

РАСЧЕТ САМОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С АРМАТУРОЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Введение. При проектировании железобетонных конструкций из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напрягаемой комбинированным способом, необходимо определить количественные характеристики напряженного состояния в приопорной зоне, а также учесть в расчете влияние существующего напряженного состояния.

Экспериментально-теоретические исследования [1, 2] позволили установить ряд особенностей внутреннего напряженного состояния элементов с арматурой, предварительно напрягаемой физико-химическим и комбинированным способом:

- изменение армирования приопорной зоны (продольная арматура сосредоточена в растянутой и сжатой областях либо распределена по высоте сечения) в изгибаемых элементах из бетона на портландцементе не оказало существенного влияния на общую картину трещинообразования, на характер разрушения и величину разрушающей нагрузки;

- испытание изгибаемых элементов из напрягающего бетона, в которых вся арматура (продольная и поперечная) была предварительно напряжена физико-химическим способом, позволило установить ряд особенностей по сравнению с балками из обычного тяжелого бетона. Так увеличилось количество трещин при практически той же общей ширине раскрытия, а предельное раскрытие критической трещины ($W_k=0,4$ мм) было достигнуто при более высоком уровне нагрузки. Существенно сблизились углы наклона (общий и в верхней части) критической трещины;

- исследование влияния сеток косвенного армирования на характеристики напрягающего бетона и параметры внутреннего напряженного состояния показало:

- различие в прочности бетона на торцевых участках и в средней части образцов установить не удалось;

- средние деформации расширения бетона в образцах с сетками косвенного армирования, установленными на обоих торцевых участках, на 15,8% выше, чем у образцов без сеток косвенного армирования;

- связные деформации расширения бетона в элементе с сетками косвенного армирования и с арматурой, напрягаемой комбинированным способом, оказались меньше на 35%, чем у таких же образцов с арматурой, напрягаемой только физико-химическим способом.

Таблица 2. Классификация самонапряженных конструкций

Характеристика отличительных особенностей	Вид самонапряженных конструкций		
	СУ	С	СК
			a ¹ б ¹ в ²
Способ преднапряжения арматуры	физико-химический	физико-химический	физико-химический и комбинированный
Уровень напряжения обжатия бетона	не нормируется	до 6 МПа	до 0,75 f_{cm}
Использование напряженного состояния	для компенсации усадки	учитывается в расчете	учитывается в расчете
1 Условные обозначения самонапряженных конструкций С – конструкции с арматурой, предварительно напряженной физико-химическим способом, самонапряжение в которой используется при расчете; СУ – то же, самонапряжение в которой предназначено для компенсации деформаций усадки и при расчете не учитывается; СК – конструкции с арматурой, напряжения в которой создаются физико-химическим способом и любым другим способом, самонапряжение в которой используется при расчете			
2 Основная рабочая арматура может преднапрягаться комбинированным способом вся (а), а может только часть (б)			
3 Основная рабочая арматура имеет сцепление с бетоном (а, б) и не имеет сцепления с бетоном (в)			

Санникова Ольга Геннадьевна, ассистент кафедры геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Кондратчик Александр Аркадьевич, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

Область применения конструкций из напрягающего бетона.

При проектировании конструкций из напрягающего бетона необходимо учитывать физико-механические характеристики напрягающего бетона (таблица 1), а также большую по сравнению с бетоном на портландцементе коррозионную стойкость в магниальной среде (в 2 раза), в сульфатной и хлорсодержащей (в 3 раза) средах.

Таблица 1. Основные физико-механические характеристики напрягающего бетона

Наименование параметра	Диапазон значений
1. Прочность в возрасте 28 сут.:	
– при сжатии, Н/мм ²	30 (10)...80 (15)
– при растяжении, Н/мм ²	2,5...6,5
2. Свободное расширение, %	0,1...2,0
3. Самонапряжение, Н/мм ²	1,0...6,0
В скобках приведены значения суточной прочности при сжатии	

Применение железобетонных конструкций из напрягающего бетона должно базироваться на практической целесообразности создания требуемого напряженного состояния согласно классификации самонапряженных конструкций (таблица 2).

В таблице 3 приведена последовательность технологических операций при изготовлении железобетонных конструкций из напрягающего бетона, которая учитывает не только изменение параметров внутреннего напряженного состояния, но и их взаимовлияние.

Назначение величины предварительного напряжения. Назначение величины предварительного напряжения в арматуре, напрягаемой только физико-химическим способом, производится при рассмотрении расчетной ситуации в момент снижения величины самонапряжения бетона до нуля в результате действия внешней нагрузки [3].

$$\sigma_{s,CE1} = \sigma_{s,CE1,0} + \alpha_{CE} \sigma_{CE1} \leq k_p f_{yk};$$

$$\sigma_{s,CE2} = \sigma_{s,CE2,0} + \alpha_{CE} \sigma_{CE2} \leq k_p f_{yk}, \quad (1)$$

где $\sigma_{s,CE1,0}$ и $\sigma_{s,CE2,0}$ – предварительное напряжение в нижней и в верхней арматуре в результате самонапряжения бетона соответственно;

Таблица 3. Технология изготовления самонапряженных конструкций

Последовательность выполнения технологических операций	Способы предварительного напряжения арматуры в самонапряженных конструкциях		
	физико-химический	физико-химический и комбинированный ¹	физико-химический и комбинированный ²
1. Деформирование арматуры механическим способом ¹	нет	основной рабочей арматуры	нет
2. Укладка напрягающего бетона в опалубку	да	да	да
3. Деформирование арматуры физико-химическим способом	всей арматуры	всей арматуры	всей арматуры, кроме основной рабочей
4. Деформирование арматуры механическим способом ²	нет	нет	основной рабочей арматуры в каналах ³
1. Создание предварительного напряжения механическим способом осуществляется при натяжении продольной арматуры на упоры			
2. Создание предварительного напряжения механическим способом осуществляется при натяжении продольной арматуры на бетон			
3. Основная рабочая арматура не имеет сцепления с бетоном			

σ_{CE1} и σ_{CE2} – самонапряжение в бетоне на уровне центра тяжести нижней и верхней арматуры соответственно;

$$\alpha_E = E_s / E_{cm};$$

k_p – коэффициент, учитывающий класс напрягаемой комбинированным способом арматуры [3].

Расчет значений параметров из (1) следует производить согласно положений [4].

Величина предварительного напряжения в арматуре, напрягаемой комбинированным способом, назначается с учетом напряжений в арматуре, создаваемых физико-химическим способом:

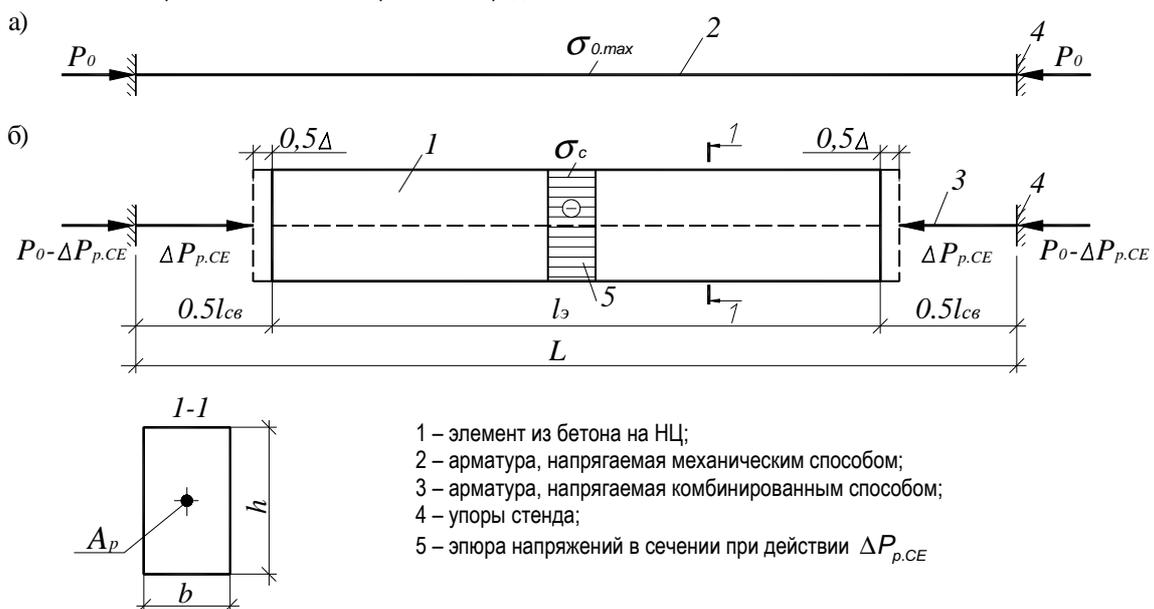
$$\begin{aligned} \sigma_{0,max} + \sigma_{CE.sp} + p &\leq k_p f_{pk}; \\ \sigma_{0,max} - \sigma_{CE.sp} - p &\geq 0,3 f_{pk}. \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_{0,max}$ – предварительное напряжение в арматуре, создаваемое механическим способом;

$\sigma_{CE.sp}$ – предварительное напряжение в арматуре, уже имеющей напряжения, физико-химическим способом;

p – нормируемое отклонение величины $\sigma_{0,max}$ при принятом механическом способе предварительного напряжения арматуры [3].

Изменение напряжения в арматуре, напрягаемой комбинированным способом, на стадии изготовления ($t=t_0$). Все расчеты следует выполнять в строгом соответствии с принятой очередностью



технологических операций и фиксируемом уровне напряжений в конкретный момент.

Потери от релаксации напряжений арматуры, созданных механическим способом, определяются в соответствии с п. 9.3.1.1 СНБ 5.03.01-02 [3].

Потери напряжения от деформаций анкерных устройств в арматуре, напрягаемой механическим способом, при расположении анкеров в зоне натяжных устройств определяются в соответствии с п. 9.2.1.3 [3]; от деформации стальной формы в соответствии с п. 9.3.1.5 [3].

Изменение напряжения в арматуре, напрягаемой физико-химическим способом. При предварительном напряжении арматуры, уже имеющей начальные напряжения, физико-химическим способом ($\sigma_{s,CE}$) следует учитывать появление дополнительного усилия $\Delta P_{p,CE}$ (рисунок 1) и развитие процесса самонапряжения при наличии начального напряженного состояния в бетоне коэффициентом k_n (рисунок 2).

$$\Delta P_{p,CE} = \Delta \sigma_{s,CE}^{ce} \cdot A_{sp}, \quad (3)$$

где $\Delta \sigma_{s,CE}^{ce}$ – снижение растягивающих напряжений на свободных участках арматуры:

$$\Delta \sigma_{s,CE}^{ce} = \varepsilon_{s,CE}^{ce} \cdot E_s = \Delta \cdot E_s / L_{ce} = \frac{\varepsilon_{s,CE} \cdot I_a \cdot E_s}{L_{ce}} = \sigma_{s,CE} \cdot k_n, \quad (4)$$

$\varepsilon_{s,CE}^{ce}$ – деформации арматуры на свободных участках;

Рис. 1. Схема действующих усилий при предварительном напряжении арматуры механическим способом (а) и комбинированном способом (б)

$\varepsilon_{s,CE}$ – деформации арматуры физико-химическим способом внутри элемента, определяемые по формуле:

$$\varepsilon_{s,CE} = \frac{f_{CE,d} \cdot k_p \cdot k_s \cdot k_e \cdot k_w \cdot k_0}{\rho_l \cdot E_s}, \quad (5)$$

$f_{CE,d}$ – расчетное значение самонапряжения согласно марке бетона по самонапряжению [4, 5];

k_p, k_e, k_s, k_w, k_0 – коэффициенты, учитывающие влияние армирования (k_p), его положение в сечении (k_e), наличие по направлению одной, двух или трех осей (k_s), условия увлажнения (k_w) и технологическую прочность бетона (k_0) соответственно [4, 6];

ρ_l – процент армирования сечения;

$k_n = l_s / l_{ce}$ – коэффициент, учитывающий соотношение длины арматуры, деформируемой физико-химическим способом, внутри элемента (l_s) к общей длине свободных участков арматуры (l_{ce}) между упорами и торцами элемента (рисунок 1).

Величина $\sigma_{s,CE}$ определится:

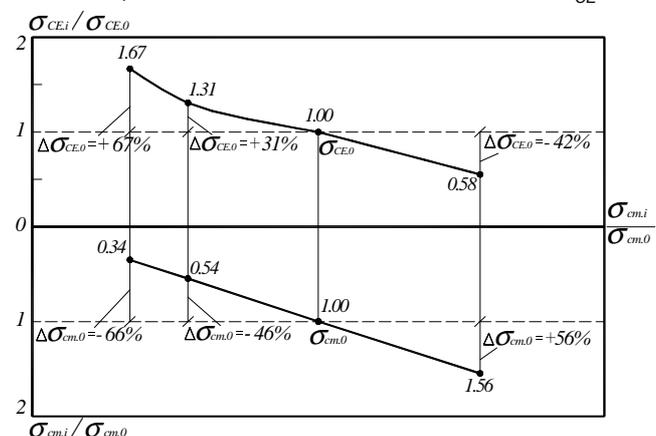
$$\sigma_{s,CE} = \varepsilon_{s,CE} \cdot E_s \cdot k_n. \quad (6)$$

Относительная деформация напрягаемой арматуры $\varepsilon_{s,CE}$ определится по (5).

Коэффициент k_n учитывает влияние напряженного состояния на достигаемую величину самонапряжения, так как усилие $\Delta P_{p,CE}$ будет создавать в сечении напряжения сжатия (рисунок 2).

$$k_n = 2 + \left[2 \frac{\sigma_c}{\sigma_{CE}} - 1 \right], \quad (7)$$

где $\sigma_c = \Delta P_{p,CE} / (b \cdot h)$ – среднее значение напряжения сжатия в сечении, принимается со своим знаком, но не более $0,5\sigma_{CE}$;



$\sigma_{CE,i}, \sigma_{cm,i}$ – самонапряжение и напряжение сжатия в элементе;
 $\sigma_{CE,0}, \sigma_{cm,0}$ – самонапряжение и напряжение сжатия $\sigma_{cm,0} = 0,5\sigma_{CE,0}$ в контрольном элементе.

Рис. 2. Влияние сжимающих и растягивающих напряжений на величину самонапряжения

σ_{CE} – значение самонапряжения в бетоне без учета действия $\Delta P_{p,CE}$.

$$\sigma_{CE} = \frac{P_{mt,CE}}{b \cdot h} = \frac{\sigma_{s,CE} \cdot A_{sp}}{b \cdot h}. \quad (8)$$

Потери, вызванные упругой деформацией бетона, при полной передаче усилия обжатия с упоров на бетон.

При $\Delta P_{p,CE} = P_{0,c} = P_0 - \sum \Delta P_i$ произойдет полная передача усилия натяжения арматуры механическим способом с упоров на бетон.

При $\Delta P_{p,CE} < P_{0,c} = P_0 - \sum \Delta P_i$ произойдет частичная передача усилия натяжения арматуры механическим способом с упоров на бетон.

Снижение величины предварительного напряжения в арматуре элемента будет происходить при плавном, постепенном возрастании $\Delta P_{p,CE}$ вследствие упругой деформации бетона и определится по зависимости (9.19) СНБ 5.03.01-02 [3].

$$\Delta \sigma_c = \alpha \cdot \rho_p \cdot \left(1 + Z_{cp}^2 \frac{A_c}{I_c} \right) \cdot \frac{P_{0,c}}{A_{sp}}, \quad (9)$$

где $\rho_p = A_p / A_c$;

$Z_{cp} = 0$ (согласно рисунку 1);

$P_{0,c}$ – усилие предварительного натяжения арматуры механическим способом с учетом потерь к моменту обжатия бетона;

$\alpha = E_s / E_{cm(t)}$ при E_{cm} , соответствующем моменту обжатия бетона.

При проектировании самонапряженных конструкций с арматурой, напрягаемой комбинированным способом, следует иметь в виду, что расширение бетона, возрастание его прочности, появление усилия обжатия ($\Delta P_{p,CE}$) будут происходить одновременно. С целью исключения проскальзывания напрягаемой арматуры в таких конструкциях обязательным является косвенное армирование торцевых участков. Учитывая то, что косвенная арматура будет предварительно напрягаться физико-химическим способом, она будет активно включаться в процесс увеличения сил сцепления арматуры с бетоном, образуя так называемый “внутренний анкер”.

Определение величины усилия предварительного обжатия $P_{m,0}$ к моменту времени $t=t_0$, действующего непосредственно после передачи усилия обжатия (т. н. начальная расчетная ситуация).

$$P_{m,0} = P_0 - \sum \Delta P_i + \Delta P_{CE}; \quad (10)$$

$$A_{sp} \cdot \sigma_{mp,0} = A_{sp} (\sigma_{0,max} - \sum \Delta \sigma_{si} + \sigma_{s,CE}),$$

где $\sum \Delta P_i$ – потери усилия предварительного напряжения от релаксации напряжений в арматуре, от деформации анкеров, упругой деформации бетона и т. д. в зависимости от принятого способа предварительного напряжения арматуры механическим способом;

P_{CE} – усилие в предварительно напряженной комбинированным способом арматуре:

$$P_{CE} = \sigma_{CE} \cdot b \cdot h = \varepsilon_{s,CE} \cdot E_s \cdot A_{sp}. \quad (11)$$

При проектировании следует контролировать изменение напряжения в арматуре, напрягаемой комбинированным способом, в начальной расчетной ситуации при $t=t_0$, ограничивая ее величину по условию (9.21) СНБ 5.03.01-02 [3]:

$$P_{m,0} = \sigma_{p,m,0} \cdot A_{sp} \leq 0,75 \cdot f_{pk} \cdot A_{sp}. \quad (12)$$

При необходимости, в зависимости от принятой марки бетона по самонапряжению и условий изготовления, может понадобиться корректировка значения $\sigma_{0,max}$ из зависимости (2) на стадии расчета. Общие сжимающие напряжения в бетоне в момент полной передачи усилия обжатия не должны превышать значений по п. 9.6.1 СНБ 5.03.01-02 [3].

Изменение напряжения в арматуре, напрягаемой комбинированным способом, к моменту времени $t > t_0$ (на стадии эксплуатации).

Изменение усилия обжатия на стадии эксплуатации из-за усадки и ползучести бетона, а также длительной релаксации напряжений в арматуре определится:

$$\Delta P_t(t) = \Delta \sigma_{p,c+s+r} \cdot A_{sp}, \quad (13)$$

где $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$ – потери предварительного напряжения, вызванные усадкой и ползучестью бетона и релаксацией напряжений в арматуре:

$$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p + \Delta \sigma_{pr} + \alpha_p \cdot \Phi(t, t_0) \cdot (\sigma_{cp} + \sigma_{cp,0})}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot (1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2) \cdot [1 + 0,8 \cdot \Phi(t, t_0)]}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ – ожидаемое значение усадки к моменту времени t , определяемое по указаниям раздела 2.1.4 [7]. При эксплуатации элемента во влажных условиях $\varepsilon_{cs}(t, t_0) = 0$;

$\Phi(t, t_0)$ – коэффициент ползучести за период времени от t_0 до t , учитывая влажность среды, возраст и прочность бетона, консистенцию бетонной смеси и т. д. по указаниям раздела 2.1.4 [7];

σ_{cp} – напряжения в бетоне на уровне центра тяжести напрягаемой комбинированным способом арматуры от практически постоянного сочетания нагрузок, включая только собственный вес;

$\sigma_{cp,0} = \sigma_{p,m,0}$ – начальное напряжение в бетоне на уровне центра тяжести напрягаемой комбинированным способом арматуры с учетом первых потерь в момент времени $t=t_0$;

$\Delta \sigma_{pr}$ – изменение напряжения в арматуре, напрягаемой комбинированным способом, вызванное релаксацией арматурной стали, согласно п. 9.3.2.2 [3].

Определение усилия предварительного обжатия к моменту времени $t > t_0$ (т. е. с учетом всех потерь на стадии эксплуатации).

$$P_{m,t} = P_{m,0} - \Delta P_t(t), \quad (15)$$

$$P_{m,t} \leq 0,65 f_{pk}, \quad (16)$$

$$P_{m,t} \leq P_0 - 100 A_{sp},$$

где $P_{m,t}$, $P_{m,0}$, P_0 принимается в кН, а A_{sp} в мм².

Определение величины усилия обжатия для выполнения расчетов по предельным состояниям первой и второй группы. При расчете предварительно напряженной конструкции по предельным состояниям первой группы следует принимать усилие предварительного обжатия (расчетное значение), соответствующее рассматриваемой расчетной ситуации [3]:

$$P_d = \gamma_p \cdot P_{m,t}, \quad (17)$$

где γ_p – частный коэффициент безопасности для усилия предварительного обжатия, принимаемый 0,9 или 1,0 при благоприятном эффекте и 1,2 или 1,0 – при неблагоприятном эффекте.

При расчете предварительно напряженной конструкции по предельным состояниям второй группы следует принимать усилие предварительного обжатия (нормативное значение), соответствующее рассматриваемой расчетной ситуации [3]:

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{m,t}, \quad (18)$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{m,t}, \quad (19)$$

где $r_{sup} = 1,1$ – коэффициент, определяющий верхнее значение усилия предварительного обжатия при создании начальных напряжений в арматуре механическим способом при натяжении на упоры;

$r_{inf} = 0,9$ – коэффициент, определяющий нижнее значение

усилия предварительного обжатия при создании начальных напряжений в арматуре механическим способом при натяжении на упоры.

Учет полученного напряженного состояния в железобетонных элементах из напрягающего бетона с предварительным напряжением продольной рабочей арматуры комбинированным способом в расчетах по предельным состояниям первой и второй группы следует осуществлять в соответствии с требованиями СНБ 5.03.01-02 [3].

Заключение. Отличительной особенностью железобетонных конструкций с предварительным напряжением арматуры комбинированным способом, т. е. когда продольная арматура напрягается механическим и физико-химическим способами, является наличие исходного напряженного состояния. Представленные выше зависимости позволяют производить расчет данных конструкций на любой стадии их изготовления с учетом всех потерь предварительного напряжения арматуры и наличии начальных параметров напряженно-деформированного состояния.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка методики расчета железобетонных конструкций из напрягающего бетона с комбинированным преднапряжением арматуры: отчет о НИР (промежуточный): 06/609 / БрГТУ; рук. Кондратчик А. А. – БрГТУ, 2009. – 54 с. – Исполн.: Марчук В. А., Санникова О. Г., Тур А. В. – Библиогр.: с. 54. – № ГР 20064330.
2. Санникова, О.Г. Развитие деформаций расширения напрягающего бетона в железобетонных элементах с физико-химическим и комбинированным преднапряжением арматуры / О.Г. Санникова, А.А.Кондратчик // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61): Строительство и архитектура. – С. 86–90.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. / Минархстрой РБ – Мн., 2003 – 139 с.
4. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест: Изд. БПИ, 1998. – 246 с.
5. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01-84 "Бетонные и железобетонные конструкции") / НИИЖБ Госстроя СССР и ЦНИИ-Промзданий Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 64 с.
6. Кондратчик, А.А. Повышение эффективности использования арматуры приопорной зоны железобетонных балочных элементов / А.А. Кондратчик, О.Г. Гарах // Вестник Полоцкого государственного университета. Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 6. – С. 60–64.
7. Кондратчик, А.А. Экспериментально-теоретические основы расчета конструкций из напрягающего бетона при совместном действии изгибающего момента, продольных и поперечных сил / А.А. Кондратчик. – Брест: Издательство БрГТУ, 2007. – 172 с.

Материал поступил в редакцию 21.01.11

SANNIKOVA O.G., KONDRATCIK A.A. Account of the self-intense designs with the fixture, previously intense by a combined way

The application area of self-stressing structures is reviewed. The order of calculation of self-stressing structures with combined prestressed reinforcement at any stage of production is presented.