

В.И. ДРАГАН

Брестский государственный технический университет, Брест

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

В работе представлены материалы широкого применения новой металлической структурной конструкции системы «БрГТУ» в качестве покрытий общественных, культурно-развлекательных и спортивных сооружений. Первое место среди возведенных сооружений с использованием системы «БрГТУ» в виду его уникальности занимает большепролетное покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске. Структурная оболочка имеет пролет 120,014 м, ширина переменная и изменяется от 24,0 м на опорах до 71,0 м в средней части покрытия. Описаны конструкции узлов и стержней, которые защищены 13 патентами на изобретение. Приведены особенности расчета напряженно-деформированного состояния структурной системы. Показано, что расчетные конечно-элементные модели достоверно описывают действительную работу натуральных конструкций. Разработана методика расчета несущей способности узлов и стержней структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных типов пространственных конструкций для уникальных большепролетных сооружений являются структурные конструкции, в разработке которых Беларусь сегодня имеет несомненный приоритет. В Брестском государственном техническом университете создана новая металлическая структурная конструкция, получившая название система «БрГТУ». Эта металлическая конструкция обладает архитектурной выразительностью и привлекательностью, позволяет перекрывать сооружения пролетом более 150 м с различными очертаниями в плане. С увеличением пролета эффективность применения структурных покрытий возрастает. Они пригодны для создания различных форм: плоские покрытия, оболочки, купола. К преимуществам архитектурного плана относятся сравнительно малая строительная высота, достигающая $1/20 \div 1/50$ перекрываемого пролета. Покрытие обладает высокой несущей способностью и пригодно для восприятия нагрузок свыше 300 кг/м^2 при пролетах до 100 м.

Структуру «БрГТУ» отличает простота и быстрота сборки конструкции как непосредственно на проектной отметке, так и вблизи строящегося сооружения.

Нельзя не отметить и возможную разборность конструкции с последующей ее повторной сборкой на новом месте. К преимуществам этой конструкции относятся высокая индустриальность изготовления основных конструктивных элементов, полная их заводская готовность, однотипность изделий и возможность их широкой унификации не только для отдельных сооружений, но и для зданий с различными пролетами, нагрузками и схемами опирания.

Конструктивные и строительные преимущества структуры системы «БрГТУ» свидетельствуют об экономической целесообразности их применения: сокращению расхода стали до 20%, уменьшению трудозатрат на строительной площадке до 25%, сокращению сроков возведения в 1,5 раза, снижению стоимости до 10% [1].

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

Структурная металлическая конструкция системы «БрГТУ» достаточно быстро получила признание архитекторов, проектировщиков и в настоящее время имеет несомненный приоритет по отношению к другим пространственным конструкциям. Об этом свидетельствует не только факт широкого применения данной конструкции по всей республике в качестве покрытий общественных зданий, культурно-развлекательных и спортивных сооружений, но и то, что данная конструкция была использована при возведении уникальных сооружений, таких как, например, покрытие летнего амфитеатра в г. Витебске.

Впервые структурное покрытие системы «БрГТУ» было применено при строительстве театра эстрады в парке культуры и отдыха в г. Бресте (рис. 1а).

Структурное покрытие представляет собой пространственную стержневую плиту с ортогональной сеткой поясов с размерами ячеек 1,5x1,5 м. Конструкция имеет размеры в плане 18x22,5 м, высота структурной плиты по осям поясов 1,06 м. Все стержни пространственной конструкции имеют одинаковую номинальную длину и состоят из бесшовных круглых труб двух типоразмеров: поясов и раскосов - $\varnothing 76 \times 4$ мм, опорных раскосов - $\varnothing 102 \times 4$ мм. Все узлы выполнены из поллой сферы с наружным радиусом 160 мм и толщиной стенки $t = 10$ мм. Структурная плита опирается на четыре колонны двух типов: сквозной четырехветвевой из труб сечением $\varnothing 102 \times 6$ мм и сплошной из труб $\varnothing 273 \times 7$ мм и имеет консольный вылет над сценой на 9,0 м.

Более сложное конструктивное решение применено в конструкции покрытия ледовой арены на 800 мест в г. Пружаны. Такая же конструкция применена на ледовых аренах в г. Кобрине Брестской области, в г. Сморгони Гродненской области, в городах Новолукомле, Лепеле, Глубокое Витебской области (рис. 1б).

Покрытие представляет собой металлическую пространственную перекрестно - стержневую конструкцию, выполненную в виде предварительно - напряженной прямоугольной плиты. Регулярная пространственная конструк-

ция образована двумя прямоугольными плитами, соединенными в коньке и создающими два ската с уклоном 8° . Структурная плита опирается по контуру крайними узлами нижнего пояса на сталежелезобетонные колонны с шагом 6 м и образующие в плане прямоугольник с размерами сторон 39х63 м. Ячейки поясов плиты имеют размер 3х3 м, высота плиты в осях - 3 м.

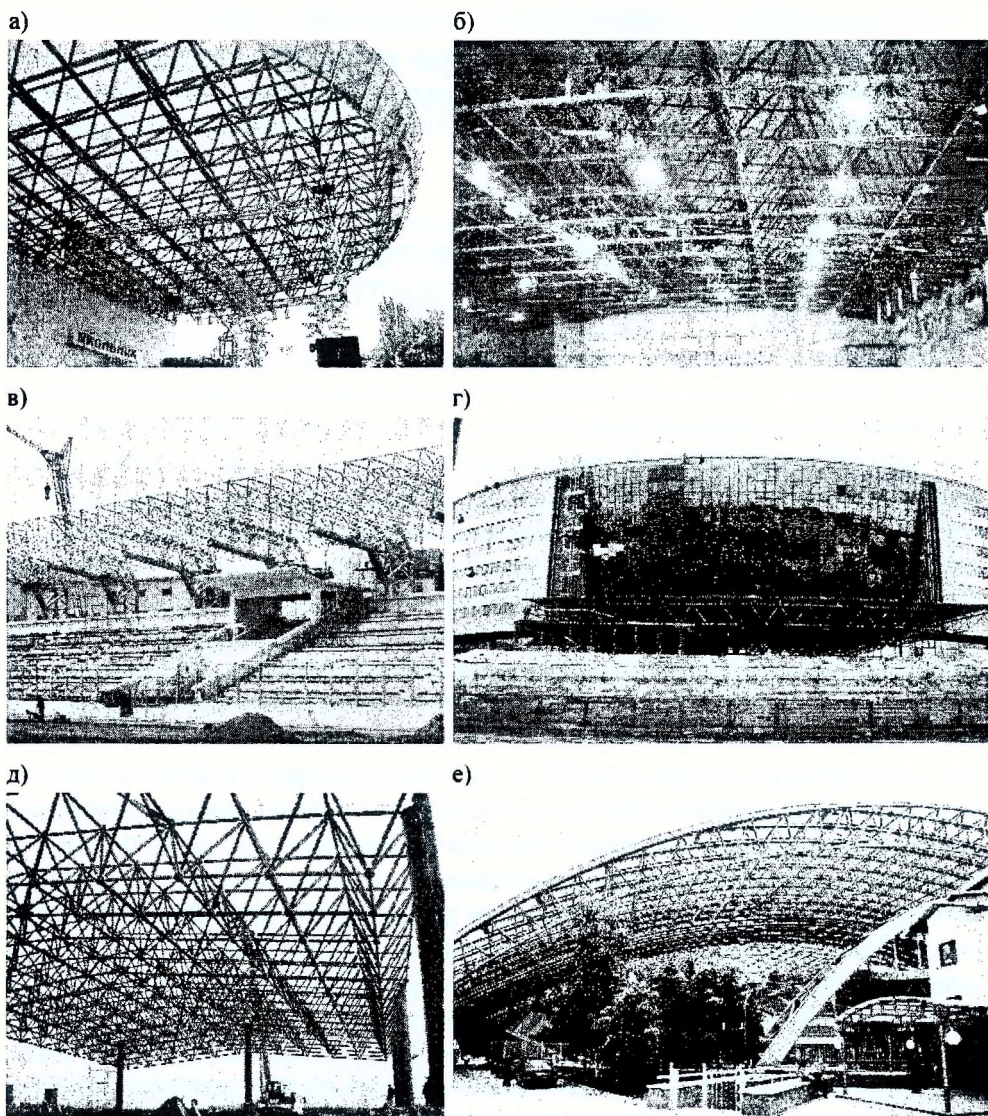


Рис. 1. Применение металлической структурной конструкции системы «БрГТУ»

В связи с необходимостью восприятия реакции распора, в уровне опорных узлов нижнего пояса плиты устанавливаются затяжки с шагом 3 м в направлении меньшего пролета.

Все затяжки выполнены из бесшовных горячекатаных труб $\varnothing 127$ мм и толщиной стенки 8 мм. Затяжки включают в работу предварительным натяжением 50 кН. Для сборки покрытия ледовой арены применены две марки узлов системы «БрГТУ»: с толщиной стенки полой сферы 10 мм и наружным диаметром 160 мм и с толщиной стенки 16 мм и наружным диаметром 212 мм. Стержни структурной плиты изготовлены из круглых труб $\varnothing 127 \times 8$ мм, $\varnothing 89 \times 5$ мм, $\varnothing 83 \times 4$ мм.

Интересное конструктивное решение применения структуры «БрГТУ» применено в навесе над западной трибуной стадиона «Спартак» в г. Могилеве. Навес представляет собой структурную плиту размером в плане 131x14 м и высотой 1,41 м, заземленную по длинной стороне на трехветвевых пилонах, установленных с шагом 12 м (рис. 1в).

Все стержни структурной плиты состоят из бесшовных горячекатаных труб $\varnothing 60 \times 4$, $\varnothing 89 \times 5$, $\varnothing 102 \times 8$. Применено два типа узлов диаметром 160 мм и толщиной 10 мм. и диаметром 212 мм и толщиной стенки 16 мм. Опорные пилоны состоят из двух условных конструктивных фрагментов: трехветвевой решетчатой колонны и трехветвевое решетчатого ригеля. Решеткой ригеля являются раскосы и стержни пояса структурной плиты. Такая конструкция сопряжения обеспечивает совместную работу структурной плиты и ригелей и заземляет плиту на опорных пилонах. Сжатая ветвь пилон запроектована из двух труб $\varnothing 325 \times 14$ мм соединенных листовыми накладками, растянутые ветви выполнены из труб $\varnothing 325 \times 14$ мм, решетка состоит из труб $\varnothing 121 \times 8$, $\varnothing 219 \times 8$ мм.

Подобную статическую схему имеет структурная плита системе «БрГТУ» над главным входом многопрофильного культурно - спортивного комплекса «Минск - Арена». Структурная плита имеет криволинейное очертание в плане с радиусом примыкания к фасаду здания $R = 64,80$ м. С размерами по ширине 17,71 м и длине дуги наружной грани 46,34 м. Криволинейная плита опирается на четыре колонны каркаса здания, четыре колонны в пролете плиты и имеет консоль длиной 6,3 м. Высота структурной плиты 1700 мм, длина ячеек верхнего и нижнего пояса 2530 мм, ширина переменная (2109÷2689 мм). Все стержни запроектованы из бесшовных горячекатаных труб $\varnothing 89 \times 5$ мм, $\varnothing 114 \times 8$ мм, $\varnothing 114 \times 12$ мм, все узлы запроектованы $\varnothing 212$ мм и толщиной стенки 16 мм (рис. 1г).

Структурная конструкция системы «БрГТУ» является весьма удачной конструкцией для перекрытия спортивных залов, больших пролетов в общественных зданиях. Плоская плита покрытия применена в покрытии универсального спортивного зала многопрофильного спортивного комплекса «Минск - Арена». Структурная конструкция имеет размеры в плане 24x42 м и высоту 2,62 м, опирается по контуру на стены крайними узлами с шагом 3,0 м.

Структурными плитами системы «БрГТУ» перекрыты залы борьбы и игровой зал в здании ДЮСШ №2 г. Калинковичи Гомельской области.

В покрытии здания кафе возле г. Береза на трассе «Брест-Минск» применена структурная конструкция с размерами в плане 18х24 м и высотой 15 м (рис. 1д).

Первое место среди возведенных сооружений с использованием системы «БрГТУ» в виду его уникальности, бесспорно занимает большепролетное покрытие Летнего амфитеатра, запроектированное в металлических конструкциях заводского изготовления. Комбинированная стержневая система состоит из структурной цилиндрической оболочки, усеченной двумя наклонными плоскостями, и подкрепляющих ее девяти вертикальных арок (пять нижних и четыре верхних), двух наклонных арок. Принятая конструкция одновременно конструктивно логична и интересна (рис. 1е).

Пролет оболочки составляет 120,014 м, ширина покрытия переменная и изменяется от 24,0 м на опорах до 71,0 м в средней части покрытия. Высота подъема осей вертикальных арок над фундаментами составляет 18,5 м, высота покрытия по осям арок 3,32 м [2].

Основными конструктивными экспериментами, обеспечивающими передачу на фундаменты нагрузок и воздействий являются пять нижних и четыре верхних вертикальных арок, между которыми расположена цилиндрическая структурная оболочка. Шаг вертикальных арок составляет 3,0 м, причем верхние вертикальные арки смещены относительно нижних на 1,5 м. Вертикальные арки выполнены в виде пучков, состоящих из трех криволинейных труб $\varnothing 273 \times 10$ мм, объединенных между собой в местах примыкания узлов структуры планками и диафрагмами. Такое решение обеспечивает совместную работу ветвей и передачу усилий с узлов структуры на вертикальные арки.

Вертикальные арки опираются на монолитные железобетонные фундаменты через консоли, которые представляют собой сталебетонные элементы, жестко защемленные в теле фундамента на глубину 1,5 м. Узел сопряжения вертикальных арок и консолей выполнен в виде фланцевого соединения на высокопрочных болтах. Принятая конструкция опирания реализует безшарнирную статическую схему, как для арок, так и для пространственной оболочки в целом. Жесткое сопряжение оболочки с фундаментами обеспечивает требуемую жесткость и пространственную неизменяемость покрытия, высокую надежность и большие запасы несущей способности, а также позволило применить простую конструкцию опорных узлов.

Наклонные арки являются обрамляющими элементами структурной оболочки и представляют собой плоские серповидные фермы с решеткой их круглых труб.

В связи с существенной асимметрией поверхности оболочки относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести вертикальных арок и фундаментов со стороны большей консоли установлены две сквозные трехветвевые колонны. Конструктивное решение сопряжения оголовка колонны со структурной оболочкой разработано таким, чтобы на колонну передавалось только

вертикальное усилие. Опорный узел структурной оболочки может свободно перемещаться в горизонтальном направлении благодаря двум фторопластовым пластинам толщиной 10 мм, уложенными между опорной плитой узла структурной оболочки и оголовком колонны.

Главная роль для создания архитектурной привлекательности и конструктивной целесообразности сооружения отводится структурной оболочке системы «БрГТУ». Радиус нижней поясной сетки по центрам узлов $R = 106,98$ м, высота сечения оболочки 2,51 м, размер ячеек верхней поясной сетки 3,0х3,0 м. Структурная оболочка воспринимает внешние нагрузки по всей площади покрытия и передает опорные реакции на вертикальные и наклонные арки и колонны, обеспечивает совместную работу всех конструкций покрытия, выполняет функцию решетки пространственной арки.

2. КОНСТРУКЦИЯ СТЕРЖНЕЙ И УЗЛОВ СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

Система «БрГТУ» отличается от других систем конструктивными решениями узлов и стержней, обладает научной и технической новизной и защищена 13 патентами на изобретение [3].

Узел структуры состоит из полого шара с отверстиями, в которые устанавливаются высокопрочные болты для соединения стержней.

Полый шар собирают из двух полусфер, полученных путем горячего пресования из листового проката. В полусферах высверливаются отверстия необходимого диаметра под высокопрочные болты.

Внутренние и наружные шайбы имеют сферическую поверхность с радиусом равным внутреннему и наружному диаметру шара соответственно. В отверстия со стороны полости полусфер устанавливаются на сферических шайбах высокопрочные болты. На высокопрочные болты с наружной стороны устанавливается наружная сферическая шайба и две гайки: силовая гайка контргайка. Далее производят сварку полусфер стыковым швом с разделом кромок полуавтоматической или автоматической сваркой в среде углекислого газа.

Важная роль в данном узле отводится шайбам. Сферические поверхности внутренней и наружной шайбы, примыкающие к шаровой поверхности, имеют радиусы равные соответственно внутреннему и наружному радиусу шара. Данная конструкция шайб обеспечивает центрирование стержней на центр узла при закручивании силовой гайки, благодаря совмещению поверхностей контакта шайба - сфера.

Следует отдельно отметить, что выполнение в стенке полого шара отверстия с диаметром, превышающим диаметр болтов, обеспечивает возможность поворота болтов при сборке на угол α , что значительно упрощает сборку и позволяет снизить точность изготовления узла и стержня конструкции (рис. 2).

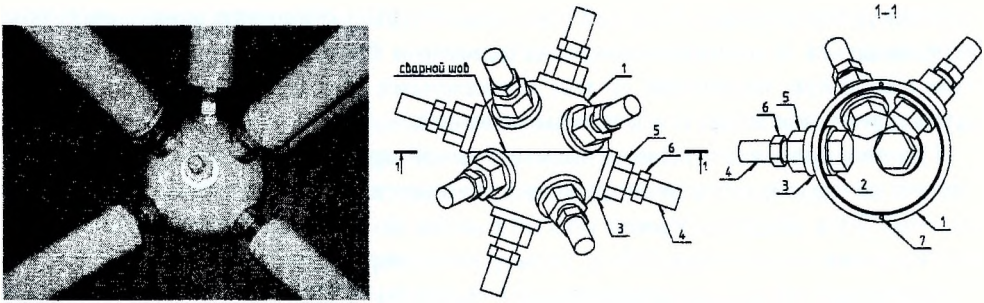


Рис. 2. Узловой элемент системы «БрГТУ»: 1 - полусфера, 2 - внутренняя шайба с выпуклой поверхностью, 3 - наружная шайба с вогнутой поверхностью, 4 - болт, 5 - силовая гайка, 6 - контргайка, 7 - центрирующий штифт

Диаметр шара, толщина стенки шара, диаметр, марка стали высокопрочных болтов и гаек, толщина и размеры сферических шайб назначаются исходя из величины усилий, возникающих в стержнях структуры.

Стержни структуры изготавливаются из круглых бесшовных труб. Для их соединения с болтами узлов в торцы труб устанавливаются и привариваются по контуру специальные круглые гайки с резьбовыми отверстиями.

Принятые конструктивные решения позволяют достаточно точно и однозначно выделить характер и направления силового потока в узле. Передача усилия со стержневого элемента на болт происходит через резьбовое соединение гайки стержня и болта. Контргайка служит только для стопорения стержневого элемента, а ее работой при передаче симметричного усилия пренебрегают. Передача усилия с болта на стенку узла зависит от знака усилия и происходит в следующей последовательности. Сжимающее усилие в стержне через резьбу передается на силовую гайку, далее на наружную шайбу и через нее на стенку шара. Усилие растяжения передается с головки болта на внутреннюю шайбу, а далее на стенку шара.

Важным конструктивным достоинством структурной системы «БрГТУ» является возможность регулировать зазор между гайками в узле, что позволяет компенсировать неточности изготовления деталей, включить в работу абсолютно все стержни конструкции и создать начальное полезное усилие в стержнях пространственной системы.

3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНОЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

Конструктивная особенность системы «БрГТУ», применение сферических толстостенных узлов позволяют допустить при расчете гипотезу о шарнирном соединении узлов и значительно упростить статическую схему. Была разработана конечноэлементная модель, которая позволяет учесть особенности действительной работы структурной конструкции. Стержни структурной

оболочки описываются пространственными стержневыми конечными элементами, в каждый узел конструкции вводятся только три связи (W, U, V), исключаяющие только линейное смещение узлов, а в стержнях возникают только продольные усилия. Сравнение численных расчетов с результатами натурных испытаний большеразмерных фрагментов, большепролетных покрытий Летнего амфитеатра в Бресте, Ледового дворца в Пружанах, Летнего амфитеатра в г. Витебске показало, что все стержни центрально растянуты или сжаты, расчетные и экспериментальные значения хорошо соответствуют друг другу в пределах не превышающих $5 \div 10\%$, незначительные изгибающие моменты в стержнях обусловлены случайными эксцентриситетами, связанными с разностенностью труб и местными погибами труб, возникшими при прокатке.

При расчетах устойчивости стержней структуры «БрГТУ» предлагается принимать в качестве расчетной длины длину между центрами узлов. Конструкция узла реализует очень близкое к шарнирному примыкание стержня. В момент потери устойчивости обнаружен поворот болта в отверстии полого шара, что дает возможность назначать свободную длину стержня, как расстояние между сечениями с нулевыми моментами исходя из классического его понимания.

Проведены исследования работы стержней на сжатие в составе натурной конструкции. Несущая способность сжатого стержня определялась по критерию достижения им в процессе нагружения точки нулевой отпорности, при котором сжимающая сила в элементе достигает максимума, называется критической, а последующее деформирование - закритическим и характеризуется уменьшением сжимающего усилия.

Построены экспериментальные кривые отпорности для стержней структуры с гибкостью $\lambda = 110$; $\lambda = 90$; $\lambda = 70$. Сравнение экспериментальных критических усилий в стержнях, с расчетными критическими усилиями полученными по методикам СНиП II-23-81* показало превышение экспериментальных значений над расчетными. Расчет сжатых стержней структурных конструкций системы «БрГТУ» по СНиП II-23-81* обеспечивает запас несущей способности в $1,2 \div 1,4$ раза.

Достижение в растянутом стержне предела текучести стали, приводит к перераспределению приращения растягивающего усилия на другие растянутые стержни. Конструкция продолжает воспринимать нагрузку.

Анализ конструктивного решения узла структурной конструкции системы «БрГТУ» позволил установить, что его несущая способность должна определяться исходя из несущей способности высокопрочных болтов и несущей способности толстостенной сферы. Высокопрочные болты расшивались по условию $N_{\max} \leq 0,5 R_{bun} \cdot A_{bn}$.

Было исследовано напряженно - деформированное состояние толстостенной сферы с отверстиями и подкрепляющими шайбами, нагруженной локальными нагрузками от усилий в стержнях структуры. Разработана конечно - элементная модель, проведено ее экспериментальное подтверждение на натурных

испытаниях узлов при одноосном и двухосном нагружении. Был выполнен численный анализ напряженно – деформированного состояния полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами при многоосном нагружении локальными нагрузками и установлены закономерности распределения напряжений и деформаций в зависимости от диаметра и толщины полого шара, размеров подкрепляющих шайб, величины локальных нагрузок. Установлено, что при любых соотношениях усилий в стержнях структуры исчерпание несущей способности узла происходит всегда в результате развития пластических деформаций стали в кольцевой зоне вокруг шайб, сопровождающихся выпучиванием или вдавливанием стенки шара при растяжении или сжатии соответственно. Появление пластических деформаций, изменяющих форму шара в других зонах, либо образование трещин в его стенке, не происходит.

Разработана достоверная методика определения несущей способности узлов структурной конструкции, основанная на сопоставлении максимального усилия, действующего на узел, с максимальным допускаемым усилием, назначенным на основании диаграммы деформирования («нагрузка - деформация») при одноосном растяжении или сжатии полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами. За допускающую нагрузку на узел принимаются значения $N = 0,6 N_{пред}$.

Разработан сортамент узлов с различными диаметрами и толщиной полых шаров, размерами подкрепляющих шайб и высокопрочными болтами, для восприятия усилий в стержнях структуры от 100 до 1000 кН. Предложенная конструкция узлов обеспечивает высокую надежность по сравнению с конструктивными решениями («Меро», «Мархи» и др.) за счет исключения одинаковых и конструктивных эксцентриситетов, включения в работу всех стержней, обеспечения требуемой точности сборки и проектного положения структурной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Драган В.И., Разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния сложных стальных и сталежелезобетонных конструкций при нестационарных силовых и не силовых воздействиях, В.И. Драган, Н.Н. Шалобыга, А.В. Мухин, В.В. Люстибер, Сборник научных трудов II международного научно - практического семинара по реализации задач ГПОФИ «Строительство и архитектура», Минск, 19-21 сентября 2007 г.: в 3 т., Минск, т. 1, с. 224-242.
- [2] Драган В.И., Конструктивные решения и основные результаты расчетов большепролетного металлического покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске, В.И. Драган, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, В.А. Лебедь, Н.Н. Шалобыга, Л.Г. Головкин, А.Б. Шурин, В.В. Люстибер, А.В. Мигель. Строительство и архитектура 2008, № 1(49), с. 94-102.
- [3] Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2489 Респ. Беларусь, Е04В 1/58, В.И. Драган, А.А. Левчук, Н.Н. Шалобыга, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский гос. ун-т. - № 20050458, заявл. 21.07.2005; опублик. 28.02.2006, афіцыйны бюл/ нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці 2006, № 1, с. 194.