

*На правах рукописи*

**МОСКАЛЕВ Михаил Борисович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛИТНО-СТРУКТУРНЫХ  
МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт–Петербург

2011

Работа выполнена на кафедре конструкций из дерева и пластмасс ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Михайлов Борис Кузьмич**
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Лабудин Борис Васильевич**  
(Северный (Арктический) федеральный университет), г. Архангельск
- кандидат технических наук, доцент  
**Корзон Сергей Александрович**  
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)
- Ведущая организация:** ГОУ ВПО «Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова»

Защита состоится «02» июня 2011 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор технических наук, профессор

Л.Н. Кондратьева

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Плитно-структурные металлодеревянные конструкции (ПСК) обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими. Это позволяет их использовать при перекрытии больших и средних пролетов. Однако в настоящее время применение таких комбинированных конструкций ограничено и обусловлено недостаточной изученностью новых материалов, узлов и схем.

Одним из направлений совершенствования плитно-структурных конструкций является создание конструкций с регулируемым напряженно-деформированным состоянием (НДС), требующее специальных исследований по управлению напряженно-деформированным состоянием металлодеревянных ПСК, проведение которых является актуальной задачей.

**Цель исследования:** Совершенствование металлодеревянных плитно-структурных конструкций с регулированием напряженно-деформированного состояния в процессе проектирования, создания и эксплуатации.

Для достижения поставленной цели определены задачи: выполнить системный анализ существующих металлодеревянных конструкций в контексте проблемы повышения эффективности использования древесины и металла; разработать методику инженерного расчета металлодеревянных конструкций с регулируемыми напряжениями; усовершенствовать узловые соединения элементов ПСК, обеспечивающие минимальную податливость стыков поясов и решетки; выполнить теоретические исследования напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом регулирования усилий; оценить влияние влажности, температуры, податливости узлов на напряженно-деформированное состояние металлодеревянных конструкций; провести экспериментальные исследования и оценить несущую способность и деформативность металлодеревянных ПСК с регулируемыми усилиями в затяжках; разработать рекомендации по использованию большепролетных ПСК для трансформируемых крыш (покрытий).

### **Научную новизну составляют и выносятся на защиту:**

- результаты исследования влияния регулирования усилий в затяжках для уменьшения материалоемкости металлодеревянной ПСК;
- конструкция безмоментного узлового соединения нижнего пояса ПСК с раскосами (заявка № 2011105728 от 15.02.2011);
- выбор рационального расположения затяжек в металлодеревянных ПСК в зависимости от условий их опирания;
- методика определения напряженно-деформированного состояния металлодеревянной ПСК при регулировании усилий;

- результаты экспериментальных исследований НДС в ПСК при регулировании усилий в затяжках;
- результаты исследования влияния влажности, температуры и податливости узлов на предельное состояние металлодеревянных конструкций;

**Объектом исследования** являются металлодеревянные плитно-структурные конструкции с регулированием усилий в затяжках.

**Научная гипотеза:** регулирование напряженно-деформируемого состояния в металлодеревянных ПСК позволит уменьшить величину усилий в элементах и снизить материалоемкость при сохранении эксплуатационной надежности конструкции.

**Практическое значение работы:** металлодеревянные ПСК с регулированием (управлением) НДС могут быть использованы в конструкциях трансформируемых покрытий зданий и сооружений.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием классических гипотез и допущений в строительной механике; методикой экспериментальных исследований; численных экспериментов с использованием стандартных программ; приемлемой сходимостью результатов эксперимента и теоретических исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались на 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (СПбГАСУ, 2008 год), на 61-й Международной научно-технической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2008 год), на международном симпозиуме «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)» (Брест, 2009 год), на 63-й Международной научно-технической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2010 год), на «67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета» (СПбГАСУ, 2010 год), на «68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета» (СПбГАСУ, 2011 год), на III и IV съездах-конгрессах Ассоциации деревянного домостроения (СПбГАСУ, 2010-2011 г.г.).

**Объем и структура.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и приложения. Общий объем 147 страниц текста, 74 рисунка, 12 таблиц.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 6 печатных работах, в том числе 2 в журналах, входящих в перечень ВАК.

## Содержание работы

**Во введении** отражена актуальность темы диссертации, сформулированы цели и поставлены задачи исследования. Отмечены научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** выполнен обзор современного состояния и перспективы развития металлодеревянных плитно-структурных конструкций, намечены пути их совершенствования в направлении создания металлодеревянных регулируемых конструкций для зданий различного назначения.

Анализ современного состояния металлодеревянных ПСК с регулируемыми усилиями велся по двум основным направлениям: анализ существующих металлодеревянных ПСК и конструкций с управляемым НДС.

Отмечается вклад в развитие теории расчета и практики применения пространственных конструкций зданий и сооружений отечественных и зарубежных ученых: Н.П. Абовский., С.А. Амбарцумян, В.З. Власов, А.С. Городецкий, Ю.А. Елисеев, М.П. Забродин, В.А.Игнатъев, В.П. Ильин, И.С. Инжутов, В.И. Колчунов, Л.Н.Кондратьева, В.А. Лебедев, Л.Н. Лубо А.М. Масленников, А.П.Морозов, Б.К. Михайлов, Х.М. Муштари, В.В. Новожилов, Д.Т.Райт, С.П. Тимошенко, В.И. Травуш, В.И. Трофимов, А.П. Филин, Р.И. Хисамов, В.В. Шугаев, E. Dischinger, V. Fuller, F. Lederer, Z. Makowski, E. Reissner, LeRicolier и др.

Пространственные деревянные конструкции и методы их расчета получили развитие в 30-х годах прошлого столетия и успешно развиваются, реализуя на практике покрытия до 200 и более метров. В этом направлении работали П.А. Дмитриев, Ф.Ф. Гаянов, И.М. Гринь, В.Ф.Иванов, М.Е. Каган, М.Ф. Ковальчук, А.Г. Кондаков, Г.В. Кривцова, Б.В. Лабудин, С.А. Малбиев, К.П. Пятикрестовский, К.И. Рузиев, Г.В.Свеницкий, Е.И. Светозарова, Е.Н. Серов, Ю.В. Слицкоухов, А.В.Турков, С.Б. Турковский, Я.Ф. Хлебной и др.

Решетчатые конструкции являются распространенным видом пространственных систем, их можно разделить на перекрестно-стержневые конструкции и сетчатые оболочки. Конструктивные решения металлодеревянных ПСК можно условно объединить в две группы: конструкции типа СибЗНИИЭП и ЦНИИСК им. Кучеренко и ЦНИИПромзданий.

Первый тип стержневых конструкций образуют плиты из элементов на ячейку. Во втором типе стержневых конструкций продольные элементы верхней и нижней сеток по длине равны половине пролета, а остальные элементы размером на ячейку. В нашей стране конструкции с

управляемым НДС (управляемые конструкции) известны по работам Н.П. Абовского, И.С. Инжутова, Л.В. Енджиевского, В.И. Жаданова и других.

Значимость обозначенной проблемы подтверждает создание в августе 1994 в г. Пасадена (Калифорния, США) международной ассоциации по управляемым конструкциям (IASC - International Association for Structural Control), первым президентом которой был профессор George W. Housner. IASC охватывает широкий круг проблем развития строительных и нестроительных конструкций, а также проблемы образования. В Европе создана ассоциация по управляемым конструкциям с центром в Италии (президент профессор F. Casciati) и издается журнал Journal of Structural Control.

Основные работы проводились в области металлоконструкций; исследования в области металлодеревянных ПСК с управляемым НДС отсутствуют, поэтому проведение исследований в области создания металлодеревянных ПСК с регулируемым НДС являются актуальными.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований влияния дополнительного усилия на НДС ПСК с использованием континуальной расчетной схемы и метода конечных элементов в программе Lira 9.6. Предлагается конструкция безмоментного узлового соединения, позволяющая избежать обмятие древесины в сопряжениях.

В работе представлено несколько способов расчета металлодеревянной ПСК с учетом дополнительных усилий от затяжек. Оцениваются дополнительные напряжения от усилий в затяжках, что позволяет регулировать НДС плитно-структурной конструкции. На основе варьирования выбирается наиболее рациональное расположение затяжек при различных условиях опирания металлодеревянной ПСК. Разрабатывается новое узловое соединение, позволяющие уменьшить отрицательный эффект от обмятия древесины в узлах. Выполняются расчеты и производится оценка влияния меняющихся эксплуатационных факторов в реальном диапазоне: влажности, температуры, податливости узлов и реологических свойств древесины на напряженно-деформированное состояние металлодеревянных конструкций. Конструктивная схема ПСК приведена на рис. 1, 2.

В расчете ПСК с помощью континуальной расчетной схемы применяем приближенный инженерный метод расчета, основанный на представлении шарнирно-стержневой системы как континуальной расчетной модели в виде сплошной плиты. При этом граничные условия, нагрузка и упругие характеристики материалов приняты эквивалентными плитно-структурной конструкции. Ошибка в усилиях по сравнению с расчетом структуры как шарнирно-стержневой системы обычно не превышает 15-20% и может быть доведена до 5-10% при учете работы плиты на сдвиг, что нашло свое отражение в работах С.П. Тимошенко.

Предварительный расчет на изгиб структурных плит с малой относительной высотой ( $h/L=1/20\dots 1/17$ ) производится в соответствии с классической теорией изгиба плит без учета влияния сдвига на прогибы (гипотеза прямой нормали). Расчет сводится к решению дифференциального уравнения с учетом граничных условий на каждой кромке плиты:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\xi \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D_{np}}. \quad (1)$$

где  $w$  – прогиб;  $q(x, y)$  – распределенная нагрузка;  $D_{np}$  – цилиндрическая жесткость на изгиб:  $D_{np} = k_1 E_\sigma F_\sigma \text{Stg}^2 \alpha$ ;  $k_1 = \frac{1}{2(1+n_1)}$ ;  $E_\sigma, F_\sigma$  – модуль упругости и площадь стержней верхнего пояса;  $S$  – длина панели пояса;  $\alpha$  – угол между раскосами и плоскостью нижнего пояса;  $n_1$  – коэффициент, учитывающий материал верхнего и нижнего пояса структуры:

$$n_1 = \frac{E_B F_B}{E_H F_H}; \quad (2)$$

$E_H, F_H$  – модуль упругости и площадь сечения нижнего пояса;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий степень работы структуры на кручение:

$\xi = \mu + \frac{2D_{хупр}}{D_{np}}$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $D_{хупр}$  – жесткость на кручение.

Представим прогибы в виде:

$$w = C[\gamma(16x^4 - 24a^2x^2 + 5a^4) + \delta(16y^4 - 24b^2y^2 + 5b^4)] + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{ch} \frac{n\pi y}{a} \cos \frac{n\pi x}{a} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{ch} \frac{n\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{b} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n y \text{sh} \frac{n\pi y}{a} \cos \frac{n\pi x}{a} + \sum_{n=1}^{\infty} D_n x \text{sh} \frac{n\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{b}; \quad (3)$$

где  $c = \frac{q}{384D_{прив}(\gamma + \delta)}$ ;  $\delta$  – соотношение сторон плиты; для квадратной

плиты  $\delta=1$ ;  $a, b$  – стороны плиты, для квадратной плиты  $a=b$ ;  $\gamma = \frac{E_1 I_1}{a D_{np}}$ ;

$E_1 I_1$  – жесткость несущих пластину балок при изгибе, при  $E_1 I_1=0$  приходим к пластине опертой в вершинах;  $A_n, B_n, C_n, D_n$  – неизвестные постоянные;  $n= 1, 3, 5 \dots$

После дифференцирования выражения (3) получено выражение для момента и поперечной силы. Для принятых граничных условий по методу Б.Г. Галеркина определяются постоянные  $A_n, B_n, C_n, D_n$ .

На основе общей теории расчета ДК с учетом податливости узловых соединений, разработанной Б.В. Лабудиным, были произведены расчеты податливости металлодеревянной ПСК.

Выражение для продольных усилий  $N$  имеет вид:

$$N = \beta_1 \cdot q \cdot a^2, \quad (4)$$

где  $\beta_1$ , - коэффициент, зависящий от формы, упругих постоянных, размеров панели ПСК.

Усилия в стержнях поясов с учетом усилий в затяжках:

$$N_{\frac{e}{n} \text{ пояс}} = \pm \beta_1 (\gamma_1 \frac{N_3}{S} (h_k + \frac{h_n}{2}) - \alpha_1 q a^2) - N_3, \quad (5)$$

где  $h_k$  – высота консоли,  $h_n$  - высота структуры;  $N_3$ - усилие в затяжке.

Здесь, выражение для усилий в поясах состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое – это усилие от затяжки, а второе – усилие от действия вертикальной нагрузки. Чем меньше сумма этих двух слагаемых, тем меньше будет суммарное усилие в элементе. Однако в разных элементах структуры коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\gamma_1$  будут разными, и, соответственно, однозначно подобрать требуемое усилие в затяжке достаточно сложно.

Для регулирования усилий в стержнях структуры введем безразмерный параметр  $\eta$ . Тогда можно задаться  $\eta$  и подобрать усилие в затяжке так, чтобы в данном элементе полное усилие изменилось на параметр  $\eta$ . Таким образом усилие в затяжке будет:

$$N_3 = \pm ((\eta \pm 1) \beta_1 \alpha_1 q a^2) \div (\beta_1 \gamma_1 \frac{1}{S} (h_k + \frac{h_n}{2}) - 1). \quad (6)$$

Как видно из формулы (5), усилия в затяжке создают дополнительные сжимающие усилия в структуре, а также выгибают структуру вверх. Обратный изгиб структуры будет тем больше, чем больше длина консоли. Применение консоли позволяет увеличить разгружающий эффект от затяжек. Другим следствием является то, что усилия в нижнем поясе под влиянием затяжки будут изменяться больше, чем в верхнем поясе.

Рассмотрены две принципиальные схемы расположения затяжек в структуре: затяжки по контуру (рис. 1), применение которых рационально при опоре структуры в углах; затяжки, расположенные в двух направлениях вдоль всех элементов нижнего пояса (рис. 2), применение которых рационально при опирании структуры на опоры, расположенные вдоль контура.



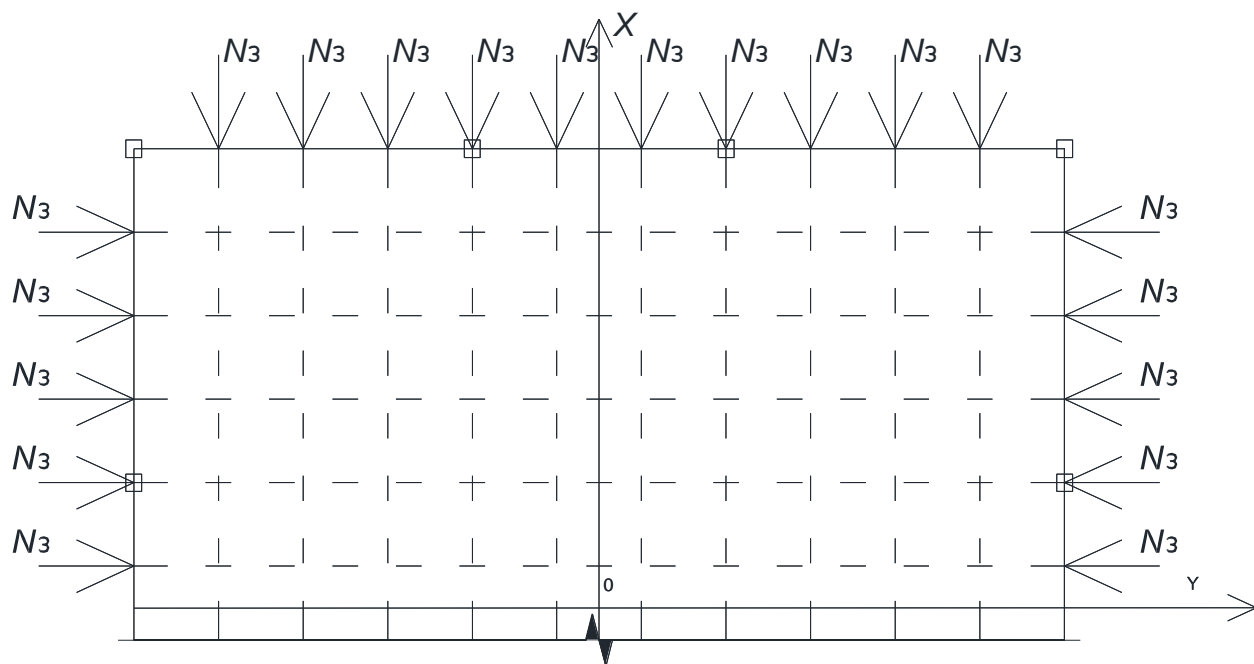


Рис. 1. Схема с ортогонально-расположенными затяжками в каждом элементе нижнего пояса.

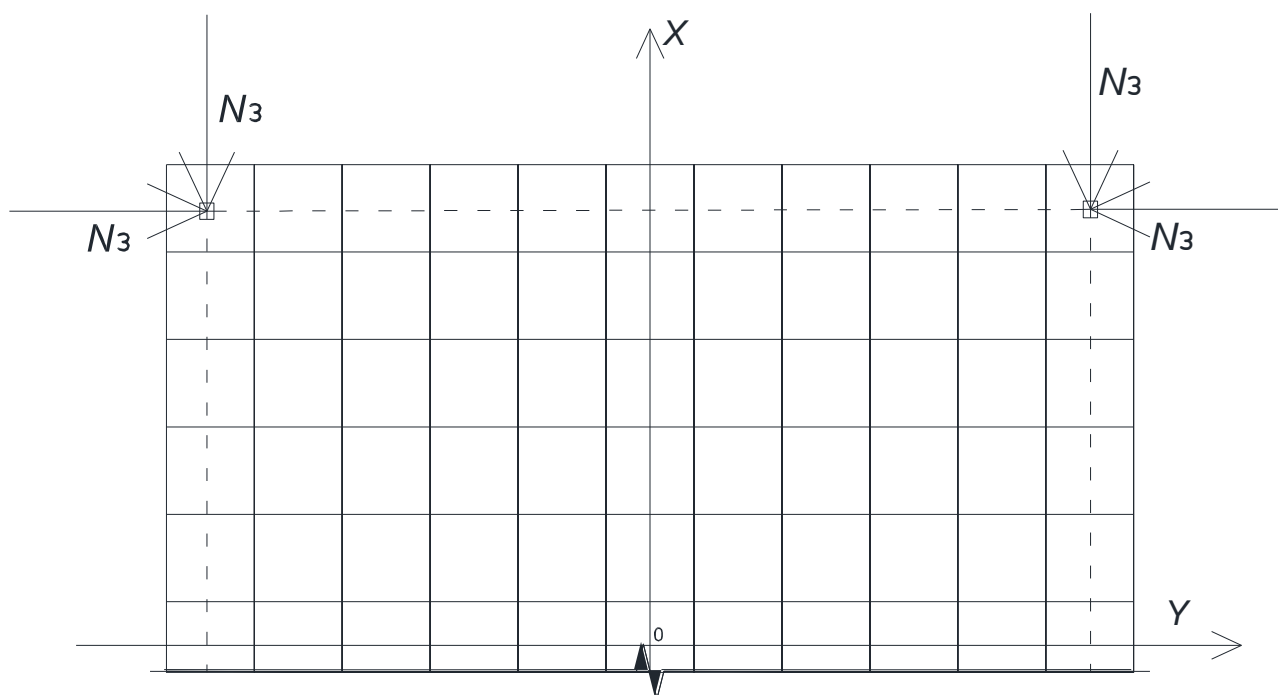


Рис. 2. Схема установки с затяжками по контуру.

Площадь сечения стержней выбирается в зависимости от  $N$ . После изменения усилий в стержнях, повторно определяются усилия в них и корректируется сечение. Регулирование усилий производится динамометрическим ключом, в соответствии с СТП 006-97.

Для расчета конструкций любого типа с использованием метода конечных элементов, применяем программные комплексы для расчета НДС ПСК с учетом дополнительных усилий. Аналитический метод используется для контроля правильности нахождения НДС в характерных

точках. Для этого провели численный эксперимент при помощи программного комплекса Lira 9.6.

Блок-схема расчета представлена на рис. 3.

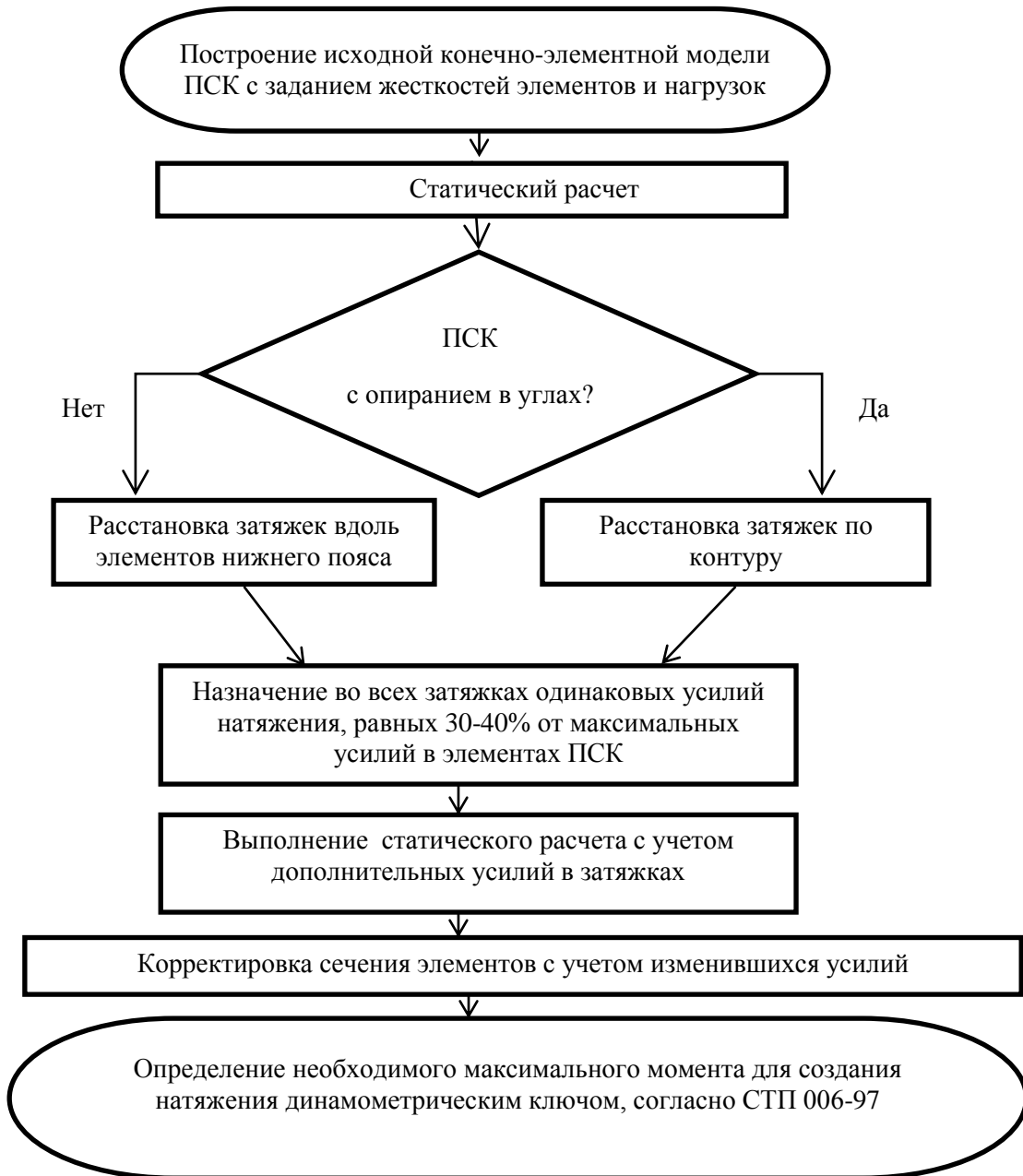


Рис. 3. Блок-схема расчета металлодеревянной ПСК с регулируемыми усилиями в МКЭ.

Расчетная схема конструкции представлена как стержневая система, в которой стержни моделируются универсальным пространственным стержневым КЭ. Для учета осевой податливости узловых соединений можно воспользоваться общим выражением:

$$N = C_1 \cdot \Delta_1 \pm C_2 \cdot \Delta_2 \pm C_3 \cdot \Delta_3 \pm \dots \pm C_n \cdot \Delta_n.$$

Для упругой стадии можно воспользоваться только первым членом  $C_1 = N / \Delta_1$ ,

где  $\Delta_1, \Delta_2 \dots \Delta_n$  -коэффициенты линейной податливости узлов,  $C_1, C_2 \dots C_n$  -коэффициенты линейной податливости узлов.

В качестве примера исследовали структуру, размером в плане 32×32 м, высотой 1,6 м, загруженную снеговой нагрузкой для Санкт-Петербурга. Элементы нижнего пояса приняты из стали круглого сечения диаметром 60 мм, раскосы из фанерных труб Ф-1 наружным диаметром 320 мм, толщиной стенки 13 мм. Верхний пояс принят из сосны II сорта сечением 250×250 мм и из фанерных труб Ф-1 наружным диаметром 320 мм, толщиной стенки 13 мм.

Регулирование напряженного состояния выполняется при помощи затяжек по контуру. Затяжки прикрепляются к структуре через консоли. Усилие в затяжках по контуру регулируется ступенчато: 6, 8, 16, 32 тонны. Схема приложения нагрузки для создания усилий в затяжках показана на рис. 2.

По результатам обработки численного эксперимента получены графики зависимостей максимальных усилий в верхнем поясе, в раскосах и в нижнем поясе структуры от усилий в затяжках (рис. 4).

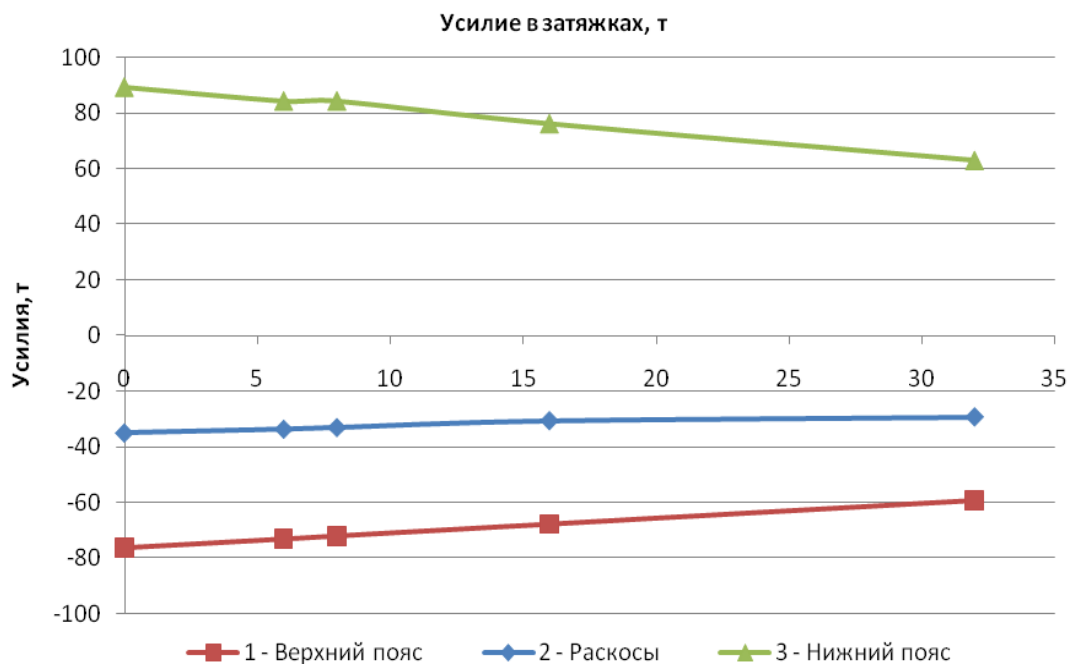


Рис. 4. Графики зависимостей максимальных усилий в элементах структуры при изменении усилий в затяжках.

Схемы узлов ПСК приведены на рис. 5, 6.

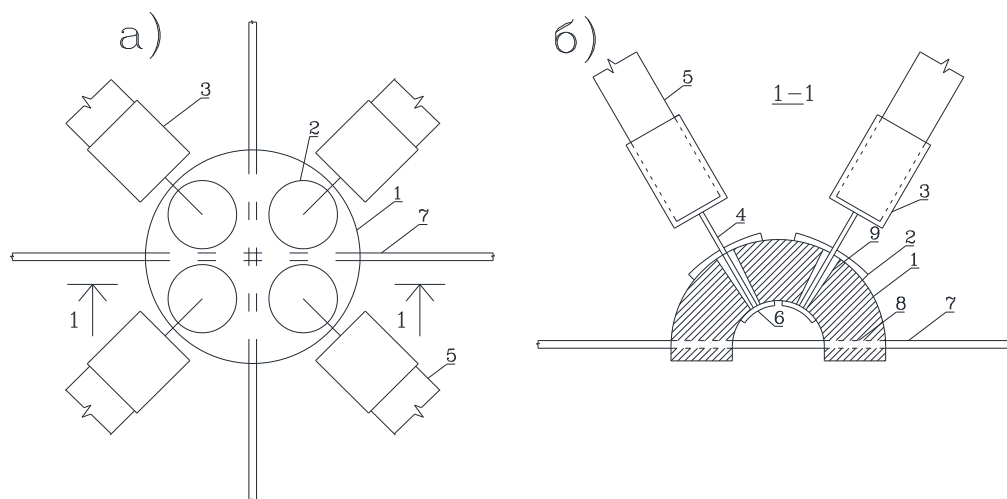


Рис 5. Схема шарнирного узла сопряжения металлического нижнего пояса и деревянных раскосов в ПСК.

- а) Вид сверху узлового соединения; б) разрез 1-1 узлового соединения  
 1-узловой элемент сферической формы; 2, 6- шайбы сферической формы;  
 3 - наконечники в виде обойм для стержневых элементов раскосов;  
 4-соединители, передающие усилия от раскосов к несущему узловому элементу;  
 5 - раскосы металлодеревянной ПСК; 7 - металлический элемент пояса;  
 8, 9- конические отверстия, допускающие поворот элементов раскосов вокруг центра узлового элемента.

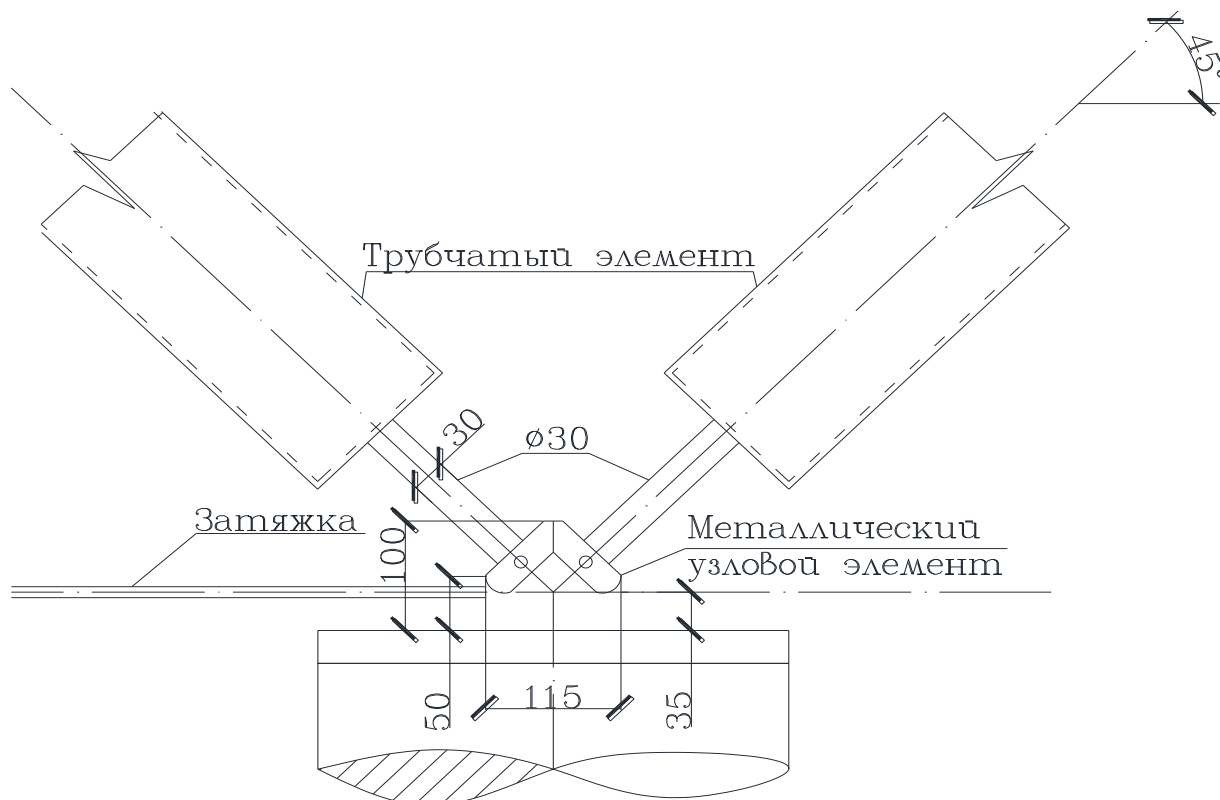


Рис 6. Опорный узел в ПСК.

Из графиков видно, что в результате действия усилий в затяжках происходит уменьшение максимальных усилий в структуре. Из сравнения графиков следует, что больше всего уменьшаются усилия в нижнем поясе

структуры. Это является следствием упругих свойств решетки структуры, которые частично компенсируют дополнительные усилия от затяжек.

В металлодеревянных ПСК в узловых элементах возможно возникновение «обмятия» древесины. Древесина хорошо работает на осевые усилия и плохо работает на усилия, направленные поперек волокон. В частности, прочность древесины на сжатие вдоль и поперек волокон различается почти в 8 раз (СНиП II-25-80). Известно много случаев на практике, когда неправильная конструкция соединительного узла приводит к возникновению трещин в соединяемых элементах.

Для устранения этих недостатков, предлагается шарнирный узел для соединения деревянных и металлических элементов, взамен существующих жестких узлов металлодеревянных ПСК, который по статической схеме принимается «идеальным» шарниром, исключая, таким образом, обмятие в деревянных элементах (рис. 5). Применение подобного узла рационально также при соединении деревянных элементов верхнего пояса и деревянных элементов решетки раскосов металлодеревянных ПСК.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований опытной ПСК с целью проверки теоретических выводов о возможности уменьшения максимальных усилий в элементах металлодеревянной ПСК путем регулирования усилий при помощи затяжек. Схема и общий вид опытной ПСК даны на рис. 7, 8.

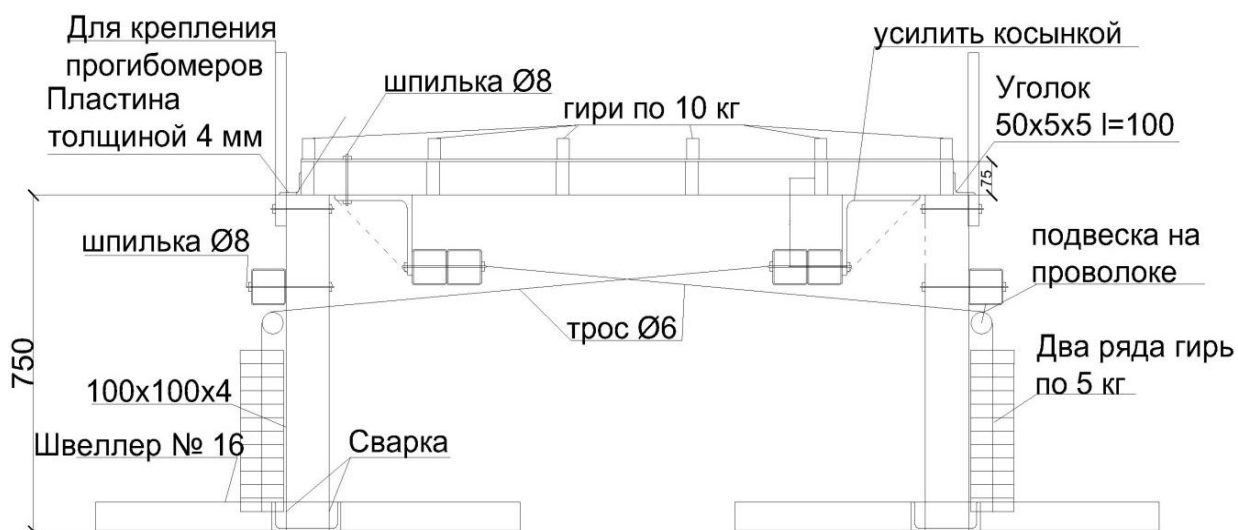


Рис 7. Схема экспериментальной установки.



Рис. 8. Экспериментальная установка в сборе.

Опытная ПСК в виде ребристой плит была выполнена в 1/20 натуральной величины, имела пролёт  $1525 \times 1525$  мм и высоту 84 мм. Соотношение высоты к пролёту составило 1/20, а отношение пролёта к ширине равно 1:1.

После приложения нагрузки, моделирующей снеговое воздействие, к опытной конструкции была приложена дополнительная нагрузка посредством тяжей, в результате изменилось НДС опытной ПСК (рис. 9, 10).

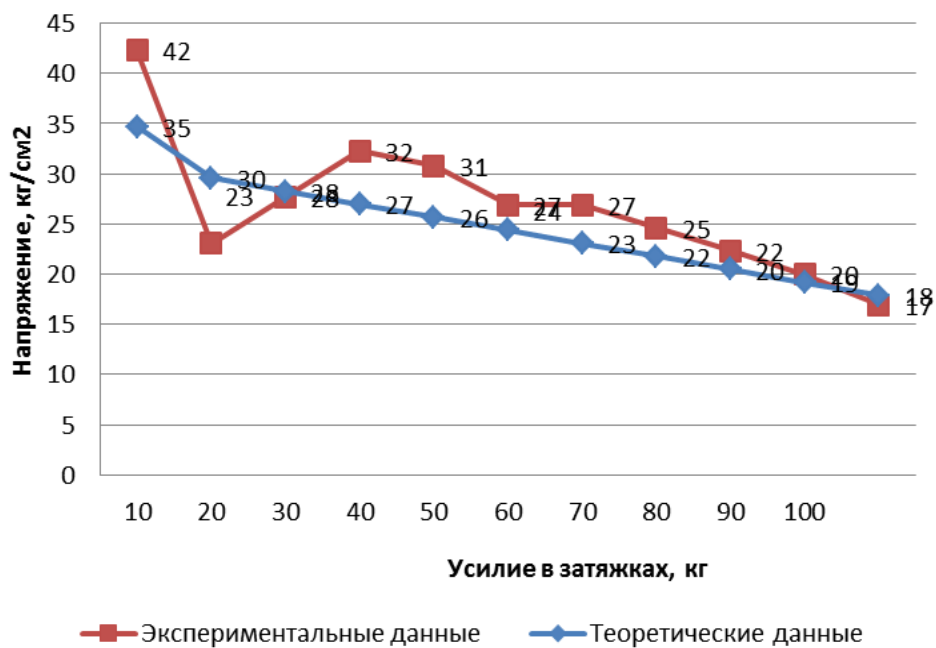


Рис. 9. График изменения максимальных напряжений в центре нижней поверхности опытной ПСК от усилий в затыжке

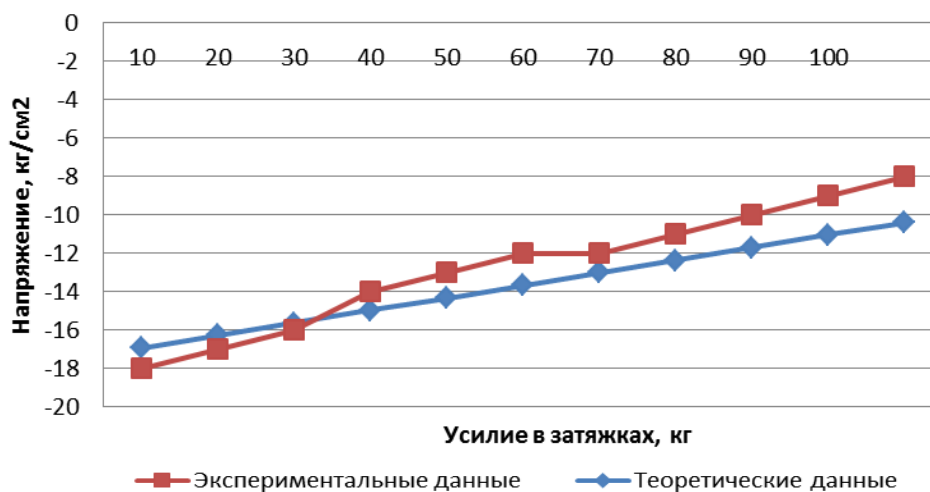


Рис.10. График изменения максимальных напряжений в центре верхней поверхности опытной ПСК от усилий в затыжке.

Грузы, подвешенные через блоки, создают усилия в тязях. Всего использовалось 8 блоков. Усилие натяжения изменялось пошагово с измерением значений на каждом этапе нагружения, что соответствует математической модели расчета. Величина ступеней приложения нагрузки на тязи составляла 10 кг. Величины перемещений и краевых деформаций в опытной ПСК фиксировались при помощи прогибомеров и тензорезисторов.

Результаты измерений максимальных напряжений приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Максимальные напряжения в опытной ПСК от усилий в затяжке.

Усилия в затяжке, кг	Напряжения в центре нижнего пояса, кг/см <sup>2</sup>		Напряжения в центре верхнего пояса, кг/см <sup>2</sup>	
	Экспериментальные	Теоретические	Экспериментальные	Теоретические
0	42	35	-22	-26
10	30	30	-20	-25
20	36	28	-19	-24
30	34	27	-18	-23
40	31	26	-17	-22
50	30	24	-17	-21
60	27	23	-16	-20
70	25	22	-15	-19
80	24	20	-14	-18
90	23	19	-13	-17
100	22	18	-13	-16

Примечание: модуль упругости древесины  $E_0=1,2 \cdot 10^4$  МПа (120 000 кг/см<sup>2</sup>).

По результатам обработки результатов экспериментальных данных и теоретических расчетов были построены графики зависимости напряжений в опытной модели от усилий в затяжках, приведенные на рис. 9, 10.

Анализ результатов показал, что под влиянием усилий в затяжках происходит изменение НДС. Как видно из графиков в опытной конструкции при увеличении усилий в затяжках, напряжения сжатия в элементах верхнего пояса уменьшаются на 35%, усилия растяжения в нижнем поясе уменьшаются на 48%. Наблюдается совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Максимальное расхождение результатов составляет 5...20%. Таким образом, подтверждается гипотеза об уменьшении максимальных усилий в металлодеревянной ПСК при увеличении дополнительных усилий в затяжках.

**В четвертой главе** приведены рекомендации по практическому применению металлодеревянных ПСК с регулируемыми усилиями в затяжках.

Основной задачей регулирования напряженно-деформированного состояния является снижение максимальных усилий в ПСК, и, соответственно, затяжки надо ставить там, где усилия в структуре максимальны. В случае опирания структуры в углах на 4 точки затяжки целесообразно ставить по контуру, а в при опирании структуры по контуру – затяжки следует располагать вдоль и поперек структуры ортогонально.

Практическое применение металлодеревянной ПСК с регулируемыми усилиями в затяжках целесообразно в конструкции покрытия стадиона. На практике известны раздвижные и тентовые трансформируемые крыши стадионов. Основным недостатком этих крыш является то, что для них необходим дорогостоящий рельсовый путь и его



содержание. Вся конструкция в итоге становится тяжелой, громоздкой и дорогостоящей.

Недостатком тентовых покрытий является то, что их применение ограничивается южными районами, т.е. с относительно небольшой величиной снеговой нагрузки. В данной работе предлагается новый вариант трансформируемой крыши, которая позволяет избежать этих недостатков (Рис. 11).

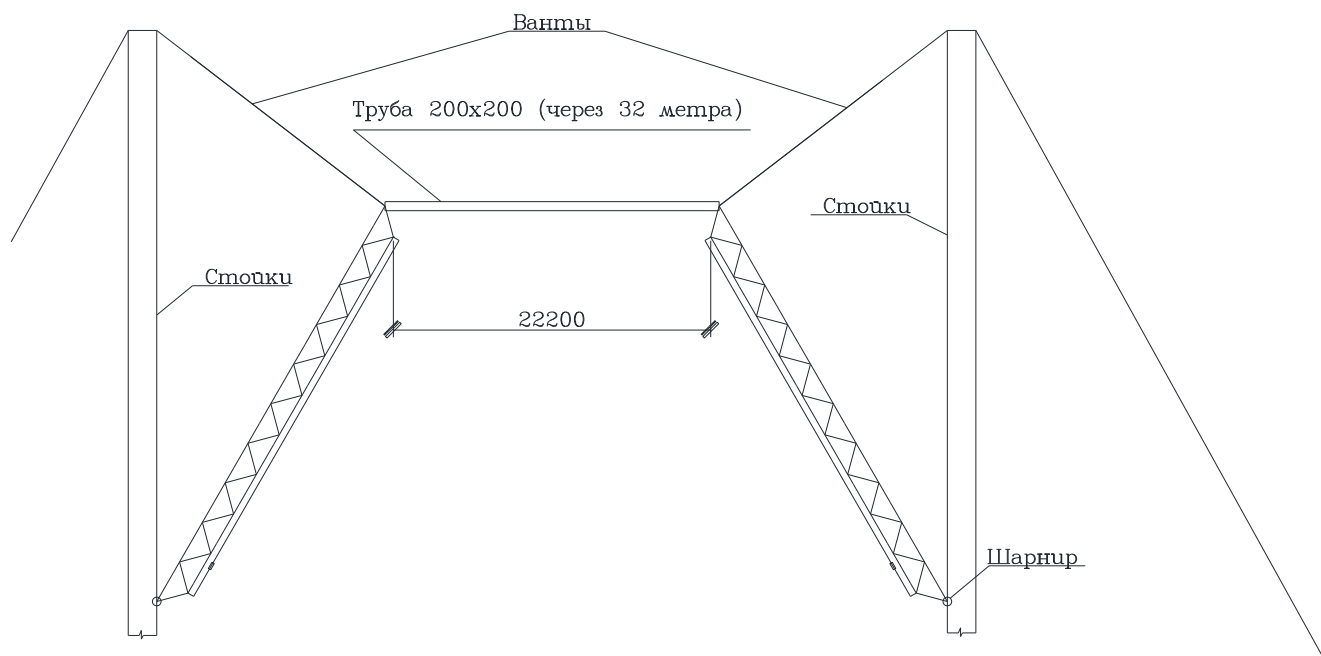


Рис 11. Схема покрытия стадиона в открытом положении.

Конструкция покрытия состоит из отдельных отсеков, каждый из которых представляет собой металлодеревянную структуру, опирающуюся двумя угловыми опорами на шарнир, а другими угловыми опорами на оттяжки. По нижнему поясу идут металлические тяжи, в которых создаются усилия, разгружающие структуру. Размер каждого блока принят  $32 \times 32$  метра, но возможно применение блоков и большего размера. В горизонтальном положении натяжение тяжей создает разгружающее усилие, уменьшающее усилия в элементах структуры. В вертикальном положении, когда вся структура работает на сжатие, усилия в металлических тяжах полностью убираются, и структура по статической схеме представляет собой двухветвевую колонну, работающую только под действием собственного веса.

Подсчитаем влияние регулирования напряжений на технико-экономические показатели ПСК. Для примера возьмем структуру размером  $32 \times 32$  м. Выполним расчет двух вариантов данной ПСК: с регулированием усилий при помощи затяжек, и без регулирования усилий. Выполним подбор сечения элементов в двух вариантах, и сравним их материалоемкость. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Сравнение показателей ПСК 32х32 м с регулированием усилий в затяжках с аналогичной ПСК, но без регулирования усилий с помощью затяжек.

Наименование материала	Экономия материала в регулируемой ПСК, в %
Металл	38.29
Древесина	28.00
Фанерные трубы	16.67

Проектирование ПСК с регулируемыми усилиями в затяжках рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

1. Произвести предварительный статический расчет конструкции. Выявить участки с максимальными усилиями. Например, при опирании структурной плиты по контуру, максимальные усилия будут в центре, а при опирании в угловых точках, максимальные усилия будут по контуру (рис. 4).

2. В соответствии со статическим расчетом ПСК разместить дополнительные связи (затяжки) в уровне нижнего пояса в зависимости от условий опирания ПСК.

3. Выполнить расчет напряженно-деформированного состояния ПСК с учетом измененных усилий в затяжках. Для этого задать несколько значений усилий в затяжках. Как правило, начальные усилия задаются такими, чтобы снизить на 30-40% усилия в соответствующих элементах структуры.

4. Определить сечения всех элементов решетки с учетом измененных усилий в них.

### **Основные выводы и рекомендации.**

1. Предложены научно обоснованные технические решения по совершенствованию металлодеревянных ПСК путем регулирования напряженно-деформированного состояния в процессе проектирования, создания и эксплуатации конструкции. Регулирование и равномерное распределение усилий в элементах ПСК позволяет уменьшить размеры поперечного сечения элементов ПСК на 20-30%, материалоемкость на 20-25%.

2. Теоретически и экспериментально определены количественные значения напряжений в элементах металлодеревянных ПСК с регулируемыми усилиями в затяжках. Установлено, что наибольшее влияние усилий в затяжках происходит в нижнем поясе с уменьшением напряжений до 30-35%, напряжения в верхнем поясе уменьшаются до 20-25%.

3. Разработаны схемы расположения затяжек в ПСК. Рекомендуется располагать затяжки по контуру при опирании структуры в углах на 4 точки, при опирании структуры по контуру - в плоскости нижнего пояса.

4. Разработана новая конструкция трансформируемой крыши стадиона, снижена материалоемкость конструкции покрытия за счет рационального сочетания древесины и металла, регулирования напряженно-деформированного состояния в зависимости от нагрузок.

5. Уточнено решение дифференциального уравнения для структурной конструкции введением приведенной жесткости ПСК. Получены простые и удобные математические зависимости статико-геометрических параметров конструкции ПСК для применения в инженерной практике, создана методика регулирования НДС в структурной конструкции в процессе проектирования и эксплуатации.

6. Предложены технические решения узловых элементов, позволяющие осуществлять их поворот относительно друг друга, избегать работу поперек волокон и «обмятие» древесины.

7. Выполнена оценка влияния меняющихся эксплуатационных значений влажности, температуры, податливости узлов и реологических параметров древесины на напряженно-деформированное состояние металлодеревянных конструкций с регулируемыми усилиями. Для учета реологических свойств древесины и деформативности упруго-податливых соединений разработан алгоритм регулирования усилий.

8. Результаты экспериментальных и теоретических исследований подтвердили эффективность применения затяжек в элементах ПСК. Расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований составляет 10-15%.

9. Разработаны рекомендации по проектированию металлодеревянных конструкций с регулируемыми усилиями в покрытиях трансформируемых большепролетных сооружений. Результаты исследований могут быть использованы в проектных организациях и НИИ при проектировании плитно-структурных металлодеревянных конструкций.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

По перечню ВАК:

1. **Москалёв М.Б.** Металлодеревянные плитно-структурные конструкции с учетом предварительного напряжения// Вестник гражданских инженеров.- СПб, 2010.- № 3. - с. 36-38.

2. **Москалёв М.Б.** Перспективная конструкция открывающейся крыши стадиона// Промышленное и гражданское строительство. – М.: ООО «Издательство ПГС», 2010-№ 12 – с. 55-56.

В других изданиях:

3. **Москалёв М.Б.** Структурные конструкции из древесины с регулированием усилий в элементах.// Доклады 65-й научной конференции

профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. 1.- СПб.: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2008 - с. 76-77.

4. **Москалёв М.Б.** Современные плитно-структурные металлодеревянные конструкции // Сборник научных трудов международного симпозиума Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство). Ч. I.- Брест: Филиал РУП Институт БелНИИС, Научно-технический центр, 2009. - с. 201-204.

5. **Москалёв М.Б.** Применение металлодеревянных покрытий с регулируемыми напряжениями в затяжках в условиях меняющегося напряженно-деформированного состояния покрытия// Доклады 63-й Международной научно-технической конференции молодых ученых Актуальные проблемы современного строительства. Ч. 2.- СПб.: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2010, - с. 51-53.

6. **Москалёв М.Б.** Расчет напряженного состояния металлодеревянных покрытия в результате регулирования напряжений.// Доклады 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов Университета. Ч. 1.- СПб.: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2010, -с. 65-67.