

ПРИМЕНЕНИЕ САПР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИССЛЕДОВАНИИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

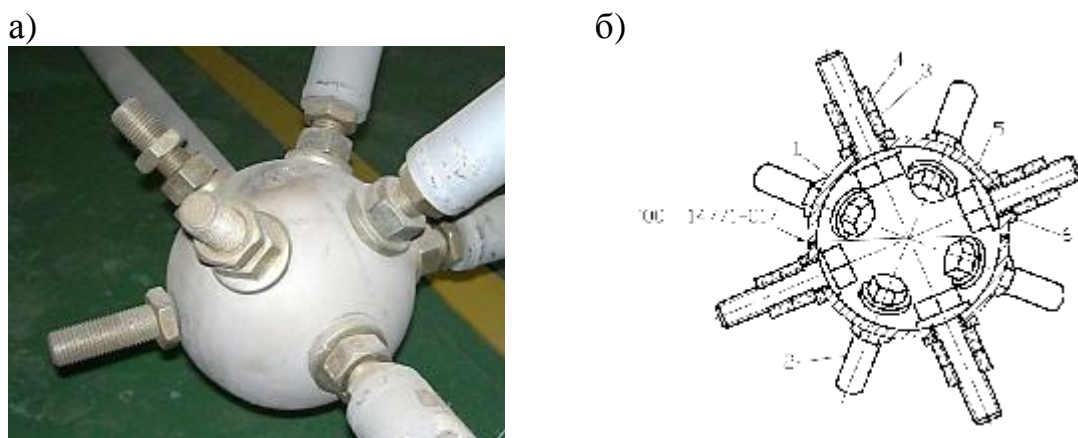
Шалобыта Н.Н., Шурин А.Б., Драган В.И., Шалобыта Т.П.

В мировой строительной практике создано огромное количество уникальных металлических структурных систем покрытий зданий и сооружений, отличающихся как оригинальными архитектурными формами, так и уникальными, новаторскими, конструкторскими решениями их исполнения, включающими как использованием различных конструкций стержневых элементов, так и узлов их сопряжения. Из множества применяемых в практике строительства узловых соединений, пригодных для любых нагрузок по прочности, для объединения трубчатых профилей, в основном получили распространение комбинированные узлы систем «Меро» и «Веймар» (Германии), «МАрХИ» (Россия), «NS» (Япония), а также узловые сопряжения с использованием монтажной сварки «Октаплатт» (Германия) и «SDS» (Франция) [1, 2, 3]. В настоящее время в разработке структурных покрытий для уникальных большепролетных сооружений Республика Беларусь имеет несомненный приоритет. В Брестском государственном техническом университете специалистами кафедры строительных конструкций создана новая металлическая структурная конструкция, получившая название система «БрГТУ», отличающаяся от известных структурных систем конструкцией узлового соединения и стержня структуры [1, 3]. Данная система позволяет создавать структурные конструкции любой архитектурной формы и выразительности, позволяет перекрывать сооружения с пролетами более 150 м с различными очертаниями в плане. Структурная система «БрГТУ» отличается от общеизвестных простотой сборки конструкции как непосредственно на проектной отметке, так и близи строящегося сооружения.

Конструктивные и строительные преимущества структур системы «БрГТУ» свидетельствуют об экономической целесообразности их применения: расход стали сокращается до 20%, трудозатраты на строительной площадке – до 25 %, сроки возведения – в 1.5 раза [3].

Узловой элемент системы «БрГТУ» выполнен в виде полого шара с отверстиями в стенке, в которые, через сферические шайбы, устанавливаются болты, предназначенные для соединения со стержневыми элементами. Шар изготавливается из двух полусфер, полученных путем горячего прессования из листового проката из стали 09Г2С по ГОСТ 19281. Полусферы (поз. 1) свариваются стыковым швом на подкладке с разделкой кромок (тип С17 по ГОСТ 14771) полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа в смеси с аргоном или автоматической сваркой под флюсом. Толщина листового проката определяется величиной максимального усилия, воспринимаемого узлом (рисунок 1) [3]. Запроектированное конструктивное решение системы «БрГТУ» позволяет достаточно точно и однозначно выделить характер и направление силового потока в узле. Передача усилия со стержневого элемента на болт происходит через резьбовое соединение гайки стержня и болта, при этом контргайка служит только для стопорения стержневого элемента, а ее работой при передаче сим-

метричного усилий пренебрегают. Передача усилия с болта на стенку сферы 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 сферы, а усилие растяжения – с головки болта на внутреннюю шайбу и далее на стенку шара.



1 – полусфера; 2 – болт; 3 – силовая гайка; 4 – контргайка; 5 – внутренняя шайба с выпуклой поверхностью; 6 – наружная шайба с вогнутой поверхностью

Рисунок 1 – Общий вид (а) и поперечный разрез узлового элемента структурной конструкции системы «БрГТУ»

Структурная металлическая конструкция системы «БрГТУ» достаточно быстро на территории Республики Беларусь получила признание архитекторов и проектировщиков и в настоящее время имеет несомненный приоритет по отношению к другим системам пространственных конструкций. Об этом свидетельствует не только факт широкого применения данной конструктивной системы 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. Витебск. С использованием узлового соединения системы «БрГТУ» в Республике Беларусь законструировано и возведено более двадцати большепролетных пространственных стержневых конструкций на территории Республики Беларусь [3, 4, 6].

При проектировании структурных конструкций «БрГТУ» и составления адекватных КЭ-модели был выполнен комплекс работ с разработкой и детальным анализом вклада каждого элемента структуры в общее напряженное состояние. При этом рассматривались вопросы моделирования стержней, моделирования узлов, моделирования нагрузок и т.д.

Аналитическое определение усилий и перемещений в элементах стержневых систем производилось с использованием программы «ЛИР А-Windows», разработанной НИИ автоматизированных систем планирования и управления в строительстве /НИИАСС/ Госкомградостроительства Украины. Исходными данными для программы являлись: проектные и испытательные нагрузки, действующие на структурную конструкцию; подробная геометрия пространственной плиты с координатами (X, Y, Z) каждого узла; предварительные жесткости стержневых элементов. Для описания конструкции использовались пространственные стержневые конечные элементы (тип 10). Численный анализ производился в три этапа [3].

Первый этап включал расчеты пространственной конструкции структурной плиты с учетом действия на нее статических проектных расчетных нагрузок. В данном расчете учитывалось, что все стержневые элементы соединены в узлах шарнирно. Расчет производился в упругой стадии работы материала конструкции. В результате статического расчета были определены максимальные расчетные усилия, которые воспринимают элементы структурной плиты, и произведен подбор их сечений с соответствующими геометрическим и жесткостным характеристикам [3].

На втором этапе численного анализа для нагрузки, соответствующей испытательной, выполнялось определение напряженно-деформированного состояния подобранных по первому этапу расчета сечений элементов структурной конструкции. Структурная плита рассматривалась как шарнирно-стержневая система без учета упругой податливости узловых элементов. В результате определены ожидаемые величины усилий в стержневых элементах конструкции и перемещения узлов в намеченных для экспериментальных исследований точках.

На третьем этапе моделировалась действительная работа узловых элементов структурной конструкции при действии статической испытательной нагрузки в упругой стадии работы материала конструкции. Податливость узлов структурной плиты учитывалась снижением жесткостных характеристик стержней структуры. При данном подходе площадь поперечного сечения стержневых элементов F заменялась фиктивной площадью F_{fik} , которая вычислялась по следующей формуле [3]:

$$F_{fik} = \frac{N}{E} \left(\frac{\Delta l + \Delta}{l} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где F_{fik} – фиктивная площадь поперечного сечения стержней решетки;

N – фактическое усилие, воспринимаемое стержнем;

E – модуль упругости стали;

Δ – податливость узлового соединения, определяемая по диаграммам деформирования узловых соединений [3];

l – суммарная длина стержня и узлового соединения.

Для адекватного описания КЭ-модели структур системы «БрГТУ» с применением ПК «ЛИРА-Windows» на третьем этапе моделирования выполняли анализ влияния на общее НДС структур узла системы «БрГТУ». В результате установили, что его несущая способность и деформативность обеспечиваются высокопрочными болтами и толстостенной сферической оболочкой.

Диаметр и марка стали высокопрочных болтов, как и для большинства комбинированных узловых элементов, назначается исходя из величины усилий, действующих в стержнях структурной конструкции, и могут быть определены достаточно простыми и известными зависимостями, приведенными в нормативных документах [8, 9]. Определение несущей способности и деформативности полый толстостенной оболочки с отверстиями связано с определенными сложностями как в теоретическом, так и расчетном планах. Полый шар с отверстиями в стенке является с точки зрения аналитического расчета очень сложной системой, в которой напряженно-деформированное состояние зависит от многих факторов: диаметра сферы, толщины ее стенки, диаметра и мест расположения отверстий, геометрических размеров подкрепляющих накладок (толщины и радиуса), характера приложения нагрузок и т.д. [10, 11].

В реальных условиях эксплуатации полая сфера узлового соединения, находится в сложном напряженном состоянии. Экспериментальное определение особенностей напряженно-деформированного состояния во многом не позволяет полностью смоделировать расчетную ситуацию, а также определить конкретный уровень напряженности слоев оболочки. Поэтому наряду с экспериментальными исследованиями выполнялось численное моделирование. В качестве численного метода решения поставленной задачи использовалось конечно-элементное моделирование с применением вычислительного пакета «MSC.visualNastran for Windows» [3]. Применение данного вычислительного комплекса позволило смоделировать ряд задач. В расчетной модели варьировались следующие параметры, как различные варианты загрузок локальными нагрузками (одноосное, двухосное и сложное), геометрические размеры полой толстостенной сферы (толщина, радиус), размеры подкрепляющих шайб.

Для построения конечно-элементной трехмерной модели применили твердотельное моделирование с использованием КЭ «Solid» (рисунок 2). Разбивка производилась с использованием твердотельных пространственных пяти- и шестигранных элементов «Solid» типа «Brick» («Брусочек») и «Wedge» («Клин»), со сторонами отвечающими линейной функции формы. Толщина принятых КЭ не превышала 1 мм, что позволяло разбить толщину сферы не менее чем на 10 слоев (при ее толщине в 10 мм). Для достоверной оценки прочности был произведен детальный анализ по нескольким критериям текучести: эквивалентным напряжениям по Губеру-Мизесу-Генки ($\sigma_{\text{экв}}$); максимальным главным напряжениям (σ_1) и максимальным касательным напряжениям (τ_{max}).

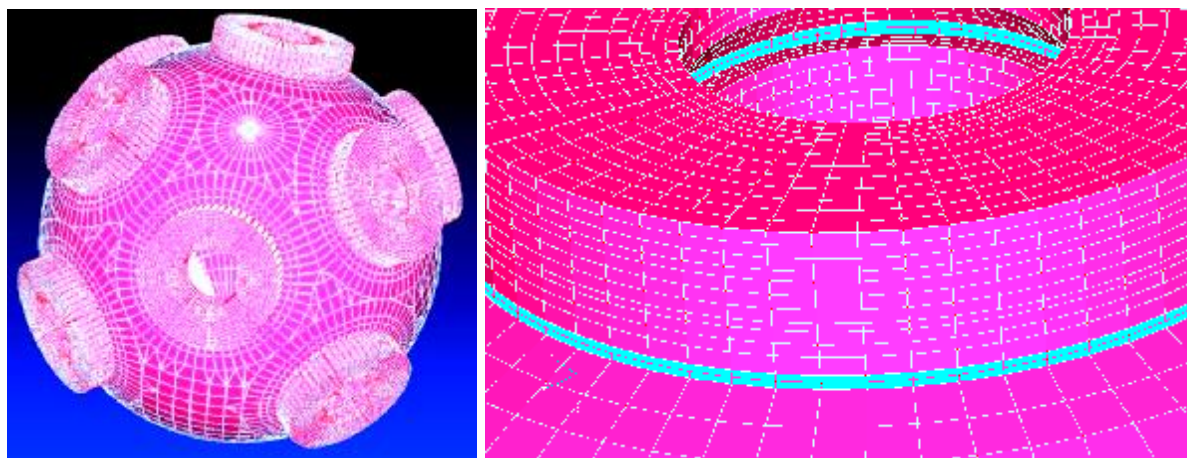
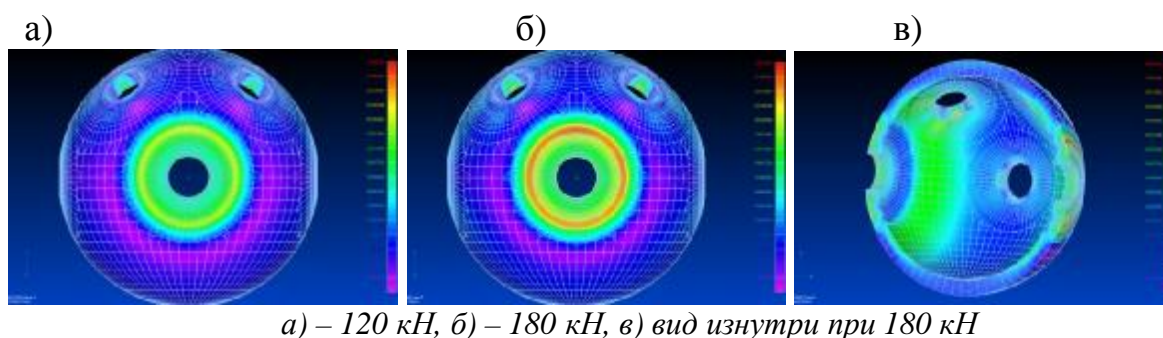


Рисунок 2 – Аналитическая конечно-элементная модель узла «БрГТУ»

Как показали результаты численных расчетов и выполненных экспериментальных исследований при симметричном одноосном растяжении максимальный уровень эквивалентных напряжений формируется на внешней поверхности сферы в месте сопряжения с жестким включением. При этом по границе подкрепляющего элемента узла – шайбы, формируется характерная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений, что наглядно представлено на рисунке 3 в виде характера изменения изополей эквивалентных напряжений. Величина напряжений и деформаций полученных численным и экспериментальным путем имеет высокую степень сходимости [3].



а) – 120 кН, б) – 180 кН, в) вид изнутри при 180 кН

Рисунок 3 – Изменение изополей распределения эквивалентных напряжений на внешней и внутренней поверхностях сферы в зависимости от уровня нагрузки

Для оценки полученных численных данных напряженно-деформированного состояния структурной плиты производились натурные испытания структурной плиты при действии на нее статической испытательной нагрузки.

Впервые запроектированный, построенный и натурно испытанный объект, с применением структуры системы «БрГТУ», был разработан для покрытия театра эстрады в г. Бресте. Покрытие сцены театра выполнено в виде консольной структурной плиты с размерами в плане 18,0x22,5 м с высотой плиты 1,06 м и размером ячеек 1,5x1,5м, при этом вылет консоли составил более 15 м (рисунок 4).



Рисунок 4 – Покрытие театра эстрады в г. Бресте

Как показали результаты проведенных натурных испытаний усилия, полученные экспериментально, во всех случаях оказались несколько ниже либо равными соответствующим усилиям, полученных численным путем, что является следствием ужесточения работы узловых соединений в условиях сложного нагружения, а также эффективного конструктивного решения узлового элемента, при котором в процессе сборки линейные элементы структурной плиты включаются в работу благодаря фиксированной величине натяга. Отклонения максимальных усилий в стержнях составили для растянутых элементов нижнего пояса – 11,8 %, для сжатых элементов верхнего пояса – 17,3 %, для элементов решетки – 19,3 %. Деформации узлов структурной конструкции, полученные в результате испытаний, незначительно отличаются от полученных в результате теоретического расчета (6,7 %) и составил в консольной части 65 мм, при предельно допустимом равном 128 мм [3].

Интенсивные экспериментальные исследования новых узловых соединений системы «БрГТУ» позволили выполнять проектирование более сложных структурных систем покрытий. Вторым объектом на котором применили эф-

фективные конструкции системы «БрГТУ» стало предварительно напряженное структурное покрытие с затяжками ледовой арены в г. Пружаны. Размеры в плане покрытия 39,0x63,0 м, высота плиты в осях – 3,0 м, размер ячеек плиты – 3,0x3,0 м. Регулярная пространственная конструкция образована двумя прямоугольными плитами, соединёнными в коньке и создающими два ската с уклонами 8°. Структурная плита опирается по контуру крайними узлами нижнего пояса на сталежелезобетонные колонны, расположенные с шагом 6м и 3м и образующие в плане прямоугольник с размерами сторон 39м и 63м. В связи с необходимостью восприятия реакции распора, в уровне опорных узлов нижнего пояса плиты устанавливаются затяжки с шагом 3м в направлении параллельном меньшему пролёту. Затяжки располагаются с пятого узла нижней поясной сетки структуры при начале отсчёта в торцах плиты (рисунок 5).

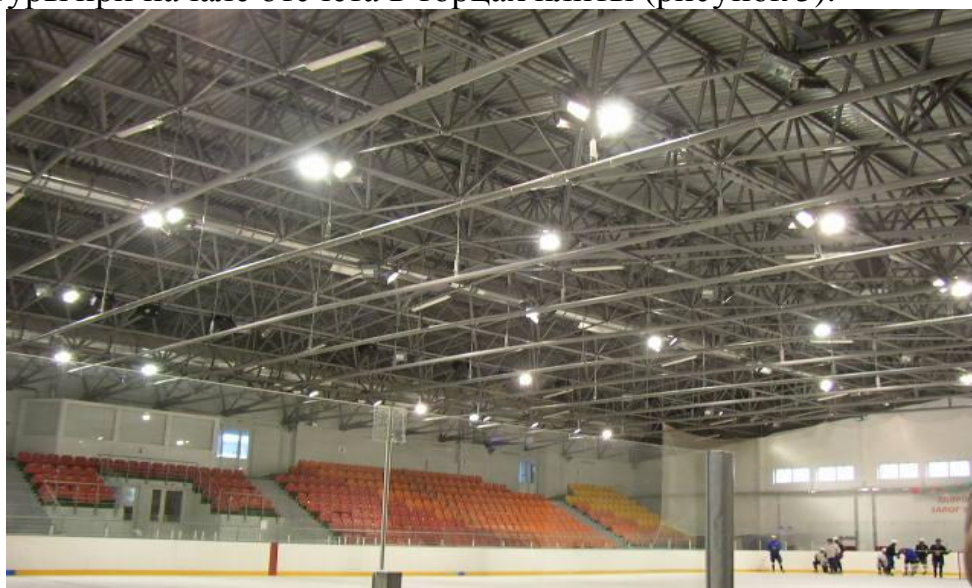


Рисунок 5 – Предварительно напряженное структурное покрытие с затяжками ледовой арены в г. Пружаны

Покрытие ледового катка в г. Гомеле по технической сложности пространственной структурной оболочки, новизне принятых конструктивных технических решений, перекрываемой площади без промежуточных опор и другим параметрам относится к уникальным сооружениям. Покрытие запроектировано на кафедре строительных конструкций УО БрГТУ в 2007 году. Покрытие имеет размеры в плане 49,092x57,82 м и представляет собой комбинированную пространственную структурную оболочку, в поперечном разрезе близкую по очертанию к синусоиде. Объединение стержней в единую конструкцию выполнено с помощью полых шаровых узлов системы «БрГТУ».

Структурная оболочка имеет диагональные верхнюю и нижнюю поясные сетки с ячейками в виде ромбов. Высота структурной оболочки по осям 2400 мм, размер стороны ромба верхней поясной сетки – 2861мм, размеры сторон ромбов нижней поясной сетки – 2733 мм, 2911 мм, 3005 мм, 3053 мм.

Для уменьшения строительной высоты покрытия и расхода металла структурная оболочка опирается нижними узлами на опорные площадки составных ригелей. Ригели выполнены из двух горячекатаных труб (ГОСТ 8732) сечением Ø273x10, объединенных в местах опирания узлов диафрагмами и площадками. Ригели, расположенные по оси А и Д, выполнены криволинейными в вертикальной плоскости [3].

Для проведения численных исследований покрытия были разработаны и использованы несколько КЭМ, последовательно усложняющихся для более полного учета особенностей работы конструкции. Исследование влияния прогонов на НДС комбинированного покрытия проводилось на соответствующей КЭМ. Соединение стержней в узлах структурной плиты принято шарнирным. Прогоны и опорные столики описывались универсальными пространственными стержневыми конечными элементами (КЭ 10). Для опорных столиков жесткостные характеристики задавались численно.

При проектировании этого сооружения возникли вопросы, выходящие за рамки действующих нормативных документов. Сложность геометрической поверхности оболочки не позволило принять нормируемые значения и эпюры ветровых и снеговых нагрузок. В связи с уникальностью сооружения и новизной конструктивных решений возникла необходимость проведения экспериментальных исследований путем нагружения покрытия полной нормативной нагрузкой. Натурные испытания проводились по методике, разработанной на кафедре строительных конструкций БрГТУ и апробированной при проведении серии натурных испытаний большепролетных комбинированных покрытий, таких как «Универсальный спортивный комплекс для игровых видов спорта в г. Бресте», «Ледовая арена на 800 мест в г. Пружаны» и т.д. [4, 5].

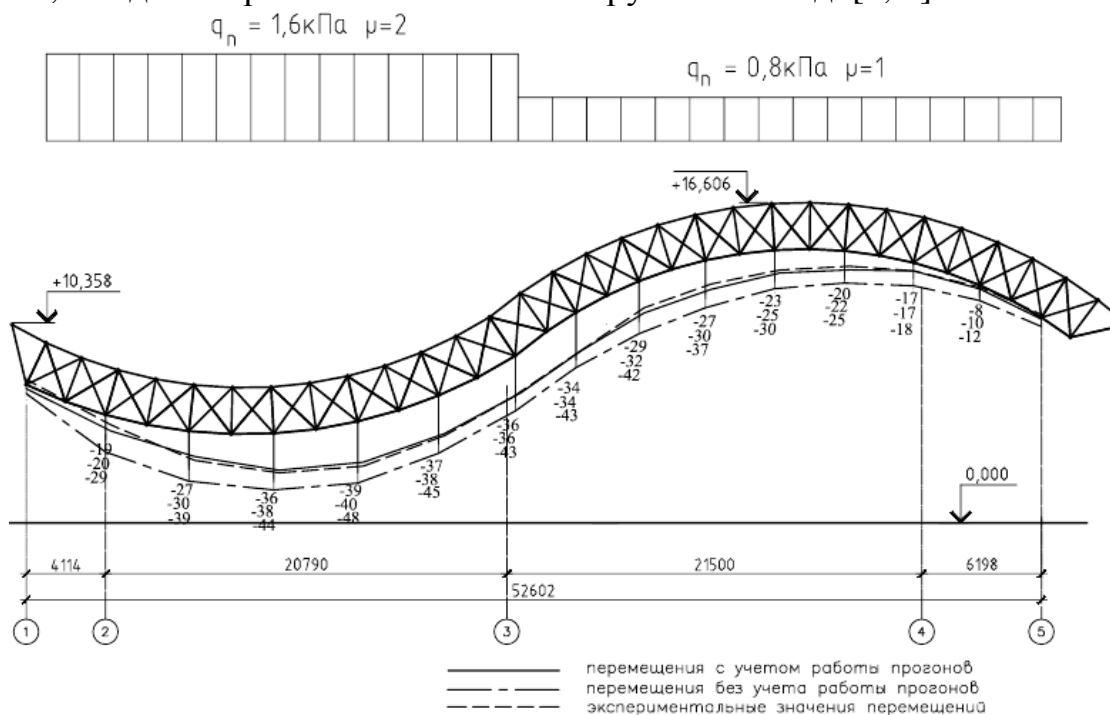


Рисунок 6 – Схема нагружения покрытия снеговой нагрузкой и эпюры вертикальных перемещений узлов нижней поясной сетки по оси В

Установлено, что эпюры вертикальных перемещений нижних узлов структурной оболочки под нагрузкой, построенные по результатам измерений, повторяют очертание эпюр, полученных в результате статического расчета. Экспериментальные значения перемещений наиболее соответствуют конечно-элементной модели, учитывающей работу прогонов в составе покрытия (рисунок 6).

Наиболее значимым среди всех запроектированных объектов на данный момент занимает большепролетное комбинированное пространственное покрытие летнего амфитеатра в г. Витебске (рисунок 7). Комбинированная стержне-

вая система состоит из структурной цилиндрической оболочки, усеченной двумя наклонными плоскостями и подкрепляющих ее девяти вертикальных арок (пять нижних и четыре верхних), а также двух наклонных арок. 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 нижних вертикальных арок от точки входа в фундамент – 18,5 м, высота покрытия по осям арок – 3,32 м. Радиус нижней поясной сетки структурной оболочки по центрам узлов составляет 106,975 м, радиус верхней поясной сетки по центрам узлов достигает 109,485 м, высота сечения оболочки – 2,51 м, размер ячеек верхней поясной сетки – 3,0x3,0 м, нижней поясной сетки – 3,0x2,931 м (рисунок 7).



Рисунок 7 – Комбинированное пространственное покрытие летнего амфитеатра в г. Витебске

Необходимо отдельно отметить, что для данного уникального объекта были проведены уникальные в мировой практике натурные испытания, которые подтвердили высокую надежность конструктивной системы «БрГТУ» (максимальный прогиб при полной нормативной нагрузке в консольной части оболочки составил 80 мм, наибольшие усилия не превысили 50 % от предельно допустимых). Кроме этого, с момента ввода в эксплуатацию данного уникального объекта, специалистами кафедры строительных конструкций производится сезонный мониторинг технического состояния конструкций сооружения, анализ и оценка напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных элементов структуры.

В настоящее время на основании накопленных экспериментальных и теоретических данных разработана достоверная методика определения несущей способности элементов структурной системы «БрГТУ», которая позволила разработать сортамент узловых соединений для восприятия усилий от 100 до 1000 кН. За короткое время с применением новой структурной системы в Республике Беларусь запроектировано 26 и построено более 18 уникальных большепролетных покрытий среди которых покрытие универсального спортивного зала МКСК «Минск-Арена» (размеры структуры в плане 24,0x42,0 м, высота плиты в осях – 2,62 м, размер ячеек плиты – 3,0x3,0м) и козырек над центральным входом МКСК «Минск-Арена» (плита криволинейного очертания в плане с вы-

сотой структуры в осях – 1,7 м, шириной 17,71 м и длиной покрытия по наружной дуге 45,72 м, комбинированное консольное покрытие над западной трибуной стадиона «Спартак» в г. Могилеве (размер структурной плиты в плане – 131,0 x 14,0 м, высота плиты в осях 1,414 м, размеры ячеек поясных сеток – 2,0x2,0 м, 2,0x2,125 м и 2,0x2,25 м, комбинированное покрытие Дворца водных видов спорта в г. Бресте (размеры цилиндрической структурной оболочки в плане по осям крайних элементов нижней поясной сетки – 36x42 м, высота структурной оболочки – 2,1 м, размер ячеек верхней поясной сетки – 3.0x3.0 м, размеры ячеек нижней поясной сетки – 2.82x3.0 м и 2.932x3.0 м), покрытие здания «Олимпийского комплекса» штаб – квартиры НОК РБ в г. Минске в виде купола, опирающегося шарнирно на верхнюю полку стального опорного кольца, заделанного в железобетонную плиту перекрытия. Конструкции запроектированы в виде двухслойной сетчатой оболочки из стержней с расстояниями между слоями 1,64 м и другие.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган, В.И., Шалобыта, Н.Н. К вопросу эффективности узлового соединения структурных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. – № 1(37): Строительство и архитектура – 2006. – С. 127–129.
2. Драган, В.И., Шалобыта Н.Н. Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением «БрГТУ» // Сборник статей XIV международного научно-практического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь» (Минск, 22-23 июня 2006 г.) / Ред. Коллегия: Т.М. Пецольд, Н.П. Блещик, Э.И. Батяновский (отв. ред.). – Мн.: БНТУ. 2006. Том 2. – 284 с.: ил. – С. 133-138.
3. Шалобыта, Н.Н. Напряженно-деформированное состояние узла из полого шара новой металлической структурной конструкции: автореф. дис. канд. техн. наук 05.23.01 / Н.Н. Шалобыта. – Брест., 2009. – 24 с.
4. 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.
5. 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.
6. Натурные испытания металлических конструкций покрытия ледового катка по ул. Головацкого в г. Гомеле: Научно-технический отчет по хозяйственному договору № 11/ 26 от 17.01.2011. – Брест: УО БрГТУ. – 2011. – 42 с.
7. Шалобыта, Н.Н. Экспериментальное исследование несущей способности узлов структурных конструкций системы «БрГТУ» / Н.Н. Шалобыта, В.И. Драган, Т.П. Шалобыта // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура – 2008. – № 1(49). – С. 94-102.
8. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. М., 1991.
9. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М., 1989.
10. Драган, В.И., Шалобыта Н.Н. Экспериментальные исследования работы структурной конструкции с узловым соединением «БрГТУ» // Сборник статей XIV международного научно-практического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь» (Минск, 22-23 июня 2006 г.) / Ред. Коллегия: Т.М. Пецольд, Н.П. Блещик, Э.И. Батяновский (отв. ред.). – Мн.: БНТУ. 2006. Том 2. – 284 с.: ил. – С. 133-138.