

Учреждение образования  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 692.426:624.014 (043.3)

**ШУРИН**  
Андрей Брониславович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ  
ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АРОК И СТРУКТУРНОЙ ПЛИТЫ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

**Брест, 2011**

Работа выполнена в Учреждении образования «Брестский государственный технический университет» на кафедре «Строительные конструкции»

Научный руководитель: **Драган Вячеслав Игнатьевич**,  
первый проректор, кандидат технических наук,  
доцент, профессор кафедры «Строительные кон-  
струкции» Учреждения образования «Брестский  
государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Грицук Михаил Степанович**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Геотехника и транспортные комму-  
никации» Учреждения образования «Брестский  
государственный технический университет»

**Мартынов Юрий Семёнович**,  
кандидат технических наук, профессор, профес-  
сор кафедры «Металлические и деревянные кон-  
струкции» Учреждения образования «Белорус-  
ский национальный технический университет»,  
г. Минск

Оппонирующая организа-  
ция: Учреждение образования «Полоцкий государст-  
венный университет»

Защита состоится 10 января 2012 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защи-  
те диссертаций К.02.09.01 при Учреждении образования «Брестский государ-  
ственный технический университет» по адресу: г. Брест, ул. Московская, 267,  
ауд. 1/323, телефон ученого секретаря: +375 162 40-60-87.

Отзывы просим направлять по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267,  
БрГТУ, ученому секретарю Совета по защите диссертаций, тел.:  
8 (0162) 40-60-87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан «06» декабря 2011 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций К.02.09.01

кандидат технических наук

\_\_\_\_\_ Шевчук В.Л.

## ВВЕДЕНИЕ

За последние годы накоплен опыт в проектировании и строительстве большепролетных сооружений, отличающихся не только архитектурным исполнением, но и конструктивным решением. К сооружениям подобного типа можно отнести спортивно-зрелищные арены, выставочные залы, рынки, ангары, крытые стадионы и т.д. Такие сооружения имеют повышенный уровень ответственности, т.к. их аварии могут привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям. Оптимальным материалом для проектирования таких конструкций являются металлические конструкции, обладающие достаточной надежностью, относительной легкостью и экономичностью.

Применение принципиально новых конструктивных решений таких покрытий требует разработки новых методов их расчета, основанных на численном моделировании, на экспериментально-теоретических исследованиях работы отдельных узлов и всей конструкции в целом.

При проектировании большепролетных сооружений возникают проблемы, выходящие за рамки расчетов, определяемых нормативными документами в соответствии с теорией предельных состояний. Повышенное значение приобретают вопросы учета деформаций узлов, температурных воздействий, неточности изготовления элементов и сборки сооружения. Тем не менее, несмотря на все попытки приближения расчетной модели к действительной работе сооружения, наиболее точное представление о работе конструкции могут дать только натурные испытания [10, 11].

Произошедшие за последние годы в различных странах мира внезапные обрушения зданий и сооружений с большепролетными конструкциями покрытий (Москва – 2004 и 2006 гг., Париж – 2005 г., Пермь – 2006 г., Германия – 2006 г.) заставили обратить серьезное внимание на вопросы повышения надежности и долговечности таких объектов на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации.

Применение комплексного подхода к проектированию, включающего теоретические и экспериментальные исследования, позволит разработать более совершенные и экономичные конструктивные решения большепролетных комбинированных металлических покрытий и повысить их уровень надежности [15, 16].

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами.** Работа выполнялась в рамках госбюджетных и хоздоговорных работ:

- государственной программы ориентированных фундаментальных исследований (ГПОФИ) по заданию «Строительство и архитектура 40»

ГБ № 06/610 «Разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния сложных стальных и сталежелезобетонных конструкций при нестационарных силовых и несиловых воздействиях» по целевому гранту (№ госрегистрации 20064977);

- ХД № 04 / 332 «Разработка чертежей стадии КМ структурной плиты из труб блока «А» «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в городе Бресте»;

- ХД № 04 / 410 «Разработка чертежей стадии КМД структурной плиты из труб блока «А» «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в городе Бресте»;

- ХД № 05 / 30 «Проведение испытаний узлов и деталей арки и структурной плиты блока «А» «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г. Бресте»;

- ХД № 05 / 76 «Авторский надзор за возведением арок и структурной плиты покрытия «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г. Бресте»;

- ХД № 05 / 183 «Проведение испытаний металлических конструкций покрытия «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г. Бресте».

#### **Цель и задачи исследования.**

*Целью* данной работы является разработка конструкции и исследование напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты.

Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи*:

- разработана новая конструкция комбинированного большепролетного покрытия из металлических арок и структурной плиты;

- выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния комбинированного большепролетного покрытия с учетом действительной работы узловых соединений структурной плиты и с включением в работу прогонов и профилированного настила;

- проведены экспериментальные исследования узлов арок комбинированного большепролетного покрытия;

- с использованием численных методов выполнено параметрическое моделирование напряженно-деформированного состояния крестообразных и Т-образных стыков труб в упругопластической стадии работы материала узлов;

- разработана методика и проведены натурные испытания комбинированного большепролетного покрытия из металлических арок и структурной плиты «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта «Виктория» в г. Бресте.

*Объект исследования* – большепролетное комбинированное покрытие из металлических арок и структурной плиты.

*Предмет исследования* – напряженно-деформированное состояние большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты.

**Положения, выносимые на защиту:**

- новое конструктивное решение большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты;
- результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия с учетом действительной работы узловых соединений структурной плиты и с включением в работу прогонов и профилированного настила, позволившие разработать КЭ-модель покрытия, адекватно отражающую работу конструкции;
- результаты численных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния крестообразных и Т-образных стыков труб в упругопластической стадии работы материала узлов, позволяющие определить резервы несущей способности арок большепролетного комбинированного покрытия;
- методика и результаты натурных экспериментальных исследований большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты, позволившие определить их действительное напряженно-деформированное состояние и обеспечить эксплуатационную долговечность сооружения.

**Личный вклад соискателя:**

- систематизация конструктивных решений узловых соединений структурных конструкций по их локальной податливости;
- разработка новой конструкции большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты в соавторстве;
- численные исследования напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия с учетом действительной работы узловых соединений структурной плиты и с включением в работу прогонов и профилированного настила;
- численный анализ и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния крестообразных и Т-образных стыков труб в упругопластической стадии работы материала узлов;
- разработка методики проведения натурных испытаний большепролетных комбинированных покрытий.

**Апробация результатов диссертации.**

Результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах:

- I Международный научно-практический семинар «Архитектура и строительство – 2005» (Брест, 22–23 сентября 2005 г.);
- Международный научно-методический межвузовский семинар «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Могилев, 16–18 ноября 2005 г.);
- XIV Международный научно-практический семинар «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Минск, 22–23 июня 2006 г.);
- XVI Международный научно-практический семинар «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Брест, 28–30 мая 2009 г.);
- XVII Международный научно-методический семинар «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров» (Гродно, 27–28 мая 2010 г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 16 основных печатных работ общим количеством 13,25 авторских листа, в том числе 6 статей в научных изданиях по перечню ВАК РБ – 7,45 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, представленной 4 главами, заключения, библиографического списка из 138 наименований (включая собственные публикации), 4 приложений, 87 рисунков, 27 таблиц. Полный объем диссертационной работы составляет 181 страница, в том числе 98 страниц машинописного текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** выполнен анализ развития и систематизация большепролетных комбинированных структурных конструкций, а также требований, предъявляемых к ним на современном этапе. Отмечается, что имеется значительное многообразие различных форм комбинированных структурных конструкций, отличающихся как архитектурным исполнением, так и конструктивным решением.

Вопросам расчета и проектирования большепролетных комбинированных покрытий посвящены работы В.И. Трофимова, Р.И. Хисамова, В.К. Файбишенко, Л.Н. Лубо, А.З. Клячина, В.А. Савельева, Б.А. Пушкина, Р. Ле Риколе, С. Дю Шато, Д. Райта, З. Гаррисона, К. Ваксмана и др.

Существенным фактором, влияющим на действительное напряженно-деформированное состояние (НДС) большепролетных комбинированных покрытий, является повышенная податливость ряда узловых соединений струк-

турных конструкций. Влияние податливости узловых соединений на работу структурных конструкций исследовалось О.И. Ефимовым, В.И. Трофимовым, И.И. Зуевой, А.В. Перельмутером, М.В. Моисеевым. В частности, при исследовании плоских структурных покрытий было установлено, что повышенная податливость узловых элементов на пространственных листовых фасонках приводит к дополнительным прогибам в конструкции и перераспределению внутренних усилий.

В соответствии с этим, автором предложено классифицировать узловые элементы структурных конструкций по степени их локальной податливости на две группы. К первой группе можно отнести узловые элементы, локальной податливостью которых при расчетах можно пренебречь, т.к. она обусловлена упругой деформацией узлов. Это узлы, выполненные на монтажной сварке, некоторые узлы комбинированных систем («Меро», «Веймар», «МАрхИ», «БрГТУ») [10, 14]. Вторая группа – это узловые элементы с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (соединения типа «Варитек», «Юнистрат», «Киси»). В таких соединениях разность между диаметром отверстия и болта приводит к появлению дополнительных прогибов, часть стержней в конструкции вступает в работу только после выбора зазоров в соединении либо не включается даже при загрузке полной нагрузкой. Все это приводит к перераспределению внутренних усилий. Однако конструкции с такими соединениями легче собираются и имеют менее жесткие допуски на изготовление [8, 9, 12].

Анализ проведенных другими авторами исследований локальной податливости узловых соединений структурных конструкций показал, что все они были проведены на моделях или фрагментах структурных конструкций с величиной зазора между диаметром отверстия и болта 1,5 мм.

Обзор конструктивных решений построенных структурных покрытий показал, что большинство из них являются плоскими и их пролеты не выходят за пределы 30 м при опирании по контуру. Для увеличения перекрываемого пролета используются разгружающие консоли, увеличение высоты структурных плит путем изменения размеров ячейки или использования двух-, трех- и более поясных систем, что в значительной степени увеличивает стоимость и металлоемкость конструкций. Другой способ увеличения перекрываемого пролета – применение комбинированных структурных покрытий с дополнительным опиранием на фермы, рамы, ванты или верхние пояса арок. Опирание структурных покрытий на затяжки арок практически не встречается [9, 11].

Анализ проведенных экспериментальных исследований покрытий показал, что большинство натуральных испытаний проведено на моделях или фрагментах для плоских конструкций. Работа структурных плит в складчато-распорных системах не исследовалась. Отсутствует единая методика проведения натуральных

испытаний. В нашей республике исследования моделей большепролетных покрытий и их натурные испытания до 2005 года не проводились.

**Во второй главе** приводится описание конструкций нового комбинированного покрытия дворца для игровых видов спорта «Виктория» в г. Бресте, разработанного с непосредственным участием автора. Разработана методика по учету податливости узловых элементов структурной конструкции, направленная на выявление резервов его несущей способности и снижение материалоемкости. Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований действительной работы наиболее ответственных узлов арок.

Для перекрытия пролета была использована большепролетная металлическая структурная плита, представляющая собой двускатную складку с углом наклона в  $15^\circ$  (рисунок 1). Размеры по диагонали ромба 93 м. В средней части плита опирается на затяжки двух несущих двухшарнирных арок, установленных вдоль диагонали покрытия на расстоянии 11,2 м друг от друга. Пролет арок 80,62 м. По периметру покрытие опирается на четыре диафрагмы жесткости и на сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6 м.



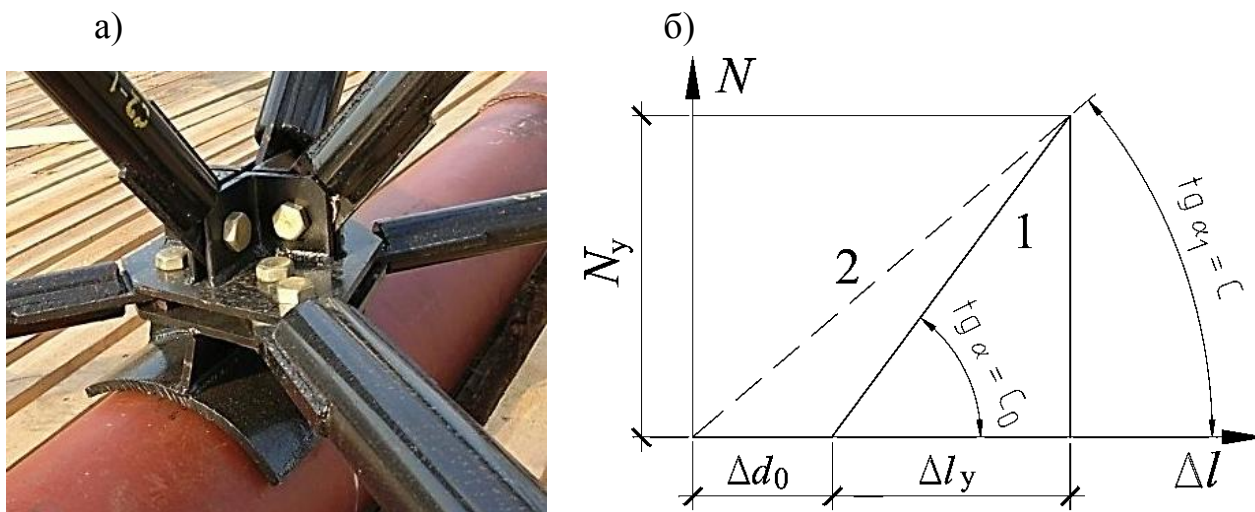
**Рисунок 1 – Общий вид покрытия дворца для игровых видов спорта «Виктория» в г. Бресте**

По статической схеме система арок принята двухшарнирной. Для исключения передачи на колонны распора от изменения температуры и для снижения чувствительности арок к осадкам опор разработана специальная опорная конструкция. Опорная реакция от собственного веса покрытия и снеговой нагрузки передается на сталежелезобетонные колонны через три цилиндрических катка [1, 2, 5, 6, 7].

Достоинством разработанного автором комбинированного покрытия является совместная работа арок и структурной плиты. Затяжки арок – это многопролетные неразрезные балки, на которые опирается структурная плита в своей



средней части. Структурная плита жестко связана с затяжкой и с опорными узлами арок и включается в работу на восприятие распора арок (рисунок 2а). Применение разработанного конструктивного решения позволило увеличить изгибную жесткость покрытия в 2 раза, уменьшить пролет покрытия в поперечном направлении в 2,3 раза и снизить продольные усилия в элементах арок на 10%. Расположение арок над кровлей существенно уменьшает внутренний отапливаемый объем здания без уменьшения полезного объема [1, 2, 6, 7].



1 – диаграмма деформирования узлового соединения по результатам статических испытаний; 2 – диаграмма деформирования, заложенная в расчет;  
 $\Delta d_0$  – разность диаметров между отверстием  $d_0$  и болтом  $d$

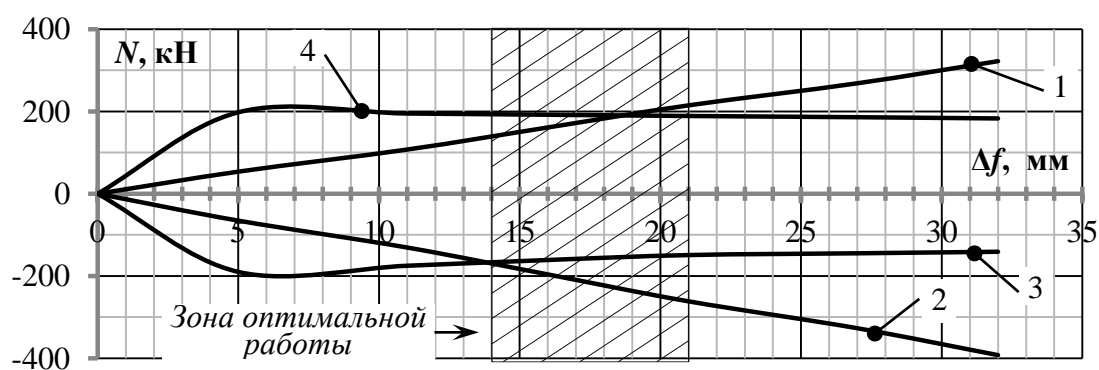
**Рисунок 2 – Узел опирания узлового соединения структурной конструкции на затяжку (а) и график деформативности узлового соединения на пространственных листовых фасонках (б)**

Во избежание провисания затяжки под собственным весом и весом структурной плиты арочная система дополнена подвесками. Отличительной особенностью покрытия является наличие в подвесках арок специально разработанных фаркопов с регулируемым натяжением, позволяющим включаться в совместную работу всем конструкциям покрытия. Численными исследованиями установлено, что высота подъема затяжки, при котором расход металла на  $1 \text{ м}^2$  покрытия будет наименьшим, составляет 20–30 мм (рисунок 3). При дальнейшем натяжении подвесок усилия в стержнях структурной плиты изменяются незначительно, в то же время как в элементах арок усилия увеличиваются линейно [1, 2].

В структурной конструкции покрытия применены узловые соединения на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (рисунок 2а). Исследования В.И. Трофимова, О.И. Ефимова, А.В. Матвеева показали, что податливость узлов структурной конструкции вырабатывается неравномерно. Предсказать, при каких усилиях в элемен-

тах структурной плиты начнутся сдвиги в болтовых соединениях и какова будет их последовательность – маловероятно. В соответствии с этим была разработана новая расчетная модель учета действительной работы узлового соединения на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (рисунок 2б). В расчетную модель вводятся следующие допущения:

- податливость в узловых элементах вырабатывается на начальном этапе, т.к. диаметр отверстия превышает диаметр болта на величину  $\Delta d_0$ ;
- трение между соединяемыми элементами в узловом соединении не учитывается;
- податливость вырабатывается во всех элементах структурной конструкции. Деформативность болтового соединения пропорциональна усилию, деформации развиваются не по зависимости 1 (рисунок 1б), а происходят по прямой 2. Полные деформации узловых элементов будут складываться из упругой части  $\Delta l_y$  и  $\Delta d_0$ , равной разности диаметров отверстия  $d_0$  и болта  $d$  [4, 9, 12].



1 – в затяжке; 2 – в опорном стержне арки; 3 – максимальные сжимающие усилия в структуре; 4 – максимальные растягивающие усилия в структуре

**Рисунок 3 – График зависимости максимальных усилий в элементах покрытия  $N$  от усилия предварительного натяжения подвесок  $N_p$**

Для вычисления действительных жесткостных характеристик узловых соединений на пространственных листовых фасонках введен параметр деформирования узлового соединения и обозначаемый как  $C$ . Тогда, в соответствии с графиком деформирования узлового соединения (рисунок 1б), параметр деформирования узлового соединения  $C$  вычисляется по формуле 1

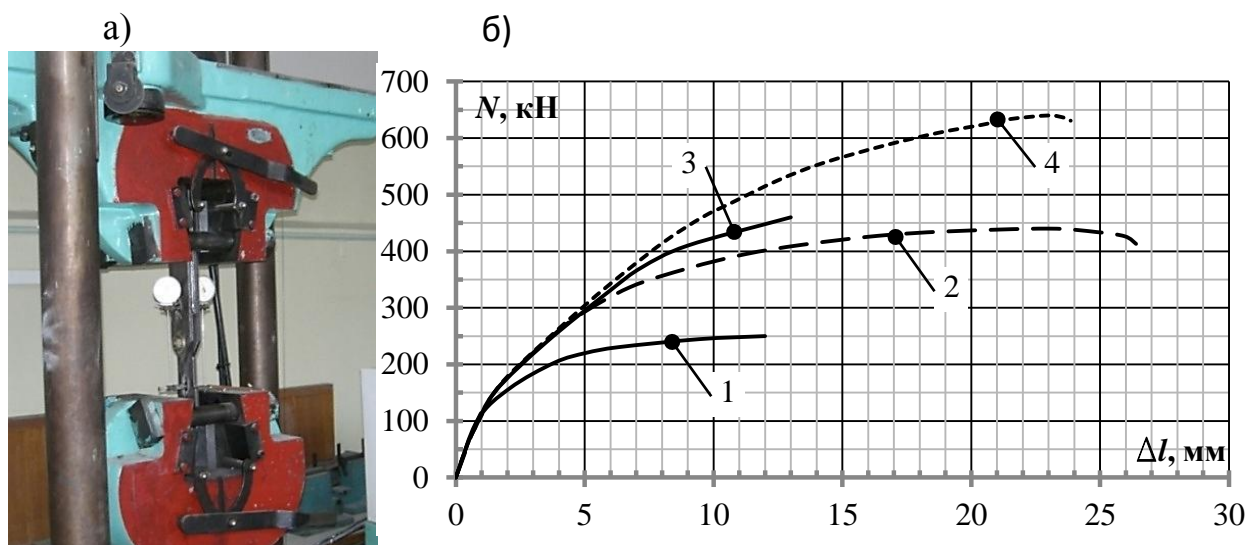
$$C = C_0 \cdot \frac{1}{\left( \frac{\Delta d_0}{\Delta l_y} + 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $C_0 = N_y / \Delta l_y$  – начальный параметр деформирования;

$\Delta l_y$  – упругие деформации узлового соединения, полученные при испытании образцов узловых элементов на осевое растяжение (рисунок 4б);

$\Delta d_0$  – разность диаметров отверстия  $d_0$  и болта  $d$  в узловом соединении.

Для определения положения прямой 2 (рисунок 1б) и соответственно линейной жесткости узловых элементов на пространственных листовых фасонках были проведены их статические испытания (рисунок 4а). В результате испытаний получены диаграммы деформирования в осях  $N - \Delta l$  (рисунок 4б), которые были использованы для назначения линии 1 графика деформативности болтового соединения (рисунок 1б) [4, 9, 12].



1 – образец №1 (M24  $t=10$ ); 2 – образец №2 (M24  $t=20$ );  
 2 – образец №3 (M24  $t=25$ ); 4 – образец №4 (M30  $t=25$ )

**Рисунок 4 – Испытание образцов узловых элементов (а) и диаграммы деформирования образцов при испытаниях на осевое растяжение (б)**

Для определения уровня максимальных усилий в узлах и для выяснения резерва несущей способности арок и отдельных, наиболее нагруженных и ответственных ее элементов, были проведены статические испытания соответствующих партий узлов арок в натуральную величину, несущая способность которых напрямую зависит от прочности имеющихся в них сварных и резьбовых соединений: фаркопфы подвесок Ф1 – для создания усилий предварительного натяжения подвесок и подъема затяжки; фаркопфы связей Ф2 – для натяжения крестовых связей по верхним поясам ферм; узлы крепления подвесок к нижнему поясу арки и к затяжкам УП1; монтажные сварные стыки затяжек УС1. Результаты испытаний узлов арок приведены в таблице 1 [1, 5, 6, 7].

Испытания на растяжение фаркопфов подвесок и фаркопфов связей производились на универсальной испытательной машине УММ-100. Для стыка затяжек был разработан испытательный стенд с использованием четырех гидродомкратов с усилием по 1000 кН (рисунок 5а). По результатам экспериментальных исследований стыка затяжек можно сделать вывод об упругой работе стыка до усилия 3800 кН (рисунок 5б). Разрушение узлов затяжек не достигнуто. Проектное усилие в затяжке от расчетных нагрузок 1750 кН.

Таблица 1 – Результаты испытаний узлов арок

Образец	Номера образцов	Усилие нагружения, кН		Различие между экспериментальным и расчетным значением $N_P / N_T$
		эксперим., $N_P$	расчетное, $N_T$	
Ф1	1, 2, 3	1000	942,1	1,06
Ф2	1, 2, 3	515	451,8	1,14
УС1	1, 2, 3	3850	5694,3	Разрушение не достигнуто
УП1	1	1161	1120.3	1.04
	2	1217		1.09
	3	1322		1.18

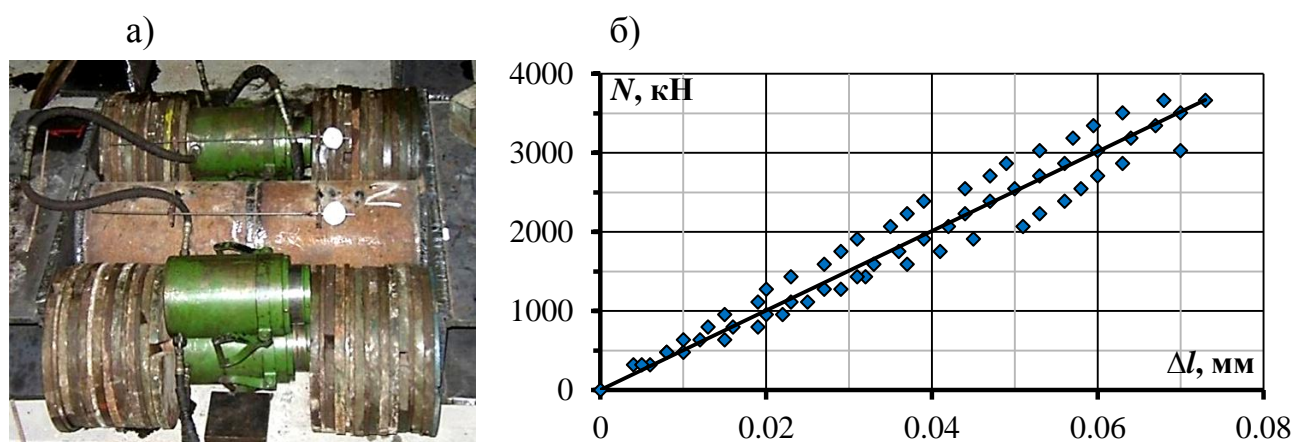
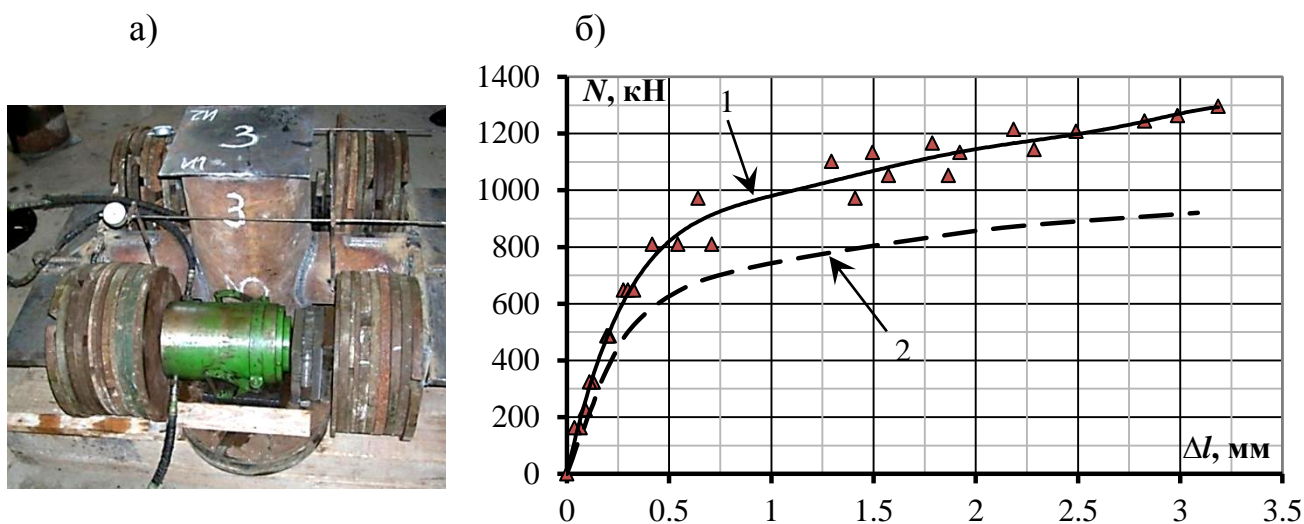


Рисунок 5 – Общий вид стенда для испытаний стыка затяжек (а) и диаграмма деформирования стыка (б)

В связи с отсутствием точных аналитических методов расчета узлов конструкций из круглых труб (стык затяжки с подвеской) и для исследования предельного состояния узлов были проведены их испытания на растяжение при одноосном нагружении (поперечном по отношению к поясной трубе) до разрушения. Испытания проводились на стенде с использованием двух гидродомкратов с усилием по 1000 кН (рисунок 5а). В результате испытания установлено, что предельное состояние наступило в результате развития значительных пластических деформаций, после чего в зоне термического влияния сварного шва со стороны затяжки образовалась трещина (рисунок 6б) [1, 5, 6, 7].

В качестве критерия оценки сложного НДС приняты эквивалентные напряжения по энергетической теории Губера-Мизеса-Генки ( $\sigma_{эКВ}$ ) и значения упругих и упругопластических деформаций.

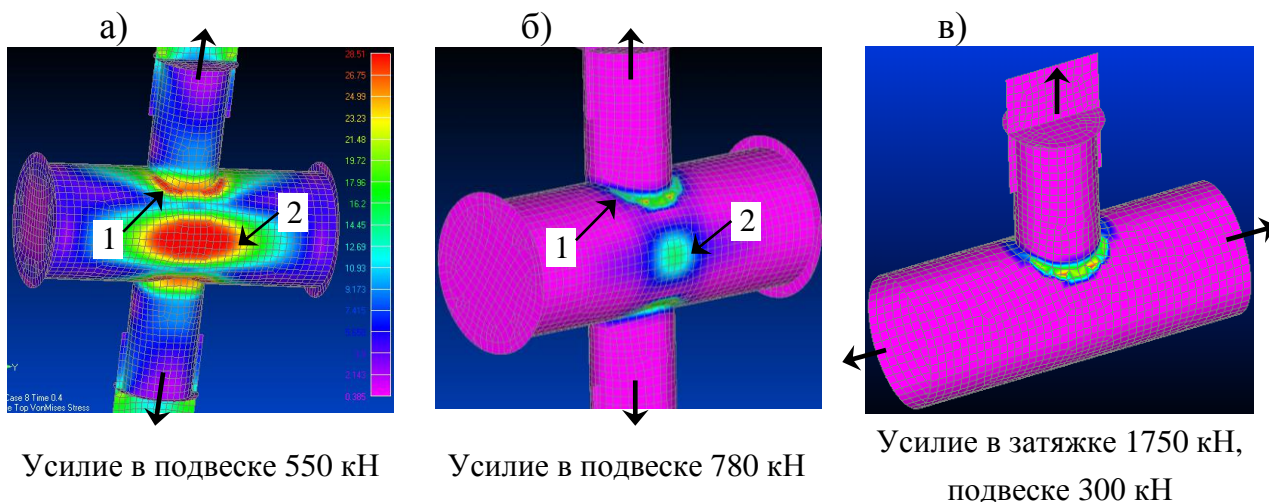
На основании численного анализа крестообразного стыка установлено, что при увеличении нагрузки вокруг сварного шва со стороны затяжки формируется характерная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений (рисунок 7а).



1 – экспериментальные данные; 2 – численные данные

**Рисунок 6 – Общий вид стенда для испытаний стыка затяжки с подвеской (а) и диаграмма деформирования стыка (б)**

Эквивалентные напряжения достигают значения предела текучести при нагрузке 550 кН сначала в точке перехода от стыкового шва к угловому со стороны поясной трубы (рисунок 7а, зона 1). При дальнейшем увеличении нагрузки пластические деформации развиваются во всем поперечном сечении трубы (рисунок 7б, зона 1). Возрастают эквивалентные напряжения и в зоне 2. В результате при нагрузке 780 кН кривизна поверхности стенки затяжки преобразуется из положительной в отрицательную (рисунок 7б, зона 2).



**Рисунок 7 – Изополя распределения эквивалентных напряжений в крестообразном стыке труб (а) и пластических деформаций в крестообразном (б) и Т-образном стыках труб (в)**

По построенной на основании расчета диаграмме деформирования можно сделать вывод об упругой работе стыка до нагрузки 550 кН (рисунок 6б, кривая 2), что на 21% меньше экспериментального значения. В целом результаты моделирования подтверждают, что разрушение образца происходит в кольце-

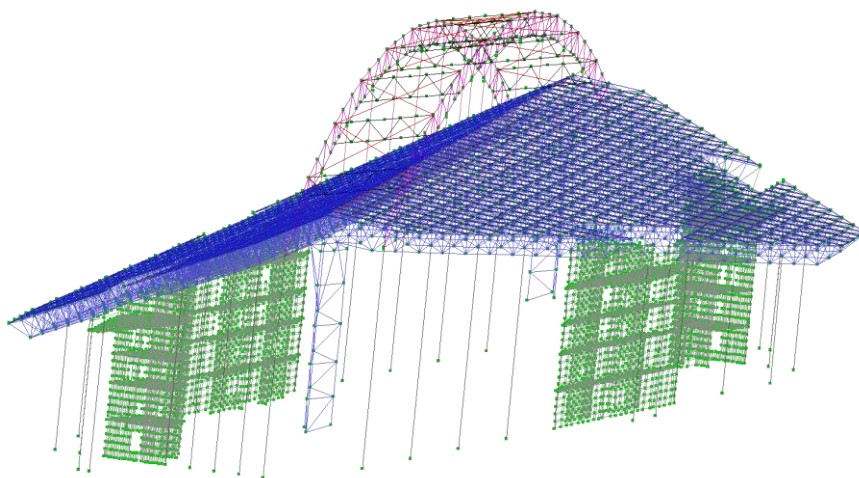
вой зоне стыка со стороны затяжки, где эквивалентные напряжения достигают своего максимального значения.

Для уточнения реальной работы Т-образного стыка труб в конструкции покрытия и подтверждения его эксплуатационной надежности было произведено его моделирование в упругопластической стадии работы при двусосном растяжении на расчетные нагрузки. На основании численного анализа установлено, что при увеличении нагрузки вокруг сварного шва со стороны затяжки также формируется характерная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений. Эквивалентные напряжения достигают значения предела текучести в точке перехода углового сварного шва к стыковому при усилии в затяжке 1750 кН и 300 кН при усилии в подвеске, что свидетельствует – при проектных значениях нагрузок узел работает упруго.

Пластические деформации в Т-образном стыке труб появляются только в кольцевой зоне вокруг сварного шва со стороны поясной трубы. В отличие от одноосного растяжения, по оси затяжки эквивалентные напряжения в стенке не достигают критических значений. Стенка работает упруго, и сплющивания трубы не происходит, что подтверждается изополями распределения пластических деформаций (рисунок 7в).

**В третьей главе** выполнены численные исследования НДС покрытия с учетом податливости узловых соединений структурной плиты и с учетом включения в работу покрытия прогонов и профилированного настила.

При разработке конечно-элементной модели (КЭМ) влияние податливости узловых соединений учитывалось введением по концам стержней соответствующих вставок, геометрическая жесткость на растяжение (сжатие) которых получалась путем умножения длины узловых элементов на параметр деформирования узлового соединения  $C$ , вычисленный по формуле 1 (рисунок 8).



**Рисунок 8 – Конечно-элементная модель покрытия**

Численными исследованиями КЭМ (рисунок 8) комбинированного покрытия с действительными жесткостными характеристиками узловых соедине-

ний структурной плиты и с учетом включения в работу покрытия прогонов и профилированного настила установлено, что в элементах структурной плиты возникает перераспределение внутренних усилий. Прогоны включаются в работу покрытия, разгружая верхний пояс структурной плиты. Увеличение прогиба структурной плиты приводит к уменьшению продольных усилий в элементах плиты и, как следствие, к возрастанию продольных усилий в элементах арок [9, 12, 13].

Увеличение величины зазора в узловых соединениях структурной конструкции также приводит к изменению НДС элементов покрытия: прогибы структурной плиты увеличиваются, а продольные усилия в ее элементах уменьшаются, что также приводит к увеличению продольных усилий в вертикальных арках покрытия. Расчетом установлено, что оптимальная величина зазора в узловых соединениях структурной плиты, при котором расход металла на  $1 \text{ м}^2$  покрытия будет наименьшим, составляет  $0,1 - 1,0 \text{ мм}$ . Однако величина зазора менее  $1 \text{ мм}$  требует высокой точности изготовления и монтажа конструкций. Поэтому в узловых соединениях комбинированной структурной конструкции принята величина зазора в  $1 \text{ мм}$ .

**В четвертой главе** приведена методика и представлены результаты натурных испытаний большепролетного комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса «Виктория» в г. Бресте.

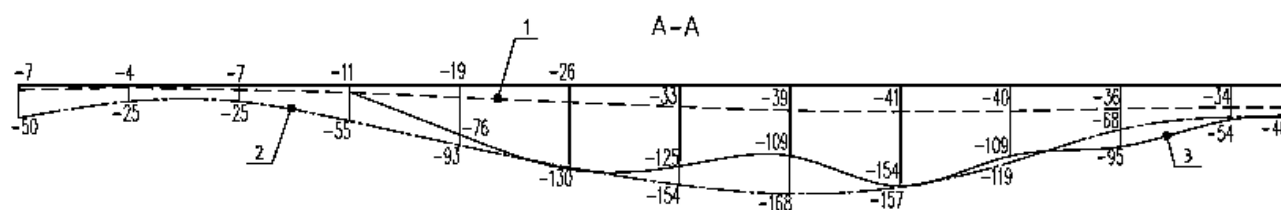
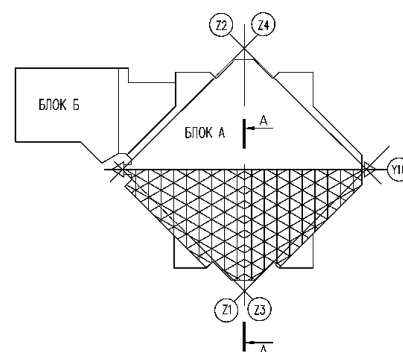
Конструктивное решение разработанного покрытия обладает существенной новизной. Наиболее значимый аспект новизны – это включение в работу затяжек арок структурной плиты покрытия и наличие в подвесках арок специально разработанных фаркопов с регулируемым натяжением, позволяющим включаться в совместную работу всем конструктивным элементам покрытия. Другой аспект новизны – это принятая для расчета покрытия КЭМ, наиболее полно учитывающая закономерности работы натурной конструкции: действительные жесткостные характеристики узловых соединений структурной плиты и включение в работу покрытия прогонов и профилированного настила.

Учитывая перечисленные выше факторы, отсутствие опыта изготовления и монтажа подобных сооружений в нашей республике, было принято решение о необходимости проведения натурных испытаний покрытия.

Для проведения натурных испытаний автором была разработана «Программа проведения испытаний металлических конструкций покрытия «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г.Бресте» и проект производства работ. Значение испытательной нагрузки назначалось по нормативным значениям постоянной и временной нагрузок, действующих на покрытие, т.е. состояло из собственного веса кровли и нормативного значения веса снегового покрова для снегового района 1Б.

Испытательная нагрузка создавалась при помощи бетонных фундаментных блоков и пакетов кровельного утеплителя, уложенных на дощатый настил. Испытания проводились в период с 12 по 18 июля 2005 г. [1, 5, 6, 7].

Натурные испытания подтвердили высокую несущую способность нового комбинированного большепролетного покрытия (рисунок 9). Экспериментально доказана целесообразность принятого конструктивного решения покрытия. Максимальный прогиб затяжек арок составляет 22 мм, структурной плиты покрытия – 174 мм, что не превышает предельно допустимый, составляющий 269 мм.



1 – перемещения, вычисленные без учета податливости узловых элементов структурной плиты; 2 – с учетом податливости и включением в работу покрытия прогонов и профнастила; 3 – экспериментальные данные

**Рисунок 9 – Эпюры вертикальных перемещений верхних узлов структурной плиты**

Рассчитанный по методу оценки надёжности первого порядка (FORM-метод) коэффициент вариации  $V_\delta$  подтвердил правильность разработанной КЭМ, учитывающей действительную работу узловых соединений структурной плиты на пространственных узловых фасонках и включение в работу покрытия прогонов и профилированного настила. Напряженно-деформированное состояние, определенное по данной КЭМ, соответствует действительной работе комбинированного покрытия.

Отклонения при измерении усилий и перемещений от расчетных объясняются неравномерностью включения стержневых элементов структурной плиты в работу, неравномерного нагрева покрытия из-за своей конструктивной формы и ориентации в пространстве. При осмотре конструкции покрытия в ходе испытаний и после снятия испытательной нагрузки каких-либо повреждений, искривлений и потери устойчивости элементов, а также разрушений узлов не обнаружено, все элементы покрытия работают упруго.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Впервые разработана и внедрена новая конструкция комбинированного большепролетного покрытия из металлических арок и структурной плиты, представляющая собой двускатную складку с уклоном в  $15^\circ$ , включающуюся в работу двух несущих двухшарнирных арок и воспринимающая совместно с затяжкой их распор. Применение разработанного конструктивного решения позволяет: применить затяжку арок в качестве опорной конструкции структурной плиты и тем самым уменьшить ее пролет в поперечном направлении в 2,3 раза; увеличить жесткость затяжек арок на растяжение в 2 раза и, как следствие, уменьшить продольные усилия в элементах несущих арок на 10%; применить фаркопфы в подвесках арок и контролировать усилия и перемещения конструкции покрытия; существенно уменьшить внутренний отапливаемый объем здания без уменьшения полезного объема [1, 2, 5, 6, 7].

2. Разработана модель работы узлового соединения структурной конструкции на пространственных листовых фасонках и проведены экспериментально-теоретические исследования по определению его жесткости. Применение полученных жесткостных характеристик в статическом расчете позволило разработать КЭ-модель большепролетного комбинированного покрытия, которая адекватно отражает действительный характер работы конструкции [1, 4, 6, 7, 8].

3. Для выяснения резерва несущей способности арок проведены экспериментально-теоретические исследования крестообразных и Т-образных узлов арок из полых труб в упругопластической стадии их работы. Анализ полученного напряженно-деформированного состояния позволяет с высокой точностью определить наиболее опасную зону концентрации напряжений в стыке данных соединений, которые определяют несущую способность узлов. Достигнута высокая сходимость с результатами эксперимента, погрешность определения значения разрушающей нагрузки составляет 21% [5, 7].

4. Разработана методика натурных испытаний большепролетных покрытий. В соответствии с методикой проведены испытания металлических конструкций комбинированного покрытия «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г. Бресте». Загружение покрытия полной нормативной нагрузкой, непрерывные измерения усилий и деформаций позволили установить его действительное напряженно-деформированное состояние и подтвердить высокую надежность и эксплуатационную пригодность здания [1, 5, 6, 7].

5. Проведенные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия из металличе-

ских арок и структурной плиты подтвердили правомерность принятых конструктивных решений и соответствие расчетной схемы действительной работе конструкции. Доказана совместность работы большепролетных арок и структурной плиты. Подтверждено, что податливость узловых соединений структурной плиты приводит к повышению прогибов покрытия и перераспределению внутренних усилий в системе. Экспериментально получены фактические данные о напряженно-деформированном состоянии натурной конструкции. При этом расхождение численных и экспериментальных результатов по усилиям в элементах арок составляет 11...30%, в элементах структурной плиты – 18...40%, по максимальным прогибам – 6,3%. Целесообразность использования разработанной и внедренной конструкции большепролетного комбинированного покрытия подтверждается опытом ее 6-летней эксплуатации в г. Бресте [1, 5, 6, 7].

### **Внедрение результатов исследований**

Результаты исследований внедрены при проектировании, изготовлении и монтаже структурного покрытия из труб блока «А» «Универсального спортивного комплекса для игровых видов спорта в г. Бресте». Разработанная автором методика проведения натуральных испытаний использовалась также при возведении следующих большепролетных комбинированных покрытий: «Ледовая арена на 800 мест в г. Пружаны», «Летний амфитеатр в г. Витебске», структурная оболочка покрытия плавательного бассейна и аквапарка в г. Пружаны и навеса над ледовой площадкой в г. Гомеле [1, 3, 6, 7, 8].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в научно-технических журналах

1. Драган, В.И. Экспериментальное исследование несущей способности большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Строительная наука и техника. – Минск, 2005. – № 2. – С. 9–14.
2. Драган, В.И. Конструкции арок комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Вестник БрГТУ. – Брест, 2006. – № 1(37) : Строительство и архитектура. – С. 87–91.
3. Драган, В.И. Конструктивные решения и основные результаты расчетов большепролетного металлического покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске / В.И. Драган, А.Б. Шурин, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, Л.Г. Головкин, В.А. Лебедь, В.В. Люстибер, А.В. Мигель, Н.Н. Шалобыта // Строительная наука и техника. – Минск, 2007. – № 3(12). – С. 18–29.
4. Драган, В.И. Влияние податливости узловых соединений комбинированного структурного покрытия комплекса «Виктория» на ее напряженно-деформированное состояние / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Вестник БрГТУ. – Брест, 2008. – № 1(49) : Строительство и архитектура. – С. 86–89.
5. Драган, В.И. Работа Т-образных и крестообразных узловых соединений из круглых труб в упругопластической стадии / В.И. Драган, А.Б. Шурин, И.В. Зинкевич // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61) : Строительство и архитектура. – С. 50–54.
6. Драган, В.И. Результаты обследования и натурных испытаний металлической структурной оболочки покрытия бассейна и аквапарка в г. Пружаны / В.И. Драган, А.В. Мухин, А.Б. Шурин, В.В. Люстибер // Вестник БрГТУ. – Брест, 2010. – № 1(61) : Строительство и архитектура. – С. 54–57.

### Статьи в периодических сборниках научных трудов

7. Драган, В.И. Исследование, расчет и испытание большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, Л.Г. Головкин // Архитектура и строительство – 2005 : Сб. трудов I международного научно-практич. семинара, Брест, 22–23 сентября 2005 г. / БрГТУ – Брест, 2005. – С. 43–53.
8. Драган, В.И. Действительное напряженно-деформированное состояние металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. науч. тр. междунар. научн.-метод. межвузовского семинара, Могилев, 16–18 ноября 2005 г. – Могилев, 2005. – С. 137–146.

9. Драган, В.И. Исследование действительной работы большепролетного комбинированного структурного покрытия с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров : сб. науч. ст., Гродно, 27–28 мая 2010 г. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : Т.М. Пецольт [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 68–73.

10. Драган, В.И. Новая металлическая структурная конструкция системы «БрГТУ». Опыт проектирования, исследований и строительства в Республике Беларусь / В.И. Драган, Н.Н. Шалобыта, А.В. Мухин, А.Б. Шурин, И.В. Зинкевич // Промышленное и гражданское строительство в современных условиях : сб. науч. тр. Междунар. научн.-техн. конференции, Москва, 19–21 апреля 2011 г. / МГСУ. – Москва, 2011. – С. 34–37.

### **Материалы конференций**

11. Драган, В.И. Обеспечение надежности комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. ст. XIV междунар. научно-практ. межвузовского семинара, Минск, 22–23 июня 2006 г. : в 2 т. / БНТУ. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 138–146.

12. Шурин, А.Б. Исследование действительной работы большепролетного комбинированного структурного покрытия с учетом податливости узловых соединений / А.Б. Шурин, Н.Н. Шалобыта // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym : praca zbiorowa pod redakcja Tadeusza Bobki i Jaroslava Rajczyka, Czestochowa, 2010 г. / Politechnika Czestochowska. – Czestochowa, 2010. – С. 290–296.

13. Шурин, А.Б. Методика расчета большепролетных комбинированных структурных покрытий с податливыми узловыми соединениями / А.Б. Шурин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. ст. XVI междунар. научно-практ. семинара, Брест, 28–30 мая 2009 г. / БрГТУ. – Брест, 2009. – С. 140–145.

### **Патенты**

14. Пространственный каркас : пат. 4506U Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04B 1/58 / В.И. Драган, В.В. Люстибер, В.Н. Пчелин, А.Б. Шурин ; заявитель УО «Брестский гос. тех. ун-т.» – № и 20070912 ; заявл. 21.12.2007 ; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3(62). – С. 217.

15. Комбинированное пространственное структурное покрытие : пат. 4602U Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04B 1/58 / В.И. Драган, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, Л.Г. Головки, В.А. Лебедь, А.Б. Шурин, В.В. Люстибер,

А.В. Мигель, В.Н. Пчелин ; заявитель УО «Брестский гос. тех. ун-т.» – № u 20080016 ; заявл. 14.01.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 188.

16. Комбинированное пространственное структурное покрытие : пат. 80471U1RU Рос. Федерация, Е 04В 1/58 / В.И. Драган, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, Л.Г. Головки, В.А. Лебедь, А.Б. Шулин, В.В. Люстибер, А.В. Мигель, В.Н. Пчелин ; заявитель УО «Брестский гос. тех. ун-т.» – № 2008116753/22 ; заявл. 28.04.2008 ; опубл. 10.02.2009 // Изобретения. Полезные модели : официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2009. – № 4.

## РЭЗІЮМЭ

Шурын Андрэй Браніслававіч

### **Напружана-дэфармаваны стан вялікапралетнага камбінаванага пакрыцця з металічных арак і структурнай пліты**

**Ключавыя словы:** металічныя аркі, структурная пліта, прагоны, падатлівасць, напружана-дэфармаваны стан, натурныя выпрабаванні.

**Мэта працы** – распрацоўка канструкцыі і даследаванне напружана-дэфармаванага стану вялікапралетнага камбінаванага пакрыцця з металічных арак і структурнай пліты.

**Метады даследвання.** Распрацоўка канструктыўнага рашэння і аналіз напружана-дэфармаванага стану вялікапралетнага камбінаванага пакрыцця. Эксперыментальнае вызначэнне прыведзенага модуля дэфармавання вузлавых элементаў структурнай канструкцыі. Эксперыментальныя і лікавыя даследаванні вузлоў арак. Натурныя выпрабаванні пакрыцця з металічных арак і структурнай пліты.

**Атрыманыя вынікі і навізна.** Упершыню распрацавана і ўкаранёна канструктыўнае рашэнне вялікапралетнага камбінаванага пакрыцця з металічных арак і структурнай пліты. Праведзены лікавыя і эксперыментальныя даследаванні напружана-дэфармаванага стану крыжападобных і Т-вобразных стыкаў труб у ўпругапластычнай стадыі працы матэрыялу вузлоў. Распрацавана разліковая мадэль працы вузлавога злучэння структурнай канструкцыі на прасторавых ліставых фасонках. Прапанавана метадыка разліку пакрыцця з улікам сапраўднай працы вузлавых злучэнняў структурнай канструкцыі і з уключэннем у працу пакрыцця прагонаў і прафіляванага насцілу. Прыведзены вынікі натуральных выпрабаванняў вялікапралетнага камбінаванага пакрыцця палаца для гульнявых відаў спорту «Вікторыя» ў г. Брэсце.

**Рэкамендацыі па выкарыстанню.** Распрацаванае вялікапралетнае камбінаванае пакрыццё з металічных арак і структурнай пліты, метадыку яго разліку і вынікі натуральных выпрабаванняў рэкамендуецца выкарыстоўваць у праектных і навукова-даследчых арганізацыях пры праектаванні або тэхнічнай экспертызе вялікапралетных камбінаваных структурных канструкцый, а таксама ў навучальным працэсе ўстаноў адукацыі для падрыхтоўкі спецыялістаў будаўнічых спецыяльнасцяў.

**Вобласць прымянення.** Вялікапралетныя пакрыцця унікальных аб'ектаў, пакрыцця прамысловых і грамадскіх будынкаў, у праектна-канструктарскіх арганізацыях і будаўнічых ВНУ.

## РЕЗЮМЕ

Шурин Андрей Брониславович

### **Напряженно-деформированное состояние большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты**

**Ключевые слова:** металлические арки, структурная плита, прогоны, податливость, напряженно-деформированное состояние, натурные испытания.

**Цель работы** – разработка конструкции и исследование напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты.

**Методы исследования.** Разработка конструктивного решения и анализ напряженно-деформированного состояния большепролетного комбинированного покрытия. Экспериментальное определение приведенного модуля деформирования узловых элементов структурной конструкции. Экспериментальные и численные исследования узлов арок. Натурные испытания покрытия из металлических арок и структурной плиты.

**Полученные результаты и новизна.** Впервые разработано и внедрено конструктивное решение большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты. Проведены численные и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния крестообразных и Т-образных стыков труб в упругопластической стадии работы материала узлов. Разработана расчетная модель работы узлового соединения структурной конструкции на пространственных листовых фасонках. Предложена методика расчета покрытия с учетом действительной работы узловых соединений структурной конструкции и с включением в работу покрытия прогонов и профилированного настила. Приведены результаты натурных испытаний большепролетного комбинированного покрытия дворца для игровых видов спорта «Виктория» в г. Бресте.

**Рекомендации по использованию.** Разработанное большепролетное комбинированное покрытие из металлических арок и структурной плиты, методику его расчета и результаты натурных испытаний рекомендуется использовать в проектных и научно-исследовательских организациях при проектировании или технической экспертизе большепролетных комбинированных структурных конструкций, а также в учебном процессе учреждений образования для подготовки специалистов строительных специальностей.

**Область применения.** Большепролетные покрытия уникальных объектов, покрытия промышленных и общественных зданий, в проектно-конструкторских организациях и строительных вузах.

## RESUME

Andrei Shuryin

### **A deflected mode of large-span roof combined from metal arches and a structural slab**

**Key words:** metal arches, structural slabs, purlins, compliance, deflected mode, full-scale test.

**The aim of the work** is working out of a construction and a deflected mode researching of a large-span combined metal arches covering and a structural slab.

**Research methods.** Working out of a constructive decision and a deflected mode analysis of a large-span combined roof. Experimental definition of a reduced modulus of deformation of nodal elements of structural slab. Experimental and numerical arches joints researches. Metal arches and structural slabs full-scale tests of roof.

**The obtained results and innovation.** A structure of a large-span combined metal arches roof and a structural slab was worked out and introduced for the first time. Numerical and experimental researches of a deflected mode of cross-formed and T-formed joint tubes in elastic-plastic stage were done. Computation model of a focal joint resistance of a structural construction was worked out. The method of roof calculations including real work of purlins roof and a profile roof were suggested. The result of full-scale tests of a large-span combined covering at the Palace «Victoria» in Brest were published.

**Usage recommendations.** The worked out large-span combined metal arches roof and a structural slab, the methods of its computation and location tests results are recommended to be used in design and scientific-research organizations while designing or technical expertise of large-span combined structural constructions, as well as in a teaching process at Establishments for training specialists in building specialists.

**The field of application:** large-spans of unique objects, roofs in industrial and public buildings, at design organizations and at Building Higher Educational Establishments.



**ШУРИН Андрей Брониславович**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ  
ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АРОК И СТРУКТУРНОЙ ПЛИТЫ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 05.12.2011 г. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Бумага «Снегурочка».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 1186.

---

Лицензия № 02330/0549435 от 08.04.2009 г.  
Отпечатано на ризографе Учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.