

10. Design of Concrete Structure. General Rules and Rules for Building: ENV 1992-1:1991. – Introduced Dec. 1991 – Brussel: European Committee for Standardization, 1991. – 230 p.

11. Design of Concrete Structure. General Rules and Rules for Building: EN 1992-1: 2001 (Eurocode 2). – Introduced Oct. 2001 – Brussel: European Committee for Standardization, 2001. – 230 p.

12. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Bemessung und Konstruktion: DIN 1045-1. Berlin, 1998. – 178 p.

13. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Введ. 01.07.2003. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2003. – 139 с.

14. К расчету ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах при осевых растягивающих усилиях / В.В. Тур [и др.] // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1. – С.40–53.

15. Драган, А.В. Трещиностойкость железобетонных элементов при действии осевых растягивающих усилий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Драган. – Брест, 2008. – 169 с.

16. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: учебное пособие / Т.М. Пецоляда [и др.]; под ред. Т.М. Пецоляда, В.В. Тура. – Брест: Изд-во БГТУ, 2003. – 216 с.

УДК 624.012

## К НАЗНАЧЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОСТ-НАПРЯЖЕННЫХ ПЛОСКИХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ

Тур В. В., Карабанюк С. А.

**Введение.** Как следует из анализа, выполненного в работе [1], пост-напряженные монолитные плиты с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, обладают рядом преимуществ, которые особенно важно принимать во внимание при разработке проектов высотных зданий.

К этим важнейшим преимуществам следует отнести [1]:

- улучшенные технико-экономические показатели, включая снижение расхода материалов по сравнению с традиционными железобетонными и даже стальными конструкциями;
- возможность создания больших пролетов при обеспеченных требованиях жесткости перекрытия. При этом увеличение размеров пролетов позволяет осуществлять более гибкую планировку площадей перекрытия;
- возможность повышения архитектурной выразительности проектируемых зданий. Свободная трассировка напрягаемых элементов по траекториям силовых потоков (линиям опор) позволяет использовать конструктивные системы с нерегулярным размещением опор (стен, колонн), отверстиями и консольными фрагментами плит;
- снижение нагрузок от собственного веса перекрытий, что создает благоприятный эффект для наиболее нагруженных колонн нижних этажей и фундаментов;
- обеспечение высоких эксплуатационных показателей при действии нагрузок, что повышает долговечность конструктивных систем;
- резервирование прочности при постановке дополнительных внутренних горизонтальных связей, повышающих надежность конструктивной системы и обеспечивающих устойчивость против прогрессирующего обрушения;
- обеспечение высокой прочности на местный срез (продавливание) при соответствующем размещении напрягаемых арматурных элементов;
- сокращение сроков строительства.

Учитывая то обстоятельство, что в Республике Беларусь начинает активно реализовываться программа высотного строительства, следует обратить пристальное внимание на пост-напряженные конструкции перекрытий.

**Назначение толщины плиты с учетом пост-напряжения.** Основные конструктивные параметры элементов плоского перекрытия (толщины плиты и сетки колонн в плане) назначают из следующих условий:

- обеспечения требуемой жесткости (ограничение прогибов);
- обеспечения прочности на продавливание (местный срез).

Предварительное напряжение оказывает благоприятное влияние на работу плоского перекрытия, как в первом, так и во втором случае. В силу того, что за счет предварительного напряжения воспринимается часть постоянных нагрузок (см. рис. 1), появляется реальная возможность уменьшить толщину плиты перекрытия, обеспечив требуемые эксплуатационные и прочностные характеристики элементов конструктивной системы.

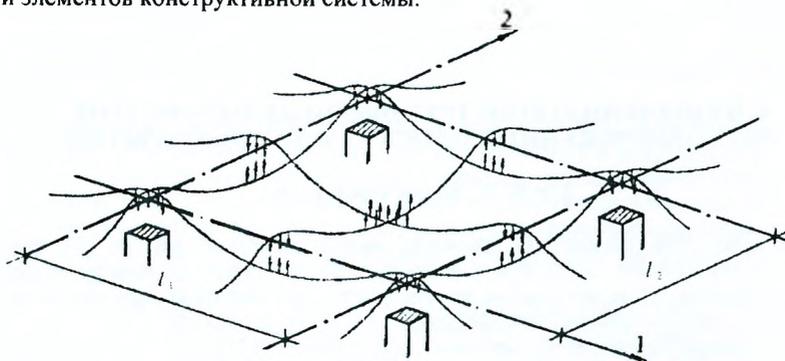


Рисунок 1 – Схема эквивалентных нагрузок от пост-напряжения внутренней плиты перекрытия

Важнейшим элементом проектирования плоских перекрытий является выбор геометрии сетки колонн.

Согласно [10] пролеты крайних плит рекомендуется принимать равными 80÷90 % от пролетов средних плит. При этом плита должна быть продлена за линию колонн (устройство консольных свесов плит). В этих случаях можно существенно снизить изгибающие моменты в крайних пролетах плит.

При выборе схемы размещения колонн в плане следует также учитывать то обстоятельство, что ведется проектирование многократно статически неопределимой системы, часто с различными условиями опирания (закрепления). Например, при наличии вертикальных элементов (бетонных или железобетонных стен) возникают дополнительные ограничения деформаций в плоскости плиты. С одной стороны, наличие такого ограничения может привести к развитию значительных температурно-усадочных напряжений, а как следствие, и к трещинообразованию в поле плиты, а с другой, снижает эффективность предварительного напряжения.

Кроме того, одним из важнейших аспектов, которые следует рассматривать при проектировании плоских перекрытий, является размещение отверстий. В отличие от перекрытий, выполняемых без предварительного напряжения, предварительно напряженные перекрытия следует проектировать, принимая трассировку напрягаемых стержней с учетом размещения отверстий.

Коротко остановимся на подходах к компоновке плоских перекрытий, акцентируя внимание на критерии ограничения прогибов.

Еще до начала статического расчета конструктор должен назначить необходимую толщину плиты. В научно-технической и нормативной литературе довольно часто представляют требования к толщине традиционных железобетонных плит, основанные на ограничении прогибов. Как правило, для предварительно напряженных плит перекрытий эти требования представляют крайне редко, а нормативные документы в ряде случаев вовсе не содержат подобных рекомендаций.

Учитывая то обстоятельство, что параметры, определяющие общую деформативность плит, могут изменяться в довольно широких диапазонах, на стадии предварительного проектирования рекомендуется использовать максимально простые, но достоверные, критерии.

Особенностью пост-напряженных конструкций с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, является то, что при трассировке канатов по выбранной траектории помимо эффекта обжатия сечений продольной силой, наблюдается появление поперечных усилий или эквивалентной поперечной нагрузки обратного знака по отношению к внешним нагрузкам. Схема нагрузок, действующих на конструктивные элементы неразрезной плиты, показана на рис. 2. Как видно из представленной схемы, эффективность пост-напряжения определяется величиной подъема трассы  $z$  и усилием натяжения канатов  $P_{0,m}$ . Для наиболее распространенной параболической трассы каната поперечное усилие равномерно распределено по всей длине каната и может быть определено из зависимости:

$$w_p = \frac{8P_{0,m} z}{L^2} \quad (1)$$

где  $z$  – подъем трассы;  $L$  – длина пролета.

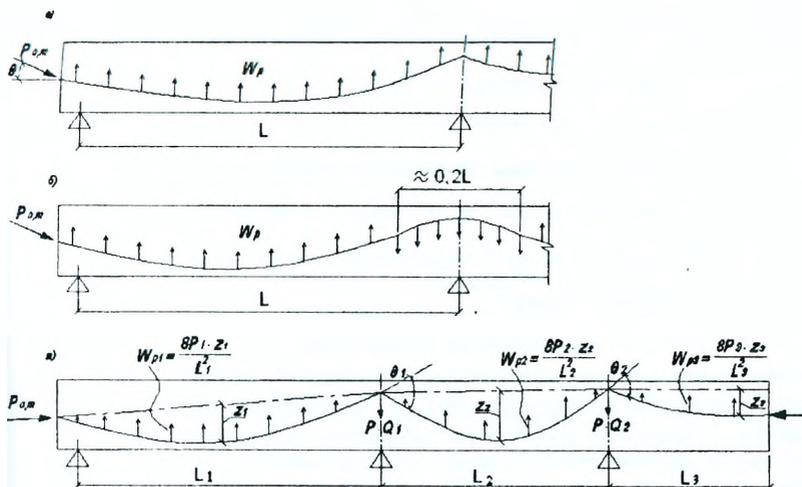


Рисунок 2 – К определению поперечных нагрузок обратного знака от предварительного напряжения в пост-напряженных плитах:

а) идеализированная полоса; б) фактическая трасса; в) многопролетная плита

Если канаты равномерно распределены по ширине поля плиты (имеют равный шаг), а усилие  $P_{0,m}$  – удельное усилие натяжения на единицу ширины плиты, тогда  $\omega_p$  – равномерно распределенная нагрузка обратного знака на единицу площади плиты. В случае, когда плита имеет обжатие в двух направлениях, а канаты ортогональны, полная поперечная нагрузка обратного знака определяется как сумма ( $\omega_p = \omega_{px} + \omega_{py}$ ).

В общем случае рекомендуется назначать параметры натяжения канатов таким образом, чтобы за счет эффекта пост-натяжения воспринималось не менее  $0,5G_k$  – половины нагрузки от собственного веса плиты. При этом следует учитывать и другое рекомендуемое ограничение, относящееся к напряжениям сжатия в бетоне. Так, например, нормы СЕВ-FIP рекомендуют назначать напряжения обжатия не более 1,0 МПа, а нормы АСІ – 0,86 МПа. Австралийские нормы, как и немецкие, рекомендуют, чтобы напряжения обжатия не превышали 3,5 МПа. Повышение уровня обжатия сверх этого предела, с одной стороны, ведет к значительному укорочению плиты и вызывает деформации каркаса, а с другой – требует постановки дополнительного количества арматуры, имеющей сцепление с бетоном. Вместе с тем, наиболее рациональным уровнем обжатия принято считать 0,7 МПа, рекомендованного [2].

С учетом названных эффектов толщина плиты может быть предварительно назначена из условия:

$$\frac{L}{h} = \left[ 14 + \frac{53}{[\varphi_c(\infty, t_0) \cdot G_k(1 - 0,9\lambda) + Q_k]^{1/3}} \right] k_1 k_2 k_3 k_4, \quad (2)$$

где  $G_k, Q_k$  – нормативные значения постоянной и переменной нагрузок, в кПа;

$\varphi_c(\infty, t_0)$  – коэффициент ползучести для бетона (в первом приближении можно принять  $\varphi_c(\infty, t_0) = 3,5$ );

$\lambda$  – доля постоянной нагрузки, которую предполагается воспринять за счет пост-натяжения;

$$k_1 = \begin{cases} 0,9 & \text{для крайних пролетов;} \\ 1,0 & \text{для средних пролетов.} \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 0,9 & \text{для плит, в которых допускается образование трещин;} \\ 1,0 & \text{для плит, в которых не допускается образование трещин.} \end{cases}$$

$$k_3 = (E_{cm}/26)^{1/3}, \text{ где } E_{cm} \text{ – модуль деформаций бетона в ГПа.}$$

$$k_4 = \begin{cases} 1,0 & \text{для плоских плит;} \\ 1,15 & \text{для плит с уширениями и капителями.} \end{cases}$$

Для определения нагрузки от собственного веса  $G_k$  толщину плиты предварительно назначают из условия прочности на продавливание (местный срез). Следует отметить, что для большинства плит это условие является определяющим.

В таблице 1 представлены рекомендуемые значения пролетов  $L$  для плоских плит перекрытий под нагрузку 1,5 кПа и 2,0 кПа. Величины пролетов определены из условия, что 50% или 100% от постоянных нагрузок воспринимается за счет эффектов от пост-натяжения. Толщина плиты предварительно назначена из условия продавливания (местного среза).

Таблица 1 – Рекомендуемые величины пролетов  $L$  пост-напряженной плиты перекрытия

Толщина плиты $h$ , мм	Нагрузки, кПа		$\lambda$	
	$G_k$	$Q_k$	0,5	1,0
250	0,625	1,5	12,5	14,0
		2,0	12,0	13,0
300	0,75	1,5	15,0	17,0
		2,0	14,0	16,0

При полученных значениях рекомендуемых пролетов необходимо произвести проверку ограничения сжимающих напряжений в бетоне. Из формулы (1) величина погонного обжимающего усилия  $P_{o,m}$  составит:

$$P_{o,m} = \frac{\sigma_p \cdot l^2}{8 \cdot z}$$

При толщине плиты  $h=250$  мм,  $z=180$  мм, а величина поперечной нагрузки обратного знака при натяжении канатов в двух направлениях  $\omega_p = 0,5\omega_p$ . При заданных начальных параметрах величина погонного усилия составит  $P_{o,m} = 38,28 \text{ кН/м}$ . При армировании канатами Y1860S709 усилие  $F_{ps} = 93 \text{ кН}$ , а с учетом потерь  $F^i_p = 83 \text{ кН}$ . При расположении канатов с шагом 500 мм погонное усилие составит  $P_{o,m} = 166 \text{ кН}$ , а напряжение сжатия в плите – 0,67 МПа, что достаточно близко к рекомендуемому значению 0,7 МПа. При увеличении числа канатов или их диаметра, собственный вес плиты будет не только компенсирован, но и получен выгиб. В ряде случаев такой эффект может быть нежелательным.

**Заключение.** Назначение толщины пост-напряженных плоских плит перекрытий следует производить с учетом разгружающих эффектов от усилия натяжения. При этом эффекты пост-напряжения оказывают положительное влияние, как на жесткость конструктивного элемента, так и на его сопротивление местному срезу.

При назначении параметров натяжения следует рационально выбирать трассировку напрягаемых канатов, усилие натяжения, их размещение в плане.

#### Список цитированных источников

- 1 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) – С. 19–34.
- 2 Тур, В.В. Основы проектных стратегий, применяемых для защиты зданий от прогрессирующего обрушения / В.В. Тур, А.В. Тур, Д.М. Марковский // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6(15). – С. 11–27.
3. Рекомендации по защите каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. – Брл ТУ, Брест. – 2008. – 175 с.
4. UFC-4-023-03- Design of Building to Resist Progressive Collapse, January, 2005 – 175 p.
5. Проектирование железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном: ТКП/ОР/45-5.01-2006.
6. EN 1991-1-7. General Actions – Accidental Actions.
- 7 Тур, А.В. К определению динамических коэффициентов для случая внезапного приложения нагрузки // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. 15 Междунар. научн.-метод. семинара: в 2-х т./ под общ. ред. Д.Н. Лазовского и А. А. Хотько. – Новополоцк: ПГУ, 2008 – Т. 1 – С. 116–125.
8. Тур, А.В. Расчет железобетонных балок при внезапном приложении нагрузки с использованием квазистатических диаграмм “нагрузка – динамическое перемещение” // Вестник Брл ТУ. – 2009. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 109–116.
9. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – 2003. – 146 с.
10. DIN 4227 Teil 6: Spaunbeton – Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund. Ausgabe Mai 1982 BK 1999 II.