

РАЗРАБОТКА И ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЁННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SCAD OFFICE 11.5

Курлапов Д.В., Дудурич Б.Б., Прокофьев В.Е., Шок П.В.

Введение. На основе проведения анализа современных требований к архитектурно-планировочным решениям промышленных и гражданских объектов просматривается необходимость реализации сетки колонн большого шага, и, соответственно, перекрытий и покрытий большого пролета. При этом существенно возрастает материалоемкость их производства и повышается габариты конструкций, что требует или снижения высоты этажа, или повышения высотных отметок зданий и сооружений. Это ведет к удорожанию производства конструкций, вертикального транспорта, а также повышению затрат на обогрев и кондиционирование. Эффективные проекты должны реализовываться на основе инноваций, обеспечивающих простоту, удобство и экономичность строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Для воплощения в жизнь данных потребностей, наиболее приемлемым является возведение монолитных железобетонных зданий с безбалочными перекрытиями. Это обусловлено тем, что данное решение обеспечивает возможность строительства с любой конфигурацией в плане и с различными объемно-планировочными решениями.

Эффективным способом снижения габаритов, материалоемкости и стоимости, а также повышения эксплуатационных характеристик монолитных безбалочных перекрытий зданий является использование в них предварительно напряженной канатной арматуры без сцепления с бетоном.

Одной из главных проблем при проектировании таких монолитных железобетонных конструкций является грамотный расчет, учитывающий все возможные потери предварительного натяжения, а также перераспределение усилий в конструкции плит перекрытия.

В данной статье приводятся два проверенных на практике метода задания предварительного напряжения в программном комплексе SCAD Office 11.5 (рассмотрено условное здание с использованием предварительно напряженной арматуры без сцепления с бетоном, в конструкции плит перекрытия; сформирована математическая модель рассматриваемой конструкции, выполнен расчёт и анализ его результатов). Инструментом исследования стал метод конечных элементов (МКЭ/ФЕМ) [1].

Основное достоинство метода конечных элементов состоит в возможности использования простых координатных функций, удовлетворяющих не слишком обременительным ограничениям. Обычно, удовлетворительная точность, как по перемещениям, так и по напряжениям получается, если размеры элементов в 10...20 раз меньше характерного размера рассматриваемой детали (конструкции, сооружения, тела).

Благодаря высокой приспособленности МКЭ к возможностям современных ЭВМ в настоящее время существует множество самых различных по своей направленности и по своим возможностям вычислительных комплексов, реализующих

метод конечных элементов. Из числа таких программных продуктов, используемых при выполнении расчетов, сопровождающих строительное проектирование, отметим ANSYS, COSMOS/M, Лира-Windows, SCAD, STAAD Pro, FEM models, PLAXIS, Robot Millennium [2].

ANSYS - самая распространенная в мире, многофункциональная система конечно-элементных расчетов. Включает в себя модули расчетов прочности и динамики, температурных полей, гидрогазодинамики, электростатики, электромагнетизма, оптимизации, вероятностных расчетов, высоко-нелинейных расчетов по явной схеме интегрирования и другие.

COSMOS/M - дает пользователю возможность создавать геометрический образ рассчитываемой модели, насыщать ее элементами, оперативно вносить необходимые изменения, выполнять требуемые виды расчетов, просматривать, рисовать на экране и печатать результаты.

Лира-Windows - данный программный комплекс предназначен для численного исследования прочности и устойчивости конструкций, а также для автоматизированного выполнения ряда процессов конструирования.

STAAD.Pro - программа, предназначенная для расчета и проектирования строительных конструкций. Данная программа представляет собой полностью интегрированный комплекс для расчета, анализа и проектирования строительных конструкций, зданий и сооружений.

PLAXIS - расчетный комплекс, состоящий из набора прикладных вычислительных программ для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы «основание-фундамент-сооружение» в условиях плоской и осесимметричной задач.

FEM models - это расчетный инструмент XXI века для сложных строительных расчетов методом конечных элементов. Он содержит модели, описывающие работу надземных конструкций здания и сложную нелинейную работу грунта.

ПК Robot Millennium - представляет собой единую систему, объединяющую в одном уникальном комплексе все этапы проектирования конструкций – от создания расчетной схемы до реализации отчетов и чертежей.

SCAD Office - программный комплекс нового поколения - позволяет проводить расчет и проектирование стальных и железобетонных конструкций. В состав комплекса входят универсальная программа конечно-элементного анализа SCAD, а также ряд функционально независимых проектно-расчетных и вспомогательных программ. Программа SCAD предназначена для расчета сооружения в целом, в отличие от вышеназванных проектно-расчетных систем, ориентированных на выполнение детальных проверочных расчетов несущих строительных конструкций (отдельных балок, колонн, плит) в соответствии с действующими нормами [3].

Для выполнения расчетов выбран именно SCAD Office, из-за своей доступности, широты распространения, соответствия СП и ГОСТ.

SCAD Office соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 «Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению», ГОСТ 28195-89 «Оценка качества программных средств. Общие положения», ГОСТ Р ИСО 9127-94 «Системы обработки информации. Документация пользователя и информация на упаковке для потребительских программных пакетов», а также рекомендациям РД 50-34.698-90 «Методические указания. Информационная технология. Ком-

плекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов». Соответствие СНиП (СП) подтверждено сертификатом Госстроя РФ и Федеральным надзором России по ядерной и радиационной безопасности.

За основу принят метод расчёта по предельным состояниям. В соответствии с ним установлены две группы:

- первая – по несущей способности;
- вторая – по пригодности к нормальной эксплуатации.

Была сформирована расчётная модель, представляющая собой здание, имеющее в плане прямоугольную форму, размеры 42,6 x 14,0 м, высота 12,4 м в верхней точке. Здание включает подвальный этаж высотой 2,44 м и 3 этажа высотой 3,3 м. В качестве основной несущей системы принят монолитный железобетонный остов, состоящий из несущих стен, колонн, и перекрытий, жестко сопряженных между собой и образующих единую пространственную конструкцию. Здание имеет 2 ядра жесткости, вокруг лестничных клеток. Толщина перекрытий подвала принята 220 мм.

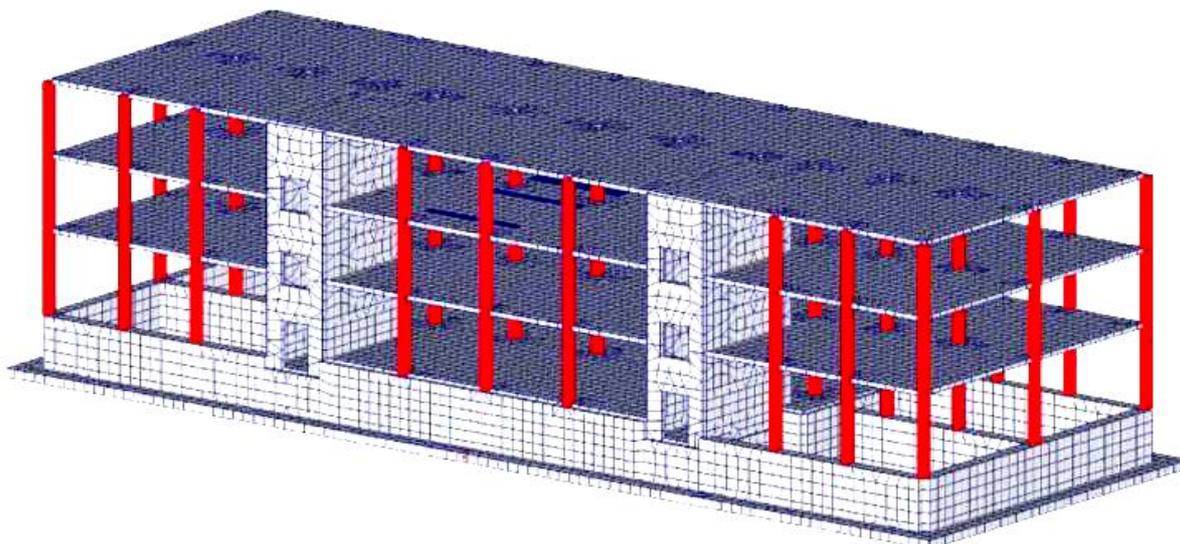


Рисунок 1 – Общий вид расчётной модели

В качестве основного материала взят тяжелый бетон класса В25, W4, F100. Арматурная сталь принята проектом согласно главе 5.2 СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» для классов А400 (АIII) (сталь марки 25Г2С, ГОСТ 5781-82* «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия»), А240 (АI) (сталь марки СтЗспЗ).

Для преднапряжения используется 7-ми проволочная канатная арматура диаметра 15,7мм, площадью сечения 155мм², из стали st.1860 Н/мм² по prEN 10138-1 или документации производителя (см. табл. 1). Анкерные устройства могут изготавливаться из стали или чугуна и должны обеспечивать надежную фиксацию напрягаемого каната, а также отсутствие смятия бетона под опорной поверхностью. Наиболее удобно использование моноанкеров – анкеров, предназначенных для фиксации одного каната. Данные приспособления наиболее просты в установке и позволяют использовать легкое оборудование для натяжения.

Таблица 1 – Канаты принятые для натяжения

Марка стали	A_{sp}	$0,8f_{pk}$	$0,9f_{p0.1k}$	$\sigma_{0,max}$	$P \leq \sigma_{0,max} \times A_{sp}$	Перетяжка
1860/1640	155 мм ²	1488МПа	1476МПа	1476МПа	221,4 кН	1558МПа/ 233,7 кН

Нагрузки и воздействия на здание определены согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Общие положения. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*». В расчётном комплексе SCAD прикладываются полные расчётные нагрузки. С помощью комбинации загружений и модуля РСУ учитывается система коэффициентов для расчета по I и II группам ПС.

Наименования принятых нагрузок представлены в табл. 2.

Нагрузки от ветра определялись с помощью подпрограммы ВЕСТ. Ветровой район – II. Тип местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м). Усилia прикладываются к балкам фиктивной жесткости в уровне плит перекрытий и покрытия. Значения прикладываемых усилий отражены в табл. 3.

Основной задачей исследования является разработка концепции и построение конечно-элементной модели постнапряженного монолитного перекрытия (ПК SCAD), адекватно описывающей физическую сущность перекрытия[4].

Таблица 2 – Нагрузки и воздействия

Тип нагрузки	P_n	γ_f	P	Кдлит	К1
Постоянные:					
собственный вес несущих конструкций	SCAD*	1,1	SCAD*	-	1
собственный вес ограждающих конструкций	910 кг/пм	1,2	1090 кг/пм	-	1
собственный вес лестничных маршей	555 кг/пм	1,1	610 кг/пм	-	1
собственный вес кровли	472	1,2	573	-	1
собственный вес полов	147	1,2	182	-	1
собственный вес парапета	610 кг/пм	1,2	730 кг/пм	-	1
давление грунта на стены подвала**	1740z	1,15	2000z	-	1
Временные длительного действия:					
собственный вес временных перегородок	50	1,3	70	-	0,95
Временные кратковременные:					
полная	150	1,3	195	0,35	0,9
снеговая	26	1,4	180	0,5	0,9
снеговой мешок	156	1,4	223	0,5	0,9
ветровая	ВЕСТ*	1,4	ВЕСТ*	0	±0,9

примечание: SCAD* нагрузка определяется программным комплексом автоматически;

** значение давления грунта на стены подвала определено для грунта обратной засыпки (песка средней крупности с уплотнением до $K = 0,95$, $\phi I = 320$, $cI = 0$).

где: P_n – нормативное значение нагрузки, кгс/м² (кроме оговоренных);

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке;

P – расчетное значение нагрузки, кгс/м² (кроме оговоренных);

Кдлит – коэффициент перехода от полных значений кратковременной нагрузки к пониженным значениям временной нагрузки длительного действия (доля длительности);

К1 – коэффициенты для комбинации №1, определяющие расчетные значения нагрузок с учетом понижающих коэффициентов сочетаний, включающих постоянные и не менее двух временных нагрузок (для расчетов по I группе ПС);

z – глубина приложения нагрузки, м.

Таблица 3 – Значения прикладываемых усилий

Высота, м	Наветренная поверхность*, кгс/пм	Подветренная поверхность*, кгс/пм
4,4	0,103	-0,079
7,7	0,066	-0,05
11	0,06	-0,045

При проектировании подобных конструкций основополагающим является определение усилий отпора каната (эффект вывешивания), который определяется в зависимости от пролета, величины усилия натяжения в канате и формы его раскладки. В дальнейшем эффект вывешивания, прикладывается к перекрытию как внешняя нагрузка.

Прочность преднапряженных железобетонных конструкций не зависит от величин предварительного напряжения арматуры. Поэтому их расчет на прочность ничем не отличается от расчета на прочность железобетонных конструкций без предварительного напряжения, а силы обжатия являются внешними силами наряду с внешней полезной нагрузкой.

При проектировании таких конструкций с системой напряжения без сцепления с бетоном следует руководствоваться следующим принципом: преднапряженная арматура передает усилия на бетон не по всей длине, а только в местах анкерования на торцах перекрытия, а также в местах перегиба канатов. Соответственно, преднапряжение должно быть принято в расчете как приложенные к конструкции внешние силы. Силы, возникающие в местах перегиба канатов, зависят, в первую очередь, от их геометрии и усилий в них.

При раскладке каната в перекрытии его геометрия описывается выражением $y(x)$. Соответственно, угол наклона в точке относительно оси конструкции описывается как $y'(x)$, а возникающая в этой точке сила – $y''(x)$. Во время расчета полученные, в зависимости от геометрии каната, силы прикладываются к расчетной схеме, и статический расчет производится традиционным образом.

Начальные предварительные напряжения в арматуре не остаются постоянными, с течением времени они уменьшаются. Различают первые потери предварительного напряжения в канате, происходящие при изготовлении элемента и обжатии бетона, и вторые потери, происходящие после обжатия бетона.

Численный анализ. При начальном натяжении на бетон с учётом перетяжки равном 230 кН:

I-е потери:

1. Потери предварительного напряжения за счет трения напрягаемой арматуры. Для вычисления данных потерь использована формула Eurocode-2, что не противоречит СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*»:

$$\Delta P = P_0(1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) \quad (1)$$

где: - e – основание натуральных логарифмов;

- μ - коэффициент трения, как правило, для монострендов = 0.06;

- θ – сумма углов отклонения каната;

- k – коэффициент «вихляния» каната, как правило, для моноанкеров равный $0,9 \times 10^{-2} \text{ м}^{-1}$;

- x – расстояние от точки натяжения до сечения, для которого определяются потери.

$$\Delta P = 230 \times (1 - 2,71 - 0,06 \times (4,75 + 0,009 \times 7)) = 57,689 \text{ кН}$$

В отличие от систем со сцеплением напрягаемой арматуры с бетоном, для систем без сцепления усилие преднапряжения в канате со временем «уравновешивается» на уровне:

$$P = \frac{P_0 + (P_0 - \Delta P)}{2} \quad (2)$$

$$P = (230 + (230 - 57,689)) / 2 = 201,155 \text{ кН}$$

2. Потери предварительного напряжения за счет проскальзывания цанг.

При передаче усилия с домкрата на анкер происходит проскальзывание цанги. Величина его нормируется производителями системы преднапряжения и составляет, как правило, бмм. Потери предварительного напряжения за счет проскальзывания цанги могут быть приближенно вычислены по формуле СП 35.13330.2011:

$$\Delta P = \frac{\Delta l}{l} E A_{sp} \quad (3)$$

где:

- Δl - величина проскальзывания;
- l - длина каната.

$$\Delta P = (0,006 / 14,2) \times 2000 \times 150 = 126,76 \text{ кгс} = 1,2431 \text{ кН}$$

$$P = 201,155 - 1,2431 = 199,9119 \text{ кН}$$

3. Потери предварительного напряжения в ранее натянутых канатах, после натяжения последующих. Данный вид потерь может быть вычислен с применением МКЭ программ на основании упругого сокращения конструкции после натяжения канатов, но, как правило, для конструкций гражданских зданий этот вид потерь пренебрежительно мал.

II-потери:

1. Потери предварительного напряжения за счет усадки бетона. Данный вид потерь может быть вычислен в соответствии с требованиями Eurocode-2 (СП 35.13330.2011) и составляет 2% от исходного натяжения

$$\Delta P = 230 \times 0,02 = 4,6 \text{ кН};$$

2. Потери предварительного напряжения за счет ползучести бетона. Данный вид потерь может быть вычислен в соответствии с требованиями Eurocode-2 (СП 35.13330.2011) и составляет 1,5 % от исходного натяжения

$$\Delta P = 230 \times 0,015 = 3,45 \text{ кН};$$

3. Потери предварительного напряжения за счет релаксации напрягаемой арматуры. Данный вид потерь может быть вычислен в соответствии с требованиями Eurocode-2 и составляет 8 % от исходного натяжения:

$$\Delta P = 230 \times 0,08 = 18,4 \text{ кН};$$

Натяжение канатов с учётом всех потерь составляет:

$$P_{i,II} = 201,155 - 4,6 - 3,45 - 18,4 = 173,4378 \text{ кН}$$

Для дальнейших расчётов принимаем натяжение равное, с учётом всех потерь, 170 кН (17 тонн).

Усилие напряжения канатов задаётся двумя экспериментальными способами: с помощью температурных напряжений; приложением сосредоточенных нагрузок в месте расположения анкера.

При первом способе задания предварительного напряжения канат задаётся стержнем, температура которого уменьшается на величину, достаточную, для возникновения в нём напряжений равных 170 кН. Для этого воспользуемся формулами (4) и (5).

$$\Delta t = \varepsilon_0 \alpha \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = \sigma_0 E_p \quad (5)$$

где: - α – коэффициент линейного расширения арматурной стали;
 - σ_0 – натяжение арматурных канатов;
 - E_p – модуль упругости стали.

$$\varepsilon_0 = 1702 \times 105 = 0,000851;$$

$$\Delta t = 0,000851 \times 0,000012 = 70,91^\circ\text{C}.$$

При втором способе задания предварительного напряжения, сжимающие усилия равные 170 кН прикладываются напрямую к грани плиты, в точках установки анкеров.

Расчет преднапряженной системы без сцепления конструкции моделируется путем приложения к расчетной схеме внешних сил в соответствии с геометрией раскладки каната. При параболической раскладке каната (так называемой «по эпюре моментов») необходимо учитывать силы приложенные в местах анкеровки и силы вызванные отпором каната в местах перегибов. Все внешние силы от преднапряжения сводятся к горизонтальной силе на анкере R_x , и отпору каната Q . Величина отпора в точке зависит от кривизны каната в этой точке и выражается как $y''(x) * P$, где $y''(x)$ - вторая производная от геометрии каната и первая производная от кривизны. Для плиты геометрия раскладки каната зависит от эксцентриситета (высоты плиты) и центра тяжести сечения в котором осуществляется анкеровка.

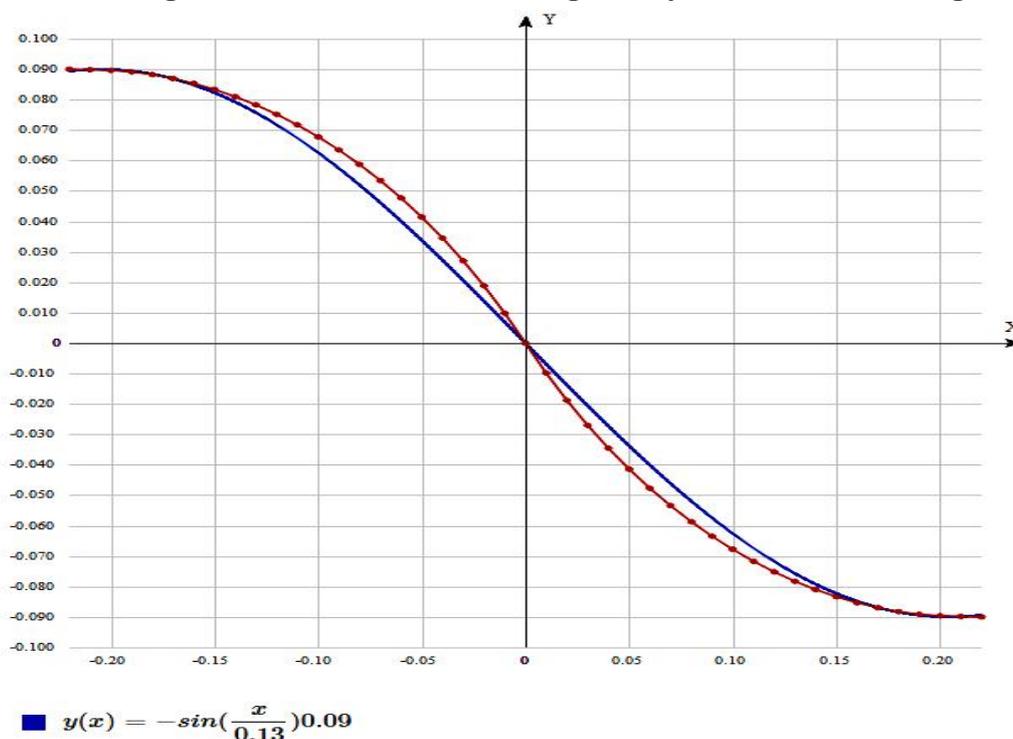


Рисунок 2 – Подбор функции

После выявления точной геометрии раскладки каната, строится график, описывающий положение каната в каждой точке. Далее, при помощи ЭВМ, получена функция, совпадающая с графиком, описывающим геометрию каната, с наименьшими погрешностями (см. рис. 2).

После двойного дифференцирования, получили производную второго порядка, описывающую кривую изменения отпора каната.

$$y''(x)=5.32544\sin (7.69231x) \quad (6)$$

Используя формулу отпора (7), и задаваясь остаточной величиной натяжения канатов в 170 кН, получаем величину отпора каната в каждой характерной точке.

$$Q=y''(x)*P \quad (7)$$

Таблица 4 – Координаты функции и величина отпора

Координаты функции $y=5.32544 \sin (7.69231 x)$		Величина отпора, кН
X	Y	
0,25	5	850
0,2	5,32	904,4
0,15	4,87	827,9
0,1	3,7	629
0,05	2	340
0	0	0
-0,05	-2	-340
-0,1	-3,7	-629
-0,15	-4,87	-827,9
-0,2	-5,32	-904,4
-0,25	-5	-850

Отпор в программном комплексе задаётся при помощи распределённой нагрузки. В случае данной расчётной модели отпор задан в виде двух трапециевидных нагрузок на элементы шириной 100 мм. На первом участке отпор изменяется с величины 904 кН до величины 629 кН, на втором участке от величины 629 кН до 0 кН.

По результатам расчёта оба метода задания предварительного напряжения без сцепления с бетоном оказались жизнеспособными. Это обуславливается тем, что две, полученные разными способами, экспериментальные модели постнапряжённого перекрытия в результате расчётов по I группе предельных состояний, дают схожие результаты с расхождениями не превышающими погрешность.

Заключение. Основным результатом произведённых расчётов, является созданная концепция построения конечно-элементной модели постнапряжённого монолитного перекрытия (ПК SCAD), адекватно описывающей физическую сущность перекрытия.

Предлагаемая методика расчёта и конструирования базируется на результатах проведенных исследований и состоит из последовательности следующих действий:

- создаётся модель здания по стандартному решению SCAD;

- определяется величина предварительного натяжения канатов;
- определяются величины потерь предварительного напряжения в канатах;
- определяется величина отпора канатов в местах перегибов;
- в первичной модели задаются канаты, обычными стержнями, закреплёнными на торцах плит;
- к модели добавляются усилия отпора, а также нагрузки предварительного напряжения (температурной деформацией либо сосредоточенной узловой нагрузкой);
- выполняется расчёт методом конечных элементов, формируются РСУ;
- определяется необходимое армирование плит перекрытия;
- с помощью РСУ в подпрограммах рассчитываются отдельные элементы конструкции.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курлапов Д.В., Тюкаев В.В. Железобетонные и каменные конструкции. Учебник для курсантов и студентов – СПб.: ВИ(ИТ) ВАМТО, 2015. – С. 191–202.
2. Демичев Д.С., Иванов А.Д. Численное моделирование сооружений из монолитного железобетона для обеспечения качества проектирования// Молодые учёные – промышленности Северо-западного региона: Материалы семинаров политехнического симпозиума. Декабрь 2004 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.
3. Портаев Д.В. Опыт расчета монолитных преднапряженных конструкций в программном комплексе SCAD с использованием метода эквивалентных загрузений. - М.: МГУ, 2012 г.
4. Курлапов Д.В., Терещенко Р.В., Волос И.Н. Сравнительный анализ результатов инженерного расчета с расчетом в программном комплексе SCAD OFFICE // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций / Материалы XVIII научно-методической конференции ВИТУ (13 марта 2014 года). ВИ(ИТ) ВА МТО (ВИТУ) – СПб., 2014. – С. 160–165.