

УДК 624.074.5

Большепролетные металлические структурные конструкции системы «БрГТУ»

Драган В.И., к.т.н., Морилова Н.Л.

Брестский государственный технический университет,
Республика Беларусь

Анотація. У статті описана нова металева структурна конструкція системи «БрГТУ» в якості покриття громадських, культурно-розважальних і спортивних споруд, зокрема унікальне великопрогонове покриття Літнього амфітеатру в м. Вітебську, структурна оболонка якого має прогін 120,014 м, змінну ширину від 24,0 м на опорах до 71,0 м в середній частині покриття. Приведені особливості розрахунку напружено-деформованого стану структурної системи. Показано, що розрахункові скінченно-елементні моделі достовірно описують дійсну роботу натурних конструкцій. Розроблена методика розрахунку несучої здатності вузлів і стержнів структури.

Аннотация. В статье описана новая металлическая структурная конструкция системы «БрГТУ», используемая в качестве покрытий общественных, культурно-развлекательных и спортивных сооружений, в частности уникальное большепролетное покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске, структурная оболочка которого имеет пролет 120,014 м, переменную ширину от 24,0 м на опорах до 71,0 м в средней части покрытия. Описаны конструкции узлов и стержней, приведены особенности расчета напряженно-деформированного состояния структурной системы. Показано, что расчетные конечноэлементные модели достоверно описывают действительную работу натурных конструкций. Разработана методика расчета несущей способности узлов и стержней структуры.

Abstract. The application of the new metal structural construction of the BSTU-type for wide-span roof structures of buildings for public, sport and recreational use is presented in the article. The most noticeable among the constructions with the BSTU-type roof structure is Summer Amphitheatre in Vitebsk, Belarus. The structural shell with the span length of 120,014 m and variable width from 24,0 m minimum is supported with bearings of up to 71,0 m wide placed in middle of the shell. Thirteen patents are issued on the construction's nodes and rods described in the article. The specifics of stress-strain analysis of the structure are also presented. It is proved that the finite element representation accurately describes the work of full-scale structures. A calculation method for bearing capacity of the nodes and rods of the structure has been developed.

Ключевые слова: система «БрГТУ», большепролетные сооружения, напряженно-деформированное состояние, стержни, узлы, расчет.

Введення. 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 воспринимает нагрузки свыше 300 кг/м^2 при пролетах до 100 м.

Структура «БрГТУ» отличается простой и быстрой сборкой 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 ее применения: сокращается расход стали до 20 %, уменьшаются трудозатраты на строительной площадке до 25 %, сокращаются сроки возведения в 1,5 раза, снижается стоимость до 10 % [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 среди других пространственных конструкций. 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. 1, а).

Структурное покрытие представляет собой пространственную стержневую плиту с ортогональной сеткой поясов с размерами ячеек $1,5 \times 1,5$ м. Конструкция имеет размеры в плане $18 \times 22,5$ м, высота структурной плиты по осям поясов 1,06 м. Все стержни пространственной конструкции имеют

одинакову 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 полый 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. 1, б).

Покрытие представляет собой металлическую пространственную перекрестно-стержневую конструкцию, выполненную в виде предварительно напряженной прямоугольной плиты. Регулярная пространственная конструкция 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 39×63 м. Ячейки поясов плиты имеют размер 3×3 м, высота плиты в осях – 3 м.

В связи с необходимостью восприятия реакции распора, в уровне опорных узлов нижнего пояса плиты устанавливаются затяжки с шагом 3 м в направлении меньшего пролета, выполненные 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 «BrI™TU»: с толщиной стенки полый 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, $\varnothing 83 \times 4$.

Интересным является конструктивное решение применения структуры «BrI™TU» в навесе над западной трибуной стадиона «Спартак» в г. Могилеве. Навес представляет собой структурную плиту размером в плане 131×14 м и высотой 1,41 м, заземленную по длинной стороне на трехветвевых пилонах, установленных с шагом 12 м (рис. 1, в).

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 трехветвевого 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 пилона запроектирована из двух труб $\text{Ø}325 \times 14$ мм, соединенных листовыми накладками, растянутые ветви выполнены из труб $\text{Ø}325 \times 14$ мм, решетка состоит из труб $\text{Ø}121 \times 8$, $\text{Ø}219 \times 8$ мм.

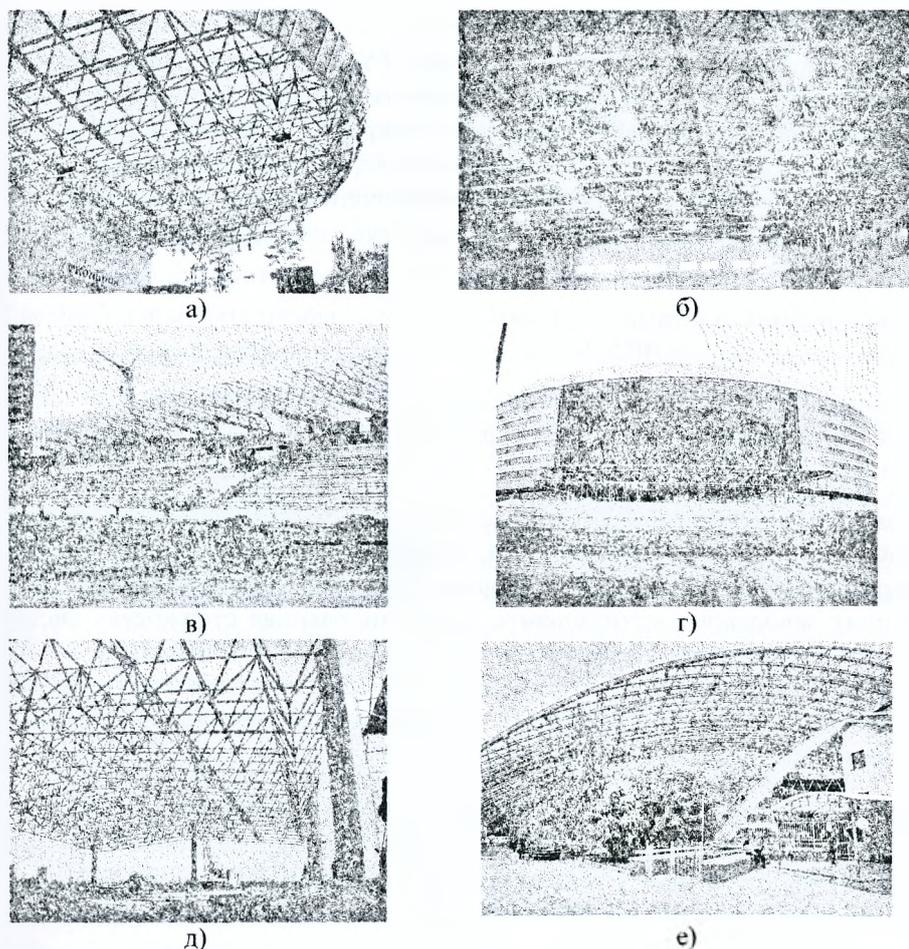


Рис. 1. Применение металлической структурной конструкции системы «БрГТУ»

Подобную статическую схему имеет структурная плита системы «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 460,34 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 мм – 2689 мм). Все стержни запроектированы из бесшовных горячекатаных труб $\varnothing 89 \times 5$ мм, $\varnothing 114 \times 8$ мм, $\varnothing 114 \times 12$ мм, узлы – $\varnothing 212$ мм и толщиной стенки 16 мм (рис. 1, г).

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 24×42 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 в г. Калинковичи Гомельской области.

В покрытии здания кафе возле г. Береза на трассе «Брест–Минск» применена структурная конструкция с размерами в плане 18×24 м и высотой 15 м (рис. 1, д).

Первое место среди возведенных сооружений с использованием системы «БрГТУ» в виду его уникальности, бесспорно занимает большоепролетное 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 конструктивно логична и интересна (рис. 1, е).

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 элементами, обеспечивающими передачу на фундаменты нагрузок и воздействий являются пять нижних и четыре верхние вертикальные арки, 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 заземленные 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 обеспечило 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, уложенным между опорной плитой узла структурной оболочки и оголовком колонны.

Главная роль при создании 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 3,0×3,0 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.

Конструкция стержней и узлов структурной конструкции системы «БрГТУ». Система «БрГТУ» отличается конструктивными решениями узлов и стержней, обладает научной и технической новизной и защищена 15 патентами на изобретения [3].

Узел структуры состоит из полого шара с отверстиями, в которые устанавливаются высокопрочные болты для соединения стержней. Полный шар собирают из двух полусфер, полученных путем горячего прессования 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, с наружной стороны которых устанавливаются наружная сферическая шайба и две гайки: силовая гайка и 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).

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.

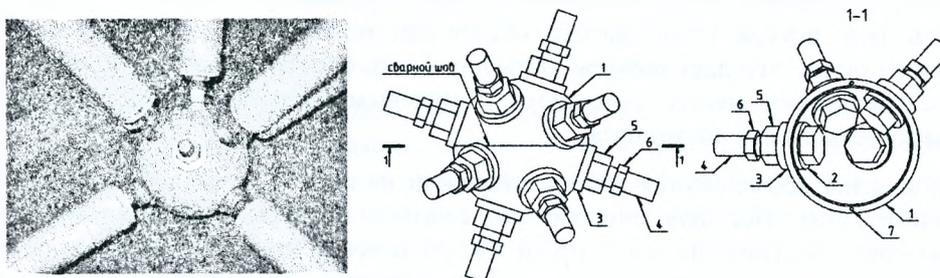


Рис. 2. Узловой элемент системы «БрГТУ»:
1 – полусфера; 2 – внутренняя шайба с выпуклой поверхностью;
3 – наружная шайба с вогнутой поверхностью; 4 – болт; 5 – силовая гайка;
6 – контргайка, 7 – центрирующий штифт

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

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 больших размеров фрагментов, больших пролетных 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» в качестве расчетной предлагается принимать 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 рассчитывались по условию $N_{max} \leq 0,5R_{bun} A_{bn}$.

Было исследовано напряженно-деформированное состояние толстостенной сферы с отверстиями и подкрепляющими шайбами, нагруженной локальными нагрузками от усилий в стержнях структуры. Разработана конечноэлементная модель, проведено ее экспериментальное подтверждение на натурных испытаниях узлов при одноосном и многоосном нагружениях. 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. Как допускающая нагрузка на узел принимаются значения $N = 0,6N_{пред}$.

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

Живучесть системы «БрГТУ». Любое сооружение не может быть абсолютно свободным от риска прогрессирующего обрушения, а, следовательно, не может быть абсолютно безопасным. Именно поэтому ученые обратили пристальное внимание на проблему живучести.

Выводы

В большинстве случаев система «БрГТУ» – это большепролетные, пространственные, комбинированные системы, принцип работы которых построен на многосвязности и совместной работе. Такие расчетные схемы исключают наличие «ключевых» элементов.

Возможность регулирования зазора между гайками в узле, компенсируя неточности изготовления, позволяет включить в работу абсолютно все стержни конструкции, что говорит о том, что конструкция будет работать по предписанным ей законам.

Шарнирная работа узлов позволяет точно описать их в расчетной схеме и говорить о соответствии расчетной схемы и действительной работы конструкции.

Повсеместные натурные испытания построенных объектов подтвердили соответствие расчетных моделей и действительной работы конструкций.

Разработанные проекты, составленные расчетные модели, математические модели разрушения конструкций свидетельствуют о стойкости системы «БрГТУ» к прогрессирующему обрушению.

Постоянный мониторинг построенных объектов, научное сопровождение строящихся, изготовление всех стадий проектной документации (архитектурный проект, строительный проект / КМ, чертежи стадии КМД) позволяют объективно контролировать во времени изменение технического состояния зданий и сооружений и своевременно осуществлять меры по недопущению аварийных ситуаций.

Учитывая многосвязность и многоэлементность таких систем, особенности их расчетных схем, можно сделать вывод о надежности, безопасности и достаточном уровне живучести большепролетных металлических пространственных конструкций системы «БрГТУ».

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. Шалобыта, 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 2007г.: 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. Шалобыта, Л.Г. Головкин, А.Б. Шуринов, 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, E04B 1/58/ В.И. Драган, А.А. Левчук, Н.Н. Шалобыта, В.Н. Пчелин; заявитель Брестский го. ун-т. – № 20050458, заявл. 21.07.2005; опубл. 28.02.2006 // офіційны бюл/ нац. центр інтэлектуал. уласнасці. 2006. – № 1. – С. 194.

Надійшла до редколегії 10.06.2010 р.