

С.А. ТУР

Брестский государственный технический университет

## К РАСЧЕТУ ПОСТ-НАПРЯГАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С НАПРЯГАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, НЕ ИМЕЮЩИМИ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ

В настоящей статье представлены некоторые из существующих предложений и методик расчета изгибаемых предварительно напряженных элементов без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Эта задача является актуальной в связи с введением в Республике Беларусь европейских норм проектирования, или т. наз. «Конструкционных Еврокодов» (Structural Eurocodes).

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с переходом на строительство монолитных каркасов, особенно в высотном строительстве, актуальным является выполнение предварительного напряжения перекрытий в построечных условиях. Для этих целей широко применяют пост-напряженные конструкции с натяжением напрягаемых элементов на бетон.

Введение в Республике Беларусь европейских норм проектирования, или т. наз. «Конструкционных Еврокодов» (Structural Eurocodes), требует разработки национальных приложений, в рамках которых должны быть определены национальные параметры и требования к расчетам (National Determined Parameters, NDP).

Нормирование приращений в напрягаемой арматуре без сцепления с бетоном в предельной стадии - одно из этих требований. Следует отметить, что в отличие от норм ряда стран и предложений отдельных исследователей, EN1991-1-1 [12] рекомендует принимать постоянное значение  $\Delta f_{ps} = 100 \text{ Н/мм}^2$ .

В представленной статье рассмотрены и проанализированы предложения и рекомендации различных норм и исследователей на фоне опытных данных.

### ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ИЗГИБАЕМЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

При отсутствии сцепления арматуры с окружающим бетоном приращение напряжений в арматуре от действия эффектов от нагрузки распределяется

одинаково по всей длине стержня. Это обстоятельство изменяет характер трещинообразования элементов, ведет к увеличению прогибов и ширины раскрытия трещин. При этом разрушение таких элементов происходит, как правило, при меньших нагрузках в результате раздавливания бетона сжатой зоны. Прочностные свойства напрягаемой арматуры зачастую оказываются недоиспользованными [4].

Несмотря на то, что бетонные элементы, подвергаемые предварительному обжатию арматурой без сцепления с бетоном, в большинстве случаев имеют конструктивное армирование, его в большинстве случаев не учитывают в расчетах. Вместе с тем, если часть арматуры (напрягаемой или ненапрягаемой) имеет сцепление с бетоном, это может существенно повлиять на характер трещинообразования и разрушения такого элемента.

Чтобы рассмотреть работу такого элемента в предельном состоянии, необходимо определить прирост напряжений в свободной арматуре (арматуре, не имеющей сцепления с бетоном).

Согласно Politalski [14], польские нормы [13] и Eurocode 2 [12] рекомендуют принимать прирост напряжений в арматуре без сцепления в предельном состоянии равным 100 МПа. Аналогичное значение было принято и в американских нормах ACI 318-63. Актуальное издание этих норм [11] рекомендует рассчитывать величину приращения напряжений как зависимость от трех параметров: прочности на сжатие бетона, коэффициента армирования преднатянутой арматуры и отношения пролета к высоте элемента.

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps} &= 70 + f_c^1 / (100 \cdot \rho_p) \leq 420 \text{ МПа для } L/d_p \leq 35 \\ \Delta f_{ps} &= 70 + f_c^1 / (300 \cdot \rho_p) \leq 200 \text{ МПа для } L/d_p > 35 \end{aligned} \quad (1)$$

Очевидно, что уравнения, предлагаемые ACI [11], могут обеспечить прирост напряжений в предельной стадии в пределах от 70 до 420 МПа, что можно считать как и опасным, так и консервативным результатом по сравнению с требованием европейского стандарта.

Важно отметить, что положения ACI норм опираются на большое количество испытаний и значительный опыт в изготовлении подобного рода конструкций.

В работах А.И. Хачатряна и В.Б. Титуса [10, 7] по исследованию предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном указывается на равномерное распределение приращения напряжений  $\sigma_{sp,ub}$  по всей длине стержня без сцепления с бетоном. При этом показано, что в момент разрушения напряжения в арматуре не достигают временного сопротивления разрыву ( $f_{pk}$ ).

На основании результатов выполненных исследований был сделан вывод о том, что напряжения в крайнем сжатом волокне бетона при разрушении сечения достигают предельных значений, а эпюру распределения напряжений

в сжатой зоне можно принимать прямоугольной. При этом, напряжения в напрягаемой арматуре без сцепления пропорциональны призмочной прочности бетона  $f_{cm}$  и рабочей высоте сечения  $d$ , обратно пропорциональны коэффициенту армирования  $\rho_e$  и длине пролетов  $l$ . Полная величина напряжений в растянутой арматуре без сцепления в предельной стадии составляет:

$$\sigma_{sp,uh} = \sigma_{sp,0} + 2\alpha f_{ctm} + k_1 \frac{f_{cm} \cdot d}{\rho_e \cdot l} \leq f_{pk,02} \quad (2)$$

где  $k_1$  - опытный коэффициент.

Используя эту формулу для определения напряжений в растянутой арматуре расчет прочности предлагается выполнять в соответствии с методикой, изложенной в СНиП [6].

В проекте «Пособия по проектированию железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном» (к СНиП 2.03.01.84\*) [3], разработанного под руководством А.И. Мордича, при расчете прочности нормальных сечений предложено использовать метод предельных усилий, изложенный в СНиП [6], принимая равномерное распределение сжимающих напряжений по высоте условной сжатой зоны сечения (прямоугольный блок напряжений). При этом величину предельных напряжений в свободной напрягаемой арматуре для одно- и многопролетных ригелей, балок, одноосно напряженных плит рекомендовано определять по формуле:

$$\sigma_{sp,uh} = \sigma_{sp,0} + 3,5\alpha \cdot f_{ctd} + \beta \frac{f_{cd} \cdot x}{100\rho_e} \leq f_{pd} \quad (3)$$

В случае двухосно напряженных плит предложено использовать следующую формулу:

$$\sigma_{sp,uh} = \sigma_{sp,0} + 2\alpha \cdot f_{ctd} + \frac{f_{cd}}{100\rho_e} \cdot \frac{d_p}{l} \leq f_{pd} \quad (4)$$

В «Рекомендациях по расчету железобетонных предварительно напряженных изгибаемых элементов без сцепления арматуры с бетоном» [2], разработанных под руководством П.И. Васильева и О.А. Рочняка, описана, так называемая, блочно-контактная расчетная модель для изгибаемых элементов без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Согласно принятому подходу, предварительно напряженные железобетонные балки с продольной арматурой без сцепления с бетоном после образования нормальных трещин превращаются в систему блоков, соединенных между собой в сжатой зоне, и передающих распор через крайние блоки на предварительно напряженные стержни. Напряжения в продольной арматуре на всех стадиях (до и после образования трещин) одинаковы по всей длине. Разрушение блочной системы происходит либо вследствие раздавливания сжатого бетона в месте контакта блока, либо от потери устойчивости отслоившейся сжатой зоны.

По способу, предложенному профессором П. И. Васильевым и А.А. Вайсфельдом [1], расчет прочности нормальных сечений элементов, не имеющих сцепления напрягаемой арматуры с бетоном, предложено выполнять, принимая линейный закон распределения по высоте сечения средних деформаций в зоне максимальных изгибающих моментов (рис. 1).

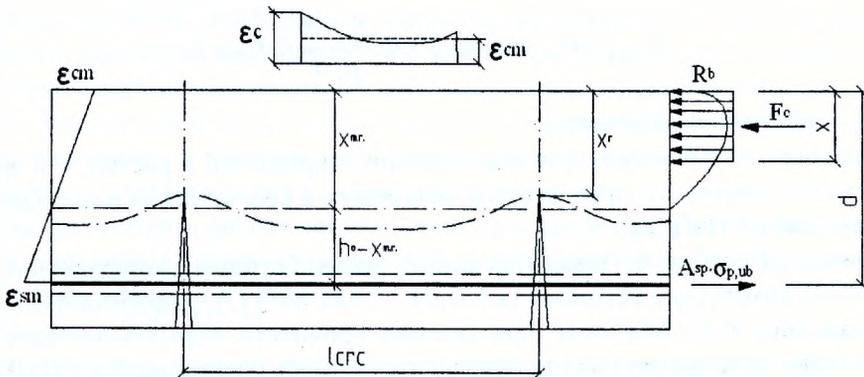


Рис. 1. К расчету прочности нормальных сечений по способу проф. П.И. Васильева и А.А. Вайсфельда [1]

Профессором О.А. Рочняком при составлении проекта СНБ 5.03.01 [5] были внесены предложения по расчету прочности нормальных сечений конструкций без сцепления арматуры с бетоном, базирующиеся на следующих предпосылках:

- принимается линейное распределение средних деформаций по высоте сечений в зоне действия изгибающих моментов, т.е. для среднего сечения по длине элемента выполняется гипотеза плоского деформирования;
- исчерпание прочности происходит при достижении в крайнем волокне конструкции относительных укорочений, равных предельной сжимаемости  $\epsilon_{сн}$ .

Расчетная схема изгибаемого элемента без сцепления при расчете прочности показана на рисунке 2.

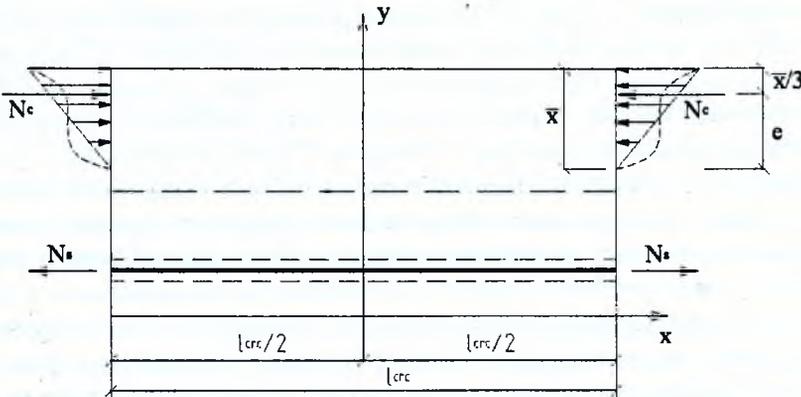


Рис. 2. Расчетная схема

В таблице 1 обобщены наиболее известные расчетные зависимости, изменяемые для определения  $\Delta f_{ps}$ . Следует отметить, что если не принимать во внимание некоторые незначительные, все они имеют общую основу.

Таблица 1. Расчетные зависимости для определения  $\Delta f_{ps}$

№ п/п	Источник, автор	Расчетная зависимость для $\Delta f_{ps}$
1	EN1992-1-1 (EUROCODE-2) [12]	$\Delta f_{ps} = 100 \text{ МПа (const)}$
2	Хачатрян А.И., Титус Б.В. [7, 10]	$\Delta f_{ps} = 2\alpha f_{ctm} + k_1 \frac{f_{cm} \cdot d}{\rho_e \cdot l}$ Полные напряжения в предельной стадии: $\sigma_{sp,uh} = \sigma_{pm,x} + \Delta f_{ps} \leq f_{pk,02} \cdot k_1$ - опытный коэффициент
3	ACI 318[11]	$\Delta f_{ps} = 70 + f_c' / (100 \cdot \rho_p) \leq 420 \text{ МПа}$ для $L/d_p \leq 35$ $\Delta f_{ps} = 70 + f_c' / (300 \cdot \rho_p) \leq 200 \text{ МПа}$ для $L/d_p > 35$
4	Пособие [3]	Для балок: $\Delta f_{ps} = 3,5\alpha \cdot f_{ctd} + \beta \frac{f_{ctd} \cdot x}{100\rho_p} \leq f_{pd}$ Для плит: $\Delta f_{ps} = 2\alpha \cdot f_{ctd} + \frac{f_{ctd}}{100\rho_p} \cdot \frac{d_p}{l} \leq f_{pd}$ Полное напряжение в предельной стадии: $\sigma_{sp,uh} = \sigma_{pm,x} + \Delta f_{ps}$
5	Отчет [16]	Для середины пролета: $\Delta f_{ps} = \frac{d}{17L} E_p$ На опоре: $\Delta f_{ps} = \frac{2d}{17L} E_p$ , $d$ - рабочая высота сечения; $L$ - расстояние между анкерами; $E_p$ - модуль упругости. Полные напряжения в предельной стадии: $f_p = \sigma_{pm,x} + \Delta f_{ps}$

Как видно из зависимостей, представленных в таблице 1, приращения в напрягаемой арматуре принимает либо как некоторую константу, либо в виде функции, базисными переменными которой является содержание напрягаемой арматуры в сечении и прочность бетона при сжатии.

В отличие от большинства методов, расчетный метод, описанный в ТКП/ОР/45-5.01[8], учитывает работу ненапрягаемой арматуры, имеющей сцепление с бетоном, минимальное количество которой определяется исходя из требований норм.

В соответствии с требованиями [8] в предельном состоянии по прочности растягивающее усилие, вызванное расчетным изгибающим моментом, воспринимается одновременно как напрягаемой, так и ненапрягаемой арматурой.

В предварительно напряженных конструкциях с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном, в растянутой при эксплуатационных нагрузках зоне, следует предусматривать установку арматуры, имеющей сцепление с бетоном. Предварительно количество арматуры, имеющей сцепление с бетоном, определяется расчетом из условия ограничения ширины раскрытия трещин, как для внецентренно сжатого элемента при продольной силе  $N_{pd}$  (равнодействующая усилия предварительного обжатия). В связи с тем, что ненапрягаемая арматура обеспечивает резервы прочности, рекомендуется принимать чтобы 50÷60% предельного расчетного усилия, действующего в сечении, должно быть воспринято напрягаемой арматурой и оставшиеся 40÷50% - ненапрягаемой арматурой, имеющей сцепление с бетоном. Минимальный процент армирования арматурой, имеющей сцепление с бетоном, при этом должен быть не менее, чем 0,15%. Следует отметить, что количество ненапрягаемой арматуры зависит от прогнозируемой величины обжатия, что было показано в наших работах [9]. С ростом усилия обжатия увеличивается количество ненапрягаемой арматуры.

Расчет предварительно напряженных элементов с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном по предельным состояниям первой и второй групп производится согласно требованиям СНБ 5.03.01 [5]. Усилия предварительного обжатия, определенное с учетом всех потерь, следует рассматривать как внешнее усилие, приложенное к конструкции.

В работе О.Л. Образцова [4] рассматривались конструкции, предварительно напряженные которых осуществлялось при помощи натяжения арматуры без сцепления на напрягающий бетон. В рамках данной работы была разработана деформационная модель для расчета изгибаемых комбинированно напряженных элементов, не имеющих сцепления напрягаемой арматуры с бетоном. Общий алгоритм расчета прочности сечений, нормальных к продольной оси приведен на рисунке 3.

Для участков элемента, работающих без трещин при условии, что  $M_x \leq M_{cr}$  напряжения в арматуре и бетоне рассчитывают исходя из уравнений упругого деформирования:

– напряжения в арматуре, не имеющей сцепления с бетоном:

$$f_{ps,ub} = f_{po,ub} + \frac{\varpi \cdot Mx(i, j) \cdot e_c}{A_{p,ub} \left( \frac{J_{red}}{A_{red}} + e_c^2 \right) + \frac{J_{red} \cdot E_c}{E_{ps}}} \quad (5)$$

– напряжения в арматуре, имеющей сцепление с бетоном:

$$f_s = \frac{E_s}{E_c} \left[ \frac{Mx(i, j) \cdot (d - y_l)}{J_{red}} - \frac{A_{p,ub} \cdot f_{ps,ub}}{A_{red}} \left( 1 - \frac{e_c \cdot (d - y_l) A_{red}}{J_{red}} \right) \right] \quad (6)$$

– напряжения в бетоне:

$$f_c = \frac{A_{p,ub} \cdot f_{ps,ub}}{A_{red}} \left[ \left( 1 - \frac{e_c \cdot y_l \cdot A_{red}}{J_{red}} \right) \right] + \frac{Mx(i, j) \cdot y_l}{J_{red}} \quad (7)$$

где  $f_{ps,ub}$  - начальное (эффективное) предварительное напряжение в арматуре без сцепления с бетоном;  $y_l$  - расстояние от ц.т. приведенного сечения до его наиболее сжатой грани;  $e_c$  - эксцентриситет усилия предварительного напряжения;  $\varpi$  - понижающий коэффициент, учитывающий отсутствие сцепления напрягаемой арматуры с бетоном.

Для сечений, располагаемых в области, работающей с трещинами ( $M_x \geq M_{cr}$ ), расчет напряженно-деформированного состояния выполняют с использованием итерационных процедур, учитывая нелинейную работу материалов, при этом используются положения общей расчетной деформационной модели при совместном действии изгибающих моментов и продольных сил согласно [5]. При этом, эффект от предварительного напряжения и самонапряжения учитывают в расчетных уравнениях общего деформационного метода частично в уравнениях прочности сечения  $N_{Rd}$ ,  $M_{Rd}$  и частично в векторе усилий от внешних нагрузок  $N_{Sd}$  и  $M_{Sd}$ .

Усилие в растянутой напрягаемой арматуре, не имеющей сцепления с бетоном рассчитывают по формуле:

$$F_{p,ub} = \Delta \sigma_{p,ub} \cdot A_{p,ub} \quad (8)$$

где  $\Delta \sigma_{p,ub} = f(\varepsilon_{pm} + \Delta \varepsilon_p^I + \Delta \varepsilon_p^{II}) - f(\varepsilon_{pm})$  - приращение напряжений в напрягаемой арматуре, вызванное действием усилий от внешней нагрузки;  $\varepsilon_{pm}$  - начальные относительные деформации с учетом потерь;  $\Delta \varepsilon_p^I = \frac{\sigma_{cp}}{E_{cm}}$  - приращение деформаций в напрягаемой арматуре в момент погашения усилия обжатия  $\sigma_{cp}$  в бетоне на уровне напрягаемой арматуры, рассчитываемые исходя из упругой работы бетона;  $\Delta \varepsilon_p^{II} = \frac{d_p - x}{x} \varepsilon_{cc}$  - приращение относительных деформаций в напрягаемой арматуре после погашения обжатия в бетоне.

Если в процессе итерационного решения условия равновесия выполняются, определяют удлинение арматуры, не имеющей сцепления с бетоном, на рассматриваемом участке разбиения:

$$\Delta l_{i,j} = \delta l \cdot \Delta \varepsilon_{p,ub(i,j)} \quad (9)$$

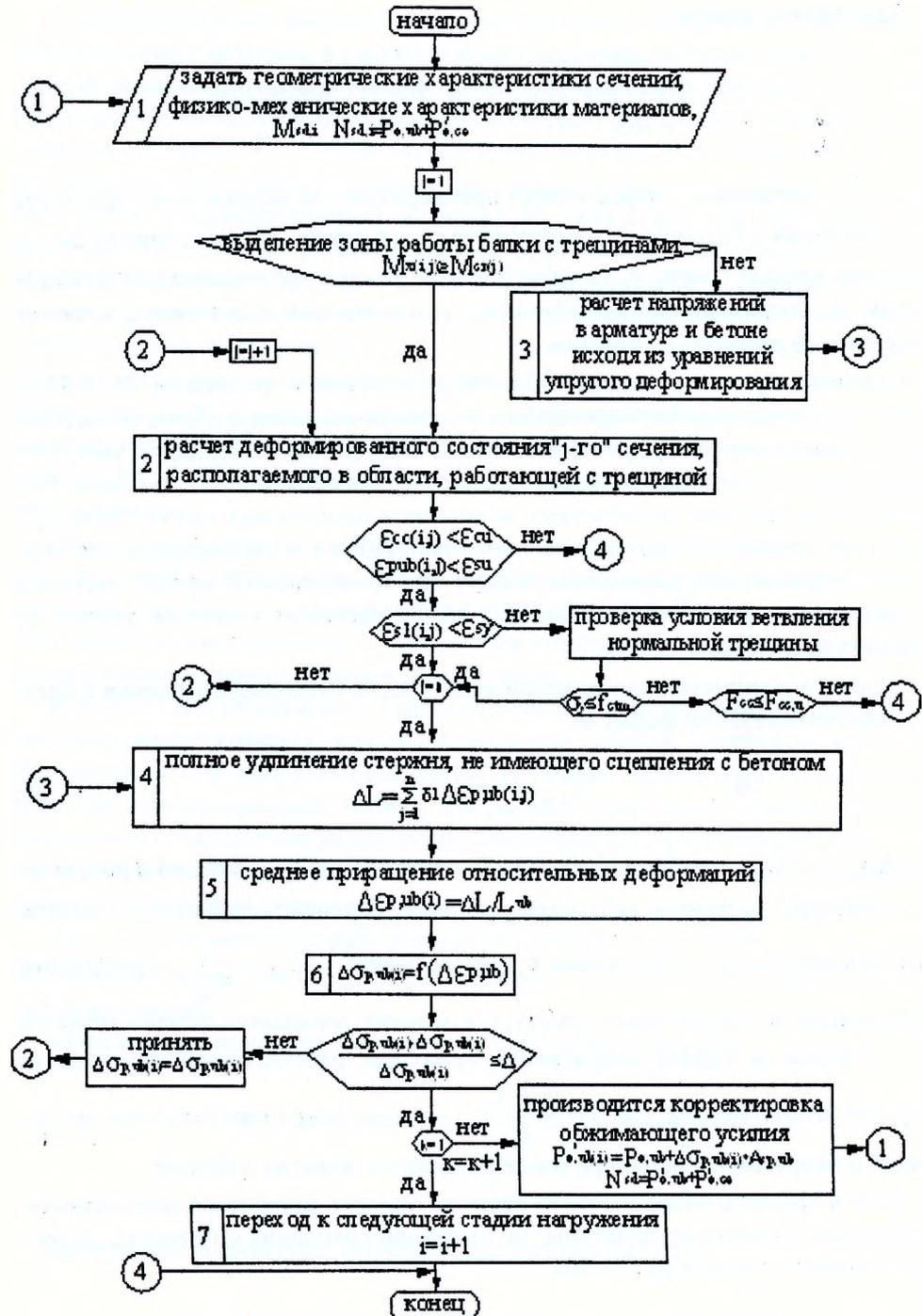
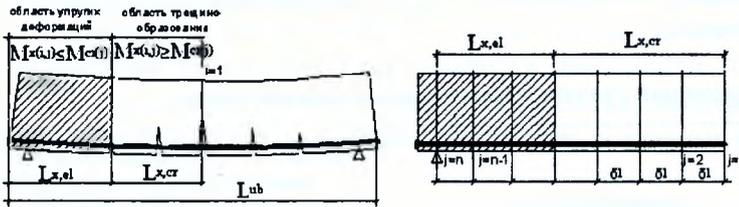


Рис. 3. Общий алгоритм расчета прочности сечений, нормальных к продольной оси

а)



б)

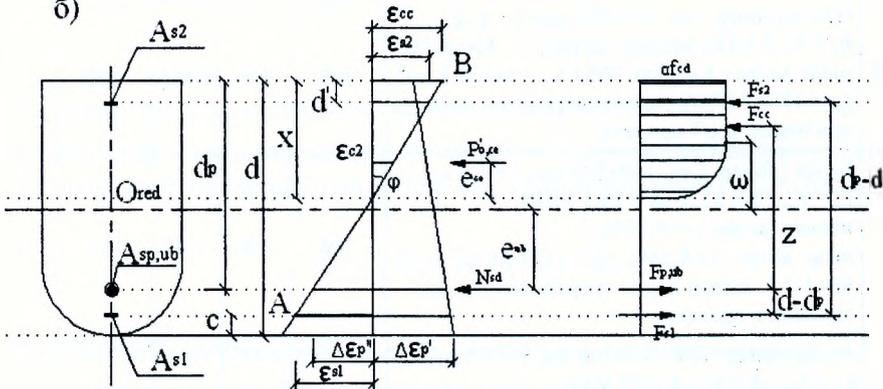


Рис. 4. К расчету прочности комбинированно армированных элементов:  
 а) разделение балки на области, работающие с нормальными трещинами и без них;  
 б) схема распределения деформаций и усилий в расчетном сечении с трещиной с арматурой, сосредоточенной у сжатой и растянутой грани при использовании линейно-параболической диаграммы для бетона [4]

Полное удлинение стержня, не имеющего сцепления с бетоном, на «i» уровне нагружения:

$$\Delta L_i = \sum_{j=1}^n \delta l \cdot \Delta \varepsilon_{p,ub(i,j)} \quad (10)$$

Тогда среднее приращение относительной деформации стержня, не имеющего сцепления с бетоном:

$$\overline{\Delta \varepsilon_{p,ub(i)}} = \frac{\Delta L}{L_{ub}} \quad (11)$$

где  $L_{ub}$  - расстояние между точками закрепления напрягаемой арматуры без сцепления.

Пользуясь диаграммой деформирования для напрягаемой арматуры по установленным средним приращениям деформаций, определяют среднее приращение напряжений  $\overline{\Delta \sigma_{p,ub}}$ .

В таблице 2 представлен упрощенный сравнительный анализ исследований различных авторов, относящихся к вопросу работы элемента с арматурой, не имеющей сцепления.

Таблица 2. Упрощенный сравнительный анализ исследований

Автор, источник	Опытный образец	Приращения напряжений в напрягаемом элементе без сцепления, $\Delta f_{ps}$ , МПа				
		Опытное	EN	ACI	Пособие	О.Л. Образцов
W. Politalski [14]	Плита (попер. сеч. 200x600 мм; $l = 8$ м; $f_{ck} = 51,5$ МПа; ненапр. ар-ра: $f_{yk} = 500$ МПа напр. ар-ра - 3 каната 7Ø5 ( $A_p = 3 \times 150,5$ мм <sup>2</sup> , $f_{pk} = 1888$ МПа)); нагр-н сосредоточ. силами, приложен. в 1/3 пролета	349	100	204,6	202	–
О.Л. Образцов [4]	Балка (попер. сеч. 100x200 мм; $l = 1,5$ м; $f_{ck} = f_{cm} - 8 = 33,3 - 8 = 25,3$ МПа ненапр. ар-ра: $\rho = 0,25\%$ ; напр. ар-ра: $\rho = 0,56\%$ , $f_{pk} = 1127$ МПа) Бн-А-I-3; нагр-н двумя сосредоточ. силами, прилож. в пролете	300	100	130	107	320
	Балка (попер. сеч. 100x200 мм; $l = 1,5$ м; $f_{ck} = f_{cm} - 8 = 30 - 8 = 22$ МПа ненапр. ар-ра: $\rho = 0,535\%$ ; напр. ар-ра: $\rho = 0,56\%$ , $f_{pk} = 1127$ МПа) Бн-А-II-3; нагр-н двумя сосредоточ. силами, прилож. в пролете	330	100	124	102	460
	Балка (попер. сеч. 100x200 мм; $l = 1,5$ м; $f_{ck} = f_{cm} - 8 = 41 - 8 = 33$ МПа ненапр. ар-ра: $\rho = 0,75\%$ ; напр. ар-ра: $\rho = 0,56\%$ , $f_{pk} = 1127$ МПа) Бн-А-III-3; двумя сосредоточ. силами, прилож. в пролете	345	100	143	135	390

Как видно из таблицы 2, результатам испытаний, выполненных в работе [4], наиболее точно соответствуют значения  $\Delta f_{ps}$ , полученные при расчете по деформационной модели, описанной в [4] ( $\Delta = 6\%$ ,  $28\%$  и  $11\%$ ). Однако, ввиду тредоемкости данной модели и возможного недостатка необходимых исходных данных, для практических расчетов рекомендуется применять метод, предложенный ACI [11], учитывающий прочность бетона на сжатие, коэффициент армирования преднапряженной арматуры и отношение пролета к высоте элемента, но дающий несколько консервативный результат ( $\Delta = 50\% \div 60\%$ ).

Исследования [4, 14] показали, что приращение напряжений зависят главным образом от геометрии и деформаций системы, условий закрепления на контуре.

В современных публикациях [15] приращение напряжений в свободной напрягаемой арматуре в предельной стадии суммируются с т. наз. эффективным пост-напряжением (с учетом потерь от трения, усадки, ползучести и релаксации). Предельное состояние устанавливается в зависимости от величины предельного прогиба  $a_{lim}$ . При таком подходе приращение напряжений в пролетной напрягаемой арматуре может быть определено из простых геометрических решений.

Так, при отсутствии ограничения горизонтальных перемещений зависимость имеет вид:

$$\frac{\Delta l}{l} = 4 \frac{a_{lim}}{l} \frac{y_p}{l} = 3 \frac{a_{lim}}{l} \frac{d_p}{l} \quad (12)$$

при условии треугольной эпюры прогибов и  $y_p = 0,75 d$ .

В случае, когда горизонтальные перемещения ограничены (например, средний пролет неразрезной балки) относительное удлинение может быть рассчитано:

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \frac{(a_{lim})^2}{l} + 4 \frac{a_{lim}}{l} \cdot \frac{h_p}{l} \quad (13)$$

Приращение напряжений следует определять по диаграмме « $\sigma_p - \varepsilon_p$ » для напрягаемой арматуры. Если арматура работает в упругой стадии ( $E_p$ ) приращения напряжений можно рассчитать по формуле:

$$\Delta f_{ps} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{l}{L} E_p = \frac{\Delta l}{L} E_p \quad (14)$$

где  $l$  - пролет балки;  $L$  - общая длина каната (расстояние между анкерами).

В заключение следует отметить, что все проанализированные методы, обладая в большей или меньшей степени условностями, не учитывают в полной мере особенностей деформирования элементов с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Наблюдается ограниченное число как экспериментальных работ, так и предложений по расчету конструкций со смешанным армированием, у которых часть арматуры имеет сцепление с бетоном.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев П.И., Разработка методов расчета и проектирование железобетонных конструкций, В кн.: Известия ВНИИГ, т. 64, 1960.
- [2] Васильев П.И., Залесов А.С., Рочняк О.А., Образцов Л.В., Деркач В.Н., Рекомендации по расчету предварительно напряженных изгибаемых элементов без сцепления арматуры с бетоном, Москва - Санкт-Петербург - Брест 1993.
- [3] Мордич А.И. (ред.), Проект «Пособия по проектированию железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном» (к СНиП 2.03.01.84\*), Издание официальное, Мн.: 1999.

- [4] Образцов О.Л., «Прочность комбинированно предварительно напряженных элементов без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном при действии изгибающих моментов» - диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Брест 2002.
- [5] СНБ 5.03.01 Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования. Стройтехнорм, Мн.: 2002, 274 с.
- [6] СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. - Взамен СНиП II-21-75; Введ. 01.01.86, Изд-во стандартов, М.: 1985, 80 с.
- [7] Титус В.Б., О расчете предварительно напряженных изгибаемых элементов без сцепления арматуры с бетоном. Библиографический указатель депонированных рукописей. Выпуск 3, 1980.
- [8] ТКП/ОР/45-5.01-2006. Проектирование железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном.
- [9] Тур В.В., Особенности проектирования монолитных плоских плит перекрытий, предварительно напряженных в построечных условиях, В.В. Тур, С.А. Карабанюк, Строительная наука и техника 2008, 1(16), 19-34.
- [10] Хачатрян А.И., Предварительное напряжение безбалочных перекрытий зданий с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, Межвузовский сб. науч. тр., ЕрПИ. Серия XII.В. Выпуск V. Строительство и архитектура, Ереван 1978, 100-104.
- [11] ACI 318-95. Design of Concrete and Prestressed Structures.
- [12] EN 1992-1-1:2004 Eurocode2: Design of Concrete Structures - Part1-1: General rules and rules for building.
- [13] Polish Standard: PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [14] Politalski W., Stress increment in unbonded tendons due to the third-point loading of a prestressed concrete slab.
- [15] VSL Report series/ Post-Tensioned slabs.- VSL International LTD.
- [16] Design of Prestressed Concrete flat slabs / The South African Institution of Civil Engineering, Report № 2.