

**Лешкевич Олег Николаевич**, канд. техн. наук, генеральный директор, РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)  
**Щербач Александр Валерьевич**, канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией, РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)

## **МОНОЛИТНЫЕ ПОСТ-НАПРЯЖЕННЫЕ ПЕРЕКРЫТИЯ. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ**

### **POST-TENSIONED FLAT SLABS. DESIGN STAGES AND PARTICULAR REQUIRMENTS**

#### **АННОТАЦИЯ**

*В статье рассмотрены основные особенности проектирования монолитных пост-напряженных перекрытий. Приведены основные требования, предъявляемые к этапам назначения основных конструктивных параметров перекрытия, величины преднапряжения, трассировки и расположения напрягаемых элементов.*

#### **ABSTRACT**

*This article shows principal features of post-tensioned flat slabs design process. It also contains specific requirements to some design stages, for example, to basic structural parameters assignment, stressing force assignment, tracing and location of tendons.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время в мировой практике строительства при возведении высотных зданий широко применяют предварительно напряженные монолитные плиты перекрытий. При этом предпочтение отдается плитам, работающим в двух направлениях, предварительное напряжение которых выполняют при помощи напрягаемых элементов (канатов, проволок), не имеющих сцепления с бетоном. Следует отметить, что наибольшее распространение конструктивные решения перекрытий, покрытий, фундаментных плит такого типа получили в США.

Пост-напряженные монолитные плиты с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, обладают рядом преимуществ, которые особенно необходимо принимать во внимание при разработке проектов высотных зданий.

К этим важнейшим преимуществам следует отнести:

- улучшенные технико-экономические показатели, включая снижение расхода материалов по сравнению с традиционными железобетонными 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 высокой прочности на местный срез (продавливание) при соответствующем размещении напрягаемых арматурных элементов;
- сокращение сроков строительства.

Важнейшим элементом проектирования плоских перекрытий является выбор геометрии сетки колонн. Оптимальные размеры пролетов для плоских перекрытий с квадратной сеткой колонн, запроектированных под нагрузку 5 кПа, приведены на рисунке 1.

Пролет (м) *)	6	8	10	12	14	16	18	20
Перекрытия с плоскими плитами (рис. 1а)								
Балочные перекрытия (рис. 1г)								
Перекрытия с обвязочными балками в одном направлении (рис. 1в)								
*)	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <span style="margin-right: 20px;">- железобетонные конструкции</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <span>- предварительно-напряженные конструкции</span> </div>							
Размеры пролетов для зданий с полезной нагрузкой на перекрытие 5 кПа (без учета собственного веса плиты)								

**Рисунок 1.** Оптимальные размеры пролетов для различных конструктивных решений перекрытий (требования жесткости обеспечены) согласно [1]

В рамках выполнения НИР по заказу МАиС в РУП «Институт БелНИИС» были разработаны Рекомендации по проектированию монолитных плоских пост-напряженных плит перекрытий с напрягающими элементами, не имеющими сцепления с бетоном. В Рекомендациях [2] детально освещены все этапы расчета и конструирования монолитных плоских пост-напряженных плит перекрытия, начиная от выбора материалов и компоновки конструктивной схемы и завершая особыми требованиями по конструированию.

Далее остановимся более подробно на наиболее важных, на наш взгляд, этапах проектирования пост-напряженных монолитных плоских плит, подробно описанных в вышеупомянутых Рекомендациях.

### Компоновка конструктивной схемы

В соответствии с положениями, изложенными в Рекомендациях [2], применение пост-напряжения при возведении плоских предварительно-напряженных перекрытий наиболее рационально при пролетах плит размером от 6 до 13 м.

При предварительной компоновке конструктивной схемы толщину пост-напряженных в двух направлениях плит перекрытий, опирающихся на колонны, рекомендуется принимать на основании ориентировочных значений, приведенных в таблице 1, основанных на обеспечении жесткости и сопротивлении продавливанию.

Таблица 1

#### Рекомендуемые отношения ( $L/h$ ) для пост-напряженных плит [2]

$L/h$	
Перекрытие	Покрытие
От 40 до 45 включительно или 48* или (от 28 до 36) **	от 45 до 48 включительно или 52*
* Значения с учетом требований жесткости (ограничения прогибов); ** Для тяжело нагруженных перекрытий.	

Допускается также использование данных таблицы 2. Значения ( $L/h$ ) в таблице 2 приведены в зависимости от соотношения величины переменных воздействий  $Q$  к постоянным  $G$  для различных пролетов плит.

Таблица 2

### Рекомендуемые ограничения отношения $L/h$ в плоских пост-напряженных перекрытиях [2]

Отношение полной нагрузки к постоянной $(Q + G) / G$	Пролет, м		
	7,5	10,0	15,0
1,0	45	42	33
2,0	41	34	26
3,0	35	29	22

Для назначения толщины пост-напряженных плоских плит, опертых по сторонам, рекомендуется пользоваться данными, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

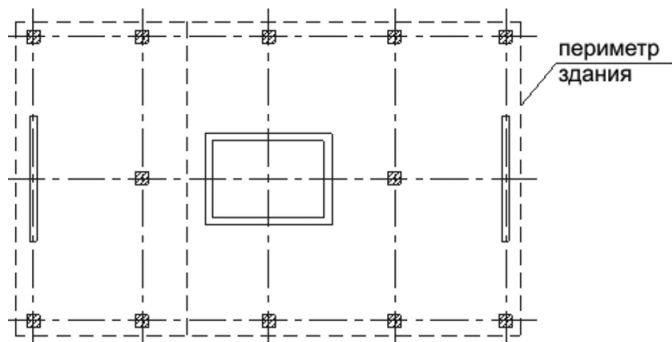
### Рекомендации для назначения высоты сечения пост-напряженных плит, опертых по сторонам [2]

Допускаемый прогиб	Пролет $L$ , м	Высота сечения плиты, $h$ , мм
Ограничение $a/L_{eff} \leq 1/500$	6	200
	8	240
	10	350
	12	480
Примечание – $L_{eff} = 0,8L$		

При выборе размещения на плане колонн и стен, в случае выполнения пост-напряженного перекрытия также необходимо учитывать следующие рекомендации оптимального проектирования:

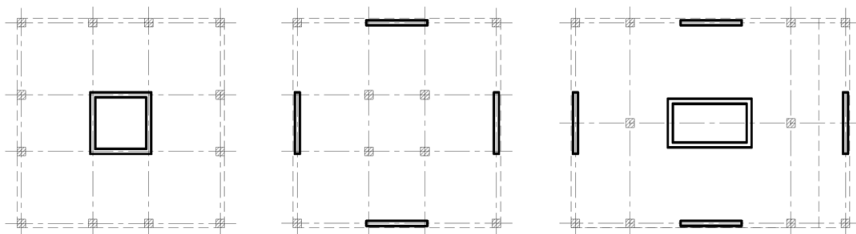
а) уменьшать размер крайнего пролета плит или, если это позволяют архитектурные решения, смещать колонны вовнутрь периметра здания и устраивать консольные участки плит (рисунок 2);

б) уменьшать, если необходимо, жесткость колонн или стен по направлению передачи усилия обжатия (натяжения напрягающих элементов) для минимизации потерь усилия обжатия, исключения образования трещин в ограничивающих элементах (при чрезмерном ограничении). На рисунке 3 приведены характерные компоновки плана здания, в том числе, рисунок 3а показывает рекомендуемое размещение стен и колонн, а рисунок 3б – неблагоприятное их размещение с точки зрения влияния ограничения эффектов со стороны конструктивной системы на эффективность пост-напряжения.

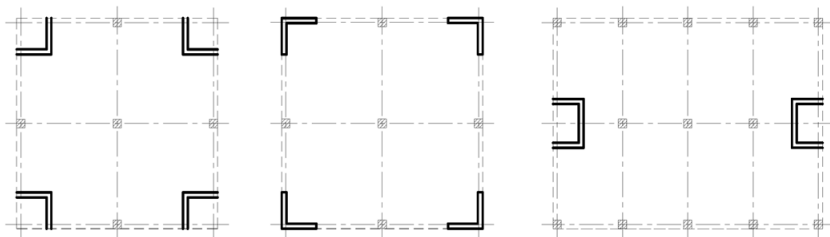


**Рисунок 2.** Характерное размещение колонн и стен в плане здания из условия достижения максимального эффекта от пост-напряжения

а)



б)



а) рекомендуемое размещение колонн и стен в плане;

б) не рекомендуемое размещение колонн и стен в плане

**Рисунок 3.** Расположение колонн и стен (диафрагм жесткости) в плане здания для снижения потерь предварительного напряжения и исключения трещинообразования.

## Назначение параметров предварительного напряжения

Усилие  $P_{max}$ , прикладываемое в процессе натяжения к активному концу натягающего каната, не должно превышать максимального значения, определяемого по формуле

$$P_{max} = A_p \cdot \sigma_{0,max} \quad (1)$$

где  $A_p$  – площадь поперечного сечения натягаемой арматуры, мм<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{0,max}$  – максимальные напряжения в натягаемой арматуре, МПа.

В свою очередь максимальные напряжения в натягаемом канате для классов, установленных СТБ EN 10138-3 [3], следует назначать из условия:

$$\sigma_{0,max} = \min \{ 0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k} \}, \quad (2)$$

где  $f_{pk}$  – характеристическое значение предела прочности на растяжение натягаемой арматуры, МПа;

$f_{p0,1k}$  – характеристическое значение 0,1 %-ного условного предела текучести натягаемой арматуры, МПа.

Расчетные критерии назначения величины преднапряжения в пост-натяженных плитах связаны, главным образом, с ограничением прогибов. Требуемое усилие предварительного напряжения устанавливается в зависимости от степени преднапряжения  $k$ , определяемой как отношение максимального перемещения (выгиба) от эффективного преднапряжения (с учетом соответствующих потерь)  $a_{sp}$  к прогибу от действия практически постоянного сочетания нагрузок  $a_e$  ( $k = a_{sp}/a_e$ ) [4]. В практических проектных ситуациях степень преднапряжения  $k$  изменяется в интервале от 0,6 до 1,0 в зависимости от технических требований норм и экономических оценок.

Важным параметром, который следует учитывать при назначении начального контролируемого усилия натяжения, является значение эффективного предварительного напряжения. Значение последнего в бетоне следует принимать равным не менее 0,85 МПа. Для плит покрытий и плит междуэтажных перекрытий парковок рекомендуется принимать значение эффективного предварительного напряжения в бетоне в диапазоне от 1,0 до 1,4 МПа, если предъявляются повышенные требования к водопроницаемости и трещиностойкости. Значение эффективного предварительного напряжения в бетоне рекомендуется принимать для плит не более 2,0 МПа.

## **Трасса напрягающих элементов. Определение эквивалентных нагрузок от пост-напряжения**

При проектировании плоских пост-напряженных плит, в которых начальное обжатие создают в построечных условиях при помощи напрягающих элементов, не имеющих сцепления с бетоном, как правило применяют метод, основанный на так называемом эффекте «уравновешивания нагрузки» (англ. load balancing method).

В соответствии с базовыми положениями вышеупомянутого метода напрягающие элементы без сцепления с бетоном необходимо рационально размещать как по высоте сечения плиты, так и в плане перекрытия с целью создания эквивалентных вертикальных нагрузок, направленных противоположно постоянным и переменным нагрузкам, действующим на плиту перекрытия в соответствующей расчетной ситуации.

Эквивалентными вертикальными нагрузками моделируют реакции, направленные перпендикулярно к плоскости плиты, возникающие при натяжении напрягающих элементов, имеющих криволинейный профиль трассы.

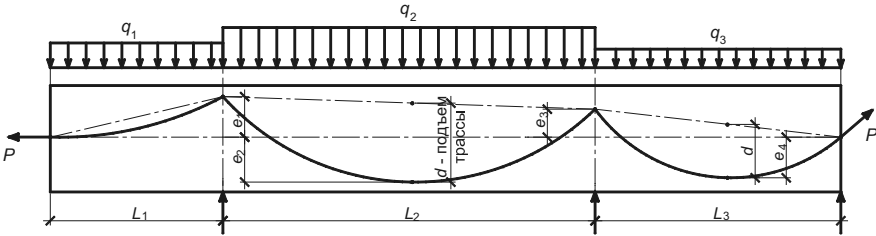
Для создания равномерно распределенных эквивалентных уравновешивающих нагрузок в пролете напрягающие элементы необходимо размещать, по возможности, равномерно в пределах пролетов, а направленные вниз эквивалентные нагрузки, рассматриваемые как реакции напрягающих элементов, передавать на рационально размещаемые вертикальные несущие элементы конструктивной системы (например, стены и балки — для балочных плит; колонны — для плит, работающих в двух направлениях).

С учетом того, что при устройстве плоских пост-напряженных плит перекрытия эквивалентные равномерно распределенные направленные вниз нагрузки передаются на ограниченные зоны в районах опирания плит на колонны (главным образом, в пределах так называемого критического периметра, назначаемого из условий расчета на местный срез), напрягающие элементы необходимо размещать в двух ортогональных направлениях.

### ***Геометрические параметры профиля трассы***

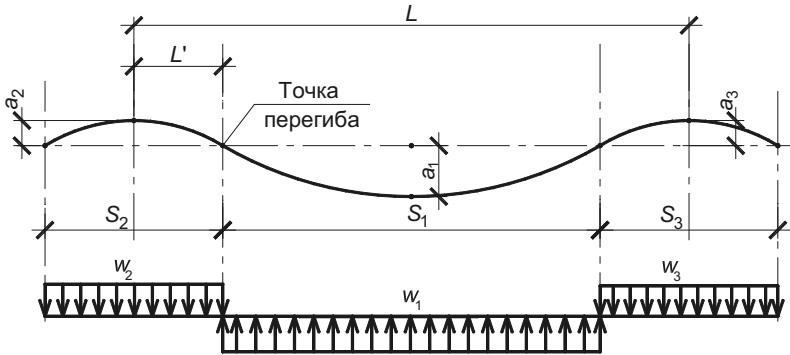
Геометрические параметры профиля трассы напрягающего элемента назначают по расчету таким образом, чтобы очертание эпюры моментов, создаваемых усилиями натяжения имело форму, близкую к очертанию эпюры изгибающих моментов от соответствующего сочетания нагрузок, но противоположную по знаку.

Значение «подъема» профиля трассы каната, принимаемое при расчетах эквивалентных равномерно распределенных нагрузок, определяют как расстояние по вертикали от точки, лежащей на середине длины отрезка, соединяющего точки перегиба на профиле трассы для данного пролета до оси профиля трассы в соответствующей области (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Идеализированная схема профиля трассы натягивающего элемента для неразрезного элемента с консолью при действии равномерно распределенных нагрузок

С учетом конструктивно-технологических требований канаты, в общем случае, логично трассировать в соответствии со схемой, показанной на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Фактическая схема профиля трассы натягивающего каната (а) и соответствующее распределение эквивалентных равномерно распределенных нагрузок

### **Определение эквивалентных нагрузок**

Систему сил, приложенных к бетонному элементу посредством натягивающих канатов, представляют как эквивалентную равномерно



распределенную нагрузку, компенсирующую полностью или частично внутренние усилия (эффекты) от постоянных и долю переменных нагрузок, действующих в соответствующей расчетной ситуации.

В соответствии с приведенной на рисунке 5 схемой внутренние эквивалентные усилия, являющиеся результатом натяжения канатов, имеющих параболический профиль трассы, направлены вверх и равномерно распределены по длине трассы в пролете. На концевых участках элемента конструктивной системы, вертикальные составляющие усилия обжатия, создаваемого канатом, передаются на бетон через анкерные устройства и приспособления.

При параболическом профиле трассы натягающего элемента, величину равномерно распределенной эквивалентной нагрузки в общем случае определяют по формуле

$$w_l = \frac{8P_{m,t} \cdot a}{L^2} \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние между точками перегиба профиля трассы натягающего элемента (рисунок 5);

$a$  – подъем профиля трассы каната (рисунок 5);

$P_{m,t}$  – среднее значение усилия натяжения с учетом всех потерь.

Детальные указания по расчету геометрических параметров профиля параболической трассы и правила определения эквивалентных поперечных равномерно распределенных нагрузок для характерных схем нагружения элементов и профилей трассы канатов подробно описаны в положениях Рекомендаций [2].

## **Расположение натягающих элементов и некоторые требования по конструированию пост-натяженных плит перекрытия**

Перечислив, на наш взгляд, основные требования к процессу проектирования на стадии компоновки схемы, назначения усилия обжатия, трассировки натягаемой арматуры, нельзя не упомянуть и некоторые требования к конструированию пост-натяженных плит перекрытия.

При проектировании плоских пост-натяженных плит рекомендуется выполнять следующие требования:

- ненапрягаемую арматуру, воспринимающую отрицательный момент, следует располагать над опорами (колоннами), как показано на рисунке 6;

- напрягаемую арматуру одного главного направления следует группировать по линии опор (колонн), а в другом – распределять равномерно по полю плиты.

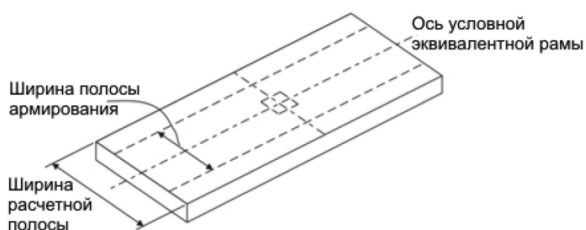
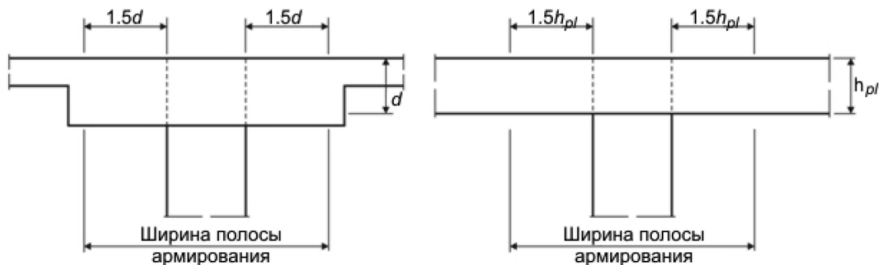
Минимальное армирование следует устанавливать группируя, как правило, по линии опор в соответствии со схемами, показанными на рисунке 6.

Минимальная площадь ненапрягаемой арматуры в нормальном сечении плиты перекрытия должна удовлетворять требованиям к минимальному коэффициенту армирования согласно ТКП ЕН 1992-1-1 [5].

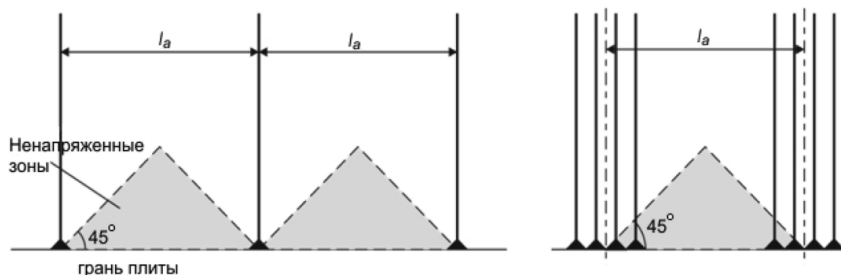
Ненапрягаемую арматуру или дополнительную напрягаемую арматуру в плитных конструкциях следует устанавливать в тех зонах конструкции, в которых средние напряжения обжатия в расчетной полосе составляют менее 0,7 МПа.

В ненапрягаемых зонах плоских плит (см. рисунок 7) необходимо устанавливать дополнительную ненапрягаемую арматуру.

Эта арматура должна быть равномерно распределена на ширине равной  $0,7l_a$  и быть непрерывной вдоль края плиты.



**Рисунок 6.** Схемы размещения ненапрягаемой арматуры, имеющей сцепление с бетоном



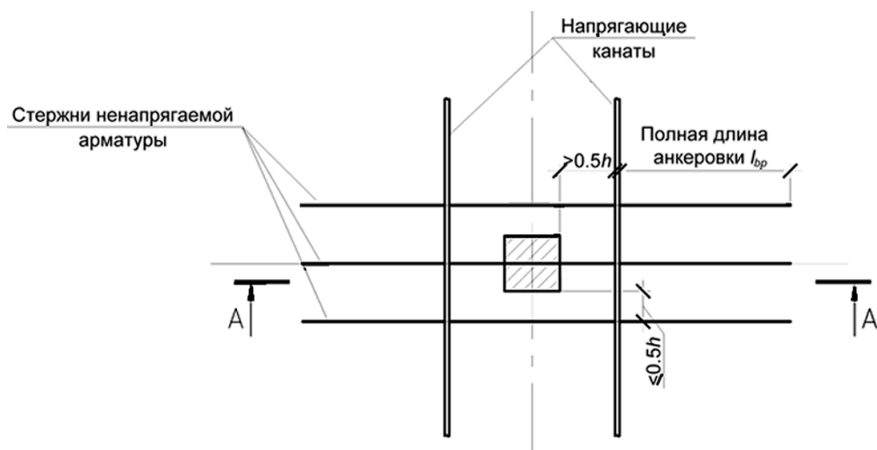
**Рисунок 7.** Схемы размещения напряженных зон, в которых следует устанавливать дополнительную ненапрягаемую арматуру

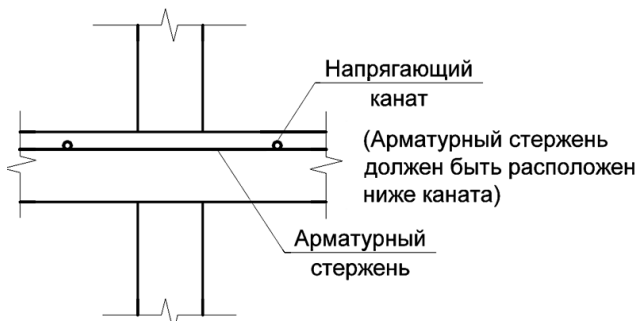
Ненапрягаемую арматуру следует располагать равномерно между анкерами на длине, большей, чем  $l_a$  или  $0,7l_a$  плюс полная длина анкеровки (где  $l_a$  – расстояние между напрягающими элементами согласно рисунку 7).

Напрягающие элементы, проходящие через эти зоны (рисунок 7) параллельно грани плиты следует учитывать совместно с ненапрягаемой арматурой, установленной в этой зоне.

В местах пересечения плит с колоннами, в зонах, где не установлена поперечная арматура, рекомендуется часть канатов располагать в непосредственной близости от грани колонны. При этом канаты, располагаемые в непосредственной близости от колонны, следует учитывать при проверках предельных состояний плит при местном срезе.

В случаях, когда невозможно расположить напрягающие канаты в непосредственной близости от колонны, следует размещать дополнительную ненапрягаемую арматуру, как показано на рисунке 8.





**Рисунок 8.** Размещение напрягаемой арматуры в случае, когда напрягающие элементы не располагаются в зоне  $0,5h$  от колонны

Дополнительная ненапрягаемая арматура должна:

- располагаться под напрягающими канатами;
- иметь достаточную площадь сечения для передачи вертикальной (поперечной) реакции усилия пост-напряжения с каната на колонну;
- иметь достаточную (полную) длину анкеровки за ось каната (рисунок 8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монолитные плиты перекрытий (покрытий), выполненные с натяжением напрягаемой арматуры на бетон в построечных условиях, обладают целым рядом преимуществ и благодаря этому составляют значительную долю в мировой практике проектирования зданий и сооружений.

Вне всякого сомнения, проектирование монолитных пост-напряженных плит имеет некоторые нюансы, не присущие процессу расчета и проектирования традиционных предварительно напряженных конструкций.

Рекомендации [2] по проектированию монолитных плоских пост-напряженных плит перекрытий с напрягающими элементами, не имеющими сцепления с бетоном, разработанные РУП «Институт БелНИИС», позволяют существенным образом облегчить работу проектировщика, столкнувшегося с необходимостью проектирования конструкций такого вида.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Stevenson A. M. Post-tensioned concrete floors in multi-storey buildings/ Reinforced concrete. British Cement Association, 1994; 22 p-p.
2. Р 5.03.125-2013 Рекомендации по проектированию монолитных плоских пост-напряженных плит перекрытий с напрягающими элементами, не имеющими сцепления с бетоном. – РУП «Институт БелНИИС», 2013.
3. СТБ EN 10138-3-2009 Арматура напрягаемая канатная для железобетонных конструкций. Технические условия. – Мн.: Госстандарт, 2010.
4. Almeida J. F., Appleton A. S. Control of deflections in post-tensioned slabs// Journal of Structural Engineering, №7 vol. 32; 2001 – p. 14–17.
5. ТКП EN 1992–1–1-2009 Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2010.

*Статья поступила в редколлегию 26.09.2014*