

На правах рукописи



ПЕКИН Дмитрий Анатольевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПОРНЫХ ЗОН МОНОЛИТНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ, УСИЛЕННЫХ
СКРЫТЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ КАПИТЕЛЯМИ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Центральном научно-исследовательском и проектно-экспериментальном институте промышленных зданий и сооружений – АО «ЦНИИПромзданий».

Научный руководитель: **Трекин Николай Николаевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Мухамедиев Тахир Абдурахманович,**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, АО «НИЦ «Строительство»
(НИИЖБ им. А.А. Гвоздева)

Галяутдинов Заур Рашидович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры железобетонных и каменных
конструкций ФГБОУ ВО ТГАСУ
(Томский государственный архитектурно-
строительный университет)

Ведущая организация: **АО «ЦНИИЭП жилища – институт
комплексного проектирования жилых
и общественных зданий»**

Защита состоится «07» июня 2017 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, светотехнический корпус, к. 205, тел. (495) 4824076, факс (495) 4824060.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИСФ РААСН и на сайте <http://niisf.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время строительство многоэтажных торговых и многофункциональных центров, подземных автостоянок и гаражей получило широкое распространение по всей стране. Увеличенные длины пролётов зданий продиктованы функциональной необходимостью, но при этом применение монолитных железобетонных безбалочных перекрытий становится затруднительным, поскольку возникает проблема продавливания опорных зон в местах сопряжения с колоннами.

Использование традиционных капителей в отдельных случаях противоречит исходным объёмно-планировочным решениям, например, при реконструкции многоэтажных промышленных зданий под торговые центры с ограниченной высотой этажа или в новом строительстве приводит к увеличению материалоёмкости за счёт увеличения высоты этажа особенно в подземных автостоянках. Конструктивные решения с жёсткой арматурой в виде двутавров или швеллеров, вставленных в арматурный каркас, требуют устройства сварных соединений арматуры с полками элементов, усложняют процесс строительномонтажных работ, а также не регламентируются действующими строительными нормами в части расчётов и проектирования.

Альтернативное конструктивное решение представляет собой скрытую металлическую капитель (СМК), состоящую из перекрёстных стальных листов, размещаемых в двух ортогональных направлениях армирования, высотой равной толщине безбалочного перекрытия с предварительно выполненными отверстиями, в которые вставляются арматурные стержни, не требующие фиксации при помощи сварки. Это повышает технологичность изготовления безбалочных перекрытий, исключает механизм хрупкого разрушения опорных зон и увеличивает несущую способность на изгиб и продавливание. Конструкция СМК запатентована (патент на изобретение №2457302), эффективность применения при строительстве безбалочных перекрытий многократно подтверждена на практике. Таким образом, **актуальным** представляется исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС), прочности и трещиностойкости

опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, и разработка рекомендаций по проектированию.

Степень разработанности темы диссертации. Исследованием безбалочных перекрытий занимались многие отечественные (Лолейт А.Ф., Штаерман М. Я., Ивянский А. М., Гвоздев А. А., Карпенко Н. И. и др.) и зарубежные (Turner С., Maillart R., Mayer M., Corley W. G., Hawkins N. M. и др.) специалисты. Ближкую по конструктивному решению задачу решали Кодыш Э. Н. и Трекин Н. Н. при усилении монолитных перекрытий. Однако для внедрения предлагаемого конструктивного решения необходима разработка методики расчёта прочности и трещиностойкости опорных зон безбалочных перекрытий, армированных обычной стержневой арматурой и стальными листами.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является разработка методики расчёта по прочности и трещиностойкости опорных зон монолитных безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1 Анализ существующих конструктивных решений опорных зон монолитных безбалочных перекрытий.

2 Теоретическое исследование НДС опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК.

3 Экспериментальные исследования НДС опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК.

4 Разработка методики расчёта по прочности и трещиностойкости опорных зон монолитных безбалочных перекрытий, усиленных СМК, на основе анализа результатов экспериментов.

5 Определение области рационального применения СМК.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- установлены параметры конечно-элементной (КЭ) модели для расчёта опорных зон, усиленных СМК, учитывающие нелинейные свойства стали и бетона, образование и раскрытие трещин на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения;

- выявлен эффект снижения изгибных составляющих внутренних усилий опорных зон безбалочных перекрытий при решении объёмной задачи теории упругости и последующего вычисления фактических изгибающих моментов на основе полученных нормальных напряжений;

- получены экспериментальные данные о влиянии СМК на прочность, деформативность и трещиностойкость опорных зон безбалочных перекрытий, подтвердившие справедливость расчётных предпосылок;

- подтверждены экспериментально совместная работа бетона, арматуры и СМК вплоть до разрушения и исключение хрупкого разрушения сопряжения колонны с перекрытием от продавливания;

- разработана методика расчёта опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, по прочности и трещиностойкости.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы:

- на основе численных и экспериментальных исследований разработана методика расчета опорных зон безбалочных перекрытий, учитывающая сложное напряженно-деформированное состояние, влияние СМК на прочность и деформативность конструкции, характер образования и раскрытия трещин;

- получены формулы для определения габаритов СМК, изгибающих моментов, прочности нормальных сечений и трещиностойкости опорных зон;

- предложены практические рекомендации по проектированию опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе применены существующие методы расчёта железобетонных конструкций, инструментарий теорий упругости и прочности бетона, строительной механики на основе метода конечных элементов (МКЭ). При выполнении экспериментов использовались методы на основе действующих нормативных документов, регламентирующих испытания железобетонных конструкций (ГОСТ 8829-94).

Положения, выносимые на защиту:

1 Конструктивное решение опорных зон монолитных безбалочных перекрытий, усиленных СМК, и обоснование целесообразности применения.

2 Результаты численных исследований на базе сравнения различных теорий расчёта безбалочных перекрытий.

3 Распределение внутренних напряжений и деформаций, образование и раскрытие трещин, выявленное в результате натуральных испытаний образцов опорных зон безбалочных перекрытий при кратковременном нагружении.

4 Методика расчёта опорных зон монолитных безбалочных перекрытий, усиленных СМК, по прочности и трещиностойкости.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных методов строительной механики и теории железобетона, удовлетворительной сходимостью теоретических данных с результатами экспериментальных исследований на натуральных образцах.

Апробация результатов. Основные положения диссертации обсуждались на конференции пользователей ПК SCAD (Москва, 2009 г.), на заседании НТС в АО «ЦНИИПромзданий» (Москва, 2015 г.), на международной конференции «Современные проблемы расчёта железобетонных конструкций зданий и сооружений на аварийные воздействия» в НИУ МГСУ (Москва, 2016 г.).

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчёта и экспериментальных исследований вновь возводимых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Внедрение результатов исследований. Результаты, полученные в диссертации, были использованы при выполнении расчётов и конструировании целого ряда объектов:

- плиты перекрытий офисно-складского комплекса по адресу: М. О., д. Николо-Хованское, уч. 9/2-3;
- плиты перекрытий и покрытий подземной автостоянки многоэтажного жилого комплекса по адресу: М. О., г. Чехов, ул. Чехова, д. 79;

- плиты перекрытий и покрытий подземной автостоянки многоэтажного жилого комплекса по адресу: М. О., г. Железнодорожный, ул. Главная, д. 7.

В процессе проектирования и строительства была выявлена и проверена на практике возможность расширения области применения конструктивного решения, в частности для усиления опорных зон фундаментных плит.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 книга, 1 патент на изобретение (№2457302, заявка № 2011108708/03, 2011), 1 патент на полезную модель (№73891, заявка №2006133624/22, 2006).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (119 наименований) и трёх приложений. Объём диссертации составляет 163 страницы машинописного текста, включающих 58 рисунков, 20 таблиц и 67 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследований, а также указаны основные пути их решения.

В первой главе приводятся область применения, описание, преимущества и иллюстрации конструктивного решения опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК. Выполнен аналитический обзор схожих конструктивных решений Анпилова С. М., Мурашкина Г. В., Сивчука Н. А., Кришана А. Л., Купфера М. С., Мельничука А. С., Кошелева М. Н., Кожевникова А. В.

Приведены общие сведения о железобетонных безбалочных перекрытиях на основе прикладных работ Подольского И. С., Глуховского А. Д., Штаермана М. Я., Ивянского А. М., Corley W. G., Hawkins N. M., Гастеева В. А., Сахновского К. В., Байкова В. Н., Сигалова Э. Е., Евстифеева В. Г., Бондаренко В. М., Бакирова Р. О., Назаренко В. Г., Римшина В. И. и на базе теоретических исследований пластинок-оболочек Галеркина Б. Г., Власова В. З., Тимошенко С. П., Новожилова В. В., Гольденвейзера А. Л., Вольмира А. С., Огибалова П. М., Гвоздева А.А., Карпенко Н. И.

Рассмотрены основные требования при назначении геометрических размеров капителей и составляющих их элементов. Приведён технико-экономический анализ и успешные примеры реализации предлагаемого конструктивного решения для зданий различного функционального назначения. Показаны также характерные особенности и новизна конструктивного решения. Отличие заключается в том, что стальные листы перерезают тело бетона на всю высоту сечения и технологически просто обеспечивают совместную работу арматуры, бетона и листов. Это в свою очередь приводит к необходимости рассматривать плитную конструкцию как неоднородное тело уже в процессе определения НДС, что является принципиальным отличием от традиционных конструкций.

В этой связи отдельное внимание в работе уделяется сравнению результатов расчётов однородных тел с использованием технической теории изгиба пластинок (ТТИП) и неоднородных на основе решения объёмных задач теории упругости (ТУ) и теории прочности бетона (ТПБ) Вильяма-Варнка.

Следует отметить, что решение поставленной задачи стало возможным только благодаря предшествующим фундаментальным исследованиям в области механики деформируемого твёрдого тела, строительной механики, теориях железобетона, других ветвей прикладной механики, современным персональным компьютерам и программному обеспечению.

Во второй главе выполняется постановка и решение задач с использованием МКЭ, как наиболее распространённого среди применяемых в области математического моделирования конструкций. МКЭ позволяет рассмотреть НДС опорных зон как однородных плитных конструкций, так и неоднородных, решая объёмные задачи ТУ и ТПБ. При проведении численных исследований использовался ПК SCAD 11.5, ЛИРА 9.6 и ANSYS 13.0.

На основе данных, полученных при решении объёмных задач, анализируется роль компонентов безбалочного перекрытия – бетона, стальных листов и стержневой арматуры. Оценивается сцепление бетона и стальных листов. Определяется возможность возникновения нагельного эффекта и его влияние на несущую способность опорных зон безбалочных перекрытий. Рассматрива-

ется совместная работа компонентов конструкции и необходимость выполнения антикоррозийной защиты. Выполняется оценка нелинейной работы железобетона, анализируется влияние деформированного состояния системы на распределение внутренних напряжений. Сравняются различные способы моделирования опорных зон. При сопоставлении результатов расчёта плоских и объёмных расчётных схем получено значительное расхождение в НДС. Значения нормальных напряжений σ_x и σ_y в ТТИП завышены по сравнению с решением объёмной задачи ГУ для неоднородного тела.

Выполнено сравнение различных расчётных схем опорных зон с применением плоских и объёмных моделей. Сформулированы дополнительные положения для расчёта нормальных сечений по прочности и трещиностойкости. Получены уточняющие формулы, характеризующие наличие стальных листов в поперечном сечении.

Габариты СМК в плане, показанные на рис. 1, назначаются из расчёта на продавливание опорных зон безбалочных перекрытий по формуле:

$$q_l \cdot l_x \cdot l_y \leq h \cdot R_{bt} \cdot u_m = 4 \cdot h \cdot R_{bt} \cdot (l_x + l_y) / \delta, \quad (1.1)$$

где $q_l = g + p$ – расчётная равномерно распределённая нагрузка;

l_x и l_y – длины пролётов; h – высота поперечного сечения;

$u_m = 4 \cdot (l_{0x} + l_{0y}) = 4 \cdot (l_x + l_y) / \delta$ – периметр основания параллелепипеда;

$\delta = l_x / l_{0x} = l_y / l_{0y}$ – коэффициент отношения длин пролёта и капители;

l_{0x} и l_{0y} – расстояния от осей до границ капители.

Требуемые габаритные размеры СМК удобно определять с помощью коэффициента δ . Отношение длины пролёта в любом направлении l_x или l_y к коэффициенту δ является минимально возможным расстоянием l_0 от осей до границы скрытой капители. При равных пролётах $l_x = l_y = l$ и $l_{0x} = l_{0y} = l_0$ неравенство (1.1) преобразуется к виду:

$$\delta = \frac{l_x}{l_{0x}} = \frac{l_y}{l_{0y}} = \frac{l}{l_0} \leq \frac{4 \cdot h \cdot R_{bt} \cdot (l_x + l_y)}{l_x \cdot l_y \cdot q_l} = \frac{8 \cdot h \cdot R_{bt}}{l \cdot q_l}. \quad (1.2)$$

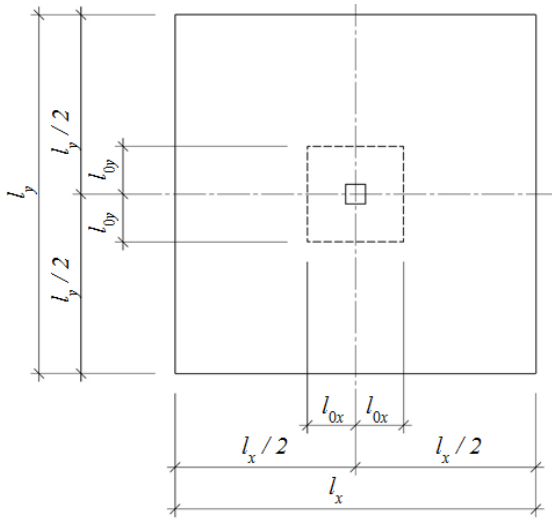


Рис. 1 – Габариты СМК в плане

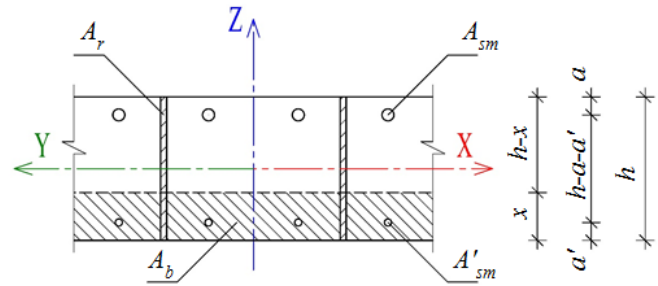


Рис. 2 – Нормальные сечения

Толщина стальных листов определяется путём расчёта на срез по границе сопряжения колонны с капителью без учёта несущей способности бетона по формуле:

$$q_l \cdot l_x \cdot l_y \leq n_{rs} \cdot t_r \cdot h \cdot R_{ys}, \quad (2.1)$$

где $n_{rs} = 8$ – количество поверхностей среза (для центрального участка);

t_r – толщина стальных листов; $R_{ys} = 0,58R_y$ – прочность стали на срез;

R_y – сопротивление стали по пределу текучести.

Неравенство (2.1) при равных пролётах $l_x = l_y = l$ преобразуется к виду:

$$t_r \geq \frac{q_l \cdot l^2}{4,64 \cdot h \cdot R_y}. \quad (2.2)$$

Определение изгибных составляющих внутренних усилий, необходимых для расчёта нормальных сечений, показанных на рис. 2, по результатам решения объёмной задачи теории упругости предлагается выполнять по формуле:

$$M_{red} = \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{1/W_{t,red} + 1/W_{c,red}} = \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{z_t/I_{red,el} + z_c/I_{red,el}} = I_{red,el} \cdot \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{h} \quad (3)$$

$$\text{где } \sigma_{bt,red} = \frac{\sigma_{bt,1} + \sigma_{bt,2} + \dots + \sigma_{bt,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{bt,i}}{n} \text{ и } \sigma_{bc,red} = \frac{\sigma_{bc,1} + \sigma_{bc,2} + \dots + \sigma_{bc,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{bc,i}}{n} -$$

приведённые растягивающее и сжимающее нормальные напряжения в крайних фибрах бетона;

$\sigma_{bt,i}$ и $\sigma_{bc,i}$ – максимальные растягивающие и сжимающие нормальные напряжения бетона в крайних объёмных КЭ.

$W_{t,red}$ и $W_{c,red}$ – моменты сопротивления растянутой и сжатой граней.

Расчёт нормальных сечений опорных зон безбалочных перекрытий по предельным усилиям выполняется на основе решения уравнения равновесия суммы моментов внутренних усилий относительно нейтральной оси и нахождения предельного изгибающего момента M_{ult} в пластической стадии:

$$M_{ult} = R_b \cdot A_{b,c} \cdot \frac{x}{2} + R_{sc} \cdot A'_{sm} \cdot z_{s,c} + R_s \cdot A_{sm} \cdot z_{s,t} + R_y \cdot A'_r \cdot \frac{x}{2} + R_y \cdot A_r \cdot \frac{h-x}{2}. \quad (4)$$

Высота сжатой зоны бетона x (рис. 2) находится на основе решения уравнения равновесия суммы проекций внутренних усилий на ось X или Y:

$$R_b \cdot A_{b,c} + R_{sc} \cdot A'_{sm} + R_y \cdot A'_r = R_s \cdot A_{sm} + R_y \cdot A_r. \quad (5)$$

Уравнение (5) преобразуется к виду:

$$R_b \cdot x \cdot b + R_{sc} \cdot n_{sc} \cdot A'_s + R_y \cdot x \cdot t_r \cdot n_r = R_s \cdot n_s \cdot A_s + R_y \cdot t_r \cdot n_r \cdot (h-x). \quad (6)$$

Решая уравнение относительно x , находим:

$$x = \frac{R_s \cdot n_s \cdot A_s + R_y \cdot h \cdot t_r \cdot n_r - R_{sc} \cdot n_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b + 2 \cdot R_y \cdot t_r \cdot n_r}. \quad (7)$$

Расчёт ширины раскрытия трещин нормальных к продольной оси элемента выполняется по формуле:

$$a_{crc,f} = \frac{a_{crc,a}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_{s,red}}{E_s} \cdot l_s \leq a_{crc,ult} \quad (8)$$

где $a_{crc,f}$, $a_{crc,a}$, $a_{crc,ult}$ – фактическая, абсолютная и предельная ширина раскрытия нормальных трещин.

Приведённые напряжения в арматуре с учётом пластической работы бетона на сжатой зоне вычисляются по формуле:

$$\sigma_{s,red} = \frac{M_{red} \cdot (h_0 - x)}{I_{red,pl}} \cdot \alpha_{s1} = \frac{I_{red,el} \cdot (\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}) \cdot (h_0 - x)}{h \cdot I_{red,pl}} \cdot \alpha_{s1}, \quad (9)$$

где $M_{red} = I_{red,el} \cdot \frac{\sigma_{bt,red} - \sigma_{bc,red}}{h}$ – приведённый изгибающий момент согласно (3);

Высота сжатой зоны бетона x находится на основе равенства нулю статического момента сечения с трещиной относительно нейтральной оси:

$$x = h_0 \cdot \left[\sqrt{\left(\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} + \frac{b_r \cdot h}{b \cdot h_0} \cdot \alpha_{s1} \right)^2 + 2 \cdot \left(\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} \cdot \frac{a'}{h_0} + \frac{b_r \cdot h^2}{2 \cdot b \cdot h_0^2} \cdot \alpha_{s1} \right)} - \left(\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} + \frac{b_r \cdot h}{b \cdot h_0} \cdot \alpha_{s1} \right) \right]. \quad (10)$$

В третьей главе описываются экспериментальные исследования фрагментов плит перекрытий, приводятся технические характеристики и чертежи испытанных образцов, испытательного стенда, показанного на рис. 3, измерительного оборудования, процесса нагружения, характер разрушения и т.д.

Для проведения эксперимента и наглядной иллюстрации вклада каждого компонента конструкции в несущую способность опорных зон безбалочных перекрытий были изготовлены и испытаны отдельные образцы, составляющие вместе рассматриваемое конструктивное решение:

- металлическая капитель 1 (МК-1) состояла из стальных листов габаритами $2000 \times 6 \times 240(h)$ мм по 4 в каждом направлении с шагом 400 мм;
- фрагмент плиты перекрытия 1 (ФПП-1), состоящий из МК-1 и бетона;
- фрагмент плиты перекрытия 2 (ФПП-2), состоящий из растянутой арматуры $18\emptyset 12$ в каждом направлении и бетона.

В качестве варьируемых параметров выбраны площадь продольной растянутой арматуры и размещение в соответствующих образцах сжатой арматуры, что позволит проанализировать изменение НДС при изменении основных компонентов конструкции. Для этого были изготовлены и испытаны следующие образцы, на основе предлагаемого конструктивного решения:

- фрагмент плиты перекрытия 3 (ФПП-3), состоял из МК-1, растянутой арматуры $18\emptyset 12$ в каждом направлении и бетона;
- фрагмент плиты перекрытия 4 (ФПП-4), состоял из МК-1, растянутой арматуры $18\emptyset 16$ в каждом направлении и бетона;
- фрагмент плиты перекрытия 5 (ФПП-5), состоял из МК-1, растянутой $18\emptyset 12$ и сжатой $18\emptyset 8$ арматуры в каждом направлении и бетона;

- фрагмент плиты перекрытия 6 (ФПП-6), состоял из МК-1, растянутой 18Ø16 и сжатой 18Ø8 арматуры в каждом направлении и бетона.

Общие характеристики исследованных фрагментов плит приводятся в следующей таблице:

Марка образца	Марка РС	Габариты образца, м	Габарит опоры, м	Толщина листов, мм	Класс стали листов	Растянутая арматура	Сжатая арматура	Класс арматуры	E_s , тс/м ²	Класс бетона	E_b , тс/м ²	Разрушающая нагрузка P_f , тс	Дата испытаний в 2010 г.	
МК-1	РС60	2,0×2,0×0,24(h)	-	6	С345	-	-	-	2,1·10 ⁷	-	-	25,6	07.04	
ФПП-1	РС61		0,5	-	-	18Ø12	-	-		А500	В30	3,31·10 ⁶	108,0	10.06
ФПП-2	РС62			-	-	18Ø12	-	-					108,0	28.05
ФПП-3	РС63			18Ø12	-	-	-	-					228,0	14.05
ФПП-4	РС64			18Ø16	-	-	-	-					268,0	06.05
ФПП-5	РС65			18Ø12	18Ø8	-	-	-					228,0	22.04
ФПП-6	РС66			18Ø16	18Ø8	-	-	-					268,0	15.04

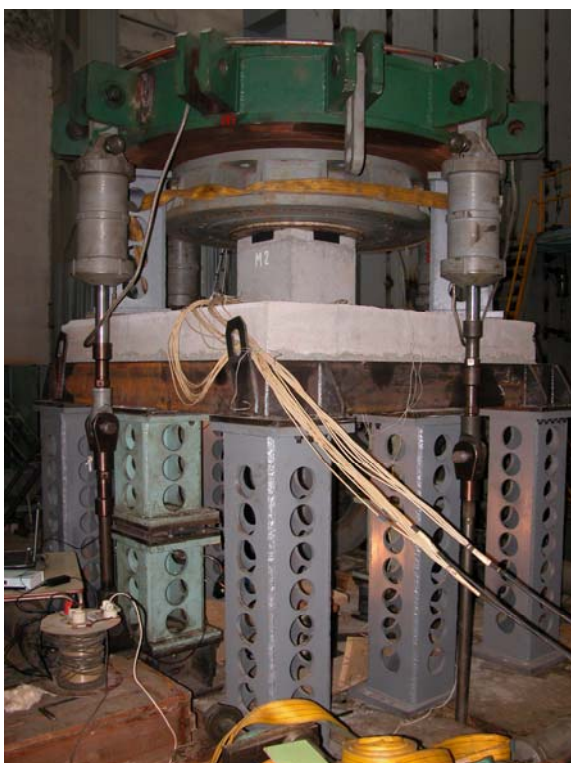
Габаритные размеры фрагментов плит перекрытий 2,0×2,0×0,24(h) м. Оголовок колонны выполнен в виде куба с размером стороны 0,5 м. Предварительно в стальных листах были выполнены отверстия Ø23 мм с шагом 100 мм и прорези на половину высоты поперечного сечения 8×125(h) мм с шагом 400 мм для стыковки листов между собой в местах пересечений. Армирование фрагментов плит выполнено отдельными стержнями. Для изготовления СМК и стержней использовалась сталь класса С345 по ГОСТ 27772-88* и А500 по СТО АСЧМ 7-93 соответственно.

На характерные арматурные стержни устанавливались по два датчика с каждой стороны стержня. Поверхность арматуры предварительно подготавливалась к приклейке тензорезисторов посредством устройства плоских площадок, размещаемых параллельно друг другу с разных сторон стержней. На стальные листы МК-1 также устанавливались тензорезисторы. На сжатую поверхность бетона в створе с характерными арматурными стержнями устанавливались тензорезисторы с шагом 100 мм.

Для проведения испытаний был изготовлен опорный контур с габаритами в плане 2,16×2,16×0,24(h) м коробчатого поперечного сечения из спаренного

швеллера №24 по ГОСТ 8240-89. Стенки швеллера расположены у наружных граней сечения. Опорный контур был установлен на 8 стоек высотой 1,2 м, опирающихся на силовой пол. Образцы устанавливались на цементно-песчаный раствор, уложенный по периметру опорного контура, для обеспечения плотного контакта. Нагружение осуществлялось 4 гидравлическими силовозбудителями от общего коллектора. Силовозбудители крепились к силовому полу и нагрузочной плите, через которую передавалось усилие на оголовок колонны.

Нагрузка, прикладываемая к испытываемым образцам, изменялась ступенчато, увеличиваясь через равные промежутки времени на постоянную величину, равную 20 тс, непосредственно до момента разрушения. Результаты измерения прогибов и ширины раскрытия нормальных трещин ФПП-1...ФПП-6 приведены на графиках, показанных на рис. 4, 5.



а) образец в стенде, вид сбоку



б) образец в стенде, вид снизу

Рис. 3 – Испытательный стенд

На основании результатов экспериментов можно утверждать, что:

- СМК не позволяют реализоваться механизму продавливания;
- несущая способность на изгиб опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, увеличивается;

- картина НДС и трещинообразования опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, меняется по сравнению с традиционными решениями;
- совместная работа стальных листов, арматуры и бетона обеспечена вплоть до разрушения;
- для всех фрагментов плит, кроме традиционного без СМК, характерно пластическое разрушение по растянутой арматуре, сжатая зона бетона не была раздроблена ни в одном образце.

В четвертой главе выполнено сопоставление результатов, полученных прямыми измерениями – прогибы, напряжения в бетоне, арматуре, с аналогичными значениями, определёнными при помощи численного моделирования в ПК SCAD 11.5 и ANSYS 13.0. Дополнительно оценивается работоспособность по второй группе предельных состояний, а также выработаны рекомендации по проектированию и уточнена методика расчёта опорных зон безбалочных перекрытий.

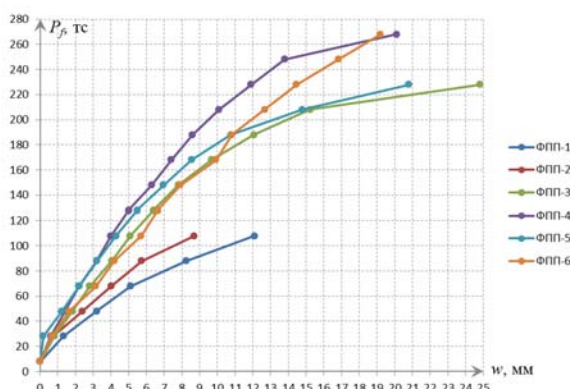


Рис. 4 – Зависимость прогибов w от нагрузки P_f

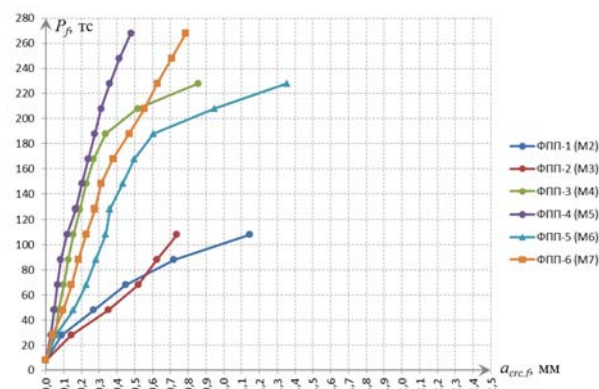


Рис. 5 – Зависимость фактической ширины раскрытия трещин $a_{crc,f}$ от нагрузки P_f

Максимальные относительные деформации в растянутой арматуре перед разрушением для фрагментов плит ФПП-2...ФПП-6 составили: 0,00409, 0,00526, 0,00298, 0,00348, 0,00601, соответственно. Сравнивая эти значения с величиной относительных деформаций соответствующих условному пределу текучести 0,00217, видно, что практически для всех испытанных образцов арматура работает в пластической стадии. При сопоставлении с предельной относительной деформацией 0,025 запас также достаточно внушительный.

По результатам испытаний фрагментов безбалочных перекрытий, усиленных СМК, можно сделать вывод о том, что пока все растянутые арматурные стержни не перешли в пластическую стадию работы, конструкция продолжает сопротивляться внешней нагрузке. Разрушение фрагментов опорных зон ФПП-3...ФПП-6 носит пластический характер и связано с превышением предела текучести арматуры у всех стержней в сечении.

Разрушение испытанных фрагментов плит ФПП-1...ФПП-6, за исключением ФПП-2, произошло на III стадии НДС по арматуре. Разрыва арматуры и раздробления сжатой зоны бетона не произошло ни в одном образце. Критерием разрушения стал процесс нарастания прогибов при попытке увеличить нагрузку на следующую ступень, равную 20 тс. В следующих таблицах приведены исходные данные и результаты расчётов на основе РС61... РС66.

Геометрические характеристики элементов и приведённые напряжения

№ образца	h , мм	b , мм	a , мм	n_s , шт	d_s , мм	A_{sm} , см ²	a' , мм	n_{sc} , шт	d_{sc} , мм	A'_{sm} , см ²	n_r , шт	t_r , см	h_r , см	$\sigma_{bt,red}$, тс/м ²	$\sigma_{bc,red}$, тс/м ²
РС61 (ФПП-1)	240	2000	40								4	0,6	24	792,5	-1016,6
РС62 (ФПП-2)	240	2000	40	18	12	20,3								808,8	-1082,4
РС63 (ФПП-3)	240	2000	40	18	12	20,3					4	0,6	24	1606,8	-2124,3
РС64 (ФПП-4)	240	2000	40	18	16	36,2					4	0,6	24	1840,7	-2480,1
РС65 (ФПП-5)	240	2000	40	18	12	20,3	45	18	8	9,0	4	0,6	24	1601,3	-2101,4
РС66 (ФПП-6)	240	2000	40	18	16	36,2	45	18	8	9,0	4	0,6	24	1828,3	-2448,2

Геометрические характеристики поперечных сечений без трещин

№ образца	α	S_{red} , см ³	I_b , см ⁴	I_{sm} , см ⁴	I'_{sm} , см ⁴	I_r , см ⁴	$I_{red,el}$, см ⁴	A_{red} , м ²	z_t , см	z_c , см	M_{red} , тс*м	N_{red} , тс
РС61 (ФПП-1)	6,34	61981	230400			2765	247930	0,51652	12,00	12,00	18,7	-58,1
РС62 (ФПП-2)	6,34	58114	230400	1232			238211	0,49287	11,79	12,21	18,8	-60,0
РС63 (ФПП-3)	6,34	62494	230400	1235		2765	255760	0,52939	11,80	12,20	39,8	-121,4
РС64 (ФПП-4)	6,34	62900	230400	2124		2765	261396	0,53947	11,66	12,34	47,1	-140,4
РС65 (ФПП-5)	6,34	63610	230400	1264	521	2765	259247	0,53509	11,89	12,11	40,0	-124,8
РС66 (ФПП-6)	6,34	64016	230400	2169	542	2765	265118	0,54518	11,74	12,26	47,2	-142,7

Геометрические характеристики поперечных сечений с трещинами

№ образца	$E_{b,red}$, кгс/см ²	α	$x=z_c$, см	z , см	z' , см	I_b , см ⁴	I_s , см ⁴	I'_s , см ⁴	$I_{r,pl}$, см ⁴	$I_{red,pl}$, см ⁴
РС61 (ФПП-1)	149333,3	14,06	6,61	13,39	6,61	19254			4438	81652
РС62 (ФПП-2)	149333,3	14,06	6,27	13,73	6,27	16433	3827			70238
РС63 (ФПП-3)	149333,3	14,06	8,10	11,90	8,10	35429	2875		3641	127039
РС64 (ФПП-4)	149333,3	14,06	8,99	11,01	8,99	48438	4388		3287	156351
РС65 (ФПП-5)	149333,3	14,06	7,94	12,06	3,44	33371	2953	107	3714	128600
РС66 (ФПП-6)	149333,3	14,06	8,81	11,19	4,31	45587	4533	167	3351	158784

Расчёт нормальных сечений по предельным усилиям

№ образца	$I_{red,el}$, см ⁴	$\sigma_{bt,red}$, тс/м ²	$\sigma_{bc,red}$, тс/м ²	x, см	$\xi=x/h$	M_{red} , тс*м	M_{ult} , тс*м	K_M
PC61 (ФПП-1)	247930	792,5	-1016,6	3,85	0,20	18,7	19,7	0,95
PC62 (ФПП-2)	238211	808,8	-1082,4	2,70	0,10	18,8	17,4	1,08
PC63 (ФПП-3)	255760	1606,8	-2124,3	5,68	0,20	39,8	34,0	1,17
PC64 (ФПП-4)	261396	1840,7	-2480,1	7,12	0,30	47,1	43,9	1,07
PC65 (ФПП-5)	259247	1601,3	-2101,4	4,87	0,20	40,0	34,3	1,17
PC66 (ФПП-6)	265118	1828,3	-2448,2	6,30	0,30	47,2	44,8	1,05

Расчёт нормальных сечений по допускаемым напряжениям

№ образца	M_{red} , тс*м	σ_s,red , тс/см ²	K_s	σ_b,red , тс/м ²	K_b	$\sigma_{sc,red}$, тс/см ²	K_{sc}	σ_r,red , тс/см ²	K_r	$\sigma_{rc,red}$, тс/см ²	K_{rc}
PC61 (ФПП-1)	18,7			1513,0	0,73			5,6	1,65	2,1	0,62
PC62 (ФПП-2)	18,8	5,2	1,13	1675,6	0,81						
PC63 (ФПП-3)	39,8	5,2	1,13	2535,2	1,22			7,0	2,06	3,6	1,06
PC64 (ФПП-4)	47,1	4,7	1,02	2705,9	1,30			6,4	1,88	3,8	1,12
PC65 (ФПП-5)	40,0	5,3	1,15	2469,5	1,19	1,5	0,33	7,0	2,06	3,5	1,03
PC66 (ФПП-6)	47,2	4,7	1,02	2621,1	1,26	1,8	0,39	6,4	1,88	3,7	1,09

Расчёт ширины раскрытия трещин

№ образца	M_{red} , тс*м	$R_{bt,rser}$, кгс/см ²	φ_1	φ_2	φ_3	$W_{t,red}$, см ³	$M_{crc,red}$, тс*м	ψ_s	l_s , мм	$a_{crc,a}$, мм	$a_{crc,f}$, мм	K_{crc}
PC61 (ФПП-1)	18,7	18,40	1,4	0,5	1,0	20660,8	3,8	0,813	400	0,62	0,31	0,78
PC62 (ФПП-2)	18,8					20204,5	3,7	0,819		0,58	0,58	1,45
PC63 (ФПП-3)	39,8					21674,6	4,0	0,908		0,64	0,32	0,80
PC64 (ФПП-4)	47,1					22418,2	4,1	0,920		0,58	0,29	0,73
PC65 (ФПП-5)	40,0					21803,8	4,0	0,908		0,65	0,33	0,83
PC66 (ФПП-6)	47,2					22582,5	4,2	0,918		0,58	0,29	0,73

При сравнении нижних граней фрагментов ФПП-2 и ФПП-4 расстояния между смежными кольцевыми трещинами l_s вне габарита колонны заметно отличаются. Для ФПП-2 (образец без СМК) шаг образования трещин составлял приблизительно 300 мм, а для ФПП-4 (образец с СМК) ориентировочно 150 мм. Таким образом, выполнить качественную оценку ширины раскрытия трещин a_{crc} при таком разбросе параметра l_s затруднительно. Очевидно, приняв расстояние между смежными трещинами l_s равным шагу стальных листов 400 мм, можно с достаточной точностью в запас гарантировать выполнение требований норм по ограничению максимальной ширины раскрытия.

При определении критической нагрузки по трещиностойкости на основе испытаний и рис. 5, проведя вертикальную линию от значения 0,4 мм вверх,

получим: для ФПП-3 – 195 тс (при разрушающей нагрузке $P_f = 228$ тс), для ФПП-4 – 242 тс (при $P_f = 268$ тс). Разделив значения P_f на соответствующие величины критических нагрузок по трещиностойкости для каждого образца, получим 1,17 и 1,11. С учётом средневзвешенного значения коэффициента надёжности по нагрузке γ_f , колеблющегося в диапазоне 1,1-1,2 для общественных зданий, можно утверждать, что требования по трещиностойкости соблюдаются при обеспечении прочности опорной зоны при изгибе.

Рекомендации по расчёту опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, дополняющие действующие строительные нормы и правила:

1 Применение теорий изгиба пластин Кирхгофа-Лява, Тимошенко-Рейсснера-Миндлина является вспомогательным инструментом, необходимым для рассмотрения НДС вертикальных конструкций в пространственных РС.

2 Применение линейной теории упругости в линейной постановке является наиболее оправданным средством при определении геометрических характеристик основных компонентов в первом приближении.

3 Близкая к действительности картина НДС опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных СМК, может быть получена только на основе решения нелинейной деформационной модели с использованием ТПБ, поскольку упрощения, используемые в ТТИП и плоских нелинейных деформационных моделях, искажают НДС опорных зон. Бетон, стальные листы и арматура моделируются при помощи объёмных и стержневых КЭ.

Анализируя результаты исследований, можно в хронологическом порядке сформулировать порядок расчёта безбалочных перекрытий:

1 Создание пространственной РС здания или сооружения. Назначение толщин безбалочных перекрытий в первом приближении выполняется по аналогии с традиционными конструкциями. Модуль упругости плитных конструкций принимается равным начальному модулю упругости бетона на сжатие E_b .

2 Определение требуемого количества продольной арматуры в соответствии с первой группой предельных состояний на основе данных пространственного расчёта.

3 Определение габаритных размеров СМК выполняется на основе решения уравнений (1) и (2).

4 Создание объёмных РС типовых фрагментов безбалочных перекрытий с учётом полученных ранее результатов.

5 Проведение технико-экономического анализа, позволяющего с учётом рыночной стоимости листового проката, арматуры и бетона, выбрать толщины, диаметры и классы применяемых строительных материалов.

6 Повторное выполнение пространственного расчёта с учётом принятых геометрических характеристик сечений плитных конструкций для определения НДС вертикальных конструктивных элементов.

Существующие положения для расчёта нормальных сечений необходимо дополнить следующим – изгибающие моменты M_x и M_y , действующие в двух взаимно ортогональных плоскостях и полученные из линейного расчёта на основе решения объёмной задачи ТУ, полагаются равномерно распределёнными по ширине соответствующего поперечного сечения опорной зоны безбалочного перекрытия между смежными нулевыми моментными точками.

В пятой главе выполнено технико-экономическое сравнение традиционных капителей и СМК, определена область рационального применения. На основании полученных результатов можно утверждать, что:

- рассмотренное и традиционные конструктивные решения сопоставимы между собой по технико-экономическим показателям;

- в случае необходимости ускорения процесса строительства или ограничений по высоте этажа при пролётах более 6 м и нагрузках более 2 тс/м² применение скрытых металлических капителей оправдано;

- в период с 2005 по 2016 г. скрытые металлические капители неоднократно применялись при строительстве плитных железобетонных конструкций.

В приложении А диссертации представлены документы о внедрении и достигнутом экономическом эффекте. **В приложении Б** приведены изополя перемещений, нормальных напряжений и армирования для РС1...РС6 в ПК SCAD на основе ТТИП и объёмной задачи ТУ; изополя перемещений и главных

напряжений для РС5 в ПК ЛИРА с использованием плоской нелинейной деформационной модели; изополя перемещений, нормальных, касательных, главных и эквивалентных напряжений бетона, СМК и стержней для РС73 в ПК ANSYS на основе нелинейной деформационной модели с использованием ТПБ. **В приложении В** приведены изополя перемещений, нормальных, главных и эквивалентных напряжений бетона, СМК и стержней для РС81 (фрагмента безбалочного перекрытия с учётом пролётной части конструкции) в ПК ANSYS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационной работы позволяют подвести следующие **итоги**:

1 Разработано конструктивное решение и методика расчета по двум группам предельных состояний опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями, подтвержденные теоретическими и экспериментальными исследованиями.

2 Проведено теоретическое исследование напряжённо-деформированного состояния опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями, на основе метода конечных элементов с применением различных теорий прочности. При этом показано, что близкая к действительности картина НДС опорных зон может быть получена на основе решения нелинейной деформационной модели с учётом неоднородного распределения материалов в конструкции и сложного напряжённо-деформированного состояния. Бетон, стальные листы и арматура моделируются объёмными и стержневыми конечными элементами, учитывающие неупругую работу материалов, образование и раскрытие трещин, что позволяет надёжно оценивать несущую способность конструкции по первому и второму предельным состояниям. Разность между теоретической и фактической разрушающей нагрузкой для образцов с металлическими капителями не превысило 15%. Отношение экспериментальных и теоретических прогибов для образцов с металлическими капителями на последних этапах нагружения отличаются между собой в среднем на 10%.

3 Экспериментально подтверждено, что несущая способность опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями, с принятыми параметрами армирования возросла до 2,11 раз по сравнению с традиционным железобетонным фрагментом безбалочного перекрытия. Разрушение образцов со скрытыми металлическими капителями происходило плавно по арматуре. При этом все растянутые арматурные стержни опорной зоны перешли в пластическую стадию работы, а в сжатой зоне бетона и в стальных листах напряжения не достигали предельных значений и элементы продолжали сопротивляться внешней нагрузке.

Разрушение образца без металлической капители носило хрупкий характер с образованием «пирамиды продавливания».

4 Экспериментально установлено, что скрытые металлические капители существенно влияют на картину напряжённо-деформированного состояния опорных зон безбалочных перекрытий. Прогибы образцов с металлическими капителями снизились на 53% по сравнению с образцом с обычным армированием. Абсолютная ширина раскрытия трещин $a_{cr,c,a}$ для образцов с металлическими капителями при нагрузке $P_f = 108$ тс меньше, чем у образца без капители в интервале от 1,61 до 3,06 раз.

5 Экспериментально показано, что рассечение тела бетона стальными листами на всю высоту поперечного сечения не оказывает существенного влияния на несущую способность железобетонной конструкции. Совместная работа конструктивных элементов наблюдалась на протяжении всех этапов нагружения без выполнения каких-либо специальных мероприятий, а также после разрушения образцов при снятии нагрузки.

6 Определена область рационального применения конструктивного решения в безбалочных перекрытиях. Основываясь на критериях по ограничению объёмно-планировочных решений, технологических и архитектурных требований, целесообразным оказывается применение скрытых металлических капителей в монолитных безбалочных перекрытиях при сетке колонн более 6×6 м и равномерно распределённых нагрузках более 2 тс/м². Существенного повыше-

ния эффективности применения можно добиться при использовании скрытых металлических капителей в фундаментных плитах.

7 Технологичный способ соединения арматуры и стальных листов без сварки, заводская готовность металлоконструкций, прогнозируемое расположение нормальных трещин, увеличение несущей способности и изгибной жёсткости опорных зон позволяют повысить технико-экономические показатели безбалочных перекрытий и получить экономию материалов в частности бетона до 16%.

По результатам выполненного исследования сформулированы следующие **рекомендации** по использованию результатов диссертационной работы:

1 Класс стали листового проката для СМК необходимо принимать близким к классу стали рабочей арматуры. Если сопротивление растяжению рабочей арматуры существенно выше сопротивления растяжению стальных листов, то необходимо применять дополнительные конструктивные мероприятия.

2 Расстояние между стальными листами определяется на основе базового расстояния между нормальными трещинами l_s и принимается не менее 300 мм и не более 600 мм (или толщины плиты).

3 Прорези в стальных листах, необходимые для сборки металлической капители, выполняются на высоту не более $1/2$ высоты сечения безбалочного перекрытия плюс дополнительные 2 мм. Ширина прорезей не должна превышать толщину стыкуемых стальных листов плюс дополнительные 2 мм.

4 Диаметр отверстий в стальных листах необходимо принимать с учётом периодического профиля арматуры, но не более диаметра стержня нетто плюс дополнительные 6 мм. Положение отверстий в стальных листах по вертикали принимается в соответствии с требованиями норм по обеспечению арматуры защитным слоем бетона. Шаг отверстий, размещаемых по одной линии, должен приниматься не менее 75 мм.

5 В случае наличия агрессивной среды по отношению к стальным листам необходимо выполнять антикоррозийную защиту поверхностей листов в соответствии с требованиями норм.

6 Сварные швы при соединении стальных листов выполнять в соответствии с требованиями норм.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- исследование напряжённно-деформированного состояния опорных зон фундаментных плит, усиленных скрытыми металлическими капителями;
- совместное использование скрытых металлических капителей и предварительно-напряженной канатной арматуры;
- рассмотрение применения скрытых металлических капителей в сборных безбалочных перекрытиях;
- исследование влияния строительного подъёма, выполняемого в пролётной части, на напряжённно-деформированное состояние опорных зон безбалочных перекрытий, усиленных скрытыми металлическими капителями.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 Трекин, Н.Н. Применение скрытых металлических капителей в безбалочных монолитных перекрытиях / Н.Н. Трекин, Д.А. Пекин // Современная наука и инновации. – 2016. – №2. С.110-115.

2 Трекин, Н.Н. Скрытые металлические капители безбалочных монолитных перекрытий / Н.Н. Трекин, Д.А. Пекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №7. С.17-20.

3 Пекин, Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция / Д.А. Пекин // Архитектура и строительство России. – 2009. – №8. С.20-37.

Патенты:

1 Пекин, Д.А. Патент на изобретение №2457302. Плитная строительная конструкция / Д.А. Пекин, О.Г. Прилуцкий (РФ) – заявка № 2011108708, 2011.

2 Пекин, Д.А. Патент на полезную модель №73891. Плитная железобетонная конструкция / Д.А. Пекин, А.Л. Мочалов (РФ) – заявка №2006133624, 2006.

Книги:

1 Пекин, Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция // Научное издание / Д.А. Пекин. – М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2010. – 440 с.