM} (x_1 + d_M - a_M)] \frac{1}{\rho_1}; \quad (3.27)$$

$$D = E_c \left[\frac{n_m F_M}{1 + \varphi_M} (x_1 + d_M - y'_M) + n_a F_{aM} (x_1 + d_M - a_M) \right] \frac{1}{\rho_1}; \quad (3.28)$$

$$\sum S_{0.T} = S_{0.T.c} + n_m S_{0.T.m} + n_a S_{0.T.a}; \quad (3.29)$$

$$\sum S_T = S_{T.c} + n_m S_{T.m} \frac{1 + \varphi_c}{1 + \varphi_m} + n_a S_{T.a} (1 + \varphi_c); \quad (3.30)$$

$S_{0.T.c}$ и $S_{T.c}$ — статические моменты площади сечения сжатой зоны бетона сборных элементов относительно н.о. соответственно в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени t (см. п. 3.8);

$S_{0.T.m}$ и $S_{T.m}$ — то же, сжатой зоны монолитного бетона;

$$S_{0.T.a} = F_{aM} (x_0 - a_M) + F'_{ac} (x_0 - d_M - a'_c) - \frac{1}{\psi_0} F_{ac} (h_0 - x_0); \quad (3.31)$$

$$S_{T.a} = F_{aM} (x - a_M) + F'_{ac} (x - d_M - a'_c) - \frac{1}{\psi} F_{ac} (h_0 - x); \quad (3.32)$$

Численные значения ψ_0 и ψ определяются по формулам

$$\psi_0 = 1 - \frac{(F_1 - b_1 x_1) n_1 m_1}{F_1 - b_1 x_1 + 2,2 n_a F_{ac}} \quad (3.33)$$

и

$$\psi = \psi_0 \left[1 + (2,26 - 3,71 \psi_0 + 1,45 \psi_0^2) \frac{\varphi_c}{\varphi_{cm}} \right], \quad (3.34)$$

где

F_1 — площадь поперечного сечения сборных элементов высотой $h_{1.0}$ без учета арматуры и свесов сжатой полки;

$$n_1 = \frac{M_1 - (M_{1.T} - R_{c.p} W_{1.T})}{M_1 - (M_{1.T} - R_{c.p} W_{1.T}) + M_{gA} \frac{h_{1.0}}{h_0}}; \quad (3.35)$$

$$m_1 = 0,65 \sqrt{\frac{R_{c,p} W_{1,T}}{M_1 - (M_{1,T} - R_{c,p} W_{1,T})}}; \quad (3.36)$$

$M_{1,T}$ — момент образования нормальных трещин в сборных элементах до приобретения монолитным бетоном заданной прочности [6,3];

b_1 и $h_{1,0}$ — ширина и рабочая высота поперечного сечения сборных элементов.

При отсутствии нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности ($M_{gA} = 0$), кривизна определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho(t)} = \frac{1}{\rho_1} \varphi, \quad (3.37)$$

где

$$\varphi = \frac{M_1 - N_{1,0} e_1 + c}{M_1 - N_{1,0} (d_{1,n} - x_1)} \cdot \frac{J_{1,0,T}}{\sum J_T} (1 + \varphi_c) - 1. \quad (3.38)$$

Высота сжатой зоны x отыскивается из уравнения (3.26) при $M_{gA} = 0$, коэффициент Ψ_0 — по формуле (3.33) при $n_1 = 1$.

3.6. Для второго случая на участках, где образуются трещины, полная кривизна определяется по формулам (3.12) и (3.13), где

$$\varphi = \frac{J_{1,n} (1 + m_T) (1 + \varphi_c) - \sum J_T m_1}{J_{1,n} (1 + m_{0,T}) - \sum J_{0,T} m_1} \cdot \frac{\sum J_{0,T}}{\sum J_T} - 1; \quad (3.39)$$

$$k_T = (1 + m_{0,T}) \frac{J_n}{J_{0,T}} - m_1 \frac{J_n}{J_{1,n}}; \quad (3.40)$$

$$m_1 = \frac{1}{M_{gA}} (M_1 - N_{1,0} e_{1,n}). \quad (3.41)$$

Численные значения $m_{0,T}$ и m_T определяются по формулам (3.16) и (3.17), высота сжатой зоны x_0 и x — из уравнений (3.25) и (3.26), где

$$c_0 = E_c \left\{ n_M [J_M + F_M (h - y'_M) (x_0 - y'_M)] + n_A F_{AM} (h - a_M) (x_0 - a_M) \right\} \frac{1}{\rho_1} + \sigma_1 [n_M F_M (x_0 - y'_M) + n_A F_{AM} (x_0 - a_M)]; \quad (3.42)$$

$$C = E_c \left\{ \frac{n_m}{1+\varphi_m} [J_m + F_m (h - y'_m)(x - y'_m)] + n_a F_{am} (h - a_m)(x - a_m) \right\} \frac{1}{\rho_1} + \sigma_1 \left[\frac{n_m F_m (x - y'_m) + n_a F_{am} (x - a_m)}{1 + \varphi_m} \right]; \quad (3.43)$$

$$D_0 = E_c \left[n_m F_m (h - y'_m) + n_a F_{am} (h - a_m) \right] \frac{1}{\rho_1} + \sigma_1 (n_m F_m + n_a F_{am}); \quad (3.44)$$

$$D = E_c \left[\frac{n_m F_m}{1 + \varphi_m} (h - y'_m) + n_a F_{am} (h - a_m) \right] \frac{1}{\rho_1} + \sigma_1 \left(\frac{n_m F_m}{1 + \varphi_m} + n_a F_{am} \right); \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_{1.8}} - \frac{1}{\rho_{1.0}}; \quad (3.46)$$

σ_1 - напряжения в нижних волокнах сборных элементов от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности; определяется по формулам теории соприкосновения упругих материалов.

Значения $1/\rho_{1.8}$ и $1/\rho_{1.0}$ расшифрованы в пп. 3.3 и 3.2.

Численное значение ψ_0 определяется по формуле

$$\psi_0 = 1 - \frac{(F - b x_0) m}{F - b x_0 + 2,2 n_a F_a}; \quad (3.47)$$

где F - площадь поперечного сечения конструкции высотой h_0 , приведенного к бетону сборных элементов, без учета арматуры и свесов сжатой полки;

$$F_a = F_{ac};$$

$$m = 0,65 \sqrt{\frac{R_{c,p} W_T}{M_I + M_{qL} - (M_T - R_{c,p} W_T)}}; \quad (3.48)$$

M_T - момент образования нормальных трещин, определяемый по формуле (4.1).

Высота сжатой зоны x_0 отыскивается из уравнения (3.25) при $\psi_0 = 1$; значение ψ см. в п. 3.5.

3.7. Для третьего случая на участках, где образуются трещины, полная кривизна определяется по формуле (3.12), где

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{qL} - N_0 E_0}{E_c J_n} k_T; \quad (3.49)$$

$$\varphi = \frac{(M_{g\lambda} - N_0 e) \sum J_{oT}}{(M_{g\lambda} - N_0 e_0) \sum J_T} (1 + \varphi_0) - 1; \quad (3.50)$$

$$K_T = \frac{J_n}{J_{oT}}; \quad (3.51)$$

высота сжатой зоны x_0 и x - из уравнений

$$\frac{\sum S_{oT}}{\sum J_{oT}} + \frac{N_0}{M_{g\lambda} - N_0 e_0} = 0 \quad (3.52)$$

и

$$\frac{\sum S_T}{\sum J_T} + \frac{N_0}{M_{g\lambda} - N_0 e} = 0. \quad (3.53)$$

Здесь:

e_0 и e - расстояния от точки приложения силы N_0 до н.о. соответственно в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени t (см. п. 3.8).

Численное значение Ψ_0 определяется по формуле (3.47), где $F_a = F_{ам}$;

$$m = 0,65 \sqrt{\frac{R_{м.р} W_T}{M_{g\lambda} - (M_T - R_{м.р} W_T)}}; \quad (3.54)$$

M_T - момент образования нормальных трещин, определяемый по формуле (4.4);

Ψ - по формуле (3.34) с учетом замены φ_c на φ_m и $\varphi_{ст}$ на $\varphi_{мт}$.

3.8. Численные значения параметров $\epsilon_{му}$, φ_m , $\epsilon_{су}$ и φ_c определяются в соответствии с разделом 8 настоящих методических рекомендаций.

За начало отсчета времени при определении $\epsilon_{му}$, φ_m , $\epsilon_{су}$, φ_c в п. 3.1 и φ_m , φ_c в п. 3.2 принимается момент приобретения монолитным бетоном заданной прочности, за начало отсчета времени при определении φ_m и φ_c в пп. 3.3 и 3.5-3.7 - момент нагружения после приобретения монолитным бетоном заданной прочности.

Численные значения коэффициентов δ_m и δ_c в зависимости, соответственно, от φ_m и φ_c и в зависимости от возраста бетона к началу отсчета времени τ_1 принимаются по табл. 2.1.

4. РАСЧЕТ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

4.1. При определении момента образования нормальных трещин следует предусматривать два случая:

с.о.к. и пролетные участки с.н.к. - трещины образуются в предварительно напряженных сборных элементах;

надопорные участки с.н.к. - трещины образуются в монолитном бетоне.

4.2. Для первого случая расчет по образованию трещин производится из условия

$$M_1 + M \leq M_T = N_{1,0} (e_{1,н} + k_1 \frac{W_{1,0}}{F_{1,н}}) k \frac{W_0}{W_{1,0}} + \\ + M_1 (1 - k \frac{W_0}{W_{1,0}}) + \sigma_{c(y+n)} W_0 + R_{c,p} W_1, \quad (4.1)$$

где

$\sigma_{c(y+n)}$ - напряжения в наиболее растянутых от внешних нагрузок волокнах сборных элементов, вызванные усадкой и ползучестью бетонов; определяются как алгебраическая сумма напряжений, вычисленных по формулам (2.3), (2.15) и (2.18);

k_1 и k - коэффициенты, учитывающие возможность развития неупругих деформаций в сжатых бетонах.

Если сборные элементы попадают в сжатую зону конструкции и выполняется условие

$$\frac{M_1 y'_1}{J_{1,н}} + \frac{M y'_c}{J_n} \geq 0,7 R_{c,нр}, \quad (4.2)$$

где y'_1 и y'_c - расстояния, соответственно, от ц.т. приведенных сечений сборных элементов и конструкции до сжатого края сечения элементов, величина k_1 принимается равной 0,8; если сборные элементы не попадают в сжатую зону конструкции или попадают, но условие (4.2) не выполняется, величина k_1 принимается равной единице.

Если выполняется условие

$$\frac{n_M M y'_M}{J_n} \geq 0,7 R_{M,нр}, \quad (4.3)$$

где Y'_M - расстояние от ц.т. приведенного сечения конструкции до сжатого края указанного сечения, величина K принимается равной 0,8; если условие (4.3) не выполняется, величина K принимается равной единице.

4.3. Для второго случая расчет по образованию трещин производится из условия

$$M \leq M_T = N_0(e_n + k \frac{W_0}{F_n}) + \sigma_{M(y+n)} W_0 + R_{M,P} W_T, \quad (4.4)$$

где

$\sigma_{M(y+n)}$ - напряжения в наиболее растянутых от внешних нагрузок волокнах монолитного бетона, вызванные усадкой и ползучестью бетонов; определяются как алгебраическая сумма напряжений, вычисленных по формулам (2.2), (2.14) и (2.17).

Если выполняется условие

$$\frac{N_{1,0}}{F_{1,n}} + \frac{N_{1,0} e_{1,n} Y_1}{J_{1,n}} + \frac{M Y_c}{J_n} \geq 0,7 R_{c,нр}, \quad (4.5)$$

где Y_1 и Y_c - расстояния, соответственно, от ц.т. приведенных сечений сборных элементов и конструкции до сжатого края надопорного сечения элементов, величина k принимается равной 0,8; если условие (4.5) не выполняется, величина k принимается равной единице.

5. РАСЧЕТ ПО РАСКРЫТИЮ ТРЕЩИН

5.1. Ширина раскрытия нормальных трещин определяется на уровне ц.т. сечения арматуры наиболее растянутого ряда.

5.2. При определении ширины раскрытия нормальных трещин следует предусматривать три случая - см. п. 3.4.

5.3. Для первого случая полная максимальная ширина раскрытия трещин^{х)} определяется по формуле

$$a_T = a_{1,T} + 1,6 C_{g1} \eta k k_a \frac{\sigma_a}{E_a} l_T, \quad (5.1)$$

х) Под полной имеется в виду ширина раскрытия трещин, равная сумме начальной величины раскрытия, соответствующей моменту нагружения, и дополнительной, вызванной ползучестью бетонов.

где

$a_{1,T}$ - максимальная ширина раскрытия трещин в сборных элементах от нагрузок, приложенных до приобретения монолитным бетоном заданной прочности; определяется по формуле (I38) [6] или по формуле (4) [4];

C_{gA} - коэффициент, учитывающий влияние ползучести бетонов на ширину раскрытия трещин после приобретения монолитным бетоном заданной прочности:

$$C_{gA} = \frac{\sum J_{a,T}}{\sum J_T} \cdot \frac{h_0 - x}{h_0 - x_0} (1 + \varphi_c); \quad (5.2)$$

η - коэффициент, принимаемый равным: при стержневой арматуре периодического профиля - I, гладкой - I,3; при проволочной арматуре периодического профиля - I,2, гладкой - I,4;

$$k = 1 - \frac{\Delta y}{h_0 - x_0}; \quad (5.3)$$

$$k_a = \frac{F - \beta x_0}{F - \beta x_0 + 2,2 n_a F_{ac}}; \quad (5.4)$$

σ_a - приращение напряжений в арматуре A_c на уровне ц.т. сечения указанной арматуры от нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности:

$$\sigma_a = \frac{M + C_0 + D_0(0,2h_0 - y'_M) + [M_1 + N_{1,0}(h_{1,0} - d_{1,N})](1 - h_0/h_{1,0})}{F_{ac} Z_0} \quad (5.5)$$

l_T - расстояние между трещинами:

$$l_T = \frac{2 E_a F_{ac}}{\psi_0 \rho_a k_{cc} E_c}; \quad (5.6)$$

Δy - расстояние от ц.т. сечения арматуры A_c до ц.т. сечения арматуры наиболее растянутого ряда;

ρ_a - периметр поперечного сечения арматуры A_c ;

k_{cc} - коэффициент, определяемый по табл. 2 в зависимости от вида бетона сборных элементов, его марки и степени сжатия;

для тавровых и двутавровых сечений

$$z_o = h_o - x_o + 2 \cdot \frac{x_o^3 b'_n - (b'_n - b)(x_o - h'_n)^3}{x_o^2 b'_n - (b'_n - b)(x_o - h'_n)^2} \quad (5.7)$$

Значения x_o , x , ΣJ_{oT} , ΣJ_T и Ψ_o расшифрованы в п.3.5 настоящих методических рекомендаций.

Таблица 2

Вид бетона	Уровень предвартельного обжатия	σ_8/R_o	Проектная марка бетона					
			M100	M150	M200	M300	M400	M600
Тяжелый	0	-	0,56	0,51	0,45	0,42	0,39	0,37
	0,2	-	-	0,5	0,44	0,41	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	0,18	0,16	0,13	0,11
Легкий плотной структуры	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	0,18	0,16	-	-

В табл. 2:

σ_8 - сжимающие напряжения в бетоне сборных элементов на уровне ц.т. сечения арматуры наиболее растянутого ряда в стадии предварительного обжатия; определяются по формулам теории сопротивления упругих материалов;

R_o - передаточная прочность бетона сборных элементов.

5.4. Для второго случая полная максимальная ширина раскрытия трещин определяется по формуле

$$\alpha_T = 3,4 C_{91} \eta k k_a \frac{\sigma_a F_{ac}}{R_a k_{cц} E_c} \quad (5.8)$$

где

$$\sigma_a = \frac{M_1 + M - (M_T - R_{c,p} W_T)}{F_{ac} z_o} \quad (5.9)$$

Значения $C_{qл}$, η , k , k_a , ρ_a , $k_{сц}$ и z_0 расшифрованы в п. 5.3; x_0 , x , $\sum J_{от}$ и $\sum J_T$ - в п. 3.5 настоящих методических рекомендаций.

Момент образования трещин M_T определяется по формуле (4.1).

5.5. Для третьего случая полная максимальная ширина раскрытия трещин определяется по формуле

$$\alpha_T = 3,4 C_{qл} \eta k k_a \frac{\sigma_a F_{ам}}{\rho_a k_{сц} E_m}, \quad (5.10)$$

где

$$\sigma_a = \frac{M - (M_T - R_{м.р} W_T)}{F_{ам} z_0}; \quad (5.11)$$

ρ_a - периметр поперечного сечения арматуры A_m ;

$k_{сц}$ - коэффициент, определяемый по табл. 2 в зависимости от вида монолитного бетона, его марки и степени обжатия.

Коэффициент k определяется по формуле (5.3), где Δy - расстояние от ц.т. сечения арматуры A_m до ц.т. сечения арматуры наиболее растянутого ряда, коэффициент k_a - по формуле

$$k_a = \frac{F - 6x_0}{F - 6x_0 + 2,2 \rho_a F_{ам}}. \quad (5.12)$$

Значения $C_{qл}$, η и z_0 расшифрованы в п. 5.3; x_0 ; x , $\sum J_{от}$ и $\sum J_T$ - в п. 3.7 настоящих методических рекомендаций.

Момент образования трещин M_T определяется по формуле (4.2).

В табл. 2:

σ_s - сжимающие напряжения в монолитном бетоне на уровне ц.т. сечения арматуры наиболее растянутого ряда в стадии предварительного обжатия; определяются по формулам теории сопротивления упругих материалов;

R_0 - передаточная прочность монолитного бетона.

5.6. численные значения параметра ψ_c определяются в соответствии с настоящими методическими рекомендациями (раздел 8).

За начало отсчета времени при определении ψ_c принимается момент нагружения после приобретения монолитным бетоном заданной прочности.

6. РАСЧЕТ ПО ЗАКРЫТИЮ ТРЕЩИН

6.1. При расчете по закрытию нормальных трещин следует предусматривать два случая (см. п. 4.1).

6.2. Для первого случая расчет по закрытию трещин производится из условий:

$$\sigma_{1.0} + \frac{M_1 + M - (M_T - R_{c.p} W_T)}{F_{ac} z_0} \leq 0,8 R_{aII}, \quad (6.1)$$

где

$\sigma_{1.0}$ - предварительное напряжение в арматуре A_c с учетом первых потерь,

и

$$\frac{N_{1.0}(e_{1.n} + W_{1.0}/F_{1.n}) - M_1}{W_{1.0}} - \frac{M_1 + M_{aII}}{W_0} + \sigma_{c(y+n)} \geq 10 \text{ кгс/см}^2. \quad (6.2)$$

Первое условие обеспечивает от возникновения необратимых деформаций в предварительно напряженной пролетной арматуре от действий постоянных, длительных и кратковременных нагрузок, второе - надежное зажатие трещин при действии постоянных и длительных нагрузок.

Значение z_0 расшифровано в п. 5.3, $\sigma_{c(y+n)}$ - в п. 4.2.

6.3. Для второго случая расчет по закрытию трещин производится из условий:

$$\sigma_0 + \frac{M - (M_T - R_{m.p} W_T)}{F_{am} z_0} \leq 0,8 R_{aII}, \quad (6.3)$$

где

σ_0 - предварительное напряжение в арматуре A_m с учетом первых потерь,

и

$$\frac{N_0(e_n + W_0/F_n) - M_{aII}}{W_0} + \sigma_{m(y+n)} \geq 10 \text{ кгс/см}^2. \quad (6.4)$$

Первое условие обеспечивает от возникновения необратимых деформаций в предварительно напряженной надопорной арматуре от действия постоянных, длительных и кратковременных нагрузок, второе - надежное зажатие трещин от действия постоянных и длительных нагрузок.

Значение z_0 расшифровано в п. 5.3, $\sigma_{m(y+n)}$ - в п. 4.3.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В МНОГОПРОЛЕТНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ БАЛКАХ

7.1. Определение усилий от усадки бетонов и нагрузок, приложенных до замыкания системы, в конструкциях, на пролетных и надпорных участках которых от действия указанных нагрузок трещины не образуются, производится путем решения системы трехчленных уравнений вида (рис. 8,а)

$$M_{n-1}(t) \frac{l_n \delta_n}{(E_c J_n)_n} + 2M_n(t) \left[\frac{l_n \delta_n}{(E_c J_n)_n} + \frac{l_{n+1} \delta_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} \right] + M_{n+1}(t) \frac{l_{n+1} \delta_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} + 6 \Delta_{np}(t) = 0, \quad (7.1)$$

где

δ - коэффициент, определяемый по табл. I в зависимости от величины φ .

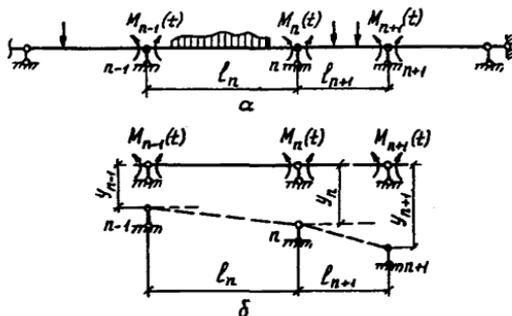


Рис. 8. Основные системы при расчете неразрезных балок

а - на действие внешних нагрузок;
б - на смещение опор

Численные значения φ определяются по формуле (3.II).

При расчете на усадку бетонов

$$\Delta_{np}(t) = \frac{1}{\rho_{y,n}} \cdot \frac{l_n}{2} + \frac{1}{\rho_{y,n+1}} \cdot \frac{l_{n+1}}{2}. \quad (7.2)$$

где $\frac{1}{\rho_n}$ - кривизна, определяемая по формуле (3.1).

При расчете на действие сил предварительного обжатия

$$\Delta_{np}(t) = \frac{l_n}{\rho_{n,n}} \cdot \frac{l_n}{2} + \frac{l_{n+1}}{\rho_{n,n+1}} \cdot \frac{l_{n+1}}{2}, \quad (7.3)$$

где $\frac{1}{\rho_n}$ - кривизна, определяемая по формуле (3.2).

При расчете на действие собственного веса бетонов и длительно действующей части внешних нагрузок

$$\Delta_{np}(t) = \frac{\omega_{1,n} z_{1,n} \varphi_n}{l_n (E_c J_n)_n} + \frac{\omega_{1,n+1} z_{1,n+1} \varphi_{n+1}}{l_{n+1} (E_c J_n)_{n+1}}, \quad (7.4)$$

где

ω_1 - площадь эпюры изгибающих моментов от заданных нагрузок в соответствующем пролете основной системы (рис. 8, а);

z_1 - расстояние от ц.т. указанной эпюры до оси соответствующей опоры.

Численные значения φ определяются по формуле (3.5).

7.2. Определение полных усилий^{х)} от мгновенного смещения опор и нагрузок, приложенных после замыкания системы, в конструкциях, на пролетных и надопорных участках которых от действия указанных нагрузок трещины не образуются, производится путем решения системы трехчленных уравнений вида

$$\begin{aligned} M_{n-1}(t) \frac{l_n \delta_n}{(E_c J_n)_n} + 2M_n(t) \left[\frac{l_n \delta_n}{(E_c J_n)_n} + \frac{l_{n+1} \delta_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} \right] + M_{n+1}(t) \frac{l_{n+1} \delta_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} + \\ + M_{n-1} \frac{l_n}{(E_c J_n)_n} (1 + \varphi_n - \delta_n) + 2M_n \left[\frac{l_n}{(E_c J_n)_n} (1 + \varphi_n - \delta_n) + \right. \\ \left. + \frac{l_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} (1 + \varphi_{n+1} - \delta_{n+1}) \right] + M_{n+1} \frac{l_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} (1 + \varphi_{n+1} - \delta_{n+1}) + 6\Delta_{np}(t) = 0, \end{aligned} \quad (7.5)$$

где

M_{n-1}, M_n и M_{n+1} - начальные значения усилий, полученные в результате расчета балки как упругой системы.

^{х)} Под полными имеются в виду усилия, равные алгебраической сумме начальных усилий, возникающих в момент нагружения, и дополнительных, вызванных ползучестью бетонов.

При расчете на мгновенное смещение опор (рис. 8,б)

$$\Delta_{np}(t) = \Delta_{np} = \frac{y_{n+1} - y_n}{l_{n+1}} - \frac{y_n - y_{n-1}}{l_n} \quad (7.6)$$

При расчете на действие внешних нагрузок

$$\Delta_{np}(t) = \frac{\omega_n z_n (1 + \varphi_n)}{l_n (E_c J_n)_n} + \frac{\omega_{n+1} z_{n+1} (1 + \varphi_{n+1})}{l_{n+1} (E_c J_n)_{n+1}}, \quad (7.7)$$

где

ω - площадь эпюры изгибающих моментов от заданных нагрузок в соответствующем пролете основной системы (рис. 8,а);

z - расстояние от ц.т. указанной эпюры до оси соответствующей опоры.

Численные значения φ определяются по формуле (3.II), δ - по табл. I.

7.3. Определение полных усилий от мгновенного смещения опор и нагрузок, приложенных до и после замыкания системы, в конструкциях, на пролетных и надопорных участках которых образуются трещины, производится методом последовательных приближений. В качестве первого приближения принимаются усилия, полученные в результате расчета балки как упругой системы. Затем каждый пролет балки разбивается на m одинаковых по длине участков ($m \geq 10$). На каждом участке жесткость принимается постоянной, соответствующей изгибающему моменту в первом приближении в середине данного участка. Определение усилий во втором приближении производится путем решения системы трехчленных уравнений вида

$$\begin{aligned} M_{n-1}(t) \frac{l_n S_{n,n-1}}{(E_c J_n)_n} + 2M_n(t) \left[\frac{l_n S_{n,n}}{(E_c J_n)_n} + \frac{l_{n+1} S_{n,n}^{(n+1)}}{(E_c J_n)_{n+1}} \right] + \\ + M_{n+1}(t) \frac{l_{n+1} S_{n,n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} + 6 \Delta_{np}(t) = 0. \end{aligned} \quad (7.8)$$

При расчете на мгновенное смещение опор:

$$\begin{aligned} S_{n,n-1} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n-1,j} = S_{n,n+1} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n+1,j} = \\ = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{\tau j} \delta_j [3(m-j)(2j-1) + 3j-2]; \end{aligned} \quad (7.9)$$

$$S_{n,n}^{(n)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n,j}^{(n)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{Tj} \delta_j [3j(j-1)+1]; \quad (7.10)$$

$$S_{n,n}^{(n+1)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n,j}^{(n+1)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{Tj} \delta_j [3(m-j)(m-j+1)+1]. \quad (7.11)$$

Численные значения $\Delta_{np}(t)$ определяются по формуле (7.6).

При расчете на действие нагрузок, приложенных до и после замыкания системы или только после замыкания системы, численные значения $S_{n,n-1}$; $S_{n,n}^{(n)}$; $S_{n,n}^{(n+1)}$ и $S_{n,n+1}$ определяются по формулам (7.9)-(7.11), $\Delta_{np}(t)$ - по формуле

$$\Delta_{np}(t) = \frac{l_n}{(E_c J_n)_n} \sum_{j=1}^m \Delta_{npj}^{(n)}(t) + \frac{l_{n+1}}{(E_c J_n)_{n+1}} \sum_{j=1}^m \Delta_{npj}^{(n+1)}(t), \quad (7.12)$$

где

$$\Delta_{npj}(t) = \frac{k_{Tj}(1+\varphi_j)}{m l_j} \int_0^l \bar{M} M_p dx; \quad (7.13)$$

l_j - длина j -го участка;

\bar{M} - изгибающий момент от единичного значения лишнего неизвестного;

M_p - то же, от заданных нагрузок в основной системе.

Для участков без трещин коэффициенты k_{Tj} принимаются равными единице.

Для участков с трещинами (см. п. 3.4 настоящих методических рекомендаций) для первого случая коэффициенты k_{Tj} определяются по формуле (3.15), для второго случая - по формуле (3.40), для третьего - по формуле (3.51).

Для участков без трещин численные значения δ_j определяются по табл. I в зависимости от величины φ_j , определяемой по формуле (3.11).

Для участков с трещинами (см. п. 3.4) численные значения δ_j определяются по формуле

$$\delta_j = 1 + \varphi_j, \quad (7.14)$$

где численные значения φ_j для первого случая определяются по формуле (3.14), для второго случая - по формуле (3.39), для

третьего - по формуле (3.50).

При расчете на действие нагрузок, приложенных только до замыкания системы

$$S_{n,n-1} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n-1,j} = S_{n,n+1} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n+1,j} = \\ = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{1\tau j} \delta_j [3(m-j)(2j-1) + 3j - 2]; \quad (7.15)$$

$$S_{n,n}^{(n)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n,j}^{(n)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{1\tau j} \delta_j [3j(j-1) + 1]; \quad (7.16)$$

$$S_{n,n}^{(n+1)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m S_{n,n,j}^{(n+1)} = \frac{1}{m^3} \sum_{j=1}^m k_{1\tau j} \delta_j [3(m-j)(m-j+1) + 1]. \quad (7.17)$$

Численные значения $\Delta_{np}(t)$ определяются по формуле (7.12), где

$$\Delta_{npj}(t) = \frac{k_{1\tau j} \varphi_j}{m l_j} \int_{l_j}^l M_{1p} dx; \quad (7.18)$$

M_{1p} - изгибающий момент от заданных нагрузок в основной системе.

Для участков без трещин

$$k_{1\tau j} = \frac{J_n}{J_{1,n}}. \quad (7.19)$$

Численные значения δ_j определяются по табл. I в зависимости от величин φ_j , определяемых по формуле (3.5).

Для участков с трещинами

$$k_{1\tau j} = \frac{J_n}{(J_{1,0,\tau})_j}. \quad (7.20)$$

Численные значения δ_j определяются по формуле (7.14), φ_j - по формуле (3.38).

По вычисленным во втором приближении усилиям определяются новые значения $k_{\tau j}$, φ_j и δ_j и производится расчет усилий в третьем приближении. Процесс итераций повторяется до тех пор, пока в дальнейшем уточнении расчета не будет необходимости.

При медленно сходящемся или расходящемся процессе итераций необходимо увеличить количество участков и повторить расчет.

7.4. После определения опорных моментов по формулам строительной механики вычисляются пролетные моменты и опорные реакции. При этом каждый пролет рассматривается как однопролетная свободно лежащая балка, нагруженная опорными моментами и заданной нагрузкой.

Полученные таким образом усилия используются в качестве внешних при определении напряжений в нормальных сечениях, при расчете по образованию, раскрытию и закрытию трещин, а также при вычислении кривизн конструкций, а по ним - прогибов и углов поворота.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСАДКИ БЕТОНА

8.1. Предельные значения числовых параметров ползучести Ψ_m и усадки ϵ_{ym} , соответствующих фактическим условиям эксплуатации конструкции, определяются по формулам:

$$\Psi_m = C_n \epsilon_s \xi_1 \xi_2 \xi_3; \quad (8.1)$$

$$\epsilon_{ym} = \epsilon_{yn} \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3, \quad (8.2)$$

где

C_n и ϵ_{yn} - нормативные значения меры ползучести и деформаций усадки; определяются в соответствии с пп. 8.3 и 8.4;

ξ_i и ζ_i - коэффициенты, учитывающие влияние действительных условий работы бетона в железобетонных элементах; определяются согласно п. 8.5.

8.2. Определение промежуточных значений параметров Ψ_t и ϵ_{yt} , соответствующих заданному времени t , производится по данным табл. 3.

Таблица 3

Вид деформации	Величины Ψ_t/Ψ_m и $\epsilon_{yt}/\epsilon_{ym}$ к моменту времени t , сут.								
	3	7	28	60	90	180	360	720	2000
Ползучесть	0,21	0,31	0,52	0,63	0,69	0,77	0,84	0,89	0,94
	0,15	0,23	0,41	0,53	0,59	0,69	0,77	0,84	0,91
Усадка	0,09	0,13	0,43	0,67	0,75	0,85	0,93	0,96	0,98
	-	0,06	0,19	0,33	0,43	0,60	0,75	0,86	0,94

Примечания: 1. В числителе приведены значения для стержневых элементов с величиной открытой удельной поверхности 0,4 см⁻¹ и более, в знаменателе — для элементов, у которых эта величина составляет 0,1 см⁻¹ и менее (для промежуточных значений открытой удельной поверхности следует пользоваться линейной интерполяцией). 2. Открытую удельную поверхность стержневых элементов вычисляют как отношение открытого для влагопотерь периметра поперечного сечения к его площади.

8.3. Нормативные значения меры ползучести C_n (см²/кгс) и деформаций усадки ϵ_{yn} определяются по формулам:

$$C_n = k_n \frac{B}{50 + R_{т1}}; \quad (8.3)$$

$$\epsilon_{yn} = k_y B^{3/2}, \quad (8.4)$$

где

$R_{т1}$ — кубиковая прочность бетона в момент нагружения, не превышающая проектной марки бетона по прочности на сжатие (кгс/см²);

B — удельное (по объему) суммарное количество воды затворения и вовлеченного воздуха в литрах на 1000 л уплотненной бетонной смеси;

k_n и k_y — безразмерные коэффициенты, зависящие от вида заполнителя бетона.

Значения коэффициентов в зависимости от вида заполнителя для бетона:

	$k_n \cdot 10^6$	$k_y \cdot 10^6$
Щебень или гравий из плотных изверженных пород (гранит, базальт, кварц, др)	20	0,14
Щебень из плотных осадочных пород (известняк)	17	0,14
Кварцевый песок (без крупного заполнителя)	18	0,14
Керамзитовый гравий (с кварцевым песком)	21	0,19

Примечание. При расчете по формулам (8.3) и (8.4) количество вовлеченного воздуха рекомендуется учитывать только при применении воздухововлекающих (газообразующих) добавок. Для бетонов, изготовленных с пластифицирующими добавками или без них, влияние вовлеченного воздуха в бетонной смеси можно не учитывать.

8.4. При отсутствии данных о дозировке составляющих бетонной смеси нормативные значения C_n (см²/кгс) и ϵ_{yn} рекомендуется ориентировочно назначать по табл. 4 для тяжелых бетонов (в числителе) и для легких бетонов плотной структуры (в знаменателе).

Таблица 4

Подвижность (удобоукладываемость) бетонной смеси осадка жесткоусадочность, см	Значения $C_n \cdot 10^6$, см ² /кгс, для бетона с кубиковой прочностью $R_{ку}$, кгс/см ²	Значения $\epsilon_{ун} \cdot 10^6$ для бетона проектной марки									
		150	200	300	400	500	600	700	800	150-200	300 и более
		с	с	с	с	с	с	с	с	с	с
-	80-60	-	-	-	<u>6,7</u>	<u>5,5</u>	<u>4,6</u>	<u>4,0</u>	<u>3,5</u>	-	<u>230</u>
-	35-30	-	-	<u>9,5</u>	<u>7,3</u>	<u>6,2</u>	<u>5,2</u>	<u>4,5</u>	-	-	<u>270</u>
		16,7	12,5	8,5	6,1	5,2	-	-	-	310	370
I-2	-	<u>17,8</u>	<u>14,0</u>	<u>9,9</u>	<u>7,7</u>	<u>6,2</u>	<u>5,3</u>	<u>4,5</u>	-	<u>290</u>	<u>330</u>
		19,5	14,8	9,8	7	6	-	-	-	390	450
5-6	-	<u>19,5</u>	<u>15,4</u>	<u>10,9</u>	<u>8,4</u>	<u>6,8</u>	<u>5,8</u>	-	-	<u>350</u>	<u>400</u>
		21,3	16,4	10,7	8,3	6,9	-	-	-	470	510
9-10	-	<u>20,7</u>	<u>16,4</u>	<u>11,5</u>	<u>8,9</u>	<u>7,3</u>	-	-	-	<u>380</u>	<u>430</u>
		22,5	17,4	11,6	9	7,6	-	-	-	530	580

Примечания: 1. Для бетонов, подвергнутых тепловлажностной обработке, нормативные значения C_n и $\epsilon_{ун}$ по табл. 4 или формулам (8.3) и (8.4) следует уменьшить на 10%. 2. Нормативные значения C_n по формуле (8.3) или по табл. 4 следует, кроме того: а) для бетонов, изготовленных на пуццолановом портландцементе - увеличить на 35%; б) для бетонов, изготовленных на шлаковом портландцементе - увеличить на 25%, если элемент нагружен в условиях атмосферной влажности, или уменьшить на 35% при его нагружении во влагонасыщенной среде.

8.5. Числовые значения поправочных коэффициентов ϵ_i и ζ_i в формулах (8.1) и (8.2) принимаются для тяжелого и легкого бетона по табл. 5 в зависимости от возраста бетона в момент нагружения $\tau_i > 28$ сут. (для ползучести) или начала высыхания τ_0 (для усадки), а также от размеров поперечного сечения элемента и влажности окружающей среды.

8.6. Если силовые воздействия от внешней нагрузки или вынужденных деформаций прикладываются к элементу конструкции последовательно в разном возрасте, то числовые параметры φ_m и φ_t определяются с учетом возраста бетона к моменту приложения каждого из этих воздействий (согласно табл. 5).

8.7. Если воздействие усадки на напряженно-деформированное состояние элемента начинается по истечении некоторого периода

времени после начала его высыхания, то числовые параметры $\epsilon_{ум}$ и $\epsilon_{вт}$ следует уменьшить на величину деформации, проявившуюся за этот период (согласно табл. 3).

Таблица 5

Возраст бетона в момент нагружения, сут.	28 и менее	45	60	90	180	360	720 и более
ϵ_1 (для ползучести)	I	0,87	0,80	0,70	0,60	0,54	0,50
Возраст бетона к началу высыхания, сут.	I	7	28	90 и более	-	-	-
ζ_1 (для усадки)	I,05	I	0,95	0,90	-	-	-
Открытая удельная поверхность элемента, см ⁻¹	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	I и более
ϵ_2 (для ползучести)	0,46	0,59	0,68	0,83	I	I,15	I,20
ζ_2 (для усадки)	0,20	0,59	0,75	0,90	I	I,05	I,10
Относительная влажность средн., %	40 и менее	50	60	70	80	90	100
ϵ_3 (для ползучести)	I,45	I,3I	I,15	I	0,85	0,70	0,54
ζ_3 (для усадки)	I,45	I,3I	I,15	I	0,85	0,64	0

Примечания: I. При нагружении элемента в возрасте, большем чем 28 сут., прочностъ бетона R_t , принимается равной его марочной прочностъ R . 2. Относительная влажность среды для эксплуатации конструкций на открытом воздухе принимается в зависимости от климатического района расположения сооружения согласно СНиП II-A.6-72 как средняя относительная влажность воздуха наиболее жаркого месяца. При отсутствии данных о районе расположения сооружения, а также для элементов типовых конструкций допускается принимать $\epsilon_1 = \zeta_1 = I$. 3. Для районов, относящихся по СНиП II-A.6-72 к IV климатической зоне (районы с сухим жарким климатом), относительную влажность воздуха рекомендуется устанавливать как среднемесячную влажность, соответствующую времени нагружения (начала высыхания) элемента конструкции. 4. Для массивных элементов с открытой удельной поверхностью 0,05 см⁻¹ и менее, а также элементов, полностью гидроизолированных до начала нагружения (высыхания), независимо от влажности воздуха следует принимать $\epsilon_3 = \zeta_3 = I$. 5. Для элементов, находящихся в воде или насыщенной влагой среде, независимо от размеров поперечного сечения следует принимать $\epsilon_2 = \zeta_2 = I$.

П р и л о ж е н и е

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример I. Определить изгибающие моменты в четырехпролетном неразрезном ригеле перекрытия и проверить трещиностойкость его сечений. Длина каждого пролета 7,5 м, шаг ригелей — 6 м. Ригель состоит из сборных предварительно напряженных элементов, монолитного бетона и дополнительно укладываемых сборных ненапряженных железобетонных плит (см. рисунок).

Данные для расчета.

Сборные элементы: бетон М500 пропаренный $F_c = 1600 \text{ см}^2$,
 $Y_c = 27,5 \text{ см}$; $Y'_c = 32,5 \text{ см}$; $h_c = 60 \text{ см}$; $a_m = 10 \text{ см}$; $J_c =$
 $= 358300 \text{ см}^4$; $E_c = 3,25 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$; $R_{прII} = 280 \text{ кгс/см}^2$;
 $R_{рII} = 20 \text{ кгс/см}^2$; напрягаемая арматура класса К-7, $F_{ac} =$
 $= 11,33 \text{ см}^2$; $F_{ac} = 2,83 \text{ см}^2$; $E_a = 1,8 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$; $R_{aII} =$
 $= 13200 \text{ кгс/см}^2$; $n_a = 5,54$; $a_c = 7,5 \text{ см}$; $\alpha_c = 5 \text{ см}$.
 Монолитный бетон М200 естественного твердения: $F_{M2} = 600 \text{ см}^2$;
 $Y_{M2} = 17,5 \text{ см}$; $Y'_{M2} = 12,5 \text{ см}$; $h_{M2} = 30 \text{ см}$; $J_{M2} = 46250 \text{ см}^4$;
 $E_{M2} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$; $R_{прII} = 115 \text{ кгс/см}^2$; $R_{рII} = 11,5 \text{ кгс/см}^2$;
 $n_{M2} = 0,738$.

Сборные плиты: бетон М200 пропаренный, $F_{M1} = 3225 \text{ см}^2$;
 $Y_{M1} = 25,92 \text{ см}$; $Y'_{M1} = 4,08 \text{ см}$; $h_{M1} = 30 \text{ см}$; $J_{M1} = 86130 \text{ см}^4$;
 $E_{M1} = 2,15 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$; $R_{прII} = 115 \text{ кгс/см}^2$; $R_{рII} =$
 $= 11,5 \text{ кгс/см}^2$; $n_{M1} = 0,662$.

Надпорная арматура класса А-III: $F_{am} = 40,72 \text{ см}^2$;
 $E_a = 2 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$; $n_a = 6,15$; $a_m = 6 \text{ см}$.

Обагате сборных элементов произведено в возрасте бетона 3 сут. при передаточной прочности $R_0 = 0,8 R_c = 400 \text{ кгс/см}^2$. Укладка монолитного бетона осуществлена при возрасте бетона сборных элементов 45 сут., плит перекрытия — 30 сут. Временная нагрузка на перекрытие приложена в возрасте бетона сборных элементов 60 сут., плит перекрытия — 45 сут. и монолитного бетона — 15 сут.

Нагрузки равномерно распределенные: постоянная $q_1 = 1,8 \text{ тс/м}$; временная $p = 9 \text{ тс/м}$; в т.ч. длительно действующая $p_{дл} = 6 \text{ тс/м}$. Постоянную нагрузку воспринимают сборные элементы ригеля, временную — вся конструкция.

Геометрические характеристики: приведенного сечения сборного элемента — $F_{1л} = 1678 \text{ см}^2$; $Y_{1с} = 27 \text{ см}$; $I_1 = 0,5 \text{ см}^4$;
 $J_{1л} = 394920 \text{ см}^4$; $W_{1о} = 14630 \text{ см}^3$; $Z_{1л} = 235,4 \text{ см}^2$; при-
 вденного сечения конструкции в пролете — $F_n = 4255 \text{ см}^2$;
 $Y_k = 49,7 \text{ см}$; $J_n = 1939240 \text{ см}^4$; $W_o = 39020 \text{ см}^3$; $W_T =$
 $= 77250 \text{ см}^3$; приведенного сечения конструкции у промежуточных опор — $F_n = 4505 \text{ см}^2$; $Y_k = 19,5 \text{ см}$; $J_n = 1987600 \text{ см}^4$;
 $W_o = 101876 \text{ см}^3$; $W_T = 160963 \text{ см}^3$.

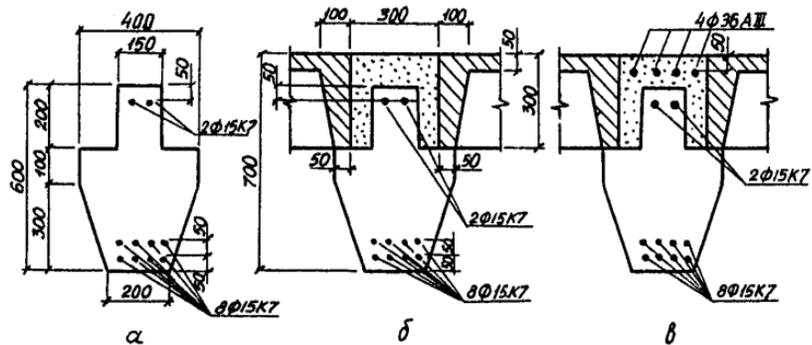
Характеристики усадки и ползучести бетонов находим по настоя-
 щим методическим рекомендациям (раздел 8):

$\psi_c = 1,00$; $E_{cy} = 16,2 \cdot 10^{-5}$; $\psi_{M1} = 2,50$; $\epsilon_{M1y} = 13,9 \cdot 10^{-5}$;
 $\psi_{M2} = 2,75$; $\epsilon_{M2y} = 20,2 \cdot 10^{-5}$.

По табл. 1 определяем:

$\delta_c = 2,18$; $\delta_{M1} = 3,90$; $\gamma_{M2} = 3,85$.

По формулам раздела 2 находим вспомогательные геометрические параметры сечения конструкции в пролете:



Ригель междуэтажного перекрытия (к примеру I)
 а - сечение сборного преднапряженного элемента;
 б - пролетное сечение ригеля; в - опорное сечение
 перекрытия

$$F = 1600 + 0,662 \cdot 3225 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,90} + 0,738 \cdot 600 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,85} + 5,54 \cdot 11,33 \cdot 2,18 + 5,54 \cdot 2,83 \cdot 2,18 = 1600 + 1193,4 + 250,7 + 136,8 + 34,2 = 3215,1 \text{ см}^2;$$

$$S = 1600 \cdot 27,5 + 1193,4(70 - 4,08) + 250,7(70 - 12,5) + 136,8 \cdot 7,5 + 34,2 \cdot 55 = 139991 \text{ см}^3;$$

$$y^* = \frac{139991}{3215,1} = 43,54 \text{ см};$$

$$i_c = 43,54 - 27,5 = 16,04 \text{ см};$$

$$i_{M1} = 70 - 43,54 - 4,08 = 22,38 \text{ см};$$

$$i_{M2} = 70 - 43,54 - 12,5 = 13,96 \text{ см};$$

$$i_{ac} = 43,54 - 7,5 = 36,04 \text{ см};$$

$$i'_{ac} = 55 - 43,54 = 11,46 \text{ см};$$

$$J = 358300 + 1600 \cdot 16,04^2 + 0,662 \cdot 86130 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,90} + 1193,4 \cdot 22,38^2 + 0,738 \cdot 46250 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,85} + 250,7 \cdot 13,96^2 + 136,8 \cdot 36,04^2 + 34,2 \cdot 11,46^2 = 1650000 \text{ см}^4;$$

$$F_I = 1600 \cdot I = 1600 \text{ см}^2;$$

$$F_{II} = 1193,4 \cdot 2,5 + 250,7 \cdot 2,75 + 1600 \cdot I = 2983,5 + 689,4 + 1600 = 5272,9 \text{ см}^2;$$

$$S_I = 1600 \cdot 16,04 \cdot I = 25664 \text{ см}^3;$$

$$S_{II} = 1600 \cdot 0,5 \cdot I = 800 \text{ см}^3;$$

$$S_{III} = 2983,5 \cdot 22,38 + 689,4 \cdot 13,96 - 1600 \cdot 16,04 = 50731 \text{ см}^3;$$

$$S_{IV} = 2983,5 \cdot 16,22 + 689,4 \cdot 7,8 - 1600 \cdot 22,2 = 18250 \text{ см}^3;$$

$$J_I = (358300 - 1600 \cdot 0,5 \cdot 16,04) \cdot I = 345500 \text{ см}^4;$$

$$J_{II} = 0,662 \cdot 86130 \cdot 2,50 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,90} + 2983,5 \cdot 16,22 \cdot 22,38 + 0,738 \cdot 46250 \times 2,75 \cdot \frac{2 \cdot I_8}{3,85} + 689,4 \cdot 7,8 \cdot 13,96 + (358300 + 1600 \cdot 22,2 \cdot 16,04) \cdot I = 2219000 \text{ см}^4.$$

Численное значение φ определяем по формуле (3.11):

$$\varphi = \frac{2,219 \cdot 10^6}{1,65 \cdot 10^6} = 1,345.$$

По табл. I при $T_1 = 45$ сут. и $\varphi = 1,345$ имеем $\gamma = 2,53$.
Усилие предварительного обжатия сборных элементов (при коэффициенте точности натяжения арматуры, равном I) к моменту замыкания системы $M_{1,0} = 15000$ кгс; эксцентриситет указанного усилия $e_{1,0} = 9,65$ см. Максимальный изгибающий момент в сборных элементах от постоянных нагрузок $M_1 = 12,66$ тс·м. Моменты образования трещин при замыкании системы:

в пролетных сечениях $M_T = 67,84$ тс·м;

в опорных сечениях $M_T = 18,50$ тс·м.

Определяем усилия в неразрезном ригеле как упругой системе. При действии длительно действующей части временной нагрузки опорные моменты равны:

на первых промежуточных опорах

$$M_1 = M_3 = -\frac{3}{28} p_{\text{дл}} l^2 = -\frac{3}{28} 6,0 \cdot 7,5^2 = -36,16 \text{ тс}\cdot\text{м};$$

на средней опоре

$$M_2 = \frac{p_{\text{дл}} l^2}{14} = \frac{6,0 \cdot 7,5^2}{14} = 24,11 \text{ тс}\cdot\text{м}.$$

Так как на всех трех опорах $M > M_T$, в зоне действия отрицательных моментов в ригеле возникают трещины. Для определения усилий в ригеле с учетом влияния ползучести бетонов используем метод последовательных приближений. Результаты расчета по упругой стадии принимаем в качестве первого приближения. Каждый пролет ригеля разбиваем на 30 участков $l_i = 0,25 \text{ м}$. В табл. 1 настоящего приложения приведены вспомогательные величины, необходимые для расчета ригеля методом последовательных приближений. В табл. 2 приведены параметры деформативности ригеля в зоне действия отрицательных моментов, вычисленные в соответствии с указаниями п. 3.7 настоящих методических рекомендаций. Последовательность определения этих параметров покажем для изгибающего момента $M = -20 \text{ тс}\cdot\text{м}$.

Расчет начинаем с определения Ψ_0 . Высоту сжатой зоны x_0 , входящую в формулу (3.47) настоящих методических рекомендаций, отыскиваем из уравнения (3.52) при $\Psi_0 = 1$. Предположим сначала, что н.о. пересекает сборный элемент ригеля в пределах переменной ширины его сечения. Тогда:

$$S_{0,т.с} = 20 \cdot x_0 \cdot 0,5 \cdot x_0 + 2 \cdot 0,5 \cdot x_0 \cdot \frac{x_0}{3} \cdot \frac{x_0}{3} = \frac{x_0^3}{9} + 10 x_0^2;$$

$$n_a S_{0,т.с} = 5,54 \cdot 11,33(x_0 - 7,5) - 5,54 \cdot 2,83(55 - x_0) - 6,15 x_0 \cdot 40,72(64 - x_0) = 329 x_0 - 17320.$$

С учетом этого уравнение (3.52) примет вид:

$$\sum S_{0,т} = \frac{1}{9} x_0^3 + 10 x_0^2 + 329 x_0 - 17320 = 0,$$

откуда $x_0 = 26,05 \text{ см} < 30 \text{ см}$.

Значения F и m определяем по формулам:

$$F = 1600 + 0,662 \cdot 7,5(64 - 40) \cdot 2 + 0,738(15 \cdot 20 + 30 \cdot 4) = 2029 \text{ см}^2;$$

$$m = 1,3 \sqrt{\frac{11,5 \cdot 160963}{2000000}} = 0,6;$$

значения Ψ_0 и Ψ — по формулам, соответственно (3.47) и (3.34) настоящих методических рекомендаций:

$$\Psi_0 = 1 - \frac{(2029 - 40 \cdot 26,05) \cdot 0,6}{2029 - 40 \cdot 26,05 + 2,2(5,54 \cdot 2,83 + 6,15 \cdot 40,72)}$$

$$\Psi = 0,7 \left[1 + (2,26 - 3,71 \cdot 0,7 + 1,45 \cdot 0,7^2) \frac{1,0}{1,0} \right] = 0,9.$$

Определим положение н.о. при вычисленных значениях Ψ_0 и Ψ . При этом будем полагать, что $x_0 < 30 \text{ см}$ и $30 \text{ см} < x < 40 \text{ см}$ (см. рисунок). Тогда:

Т а б л и ц а 1

Вспомогательные величины для расчета
ригеля методом последовательных приближений

Номер уча- стка	$M_{p,j-1}$, тс·м	$M_{p,ср}$, тс·м	$M_{p,j}$, тс·м	$\frac{S_{n,n,j}^{(n+1)}}{k_{Tj} \delta_j}$	$\frac{S_{n,n+1,j}}{k_{Tj} \delta_j}$	$\frac{S_{n,n,j}^{(n)}}{k_{Tj} \delta_j}$	$\frac{6\Delta_{npj}^{(n)}(t)}{k_{Tj}(1+\varphi_j)}$, тс·м	$\frac{6\Delta_{npj}^{(n+1)}(t)}{k_{Tj}(1+\varphi_j)}$, тс·м	$M_{1,j}$, тс·м
1	0,0	2,7656	5,4375	26II	88	I	0,0122	0,5378	0,83
2	5,4375	8,0156	10,50	2437	256	7	0,0828	1,5172	2,40
3	10,50	12,8906	15,1875	2269	412	19	0,2172	2,3578	3,87
4	15,1875	17,3906	19,50	2107	556	37	0,4078	3,0672	5,22
5	19,50	21,5156	23,4375	1951	688	61	0,6472	3,6528	6,45
6	23,4375	25,2656	27,00	1801	808	91	0,9278	4,1222	7,58
7	27,00	28,6406	30,1875	1657	916	127	1,2422	4,4828	8,59
8	30,1875	31,6406	33,00	1519	1012	169	1,5828	4,7422	9,49
9	33,00	34,2656	35,4375	1387	1096	217	1,9422	4,9078	10,28
10	35,4375	36,5156	37,50	1261	1168	271	2,3128	4,9872	10,95
11	37,50	38,3906	39,1875	1141	1228	331	2,6872	4,9878	11,52
12	39,1875	39,8906	40,50	1027	1276	397	3,0578	4,9172	11,97
13	40,50	41,0156	41,4375	919	1312	469	3,4172	4,7828	12,30
14	41,4375	41,7656	42,00	817	1336	547	3,7578	4,5922	12,53
15	42,00	42,1406	42,1875	721	1348	631	4,0722	4,3528	12,64
16	42,1875	42,1406	42,00	631	1348	721	4,3528	4,0722	12,64
17	42,00	41,7656	41,4375	547	1336	817	4,5922	3,7578	12,53
18	41,4375	41,0156	40,50	469	1312	919	4,7828	3,4172	12,30
19	40,50	39,8906	39,1875	397	1276	1027	4,9172	3,0578	11,97
20	39,1875	38,3906	37,50	331	1228	1141	4,9878	2,6872	11,52
21	37,50	36,5156	35,4375	271	1168	1261	4,9872	2,3128	10,95
22	35,4375	34,2656	33,00	217	1096	1387	4,9078	1,9422	10,28
23	33,00	31,6406	30,1875	169	1012	1519	4,7422	1,5828	9,49
24	30,1875	28,6406	27,00	127	916	1657	4,4828	1,2422	8,59
25	27,00	25,2656	23,4375	91	808	1801	4,1222	0,9278	7,58
26	23,4375	21,5156	19,50	61	688	1951	3,6528	0,6472	6,45
27	19,50	17,3906	15,1875	37	556	2107	3,0672	0,4078	5,22
28	15,1875	12,8906	10,50	19	412	2269	2,3578	0,2172	3,87
29	10,50	8,0156	5,4375	7	256	2437	1,5172	0,0828	2,40
30	5,4375	2,7656	0,0	1	88	2611	0,5378	0,0122	0,83

Т а б л и ц а 2

Параметры деформативности ригеля при наличии
трещин в пропорных сечениях

Изгибаю- щий мо- мент M , тс·м	до 18,5	18,5	19,0	20,0	21,0	23,0	25,0	30,0	40,0	50,0
x_0 , см	-	28,40	28,33	28,27	28,24	28,14	28,05	27,85	27,56	27,36
x , см	-	32,16	32,16	32,15	32,13	32,12	32,11	32,09	32,07	32,05
$\Sigma J_{от}$, см ⁴	-	636600	635400	633000	630600	626500	622900	615100	603800	595950
$\Sigma J_{т}$, см ⁴	-	895400	895300	895000	894700	894200	893800	892900	891700	890760
k_T	1,0	3,121	3,127	3,139	3,151	3,172	3,190	3,230	3,291	3,334
φ	1,345	0,422	0,419	0,414	0,410	0,401	0,394	0,378	0,354	0,338
χ	2,53	1,422	1,419	1,414	1,410	1,401	1,394	1,378	1,354	1,338

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета ригеля методом
последовательных приближений

Номер уча- стка, j	$M_j(t)$, тс·м, в первом прибли- жении	k_{Tj}	φ_j	δ_j	S_{11j}	$S_{12j} =$ $-S_{21j}$	S_{22j}	$6\Delta_{1pj}^{(n)}(t)$, тс·м	$6\Delta_{2pj}^{(n)}(t)$, тс·м	$M_j(t)$, тс·м, во вто- ром при- ближении	$M_j(t)$, тс·м, в треть- ем при- ближении
Первый пролет											
1	2,17	1,0	1,345	2,53	2,53	-	-	0,029	-	2,28	2,27
2	6,21	1,0	1,345	2,53	17,71	-	-	0,194	-	6,56	6,52
3	9,88	1,0	1,345	2,53	48,07	-	-	0,509	-	10,46	10,39

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	13,17	1,0	1,345	2,53	93,61	-	-	0,956	-	13,99	13,89
5	16,10	1,0	1,345	2,53	154,33	-	-	1,518	-	17,15	17,02
6	18,64	1,0	1,345	2,53	230,23	-	-	2,176	-	19,93	19,77
7	20,81	1,0	1,345	2,53	321,31	-	-	2,913	-	22,33	22,14
8	22,60	1,0	1,345	2,53	427,57	-	-	3,712	-	24,36	24,14
9	24,02	1,0	1,345	2,53	549,01	-	-	4,554	-	26,02	25,77
10	25,07	1,0	1,345	2,53	685,63	-	-	5,424	-	27,30	27,02
11	25,73	1,0	1,345	2,53	837,43	-	-	6,301	-	28,20	27,89
12	26,03	1,0	1,345	2,53	1004,41	-	-	7,171	-	28,73	28,39
13	25,95	1,0	1,345	2,53	1186,57	-	-	8,013	-	28,89	28,52
14	25,50	1,0	1,345	2,53	1383,91	-	-	8,812	-	28,67	28,27
15	24,66	1,0	1,345	2,53	1596,43	-	-	9,549	-	28,07	27,64
16	23,46	1,0	1,345	2,53	1824,13	-	-	10,207	-	27,10	26,64
17	21,88	1,0	1,345	2,53	2067,01	-	-	10,769	-	25,76	25,27
18	19,93	1,0	1,345	2,53	2325,07	-	-	11,216	-	24,04	23,52
19	17,59	1,0	1,345	2,53	2598,31	-	-	11,531	-	21,94	21,39
20	14,89	1,0	1,345	2,53	2886,73	-	-	11,696	-	19,47	18,89
21	11,81	1,0	1,345	2,53	3190,33	-	-	11,695	-	16,63	16,02
22	8,35	1,0	1,345	2,53	3509,11	-	-	11,509	-	13,41	12,77
23	4,52	1,0	1,345	2,53	3843,07	-	-	11,120	-	9,81	9,14
24	0,31	1,0	1,345	2,53	4192,21	-	-	10,512	-	5,84	5,14
25	-4,26	1,0	1,345	2,53	4556,53	-	-	9,667	-	1,50	0,77
26	-9,22	1,0	1,345	2,53	4936,03	-	-	8,566	-	-3,22	-3,98
27	-14,55	1,0	1,345	2,53	5330,71	-	-	7,193	-	-8,32	-9,11
28	-20,26	3,142	0,413	1,413	10073,56	-	-	10,468	-	-13,79	-14,61
29	-26,33	3,201	0,390	1,390	10843,16	-	-	6,751	-	-19,63	-20,48
30	-32,79	3,247	0,371	1,371	11623,22	-	-	2,394	-	-25,85	-26,73

Второй пролет

1	-33,19	3,250	0,370	1,370	11625,48	391,82	4,45	2,395	0,054	-26,23	-27,10
2	-27,54	3,210	0,386	1,386	10842,36	1138,96	31,14	6,750	0,368	-20,77	-21,60
3	-22,27	3,164	0,404	1,404	10079,48	1830,21	84,40	10,474	0,965	-15,70	-16,48
4	-17,36	1,0	1,345	2,53	5330,71	1406,68	93,61	7,193	0,956	-10,99	-11,73

5	-12,84	1,0	1,345	2,53	4936,03	1740,64	154,33	8,566	1,518	-6,65	-7,35
6	-8,63	1,0	1,345	2,53	4556,53	2044,24	230,23	9,667	2,176	-2,69	-3,35
7	-4,91	1,0	1,345	2,53	4192,21	2317,48	321,31	10,512	2,913	0,89	0,27
8	-1,51	1,0	1,345	2,53	3843,07	2560,36	427,57	11,120	3,712	4,09	3,52
9	1,52	1,0	1,345	2,53	3509,11	2772,88	549,01	11,509	4,554	6,93	6,40
10	4,18	1,0	1,345	2,53	3190,33	2955,04	685,63	11,695	5,424	9,39	8,90
11	6,45	1,0	1,345	2,53	2886,73	3106,84	837,43	11,696	6,301	11,47	11,02
12	8,35	1,0	1,345	2,53	2598,31	3228,28	1004,41	11,531	7,171	13,17	12,77
13	9,89	1,0	1,345	2,53	2325,07	3319,36	1186,57	11,216	8,013	14,51	14,15
14	11,03	1,0	1,345	2,53	2067,01	3380,08	1383,91	10,769	8,812	15,47	15,15
15	11,81	1,0	1,345	2,53	1824,13	3410,44	1596,43	10,207	9,549	16,05	15,77
16	12,20	1,0	1,345	2,53	1596,43	3410,44	1824,13	9,549	10,207	16,26	16,02
17	12,24	1,0	1,345	2,53	1383,91	3380,08	2067,01	8,812	10,769	16,09	15,90
18	11,89	1,0	1,345	2,53	1186,57	3319,36	2325,07	8,013	11,216	15,55	15,40
19	11,16	1,0	1,345	2,53	1004,41	3228,28	2598,31	7,171	11,531	14,63	14,52
20	10,06	1,0	1,345	2,53	837,43	3106,84	2886,73	6,301	11,696	13,34	13,27
21	8,60	1,0	1,345	2,53	685,63	2955,04	3190,33	5,424	11,695	11,67	11,65
22	6,74	1,0	1,345	2,53	549,01	2772,88	3509,11	4,554	11,509	9,63	9,65
23	4,52	1,0	1,345	2,53	427,57	2560,36	3843,07	3,712	11,120	7,21	7,27
24	1,93	1,0	1,345	2,53	321,31	2317,48	4192,21	2,913	10,512	4,42	4,53
25	-1,05	1,0	1,345	2,53	230,23	2044,24	4556,53	2,176	9,667	1,26	1,41
26	-4,39	1,0	1,345	2,53	154,33	1740,64	4936,03	1,518	8,566	-2,29	-2,09
27	-8,12	1,0	1,345	2,53	93,61	1406,68	5330,71	0,956	7,193	-6,21	-5,97
28	-12,22	1,0	1,345	2,53	48,07	1042,36	5740,57	0,509	5,529	-10,50	-10,22
29	-16,69	1,0	1,345	2,53	17,71	647,68	6165,61	0,194	3,558	-15,16	-14,84
30	-21,54	3,157	0,408	1,408	4,45	391,16	11606,04	0,054	2,391	-20,20	-19,84

Примечания. 1. Сумма по всем участкам первого пролета в графах 6 - 82337,93
 9 - 207,124; 2. Сумма по всем участкам второго пролета в графах 6 - 82347,23; 7 - 69926,83;
 8 - 73361,89; 9 - 207,157; 10 - 199,645.

$$S_{отс} = \frac{x_0^3}{9} + 10x_0^2;$$

$$S_{т.с} = 20 \cdot 30 (x - 15) + 2 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 30 (x - 20) + 0,5 \cdot 40 (x - 30)^2 = 20x^2 - 300x + 3000;$$

$$n_a S_{атт} = 5,54 \cdot 11,33 (x_0 - 7,5) - \frac{5,54}{0,7} \cdot 2,83(55 - x_0) - \frac{6,15}{0,7} x$$

$$x \cdot 40,72(64 - x_0) = 398,34 x_0 - 21769,24;$$

$$n_a S_{т.а}(1+\psi_c) = 5,54 \cdot 11,33(1+I,0)(x - 7,5) - \frac{5,54}{0,9} \cdot 2,83(1+I,0)x$$

$$x(55 - x) - \frac{6,15}{0,9} \cdot 40,72(1+I,0)(64 - x) = 671,4x - 35587,04.$$

Уравнения (3.52) и (3.53) примут вид:

$$\Sigma S_{от} = \frac{x_0^3}{9} + 10x_0^2 + 398,34x_0 - 21769,24 = 0$$

$$\Sigma S_{т} = 20x^2 + 371,4x - 32587,04 = 0,$$

откуда $x_0 = 28,27$ см и $x = 32,15$ см.

По формулам (3.21) и (3.22) настоящих методических рекомендаций вычисляем:

$$\Sigma J_{от} = \frac{28,27}{3} \cdot \frac{28,27^3}{12} + \frac{28,27^3}{3} \cdot 20 + 5,54 \cdot 11,33(28,27 - 7,5)^2 + \frac{5,54}{0,7} \cdot 2,83(55 - 28,27)^2 + \frac{6,15}{0,7} \cdot 40,72(64 - 28,27)^2 = 633000 \text{ см}^4;$$

$$\Sigma J_{т} = \frac{10 \cdot 30^3}{36} + 0,5 \cdot 10 \cdot 30(32,15 - 20)^2 + \frac{20 \cdot 30^3}{12} + 20 \cdot 30(32,15 - 15)^2 + \frac{40}{3} (32,15 - 30)^3 + 5,54 \cdot 11,33(1+I,0)(32,15 - 7,5)^2 + \frac{5,54}{0,9} x \cdot 2,83(1+I,0)(55 - 32,15)^2 + \frac{6,15}{0,9} \cdot 40,72(1+I,0)(64 - 32,15)^2 = 895000 \text{ см}^4.$$

По формулам (3.51) и (3.50) находим:

$$k_{т} = \frac{1987600}{633000} = 3,14; \quad \psi = \frac{633000}{895000} (1+I,0) - I = 0,42.$$

Так как ригель полностью симметричен относительно средней опоры, при расчете будем рассматривать только левую половину ригеля, т.е. два левых пролета.

Значения изгибающих моментов в середине каждого участка в первом приближении (упругий расчет) приведены во втором столбце табл. 3. Из этих данных следует, что на участках 28-30 первого пролета и 1,2,3,30 второго пролета изгибающие моменты превышают моменты трещинообразования; на остальных участках трещины отсутствуют. Используя данные табл. 2 настоящего приложения, определим (по интерполяции) параметры деформативности участков с трещинами - $k_{тj}$, ψ_j и δ_j . Затем, используя данные табл. 1, определим элементы перемещений для каждого участка. Так, для участка 2 второго пролета по формулам (7.9)-(7.11)

настоящих методических рекомендаций имеем:

$$S_{11} = 3,210 \cdot I,386 \cdot 2437 = 10842,36;$$

$$S_{12} = S_{21} = 3,210 \cdot I,386 \cdot 256 = 1138,96;$$

$$S_{22} = 3,210 \cdot I,386 \cdot 7 = 31,14;$$

$$6\Delta_{1p}(t) = 3,210(I + 0,386) \cdot I,5172 = 6,750 \text{ тс}\cdot\text{м};$$

$$6\Delta_{2p}(t) = 3,210(I + 0,386) \cdot 0,0828 = 0,368 \text{ тс}\cdot\text{м}.$$

Вычисленные аналогичным образом элементы перемещений для всех остальных участков приведены в табл. 3.

Коэффициенты суммирования:

$$S_{11}^{(1)} = \frac{82337,93}{27000} = 3,050; \quad S_{11}^{(2)} = \frac{82347,23}{27000} = 3,050;$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{69926,83}{27000} = 2,590; \quad S_{22}^{(1)} = S_{22}^{(2)} = \frac{73361,89}{27000} = 2,717;$$

$$6\Delta_{1p}(t) = \frac{l_1}{E_c J_n} 207,124 + \frac{l_2}{E_c J_n} 207,157 = 414,281 \frac{l}{E_c J_n};$$

$$6\Delta_{2p}(t) = \frac{l_2}{E_c J_n} 199,645 + \frac{l_3}{E_c J_n} 199,645 = 399,29 \frac{l}{E_c J_n}.$$

Учитывая, что для всех пролетов ригеля величины l и $E_c J_n$ одинаковы, составляем систему трехчленных уравнений вида (7.8):

$$2M_1(t)(3,050+3,050) + M_2(t) 2,590 + 414,281 = 0;$$

$$M_1(t)2,590 + 2 M_2(t) (2,717+2,717) + M_3(t) 2,590+399,29 = 0;$$

$$M_2(t)2,590 + 2 M_3(t) (3,050+3,050) + 414,281 = 0,$$

откуда во втором приближении

$$M_1(t) = M_3(t) = -29,11 \text{ тс}\cdot\text{м}; \quad M_2(t) = -22,87 \text{ тс}\cdot\text{м}.$$

Затем в той же последовательности находим величины лишних неизвестных в третьем приближении:

$$M_1(t) = M_3(t) = -30,00 \text{ тс}\cdot\text{м}; \quad M_2(t) = -22,49 \text{ тс}\cdot\text{м}.$$

Так как в четвертом приближении получены практически такие же величины опорных моментов, в качестве окончательных принимаем значения, полученные в третьем приближении.

В последней колонке табл. 3 приведены величины изгибающих моментов по участкам после перераспределения усилий. Из этой таблицы видно, что наибольший положительный момент возникает в первом пролете на участке I3 ($M = 28,52 \text{ тс}\cdot\text{м}$). Величина момента

M_T на этом же участке от нагрузок, приложенных до замыкания ригеля, равна 12,30 тс·м (см. последний столбец табл. I настоящего приложения).

Для этого участка производим окончательный расчет по образованию трещин.

По формулам раздела 2 настоящих методических рекомендаций определяем напряжения, вызванные усадкой и ползучестью бетонов.

Усилия и напряжения в бетоне сборных элементов на уровне растянутого края сечения конструкции от усадки бетонов:

$$N_y = 13,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2,15 \cdot 10^5 \cdot 3225 \frac{2,18}{3,90} + 20,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,4 \cdot 10^5 \times$$

$$\times 600 \frac{2,18}{3,85} + 16,2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,25 \cdot 10^5 \cdot 1600 = 154600 \text{ кгс};$$

$$M_y = 13,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2,15 \cdot 10^5 \cdot 3225 \cdot 22,38 \frac{2,18}{3,90} + 20,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,4 \times$$

$$\times 10^5 \cdot 600 \cdot 13,96 \frac{2,18}{3,85} - 16,2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,25 \cdot 10^5 \cdot 1600 \cdot 16,04 =$$

$$= 84400 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$\sigma_{cy} = \frac{1}{2,18} \left(\frac{154600}{3215,1} - \frac{84400}{1650000} \cdot 43,54 - 16,2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,25 \cdot 10^5 \right) =$$

$$= -3,12 \text{ кгс/см}^2.$$

Напряжения в бетоне сборных элементов на уровне растянутого края сечения конструкции к моменту приобретения монолитным бетоном заданной прочности от предварительного обжатия сборных элементов:

$$\sigma_{1,н} = \frac{150000}{1678} + \frac{150000 \cdot 9,65}{394920} \cdot 27,0 = 188,36 \text{ кгс/см}^2;$$

то же, после приобретения монолитным бетоном заданной прочности — см. формулу (2.15) настоящих методических рекомендаций

$$\sigma_{cп} = \frac{1}{2,18} \left\{ \frac{150000}{1678} \left[\frac{1600}{3215,1} + \frac{25664}{1650000} \cdot 43,54 - \frac{9,65}{235,4} \times \right. \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{800}{3215,1} - \frac{345500}{1650000} \cdot 43,54 \right) \right] - 188,36 \cdot 1,0 \right\} = -23,32 \text{ кгс/см}^2.$$

Напряжения в бетоне сборных элементов на уровне растянутого края сечения конструкции к моменту приобретения монолитным бетоном заданной прочности от постоянных нагрузок:

$$\sigma_{1,в} = - \frac{12,30 \cdot 10^5}{394920} \cdot 27,0 = -84,09 \text{ кгс/см}^2;$$

то же, после приобретения монолитным бетоном заданной прочности — см. формулу (2.18) настоящих методических рекомендаций

$$\sigma_{cп} = \frac{1}{2,18} \left[\frac{12,30 \cdot 10^5}{394920} \left(\frac{800}{3215,1} - \frac{345500}{1650000} \cdot 43,54 \right) + 84,09 \cdot 1,0 \right] =$$

$$= 25,90 \text{ кгс/см}^2.$$

Начальные и полные значения напряжений в бетоне сборных элементов на уровне растянутого края сечения конструкции от внешних нагрузок, приложенных после замыкания конструкции:

$$\sigma_{c,в} = - \frac{28,52 \cdot 10^5}{1939240} \cdot 49,7 = -73,09 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_c(t) = -73,09 \left(1 - \frac{1,0}{2,18} \right) + \frac{28,52 \cdot 10^5}{2,18 \cdot 1939240} \left(\frac{18250}{3215,1} - \right.$$

$$\left. - \frac{2219000}{1650000} \cdot 43,54 \right) = -75,23 \text{ кгс/см}^2.$$

Напряжения в бетоне сборных элементов на уровне растянутого края сечения конструкции, вызванные усадкой и ползучестью бетонов (см. п. 4.2 настоящих методических рекомендаций):

$$\sigma_{c(y+n)} = -3,12 - 23,32 + 25,90 - 75,23 + 73,09 = -2,68 \text{ кгс/см}^2.$$

Расчет по образованию трещин производим по формуле (4.1).
Проверяем условия (4.2) и (4.3):

$$\frac{M_1 Y'_1}{J_{1,n}} + \frac{M Y'_c}{J_n} = \frac{12,3 \cdot 10^5}{394920} \cdot 33,0 + \frac{28,52 \cdot 10^5}{1939240} \cdot 10,3 =$$

$$= 117,9 \text{ кгс/см}^2 < 0,7 R_{прI} = 0,7 \cdot 280 = 196 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\frac{n_m M Y'_m}{J_n} = \frac{0,662 \cdot 28,52 \cdot 10^5}{1939240} \cdot 20,3 = 19,8 \text{ кгс/см}^2 < 0,7 R_{прII} =$$

$$= 0,7 \cdot 115 = 80,5 \text{ кгс/см}^2.$$

Так как оба условия не выполняются, принимаем $k_1 = k = 1$ в результате

$$M_T = 150000 \left(9,65 + \frac{14630}{1678} \right) \frac{39020}{14630} + 12,3 \cdot 10^5 \left(1 - \frac{39020}{14630} \right) -$$

$$- 2,68 \cdot 39020 + 20 \cdot 77250 = 6738600 \text{ кгс.см} = 67,39 \text{ тс.м.}$$

Изгибающие моменты в сечениях ригеля при действии различных видов нагрузок приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Сечение ригеля	Изгибающие моменты, тс.м, при действии нагрузки			
	постоянной	временной		общей
		длительной	кратковременной	
В крайнем пролете (участок I3)	12,30	28,52	12,98	53,80
На первой промежуточной опоре	0,0	-30,00	-18,08	-48,08
Во втором от края пролете (участок I6)	12,64	16,02	6,10	34,76
На средней опоре	0,0	-22,49	-12,05	-34,54

Из этих данных видно, что во всех пролетных сечениях выполняется условие

$$M + M_1 < M_T.$$

Для опорных сечений ригеля ширину раскрытия трещин определяем по наибольшему значению опорного момента - на первой промежуточной опоре. Полная ширина раскрытия трещин равна [6]

$$a_T = a_{T1} - a_{T2} + a_{T3},$$

где

$\alpha_{т1}$ - ширина раскрытия трещин от кратковременного действия всей нагрузки;

$\alpha_{т2}$ - то же, от кратковременного действия постоянной и длительной нагрузок;

$\alpha_{т3}$ - ширина раскрытия трещин от длительного действия постоянной и длительной нагрузок.

Все величины $\alpha_{тi}$ вычисляем по формуле (5.10) настоящих методических рекомендаций.

При кратковременном действии всей нагрузки имеем:

$$C_{дл} = I; \quad \eta = I; \quad \Delta y = 0; \quad k = I; \quad x_0 = 27,4 \text{ см.}$$

табл. 2);

$$F = 2029 \text{ см}^2; \quad F_{ам} = 40,72 \text{ см}^2; \quad P_a = 45,24 \text{ см}; \quad h_0 = 64 \text{ см.}$$

По формуле (5.12) находим

$$k_a = \frac{2029 - 40 \cdot 27,4}{2029 - 40 \cdot 27,4 + 2 \cdot 2,6 \cdot 15 \cdot 40,72} = 0,629.$$

Так как для опорных сечений $\delta'_n - \delta$ и $M_T - R_{MP} W_T$, по формулам (5.7) и (5.11) имеем:

$$z_0 = 64 - 27,4 + \frac{2}{3} \cdot 27,4 = 54,87 \text{ см};$$

$$\sigma_a = \frac{48,08 \cdot 10^5}{40,72 \cdot 54,87} = 2150 \text{ кгс/см}^2.$$

При $\sigma_s = 0$ по табл. 5.1 имеем $K_{сц} = 0,5I$. Тогда

$$\alpha_{т1} = 3,4 \cdot I \cdot I \cdot I \cdot 0,629 \frac{2150 \cdot 40,72}{45,24 \cdot 0,5I \cdot 2,4 \cdot 10^5} = 0,0338 \text{ см.}$$

Аналогичным образом определяем величину $\alpha_{т2}$:

$$x_0 = 27,85 \text{ см}; \quad K_a = 0,624; \quad z_0 = 54,72 \text{ см}; \quad \sigma_a = 1350 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\alpha_{т2} = 3,4 \cdot I \cdot I \cdot I \cdot 0,624 \frac{1350 \cdot 40,72}{45,24 \cdot 0,5I \cdot 2,4 \cdot 10^5} = 0,0211 \text{ см.}$$

При длительном действии нагрузки $x_0 = 27,85 \text{ см};$

$$x = 32,09 \text{ см}; \quad \Sigma J_{0,T} = 615100 \text{ см}^4; \quad \Sigma J_T = 892900 \text{ см}^4 \text{ (см. табл. 2).}$$

По формуле (5.2) вычисляем:

$$C_{дл} = \frac{615100}{892900} \cdot \frac{64 - 32,09}{64 - 27,85} (I + I,0) = 1,22;$$

$$k_a = \frac{2029 - 40 \cdot 27,85}{2029 - 40 \cdot 27,85 + 2 \cdot 2,6 \cdot 15 \cdot 40,72} = 0,624;$$

$$z_0 = 64 - \frac{I}{3} \cdot 27,85 = 54,72 \text{ см};$$

$$\sigma_a = \frac{30 \cdot 10^5}{40,72 \cdot 54,72} = 1346 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\alpha_{т3} = 3,4 \cdot I \cdot 22 \cdot I \cdot I \cdot 0,624 \frac{1346 \cdot 40,72}{45,24 \cdot 0,5I \cdot 2,4 \cdot 10^5} = 0,0256 \text{ см.}$$

Полная ширина раскрытия трещин:

$$a_T = 0,0338 - 0,0211 + 0,0256 = 0,0383 \text{ см.}$$

Пример 2. Определить прогиб в середине пролета сборно-монолитной конструкции, сечение которой показано на рисунке настоящего приложения.

Данные для расчета. Конструкция представляет собой свободно-лежащую на двух опорах балку пролетом $l = 10$ м. К балке приложена равномерно распределенная нагрузка как до, так и после приобретения монолитным бетоном заданной прочности. Сборный элемент воспринимает нагрузку $q_1 = 1$ тс/м; нагрузка на конструкцию $q_{\text{дл}} = 4$ тс/м. Сборный элемент преднапряжен, $N_{1,д} = 150$ тс, $e_{1,н} = 9,65$ см. Остальные данные - по примеру 1 настоящего приложения.

Максимальные изгибающие моменты в середине пролета:

$$M_1 = \frac{1 \cdot 10^2}{8} = 12,5 \text{ тс}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{дл}} = \frac{4 \cdot 10^2}{8} = 50,0 \text{ тс}\cdot\text{м};$$

$$M_1 + M_{\text{дл}} = 62,5 \text{ тс}\cdot\text{м.}$$

Момент образования трещин равен 67,39 тс·м (см. пример 1), поэтому нормальные трещины в конструкции отсутствуют.

Кривизну от усадки бетонов определяем по формуле (3.1) настоящих методических рекомендаций:

$$\frac{1}{\rho_y} = \frac{84400}{3,25 \cdot 10^5 \cdot 1650000} = 0,016 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см.}$$

Кривизну от длительного действия усилий предварительного обжатия сборных элементов находим по формулам (3.2) и (3.3):

$$\frac{1}{\rho_{1,0}} = \frac{150000 \cdot 9,65}{3,25 \cdot 10^5 \cdot 394920} = 1,128 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см};$$

$$\psi = \frac{1}{1650000} (345500 + 25664 \frac{235,4}{9,65}) = 0,589;$$

$$\frac{1}{\rho_n} = -1,128 \cdot 10^{-5} \cdot 0,589 = -0,664 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см.}$$

Кривизну от длительного действия нагрузки q_1 вычисляем по формулам (3.4) и (3.5):

$$\frac{1}{\rho_{1,8}} = \frac{12,5 \cdot 10^5}{3,25 \cdot 10^5 \cdot 394920} = 0,974 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см};$$

$$\psi = \frac{345500}{1650000} = 0,209;$$

$$\frac{1}{\rho_n} = 0,974 \cdot 10^{-5} \cdot 0,209 = 0,204 \cdot 10^{-5} \text{ 1/см.}$$

Кривизну сечений от длительного действия нагрузок, примененных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности, определяем по формулам (3.9) - (3.11):

$$\frac{1}{P_0} = \frac{50 \cdot 10^5}{3,25 \cdot 10^5 \cdot 1939240} = 0,733 \cdot 10^{-5} \text{ I/cm};$$

$$\psi = \frac{2219000}{1650000} = 1,345;$$

$$\frac{1}{p(t)} = 0,733 \cdot 10^{-5} (1,18 + 1,345) = 1,848 \cdot 10^{-5} \text{ I/cm}.$$

Полный прогиб конструкции в середине пролета

$$f(t) = 1000^2 \left(\frac{1}{8} \cdot 0,016 - \frac{1}{8} \cdot 0,664 + \frac{5}{48} \cdot 0,204 + \frac{5}{48} \cdot 1,848 \right) \times$$

$$\times 10^{-5} = 1,33 \text{ см}.$$

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- M_1 - изгибающий момент от собственного веса сборных элементов и монолитного бетона и от внешних нагрузок, действующих к моменту приобретения монолитным бетоном заданной прочности.
- M и $M_{\text{ср}}$ - изгибающий момент от внешних нагрузок, приложенных после приобретения монолитным бетоном заданной прочности, и длительно действующая часть указанного момента.
- $N_{1,0}$ - равнодействующая сил предварительного обжатия сборных элементов с учетом потерь, проявившихся до приобретения монолитным бетоном заданной прочности.
- N_0 - равнодействующая сил предварительного обжатия над-опорных участков с.н.к. с учетом первых потерь.
- E_a - модуль упругости арматурной стали.
- E_c и $E_{\text{ср}}$ - модули упругости, соответственно, бетона сборных элементов и монолитного бетона.
- $$n_a = \frac{E_a}{E_c}; \quad n_m = \frac{E_m}{E_c}.$$
- $\epsilon_{\text{ус}}$ и $\epsilon_{\text{ум}}$ - относительные деформации усадки бетона сборных элементов и монолитного бетона к рассматриваемому моменту времени t .
- φ_c и φ_m - характеристики ползучести бетона сборных элементов и монолитного бетона к рассматриваемому моменту времени t .
- $R_{c,\text{пр}}$ и $R_{m,\text{пр}}$ - сопротивления бетона сборных элементов и монолитного бетона осевому сжатию.
- $R_{c,\text{р}}$ и $R_{m,\text{р}}$ - то же, осевому растяжению.
- R_a - сопротивление арматуры растяжению.
- $F_{a\text{м}}$, $F_{a\text{с}}$ и $F'_{a\text{с}}$ - площади поперечных сечений арматуры, соответственно A_m , A_c и A'_c .
- F_c и J_c - площадь бетона в поперечном сечении сборных элементов и собственный момент инерции указанной площади.
- F_m и J_m - площадь поперечного сечения монолитного бетона и собственный момент инерции указанной площади.
- $F_{1,\text{п}}$ и $J_{1,\text{п}}$ - площадь приведенного сечения сборных элементов и собственный момент инерции указанного сечения.
- F_n и J_n - то же, сечения конструкции, приведенного к бетону сборных элементов.

$$\gamma_{1,\text{п}}^2 = \frac{J_{1,\text{п}}}{F_{1,\text{п}}}; \quad \gamma_n^2 = \frac{J_n}{F_n}.$$

$e_{1,n}$ и e_n — эксцентриситеты сил $N_{1,0}$ и N_0 относительно ц.т., соответственно, приведенного сечения сборных элементов и сечения конструкции, приведенного к бетону сборных элементов.

$W_{1,0}$ и $W_{1,T}$ — моменты сопротивления приведенного сечения сборных элементов относительно крайних растянутых волокон, определяемые, соответственно, как для упругого материала и с учетом неупругих деформаций растянутого бетона.

W_0 и W_T — те же, сечения конструкции, приведенного к бетону сборных элементов.

b , b'_n и b_n — ширина ребра и ширина сжатой и растянутой полок сечения конструкции, приведенного к бетону сборных элементов.

h_0 , h'_n и h_n — рабочая высота поперечного сечения конструкции и высота сжатой и растянутой полок указанного сечения.

i_1 — расстояние от ц.т. приведенного сечения сборных элементов до ц.т. площади бетона в указанном сечении.

i_{mo} и i_{co} — расстояния от ц.т. сечения конструкции, приведенного к бетону сборных элементов, до ц.т., соответственно, площади монолитного бетона и площади бетона в сечении сборных элементов.

Принятые сокращения: ц.т. — центр тяжести;
н.о. — нейтральная ось;
с.о.к. — статически определимые конструкции;
с.н.к. — статически неопределимые конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. - Харьков: изд-во Харьковского университета, 1968, 323 с.
2. Инструкция по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из плотного силикатного бетона. СН 165-76. - М.: Стройиздат, 1977, 48 с.
3. Методические рекомендации по учету влияния ползучести бетона при расчете железобетонных стержней и стержневых систем / НИИСК Госстроя СССР.-Киев, 1981, 73 с.
4. Методические рекомендации по определению ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах / НИИСК Госстроя СССР.-Киев, 1982, 32 с.
5. Проектирование и изготовление сборно-монолитных конструкций. - Киев: Будівельник, 1982, 152 с.
6. Строительные нормы и правила, ч. II, гл. 21. "Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования" (СНиП II-21-75). - М.: Стройиздат, 1976, 89 с.
7. Улицкий И.И., Чжан Чжун-яо, Голышев А.Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. - Киев: Госстройиздат УССР, 1960, 495 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. Общие положения	3
2. Определение напряжений	4
3. Определение кривизн	11
4. Расчет по образованию трещин	19
5. Расчет по раскрытию трещин	20
6. Расчет по закрытию трещин	24
7. Определение усилий в многопролетных неразрезных балках	25
8. Определение параметров ползучести и усадки бетонов	30
Приложение. Примеры расчета	34
Условные обозначения	49
Литература	51

Научно-исследовательский институт строительных конструкций
Госстроя СССР

Александр Борисович Гольшев
Виталий Петрович Полищук
Валиахмат Файзуллаевич Усманов
и другие

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНОВ
ПРИ РАСЧЕТЕ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Редактор А.И.Капитоненко

Передано в произв. 17.12.82. Подп.к печ. 10.12.82. БФ 37179.
Формат бум. 60x84 1/16. Бум. для множ. аппаратов. Офсетная пе-
чать. 3,023 усл.п.л., 4,5 уч.-изд.л., 3,25 п.л.
Тираж 295 экз. Зак. № 2497. Цена 40 коп.

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

Ф.-п.л. НИИСП Госстроя УССР 252180 Киев, И.Клименко, 5/2