

На правах рукописи



КОРСУН НАТАЛЬЯ ДМИТРИЕВНА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТАЛЬНОЙ БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ  
ЖЕСТКОСТИ С ПОДКОСАМИ И ЗАТЯЖКОЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре «Строительные конструкции».

Научный руководитель -	кандидат технических наук, доцент <b>ПРОНОЗИН Яков Александрович</b>
Официальные оппоненты:	<b>ЗВЕРЕВ Виталий Валентинович</b> доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой «Металлические конструкции» <b>СЕМЕНОВ Александр Александрович</b> кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Строительные конструкции»
Ведущая организация -	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования <b>«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»</b>

Защита состоится 26 сентября 2014 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/27-korsun-natalya-dmitrievna>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бакушев Сергей Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Широкое распространение легких металлических конструкций в гражданском строительстве обусловлено их высокой технологичностью, низкой материалоемкостью и высокой скоростью монтажных работ.

В советский период производство легких металлоконструкций насчитывало более десятка серийных типов. В настоящее время российская отрасль переживает второе рождение: число заводов–производителей легких металлоконструкций растет, отмечен устойчивый рост производства. По данным маркетинговых исследований проектирование является одним из стержневых бизнес-процессов развивающейся отрасли и определяет конкурентный успех предприятий.

В этой связи, актуальным является решение задач по разработке новых форм легких металлоконструкций с целью их улучшения и создания новых унифицированных серий в развитие номенклатуры типовых металлоконструкций.

Актуальность диссертационной работы подтверждается выполнением ее разделов в рамках госбюджетной темы № ГР01.2.00606993 «Теоретические и экспериментальные исследования новых конструктивных форм ЛМК» (2006-2010 гг., руководитель Пронозин Я. А.).

**Объект исследования** - стальная балочная конструкция покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой, разработанная с использованием принципа минимизации площади эпюры моментов, как основного параметра оптимизации, предложенного проф. Н. С. Москалевым.

**Предметом исследования** является напряженно-деформированное состояние стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой, установленное при различных расчетных ситуациях на расчетных моделях и в ходе натурного испытания конструкций пролетами 18 и 24 м в составе покрытия.

**Цель исследования:** разработать стальную балочную конструкцию покрытия и экспериментально-теоретическими исследованиями обосновать ее эксплуатационную пригодность и высокую эффективность.

**Задачи исследования:**

1. Разработать с использованием принципа минимизации площади эпюры моментов стальную балочную конструкцию эффективную по расходу материала, затратам на изготовление, транспортировку и монтаж при обеспечении требований надежности.

2. Разработать алгоритм расчета и определить оптимальные геометрические параметры балочной конструкции минимального веса.

3. Обосновать расчетную модель балочной конструкции переменной жесткости с подкосами и затяжкой с учетом технологических параметров преднапряжения.

4. Выполнить численные исследования напряженно-деформированного состояния балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой на примере моделей и в составе каркаса здания.

5. Провести экспериментальные исследования напряженно- деформированного состояния балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой в составе каркаса и выполнить сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований.

**Научная новизна:**

1. Разработана новая эффективная конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой на основе принципа минимизации площади эпюры моментов.

2. Разработан алгоритм расчета балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой с установленными оптимальными геометрическими параметрами, подбором рациональных сечений элементов и усилий предварительного напряжения.

3. Получены результаты натурных экспериментальных исследований работы балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе покрытия.

**Практическая ценность** результатов исследований заключается:

- в разработке новой конструкции покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой и положительном опыте ее внедрения;

- в возможности типизации стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой, эффективность которой подтверждена технико-экономическим расчетом;

- в использовании разработанного алгоритма расчета балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой в реальном проектировании;

- в опыте проведения натурных испытаний балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе покрытия на объекте строительства.

**Реализация результатов исследования.** Новые конструкции покрытия внедрены на объекте строительства «Гипермаркет в Заречном микрорайоне г. Тюмени» (введен в эксплуатацию в 2006 году), использованы в рабочем проектировании объекта «Торговый центр в городе Нефтеюганске» (рабочий проект 32НИС/08).

Научные положения работы использовались в научно-исследовательских работах студентов, в лекционном курсе «Металлические конструкции», а также нашли применение в реальном проектировании балочных конструкций на объекте «Реконструкция спортзала ТюмГАСУ» (рабочий проект 47НИС/09, прошел госэкспертизу, ведется строительство).

**Методы исследования:** Численные исследования новой конструкции велись с применением программного комплекса SCAD, в основу работы которого положен метод конечных элементов. Алгоритм расчета новой статически неопределимой конструкции построен на основе метода сил для определения усилий, метода предельных состояний для оценки надежности и прямых методов подбора сечений. Для установления оптимальных геометрических параметров новой конструкции использованы методы теории планирования экспериментов,

адаптированные к проектированию строительных конструкций М. Б. Краковским (1973).

**На защиту выносятся:**

1. Новая конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой, эффективность которой подтверждена технико-экономическим анализом вариантов конструкций. Отличительной особенностью конструкции является регулирование усилий в балке на основе принципа минимизации площади эпюры моментов.

2. Алгоритм расчета балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой с установленными оптимальными геометрическими параметрами, подбором рациональных сечений элементов и усилий предварительного напряжения.

3. Результаты численного исследования работы балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой, в том числе в составе трехпролетного покрытия.

4. Результаты натурных испытаний работы балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе покрытия по разработанной программе испытаний.

**Достоверность и надежность** научных положений и выводов подтверждается сравнением результатов расчета, полученных при помощи линейного и геометрически нелинейного конечно-элементного анализа работы расчетных моделей, аналитических методов строительной механики и экспериментальных исследований, при проведении которых использовались приборы и оборудование, прошедшие метрологическую поверку.

**Апробация работы.** Научные положения и результаты исследований докладывались на научных семинарах кафедры строительных конструкций ТюмГАСУ (2008, 2012, 2014) и кафедры металлических и деревянных конструкций ТГАСУ (Томск, 2012), Всероссийских научно-практических и научно-образовательных конференциях ТюмГАСУ (2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2011), были представлены на Международном симпозиуме «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)» (Брест, 2009), на выставке «Технологии, инновации XXI века, инвестиции–2009, интеллектуальная собственность» (Тюмень, 2009) и на V-ом Инженерном форуме Тюменской области (2012).

**Личный вклад автора** состоит в разработке конструктивной формы балочной конструкции покрытия, конструировании ее сечений и узлов,; в разработке общего алгоритма расчета конструкции с автоматизацией расчетов с использованием программ Mathcad и MS Excel; в постановке и решении задач параметрической оптимизации; в теоретических исследованиях работы конструкции с использованием аналитических и численных методов расчета; в разработке программы и обработке результатов натурных испытаний балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе покрытия на объекте строительства. Проведение натурального эксперимента осуществлялось при непосредственном участии соискателя.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 статей, в том числе четыре – в изданиях из перечня ВАК; получен один патент на изобретение; выполнен отчет по госбюджетной теме.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 140 наименований и четырех приложений. Полный объем диссертации содержит 220 страниц, включая 48 таблиц, 119 рисунков и 18 страниц приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведена общая характеристика диссертации.

**В первом разделе** приведен краткий обзор типов легких металлоконструкций и методов их совершенствования.

Отрасль легких металлоконструкций (ЛМК) сформировалась в нашей стране в 1972 году как ответвление от производства традиционных металлоконструкций в составе Минмонтажспецстроя СССР. Головными институтами, занимающимися разработками типов легких металлоконструкций, являлись ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, Гипроспецлегконструкция, ЦНИИпроектлегконструкция, ЦНИИпромзданий, ЦНИИЭПсельстрой и др.

В отечественной и зарубежной практике строительства ЛМК самое широкое распространение получили рамные конструкции. Среди отечественных типов ЛМК, разработанных в советский период, можно назвать сварные рамы переменного сечения (1972-73 гг.), рамы типов «Орск» (1974-76 гг.), «Канск» (1982 г.). Среди современных типов рамных ЛМК можно назвать рамы УНИМАК-Р1 и УНИТЕК фирмы «УНИКОН», рамы «Матис» и «Нива» ЗАО «Выксунский ЗЛМК» и др. Разработке и исследованию рамных конструкций посвящены работы Ю. Н. Симакова, П. Н. Троицкого, Н. С. Москалева, В. В. Бирюлева, И. Д. Пелешко, В. В. Катюшина, А. И. Колесова, А. А. Лапшина, А. В. Валова и др.

Ведущими зарубежными фирмами по проектированию и производству рамных ЛМК являются фирмы «Butler Manufacturing Corp.», «Mid-West», «ARMCO Steel Corp.», «CONDOR», «Robertson Building System», «Nippon Steel Corp.», «Metal-Botnia OY», «ASTRON Buildings» и др.

Балочные конструкции меньше представлены среди стропильных конструкций покрытия, хотя использование мер по повышению эффективности делает их конкурентоспособными по отношению к другим конструктивным формам ЛМК. Балочные конструкции технологичны при изготовлении, удобны при монтаже, не чувствительны к осадкам опор и температурным деформациям. Самым распространенным типом балочной ЛМК является сварная тонкостенная балка двутаврового сечения с ребрами жесткости различной конфигурации либо с гофрами разного направления. Разработкой и исследованиями тонкостенных балок занимались Н. П. Мельников, Н. С. Стрелецкий, А. Р. Ржаницын, Н. И. Безухов, Ю. Н. Работнов, Я. М. Лихтарников, Н. С. Москалев,

Ю. И. Кудишин, В. В. Бирюлев, Я. И. Ольков, Б. Б. Лампси, В. Ф. Беляев, А. А. Лапшин, П. С. Иванов и др.

Среди зарубежных разработок можно отметить балки с гофрированной стенкой шведских фирм «AB Olverken» и «AB Ranaverken», балку с продольно гофрированной стенкой Джоя Колина (патент США, 1982).

Предварительное напряжение применяется в балках для повышения их эффективности. Предварительно напряженные балки с затяжками исследованы Е. И. Беленей, Н. П. Мельниковым, В. М. Вахуркиным, В. В. Бирюлевым, Я. М. Лихтарниковым, Н. П. Абовским, В. В. Михайловым, В. Н. Коробко, А. А. Калинин и др.

Самой эффективной балочной конструкцией среди типовых ЛМК является ферма из гнутосварных труб типа «Молодечно» (1977), которая в сравнении с другими фермами благодаря сокращению до минимума вспомогательных деталей и эффективному профилю имеет лучшие показатели по расходу стали и трудоемкости изготовления. К недостаткам фермы можно отнести высокие транспортные расходы и низкую коррозионную стойкость.

Исследованию и оптимизации решетчатых балочных конструкций посвящены работы В. Г. Шухова, Е. И. Белени, Ю. И. Кудишина, Б. А. Сперанского, В. В. Трофимовича, В. А. Пермякова, В. П. Силенко, В. И. Трофимова, И. С. Холопова, Я. И. Олькова и др. Исследователями решены задачи оптимизации решетки и поэтапного предварительного напряжения конструкций.

Проведенный обзор типов ЛМК позволил заключить следующее:

- 1) балочные конструкции по приведенным затратам не уступают прочим конструктивным системам и их использование во многих случаях рационально;
- 2) основными путями совершенствования балочных конструкций рассматриваются эффективное распределение материала по сечению и длине элемента, учет работы балки в упругопластической стадии, предварительное напряжение для регулирования деформаций и усилий в балках;
- 3) использование принципа минимизации площади эпюры моментов, как основного параметра оптимизации, предложенного проф. Н. С. Москалевым, недостаточно исследовано и может рассматриваться как одно из направлений совершенствования балочных конструкций.

На основании проведенного обзора сформулированы цель и задачи исследований.

**Во втором разделе** дано описание новой конструкции покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой (рис. 1). Техническая новизна подтверждена патентом № 2361982 РФ.

Новым является то, что балка переменной жесткости подперта подкосами на участках повышенной жесткости и работает по трехпролетной схеме (рис. 2). Горизонтальную составляющую усилия сжатия в подкосах воспринимает затяжка, установленная в уровне сопряжения подкосов с надколонниками.

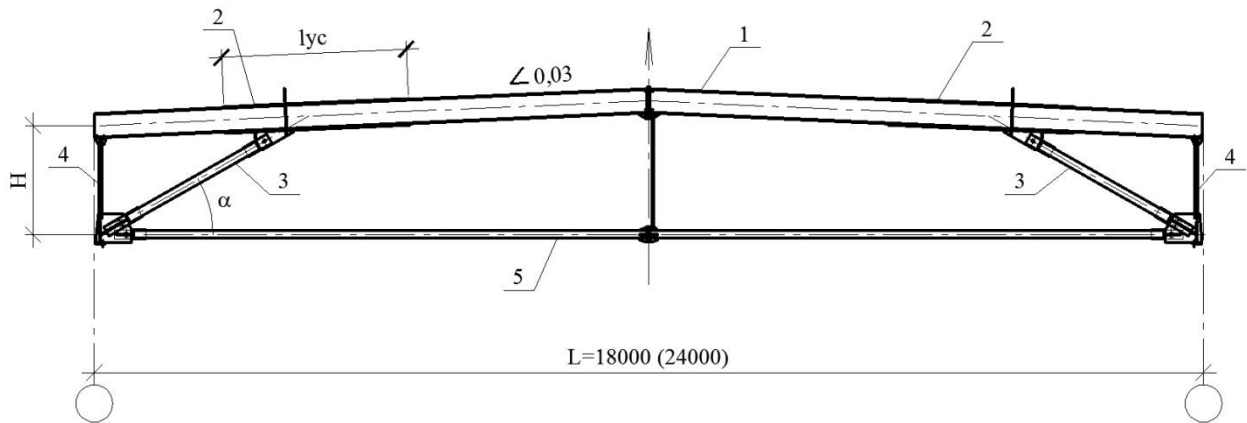


Рис. 1 – Стропильная конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой: 1 – балка; 2 – усиление балки над подкосом; 3 – подкос; 4 – надколонник; 5 – затяжка

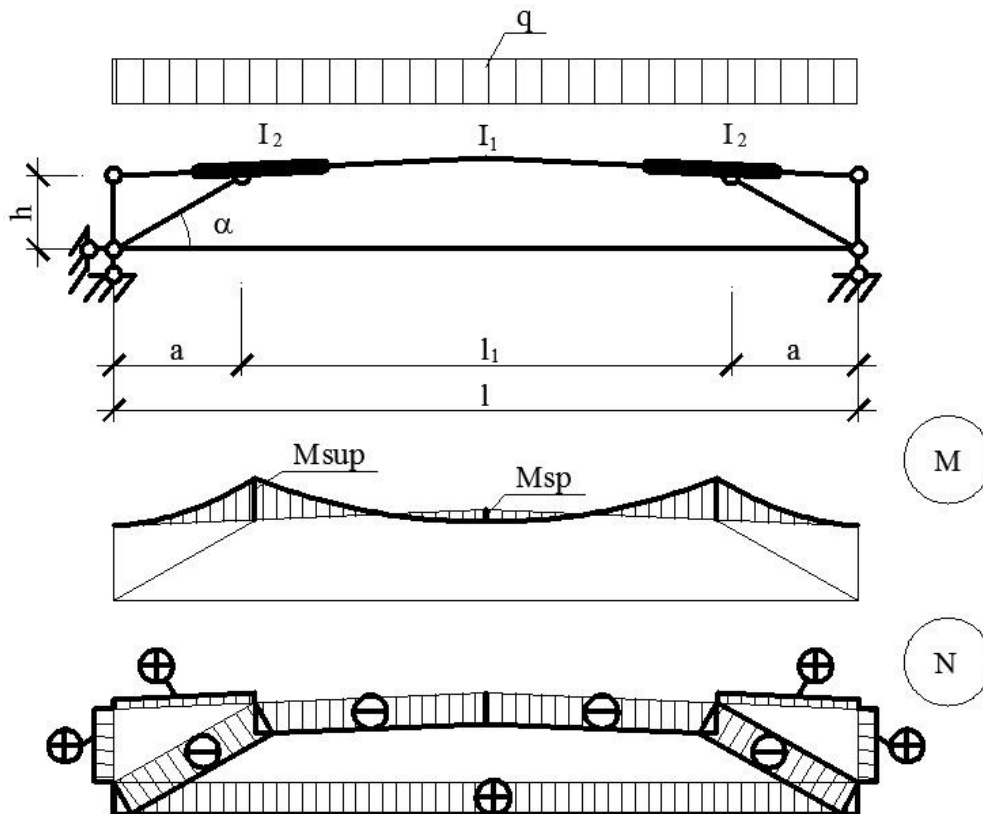


Рис. 2 – Расчетная схема конструкции

Технический результат изобретения состоит в снижении расхода металла на конструкцию за счет регулирования изгибающего момента в балке с соотношением пролетного момента к балочному  $\mu = M_{sp}/M_0 = 0,2 \div 0,3$  ( $M_0 = ql^2/8$ ), что соответствует минимальной площади эпюры моментов:

$$\Omega_{\min} = \int M dx = 0,032ql^3 \quad (1)$$

и минимальному весу балки, выраженному по формуле Н. С. Москалева:

$$G = \frac{6\gamma}{R} \int_0^l \frac{M}{(3-2\alpha)} dx. \quad (2)$$



Для регулирования усилий изгибающего момента в балке применен метод смыкания зазоров в монтажных стыках затяжки и надколонников (рис. 3).

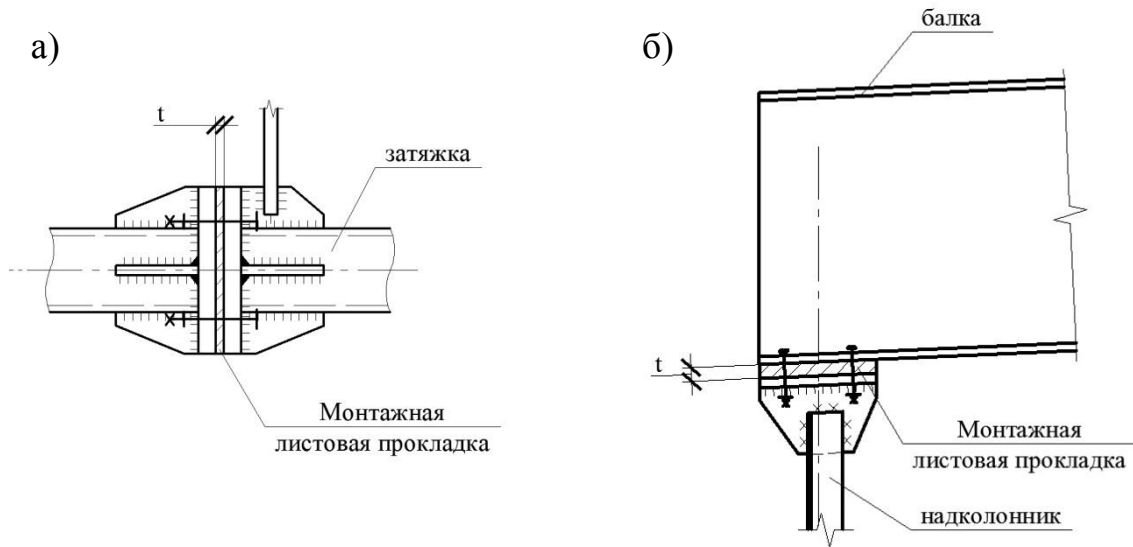


Рис. 3 – Создание предварительного напряжения в конструкции смыканием зазоров в монтажных стыках: а) затяжки; б) надколонника с балкой

Разработан алгоритм расчета новой конструкции покрытия (рис. 4, 5), являющейся один раз статически неопределимой системой. Эффективное решение балочной конструкции переменной жесткости с подкосами и затяжкой формируется за шесть этапов.

При подборе сечений элементов важным этапом является внутренняя оптимизация сечений ( $EI_i, EA_i \rightarrow \text{opt}$ ), то есть принимается оптимальная форма сечений с учетом характера работы и назначается минимально возможная площадь сечений.

Для подбора сечений внецентренно сжатой балки и центрально сжатого раскоса применены прямые методы подбора сечений, изложенные в Пособии по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*), которые позволяют при минимальном количестве итераций получать эффективные размеры сечений.

Для регулирования моментов в балке создается предварительное напряжение в затяжке  $X_{II}$ , величина которого определяется как разность между усилием в затяжке  $X=N_5$ :

$$N_5 = (1 - \mu)q \frac{l^2}{8h} + \mu q \frac{la}{2h} - \mu q \frac{a^2}{2h}, \quad (3)$$

при заданных моментах  $M_1$  и  $M_2$ :

$$M_1 = \mu q \frac{l_1^2}{8}, \quad (4)$$

$$M_2 = (1 - \mu)q \frac{l_1^2}{8}, \quad (5)$$

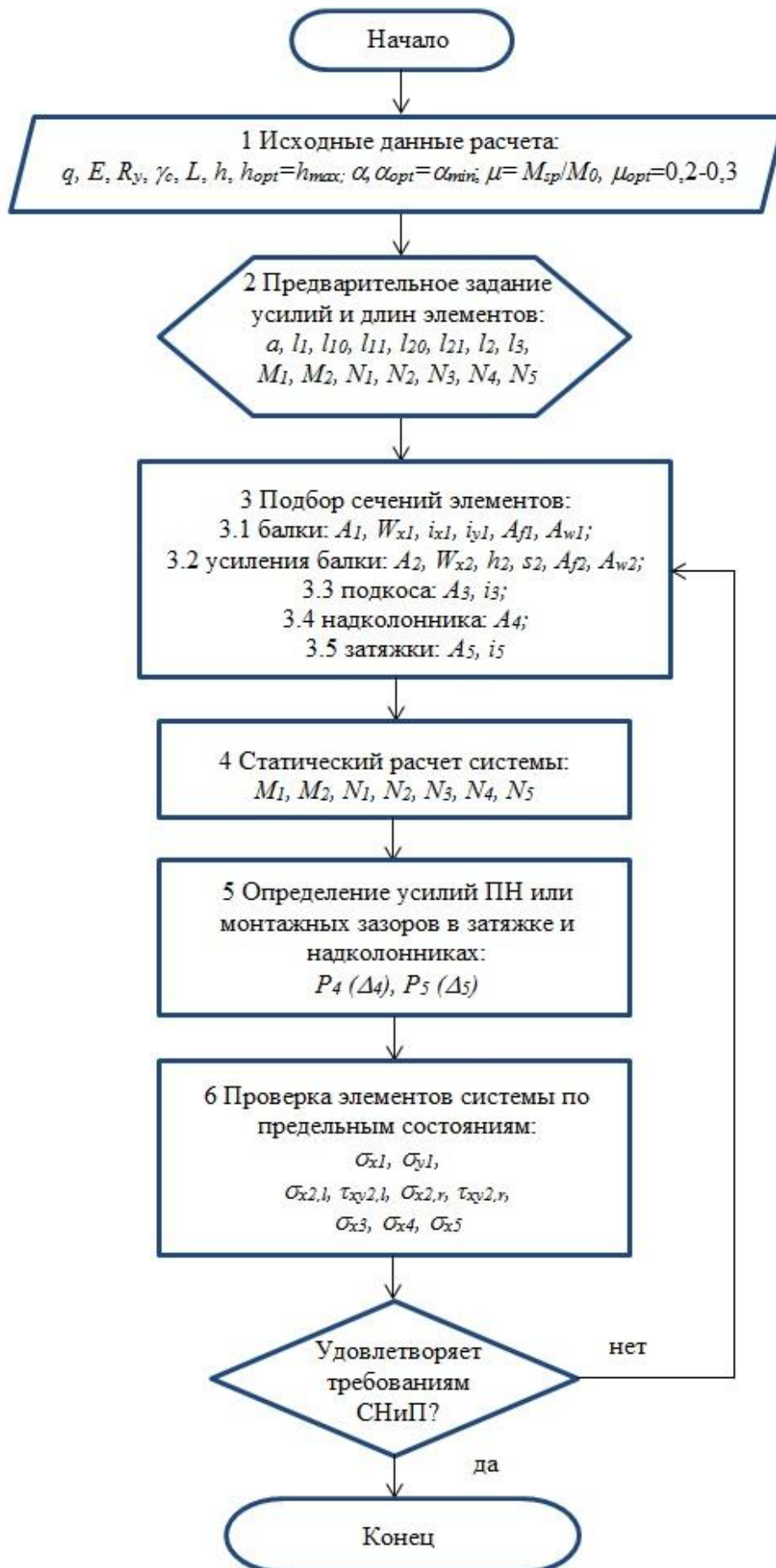


Рис. 4 - Алгоритм расчета новой конструкции

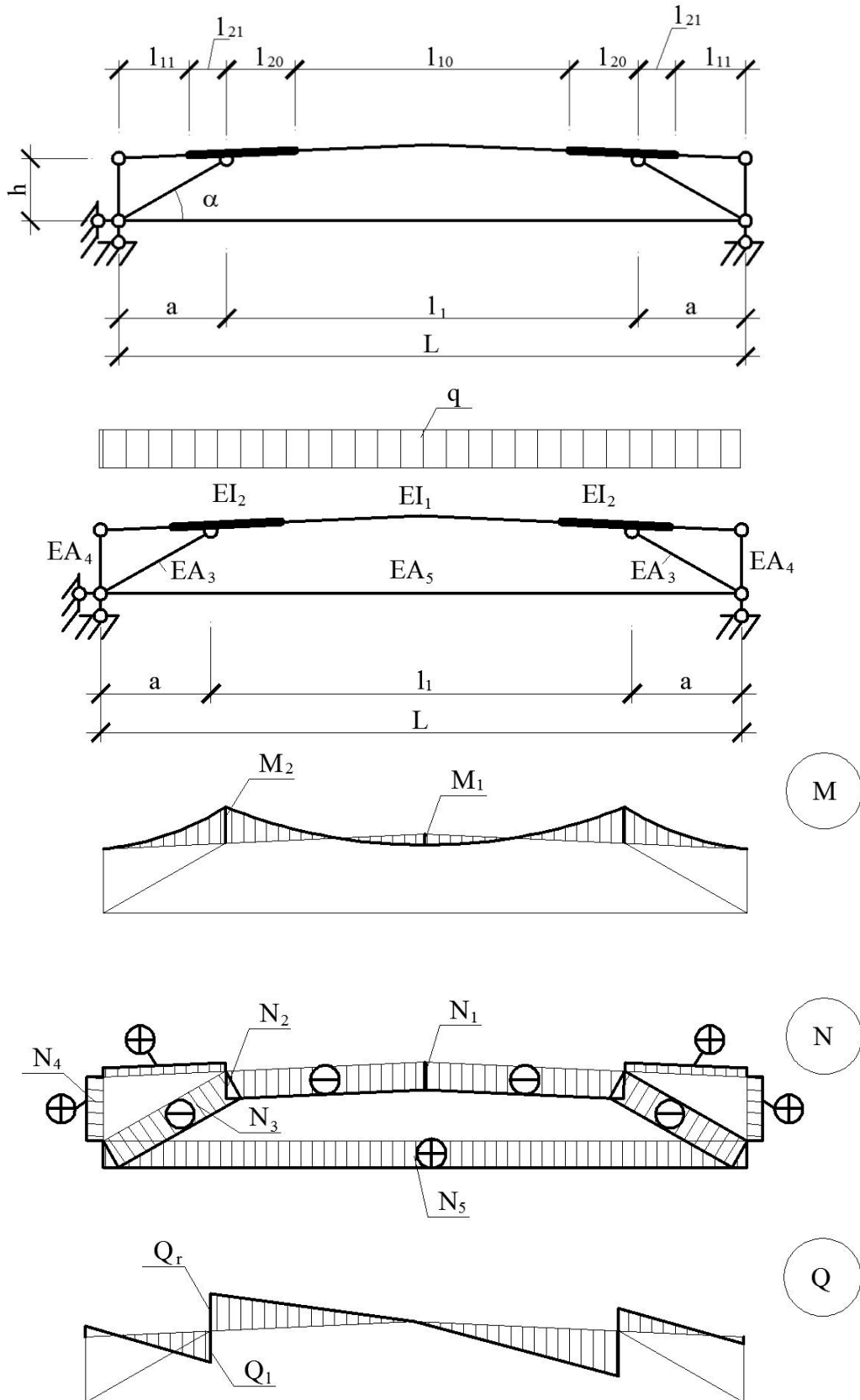


Рис. 5 - Исходные данные для расчета

и усилием самонатяжения затяжки  $X_C$ , выраженным из канонического уравнения метода сил:

$$X_C = -\frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}}, \quad (6)$$

$$X_{II} = X - X_C. \quad (7)$$

При задании предварительного напряжения путем смыкания зазора (рис. 6) искомое укорочение затяжки  $\Delta$  определяем из канонического уравнения метода сил вида:

$$\delta_{11}X + \Delta_{1p} + \Delta = 0. \quad (8)$$

На полученные значения усилий выполняется проверка сечений элементов. Для автоматизации расчетов использованы программы Mathcad и MS Excel. Для статического расчета конструкции применены метод сил и метод конечного элемента, реализованный в программном комплексе SCAD.

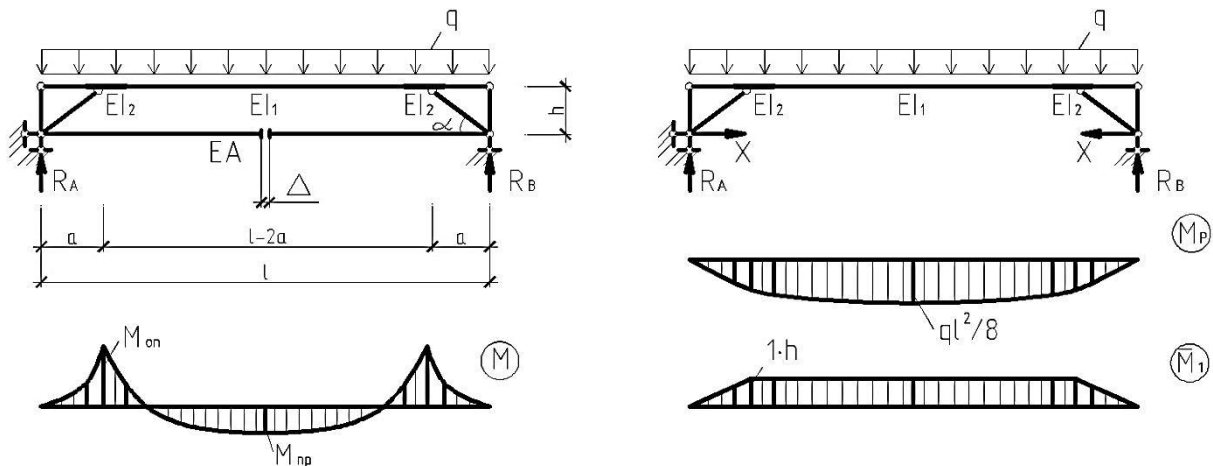


Рис. 6 – Расчетная схема конструкции к определению усилия предварительного натяжения в затяжке

Для новой конструкции выполнен поиск оптимальных геометрических параметров, соответствующих минимуму массы. Для исследования  $n$ -факторного пространства были применены методы теории планирования экстремальных экспериментов, адаптированные к проектированию строительных конструкций М. Б. Краковским. Методы позволяют при минимальном числе опытов определить степень и характер влияния отдельных факторов на изменение целевой функции.

В ходе исследования рассматривались дробный факторный эксперимент с пятью параметрами оптимизации ДФЭ типа  $2^{(5-2)}$  и полный факторный эксперимент с двумя параметрами оптимизации ПФЭ типа  $2^2$ .

В качестве критерия оптимальности принят вес конструкции:

$$y(x) = G(x) = \sum_{i=1}^n G_i(x), \quad (9)$$

где  $n$  – число элементов.

В качестве параметров оптимизации рассматривались: высота конструкции  $h$ , м; угол наклона подкоса  $\alpha$ , град.; соотношение жесткостей балки на опо-

ре и в пролете  $I_2/I_1$ ; предварительное напряжение в надколонниках  $P_4$  и затяжке  $P_5$  и коэффициент доли пролетного момента от балочного  $\mu=M_{sp}/M_0$ .

Установлено, что параметры  $I_2/I_1$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  не являются активными. Параметры  $h$ ,  $\alpha$  и  $\mu$  являются активными:  $h_{opt}=h_{max}$ ,  $\alpha_{opt}=\alpha_{min}$  (по конструктивным ограничениям),  $\mu_{opt}=M_{sp}/M_0=0,2\div 0,3$

Эффективность применения новой конструкции покрытия показана на примере блока здания размерами  $60\times 108$  м в сравнении с вариантом каркаса типа «Молодечно», выбранного в качестве исходного варианта среди других типовых ЛМК по эффективным показателям расхода металла, трудоемкости изготовления и монтажа. Новые конструкции легче на 3,5%; снижены трудоемкость изготовления на 39% и транспортные расходы на 68%.

Конструкции внедрены на объекте «Гипермаркет в Заречном микрорайоне г. Тюмени» площадью 22,5 тыс. м<sup>2</sup>.

**В третьем разделе** представлены численные исследования напряженно-деформированного состояния разработанной конструкции в программном комплексе SCAD.

Для обоснования расчетной модели балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой выполнен анализ значимости факторов: влияния поперечной силы на распределение силовых факторов в неразрезных балках; геометрической нелинейности в адекватном описании работы системы; стадий монтажа, предварительного напряжения, испытаний ступенями нагружения и разгрузки.

КЭ-анализ проведен на примере конструкции балки пролетом 18 м из стали С345-3 по ГОСТ 27772-88 (рис. 7). Сечения элементов балки приняты согласно разработанному алгоритму расчета при заданном соотношении моментов  $\mu=M_{sp}/M_0=0,25$ . Предварительное напряжение элементов балки для регулирования моментов принято способом смыкания монтажных зазоров в затяжке и надколонниках:  $\Delta_4=2,0$  см,  $\Delta_5=1,2$  см. Нагрузка на балку передается через прогоны, установленные в шаге 3 м.

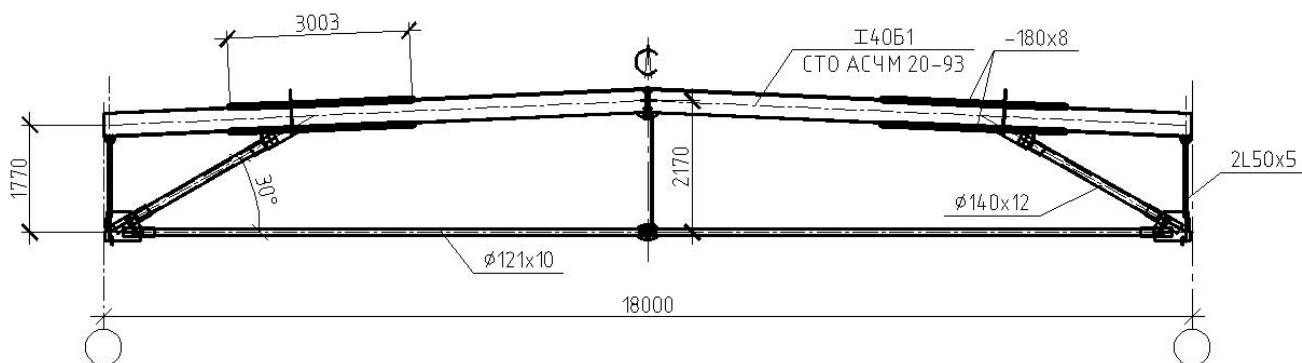


Рис. 7 – Конструкция покрытия пролетом 18 м под расчетную нагрузку  $q=46,2$  кН/м

Расчетная схема балки представлена на рис. 8. Рассмотрены следующие виды нагружений: собственный вес; постоянная нагрузка от веса покрытия; технологическая нагрузка от воздухопроводов и системы пожаротушения; снеговая нагрузка для IV снегового района с коэффициентом  $\mu=1,0$ . Суммарная распределенная расчетная нагрузка на балку составила 46,2 кН/м.



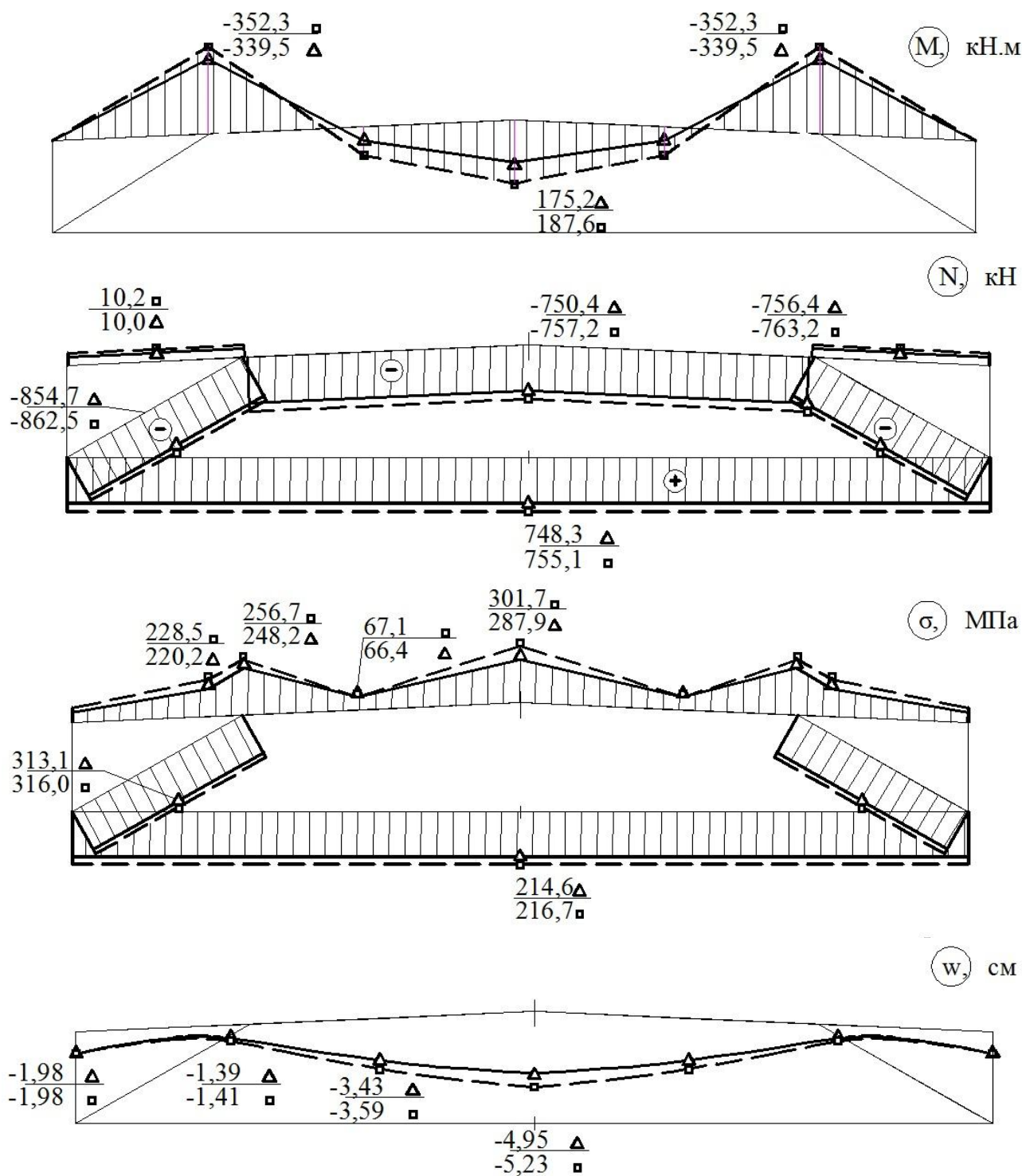


Рис. 9 – Эпюры внутренних усилий и вертикальных перемещений:

△ - линейный расчет; □ - нелинейный расчет

Для исследования работы новых балочных конструкций в составе каркаса натурального объекта, расположенного в III снеговом районе, проведены расчеты трехпролетной рамы (18-24-18 м), установленной с шагом 12 м (рис. 10).

Сечения элементов балок приняты согласно алгоритму расчета при заданном соотношении моментов  $\mu = M_{sp}/M_0 = 0,25$ . Предварительное напряжение для регулирования моментов в балках принято способом смыкания монтажных

зазоров: в затяжках 18-метровых пролетов  $\Delta=1,5$  см, в 24-метровом пролете –  $\Delta=1,8$  см, в надколонниках –  $\Delta=2,0$  см.

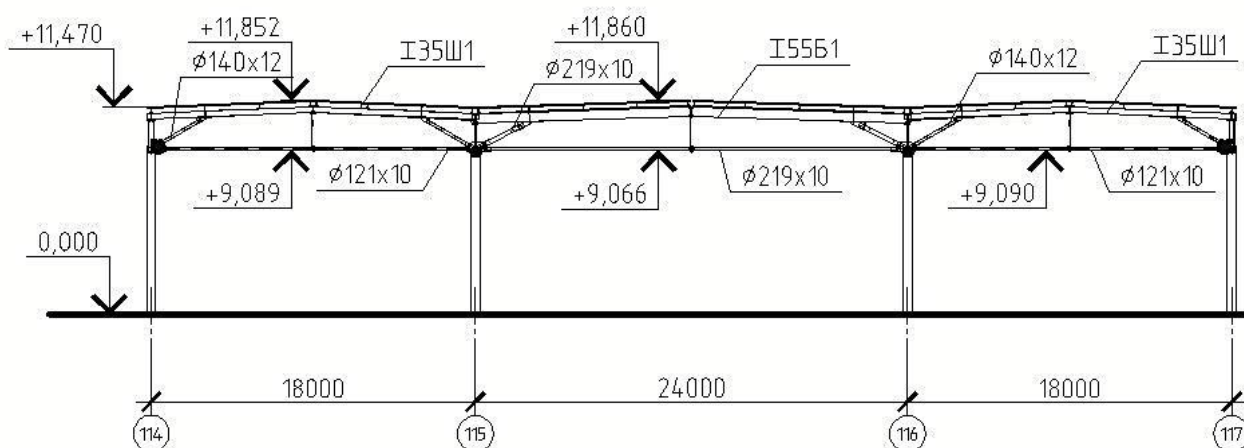


Рис. 10 – Трехпролетная рама каркаса здания

Рассмотрены три расчетные ситуации: монтаж и предварительное напряжение конструкций; испытание конструкций ступенями нагружения и разгрузки; установившаяся ситуация с эксплуатационной нагрузкой.

Для стадии монтажа и предварительного напряжения задавались нагрузки от собственного веса конструкций, веса покрытия (без утеплителя и гидроизоляции) и последовательного предварительного напряжения надколонников и затяжек.

Для стадии испытаний задавалось поэтапное нагружение конструкций до максимального значения 24,8 кН/м, соответствующего нормативному значению эксплуатационной нагрузки (без учета собственного веса конструкций), с последующей разгрузкой в соответствии с планом натурального эксперимента, а также рассматривалось влияние температурных воздействий на профилированный настил покрытия в период испытаний  $\Delta t_w=47$  °С.

Суммарная распределенная расчетная нагрузка для стадии эксплуатации составила 39 кН/м от веса конструкций, технологической нагрузки и веса снега для III снегового района. Дополнительно выполнен расчет на влияние неравномерных осадок фундаментов под колоннами на допустимую разность осадок  $\Delta s=72$  мм.

Для оценки напряженно-деформированного состояния элементов каркаса выполнены линейный и геометрически нелинейный расчеты 2D-модели и линейный расчет 3D-модели. Обосновано применение модели рамы в линейной постановке (линейный 2D-расчет), как наиболее простой.

Полученные результаты для стадий монтажа и испытания конструкций использованы для сопоставления с экспериментальными значениями.

В ходе исследования работы балочных конструкций в составе каркаса проведена оценка влияния факторов: изменения величины предварительного напряжения конструкций на  $\pm 10$  %; нагрева настила покрытия на стадии испытаний; неравномерной осадки фундаментов.



Анализ изменения напряжений в сечениях балочных конструкций позволил сделать выводы о незначительном влиянии изменения предварительного напряжения и нагрева конструкций при монтаже и чувствительности системы к неравномерным осадкам фундаментов, особенно под средними колоннами ( $\Delta\sigma_{\max}=23,3\%$ ).

В четвертом разделе представлены результаты натурных испытаний балочных конструкций пролетами 18 и 24 м, расположенных по оси «210» в осях «114-116» (рис. 11) третьего блока здания гипермаркета в Заречном микрорайоне города Тюмени. Испытания проведены после завершения монтажа элементов каркаса и настила покрытия.

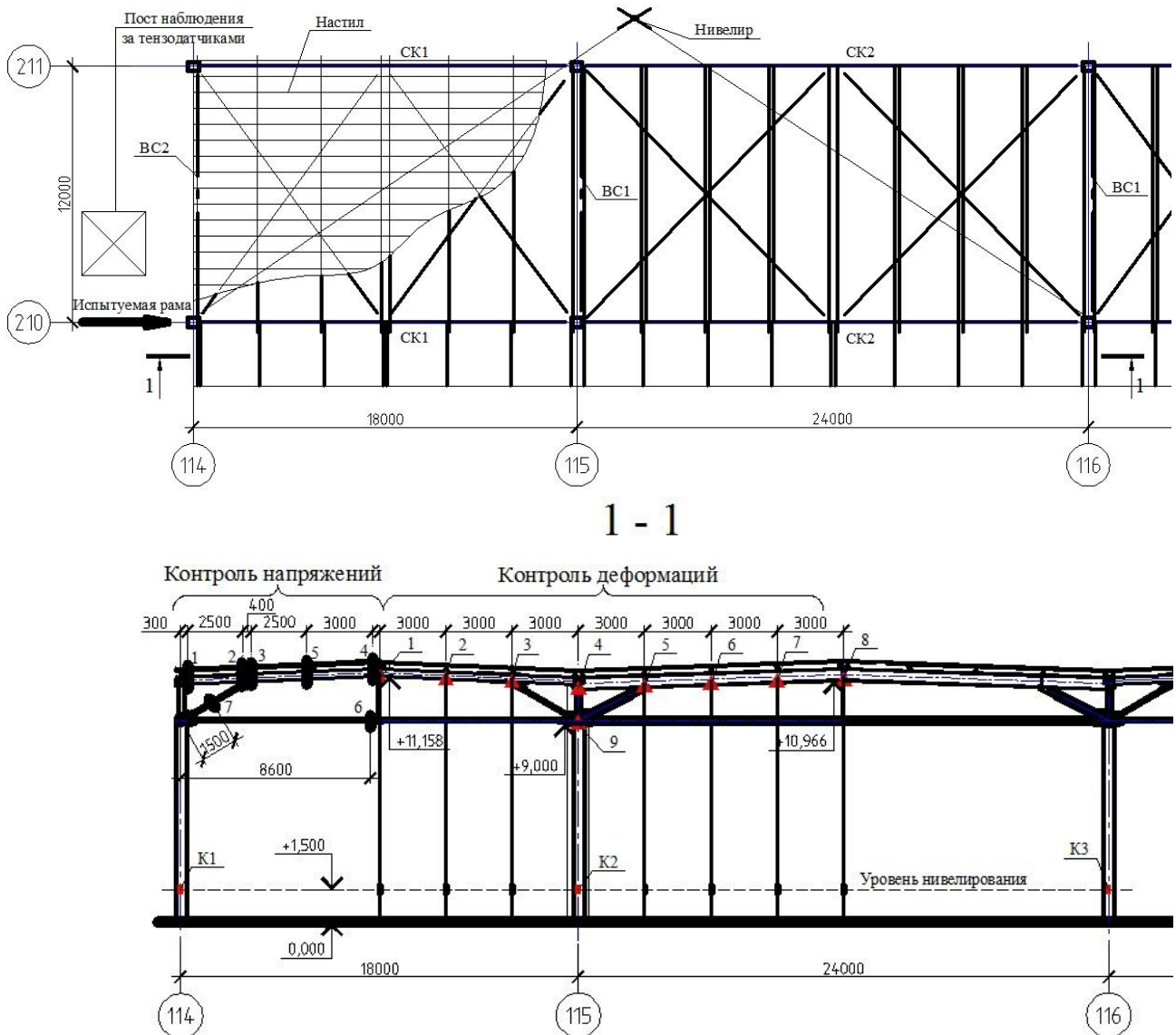


Рис. 11 – Схема испытаний балочных конструкций по оси «210»

Испытания проводились с контролем относительных деформаций, измеряемых в пяти сечениях по длине балки, в сечениях подкоса и затяжки конструкции крайнего 18-метрового пролета посредством тензометрических преобразователей. Регистрация деформаций осуществлялась посредством системы АИД-4. Контроль перемещений балок и осадок опор осуществлялся нивелира-

ми класса точности Н-1 с использованием шкаловых марок. В качестве грузов использовались мешки с цементом номинальным грузом 1000 кг (рис. 12).



Рис. 12 – Натурные испытания конструкций нагружением с контролем относительных деформаций (тензометрические преобразователи) и перемещений (шкаловые марки)

На этапе нагрузки производилось симметричное нагружение конструкции до нормативной величины нагрузки. На этапе разгрузки проводилось несимметричное разгружение конструкции с целью изучения работы неразрезной конструкции при неравномерном распределении нагрузки. На каждой ступени после выдержки конструкции не менее 30 мин. производилась регистрация контрольных показателей.

Конструкции успешно прошли натурные испытания. Сопоставление теоретических и экспериментальных напряжений и деформаций для максимальной стадии нагружения представлено на рис. 13.

Значения напряжений не превысили контрольных значений, расхождения по максимальным значениям составили до 29% в запас прочности материала. Расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями вертикальных деформаций составили до 28% в запас жесткости.

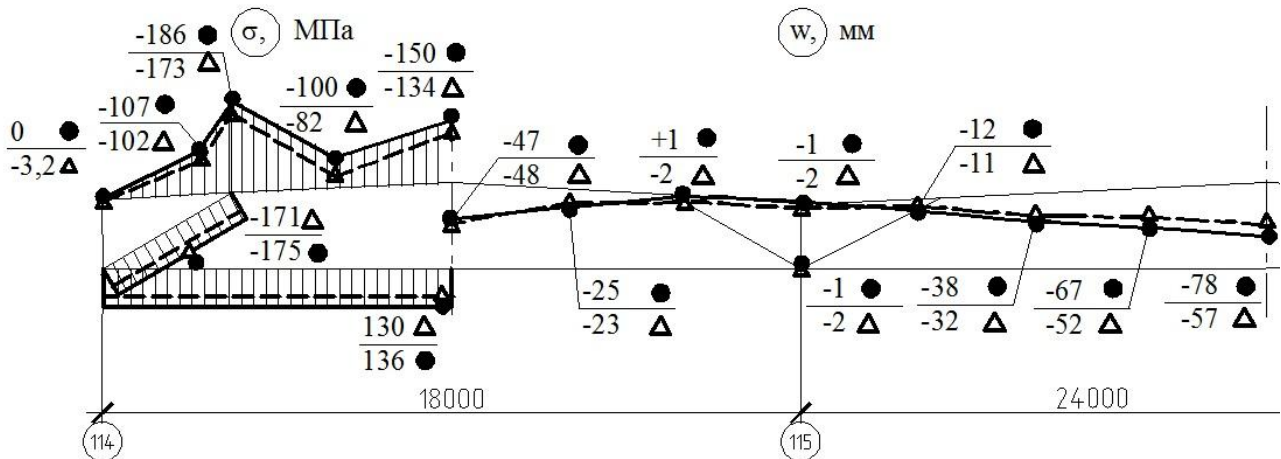


Рис. 13 – Эпюры нормальных напряжений и вертикальных перемещений: ● - теоретические значения; Δ - экспериментальные значения

Построенные зависимости «нагрузка – вертикальные перемещения» (рис.14) в целом подтверждают упругий характер работы конструкций. Остаточные деформации величиной до 4 мм объясняются приработкой конструкций в упругоподатливых соединениях.

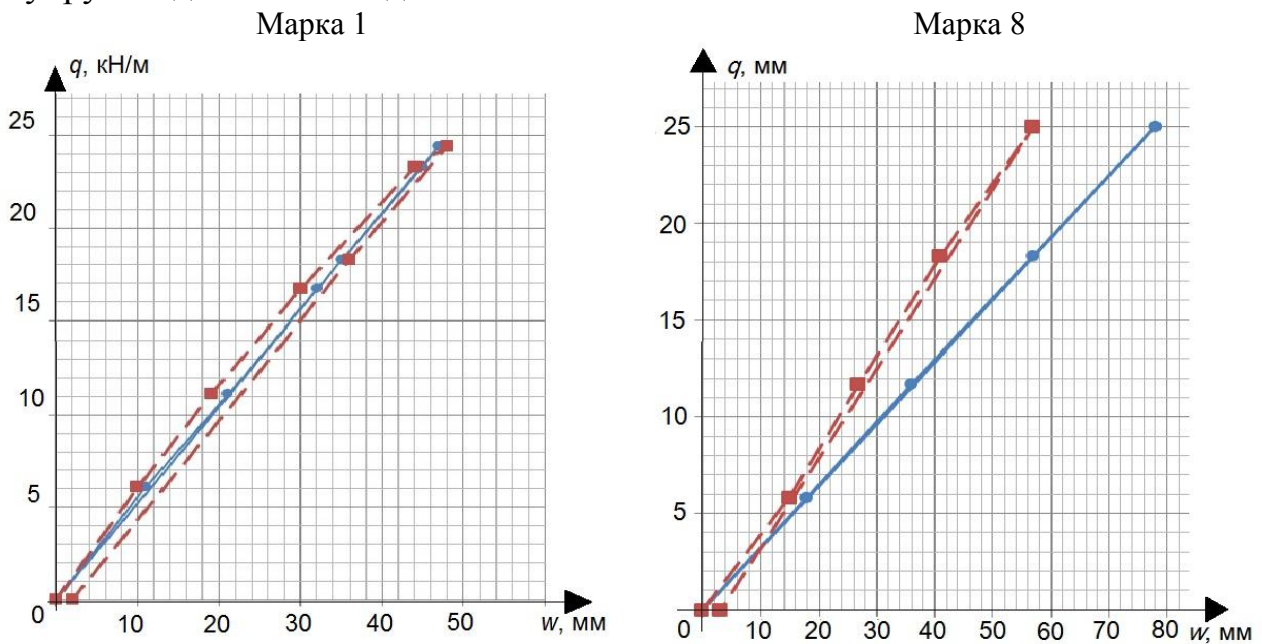


Рис. 14 – Зависимость нагрузка – относительные вертикальные перемещения:  
● - теоретические значения; ■ - экспериментальные значения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана новая конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой (патент № 2361982 РФ). Новые конструкции покрытия пролетами 18 и 24 м внедрены при строительстве здания гипермаркета площадью 22,5 тыс. м<sup>2</sup>, получен эффект от внедрения в размере 7,6% от стоимости каркаса здания.

2. Разработан алгоритм расчета новой балочной конструкции покрытия, являющейся один раз статически неопределимой системой. Использование данного алгоритма позволяет получать конструкцию минимального веса и ис-

ключает необходимость в многократных итерациях при подборе сечений элементов. Для конструкции установлены активные параметры оптимизации и значения, соответствующие минимуму веса:  $h_{opt}=h_{max}$ ,  $\alpha_{opt}=\alpha_{min}$ ,  $\mu_{opt}=M_{sp}/M_0=0,2\div 0,3$ .

3. Расчетom установлена значимость факторов влияния поперечной силы на распределение силовых факторов в неразрезных балках и геометрической нелинейности в адекватном описании работы системы. Установлено существенное влияние поперечных сил ( $\Delta > 10\%$ ) и несущественное влияние геометрической нелинейности ( $\Delta < 10\%$ ). Обосновано применение расчетной модели конструкции в линейной постановке. Коэффициент запаса общей устойчивости системы составил 1,6, что свидетельствует о необходимом уровне надежности.

4. На основании численных исследований балочных конструкций пролетами 18 и 24 м в составе каркаса выявлены закономерности изменения НДС новой конструкции при расчетных ситуациях монтажа, испытания и эксплуатации. Установлено, что усилия и деформации элементов и узлов системы в 2D и 3D-моделях сопоставимы и при отсутствии локальных воздействий на отдельные элементы каркаса может использоваться плоская модель рамы в линейной постановке. Неравномерные осадки фундаментов оказывают существенное влияние на НДС системы с неразрезным ригелем.

5. В результате натурных испытаний балочных конструкций переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе трехпролетного покрытия с учетом технологических особенностей монтажа, статического равномерного и неравномерного нагружения до максимальной нагрузки равной  $0,73q_{расч}$ , с контролем напряжений и вертикальных деформаций установлено, что качественная картина деформированного состояния конструкций при предварительном напряжении и на этапах нагружения соответствует расчетным данным.

6. На основе сопоставления результатов исследований установлено, что расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями нормальных напряжений составили не более 29 % в запас прочности конструкции, вертикальных перемещений – не более 28 % в запас жесткости. Экспериментально подтверждено, что система малочувствительна к неравномерному нагружению смежных пролетов (при изменении нагрузки в соседних пролетах в наблюдаемом пролете НДС не изменяется). Напряженно-деформированное состояние в крайнем пролете наиболее полно совпадает с расчетными значениями, что можно объяснить отсутствием стеснения горизонтальных деформаций в отличие от среднего 24-метрового пролета.

7. Построенные зависимости «нагрузка – вертикальные перемещения» в целом подтверждают упругий характер работы конструкций за исключением остаточных деформаций величиной до 4 мм, которые объясняются приработкой конструкций в упругоподатливых соединениях.



## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

### Статьи в изданиях из Перечня ВАК

1. *Корсун, Н. Д.* Анализ отказа конструкции решетчатой рамы / *Н. С. Москалев, Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун* // «Монтажные и специальные работы в строительстве». – 2005. - №10. – С. 2-5.

2. *Корсун, Н. Д.* Инновационные технологии в проектировании легких металлических конструкций / *Н. С. Москалев, Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун* // «Монтажные и специальные работы в строительстве». – 2007. - №1. – С. 8-11.

3. *Корсун, Н. Д.* Экспериментальные исследования стальной балочной конструкции переменной жесткости с подкосами и затяжкой / *Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун, С. А. Еренчинов* // «Приволжский научный журнал». – 2009. - №3(11). – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 270 с. – С. 29-34.

4. *Корсун, Н. Д.* Экспериментально-теоретические исследования работы стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой / *Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун* // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/117-12754> (дата обращения: 15.04.2014).

### Публикации в других изданиях

5. *Корсун, Н. Д.* Оценка надежности легких металлических конструкций / *Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун* // Энергосберегающие технологии, оборудование и материалы при строительстве объектов в Западной Сибири: сб. материалов научно-практической конференции / под общ. ред. Шаповала А.Ф., Моисеева Б.В. – Тюмень: ИПЦ "Экспресс", 2005. – 116 с. – С. 100-104.

6. *Корсун, Н. Д.* Опыт разработки и внедрения новой металлической конструкции покрытия / *Я. А. Пронозин, Н. Д. Корсун* // Сб. науч. тр. Междунар. симпозиума: Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство). – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – 396 с. – С. 259-264.

7. *Корсун, Н. Д.* Разработка эффективных решений по устройству перекрытий при надстройке зданий // Вестник строительства и архитектуры. – 2010. – № 1. – Орел: Изд-во ООО ПФ «Картуш», 2010. – 510 с. – С. 94-99.

8. *Корсун, Н. Д.* Определение оптимальных параметров новой металлической конструкции покрытия / Сб. материалов Всероссийской НПК «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» – Тюмень, 2010. – 225 с. – С. 106-108.

9. *Корсун, Н. Д.* Определение оптимального усилия предварительного напряжения стальной балочной конструкции // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сб. статей X Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. – 224 с. – С. 95-98.

10. *Корсун, Н. Д.* Анализ работы конструктивных систем с применением новой стальной балочной конструкции покрытия / Сб. материалов Всероссийской НПК «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» – Тюмень, 2011. – 298 с. – С. 35-38.

11. *Корсун, Н. Д.* Эффективные легкие металлические конструкции для зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения / Энергоэффективность в экономике Тюменской области: Материалы V Инженерного форума Тюменской области. 5 декабря – 25 декабря 2012 года, Тюмень, 2012. – 136 с. – С. 51-54.

Патент на изобретение

12. Пат. 2361982 Рос. Федерация: МПК E04B 7/00. Металлическая несущая конструкция покрытия / *Прозозин Я. А., Бай В. Ф., Корсун Н. Д., Еренчинов С. А., Зазуля Ю. В.*; заявитель и патентообладатель Тюм. гос. арх.-строит. ун-тет. - № 2007143425/03; заявл. 23.11.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 4 с.: ил.

Отчет по госбюджетной теме

13. Теоретические и экспериментальные исследования новых конструктивных форм ЛМК: Отчет по ГБ теме (заключ.): Код темы по ГРНТИ 67.03.03 / Тюм. гос. арх.-строит. университет, рук. *Прозозин Я. А.*; исполн.: *Бай В. Ф., Корсун Н. Д., Еренчинов С. А.* [и др.] – Тюмень, 2010. – 93 с. – Библиогр.: с. 80. - № ГР 01200606993. Инв. № 02201150429.

Корсун Наталья Дмитриевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТАЛЬНОЙ БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ  
ЖЕСТКОСТИ С ПОДКОСАМИ И ЗАТЯЖКОЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции зданий и сооружений  
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Изд. лицензия № 02884 от 26.09.2000. Подписано в печать «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Формат 60x84 /16. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

РИО ТюмГАСУ, 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2