

УДК 692.426:624.014

# Напряженно-деформированное состояние узлового элемента структурной конструкции системы «БрГТУ»

**Вячеслав Игнатьевич ДРАГАН**, кандидат технических наук, профессор, первый проректор

**Андрей Брониславович ШУРИН**, кандидат технических наук, доцент, e-mail: shuryin@mail.ru

**Николай Николаевич ШАЛОБЫГА**, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», Республика Беларусь, 224017 Брест, ул. Московская, 17

*Аннотация. Приведено описание узлового элемента металлической структурной конструкции системы «БрГТУ», разработанного на кафедре строительных конструкций в Брестском государственном техническом университете. Эта система позволяет создавать структурные конструкции любой архитектурной формы и выразительности и перекрывать сооружения с пролетами более 100 м с различными чертаками в плане. Узловой элемент системы «БрГТУ» выполнен в виде полого шара с отверстиями в стенке. Шар изготавливается из двух полусфер, полученных путем горячего прессования из листового проката, соединенных стыковым швом с разделкой кромок. В полусферах имеются отверстия под крепежные болты, диаметром на 1 мм больше диаметра соответствующего болта. Приведен анализ напряженно-деформированного состояния полого узлового соединения системы «БрГТУ» 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 от усилий в стержнях структуры. Представлена методика определения несущей способности узлового элемента системы «БрГТУ», основанная на сопоставлении максимального усилия, действующего на узел, с максимальным допустимым усилием, назначенным на основании диаграммы деформирования (нагрузка-деформация) при одноосном растяжении или сжатии полого шара с отверстиями и подкрепляющими шайбами. Получена расчетная формула определения несущей способности узла в упругой области работы стали при заданных геометрических размерах полой сферы, диаметрах болтов, размерах подкрепляющих шайб.*

*Ключевые слова:* система «БрГТУ», структурная конструкция, узловой элемент, стержневой элемент, соединение, напряженно-деформированное состояние.

## STRESS-STRAIN STATE OF A NODAL ELEMENT OF THE «BRSTU» STRUCTURAL CONSTRUCTION SYSTEM

**Vjacheslav I. DRAGAN, Andrei B. SHURYIN**, e-mail: shuryin@mail.ru, **Nikolay N. SHALOBYTA**

Brest State Technic University, ul. Moskovskaya, 17, Brest 224017, Republic of Belarus

*Abstract. The description of a nodal element of the metallic structural construction of the «BrSTU» system developed at the department of building constructions of the Brest State Technical University, which makes it possible to create structural constructions of any architectural form and expressiveness and cover the buildings with over 100 m spans with different basic geometry in plan, is presented. The nodal element of the «BrSTU» is made in the form of a hollow ball with holes in the wall. The ball is manufactured from two semi-spheres obtained by hot pressing from rolled metal which are connected by a butt joint with the partition of the edges. In the semi-spheres there are holes for fixing bolts, their diameter is 1.0 mm wider than the diameter of the corresponding fixing bolt. The analysis of stress-strain state of the hollow nodal junction of the «BrSTU» system under the many-axial loading with local loads is presented; the regularities of distribution of stresses and strains depending on the diameter and thickness of the hollow ball, sizes of reinforcing washers, values of local loads from the tension in the rods of the structure are established. The methods of determining the bearing capacity of the nodal element of the «BrSTU» system based on the comparison of maximum effort which acts on the unit, with maximum assumed effort stated on the basis of the strain diagram (load-strain) at one-axis straining or compression of the hollow ball with holes and reinforcing washers is presented. The calculation formula for determining the bearing capacity of the node in the resilient area of steel work with prescribed geometrical dimensions of the hollow sphere, bolt diameters, sizes of reinforcing washers is obtained.*

*Key words:* «BrSTU» system, structural construction, nodal element, rod element, junction, stress-strain state.

**В** настоящее время в мировой строительной практике разработано огромное количество уникальных металлических структурных систем покрытий зданий и сооружений, отличающихся

как оригинальными архитектурными формами, так и уникальными, новаторскими конструкторскими решениями с использованием различных конструкций стержневых элементов и узлов

их сопряжений. Но несмотря на многообразие форм поперечных сечений наибольшее распространение в металлических пространственных системах покрытий получили трубчатые профили, как

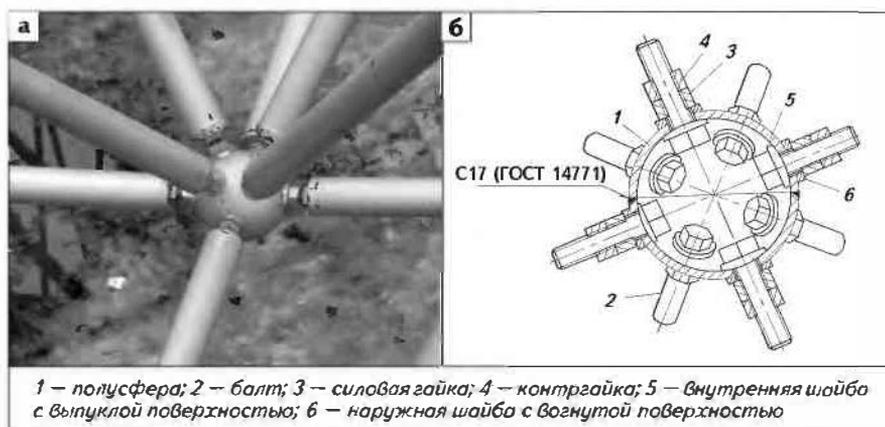


Рис. 1. Общий вид (а) и поперечный разрез (б) узлового элемента структурной конструкции системы «БрГТУ»

обладающие наибольшим радиусом инерции, одинаковым во всех направлениях, что наиболее эффективно при работе на устойчивость. Следует отметить, что при значительных ветровых нагрузках такие стержни имеют минимальный коэффициент аэродинамического сопротивления. Из множества применяемых в практике строительства для конструирования структурных конструкций узловых соединений наибольшее распространение получили комбинированные узлы систем «Меро», «Веймар» (Германия) или «МАрХИ» (Россия), «NS» (Япония), а также узловые сопряжения на пространственных листовых фасонках или на ванной сварке [1–5].

**Структурная конструкция системы «БрГТУ»** разработана на кафедре строительных конструкций в Брестском государственном техническом университете. 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 (рис. 1).

Шар изготовлен из двух полушар, полученных путем горячего прессования из листового проката из стали 09Г2С по ГОСТ 19281. Полушары 1 (см. рис. 1) сваривают стыковым швом на

подкладке с разделкой кромок (тип С17, 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. Болты 2 вставляют с внутренней поверхности полушаров в отверстия диаметром на 1 мм больше диаметра болта. Крепежные болты имеют возможность свободного вращения вокруг собственной оси и отклонения от оси отверстия на  $5^\circ$ , что обеспечивает свободную сборку элементов решетки структуры. Болты снабжены силовой гайкой 3 и контргайкой 4, которые в проектном положении надежно стопорят болт относительно стержня структуры и сферы узлового элемента. Между гайками 3 и 4 устанавливают зазор  $10 \pm 1$  мм, что значительно упрощает сборку и позволяет снизить точность изготовления узла и стержня конструкции. Под головками болтов и внутренней поверхностью шара, а также между силовыми гайками и наружной поверхностью шара установлены шайбы со сферическими, обращенными к шару поверхностями.

Важную роль в данном узле играют внутренняя и наружная шайбы 5, 6, которые имеют сферическую поверхность и обеспе-

чивают центровку стержней при закручивании силовой гайки.

В качестве стержневых элементов, соединяемых с помощью данного узла, выступают линейные элементы, изготавливаемые из круглых труб. Для их сопряжения с болтами в торцы труб устанавливают и приваривают по контуру круглые гайки с резьбовыми отверстиями. Вращение болтов при сборке производится посредством поворота застопоренных силовой гайки и контргайки. Стержневой элемент передает продольные сжимающие усилия на узловой элемент через силовую гайку и наружную шайбу, а растягивающие – через головку высокопрочного болта и внутреннюю шайбу.

Диаметр и класс прочности болтов, как и для большинства комбинированных узловых элементов, назначается исходя из величины усилий, действующих в стержнях структурной конструкции, и определяется в соответствии с нормативными документами. В узловом элементе системы «БрГТУ» болт рассчитывается только исходя из условия работы на восприятие растягивающих или сжимающих усилий, его прочность определяется по формуле

$$N \leq 0,5R_{\text{блт}} A_{\text{блт}} \gamma_b, \quad (1)$$

где  $R_{\text{блт}}$  – расчетное сопротивление растяжению высокопрочных болтов;  $A_{\text{блт}}$  – площадь сечения болта;  $\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения [3, 6].

**Экспериментальное и численное определение НДС толстостенной сферической оболочки при действии сосредоточенных сил.** Определение несущей способности полый толстостенной оболочки с отверстиями связано с некоторыми сложностями как в теоретическом, так и расчетном плане. Полый шар с отверстиями в стенке с точки зрения аналитического расчета – очень сложная система, в которой его НДС зависит от

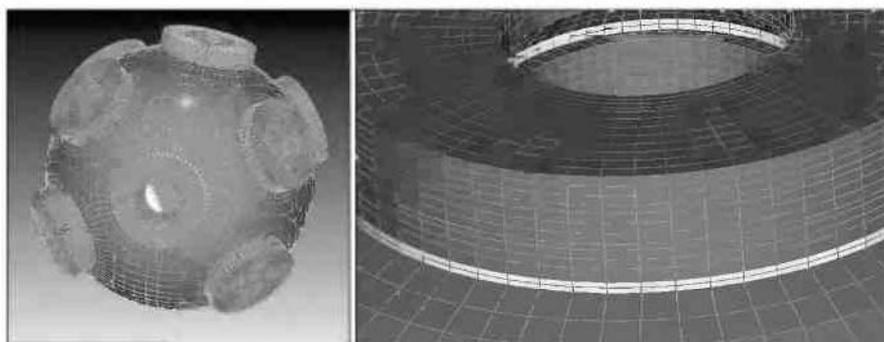


Рис. 2. Конечно-элементная модель узлового элемента системы «БрГТУ»

многих факторов: диаметра сферы, толщины ее стенки, диаметра и мест расположения отверстий, геометрических размеров шайб (толщины и радиуса), характера приложения нагрузок и т. д.

В реальных условиях эксплуатации полая сфера узлового соединения находится в сложном напряженном состоянии. Особенности НДС конструкции во многом не позволяют полностью смоделировать расчетную ситуацию, а также определить конкретный уровень напряженности слоев оболочки. Поэтому наряду с экспериментальными исследованиями целесообразным является численное моделирование с использованием конечно-элементных моделей.

Для оценки НДС толстостенной оболочки проведены экспериментальные исследования на узловых элементах со следующими геометрическими характеристиками: внешний диаметр сферы — 160 мм, толщина — 10 мм, диаметр отверстий под болты — 25 мм, диаметр внутренней и наружной шайб — 56 мм с отверстием 25 мм. Измерения производились по наружной и внутренней поверхностям сферы с помощью тензометрии. Розетки тензодатчиков расположили таким образом, чтобы их направления соответствовали траекториям главных напряжений — меридиональных и кольцевых.

При конечно-элементном мо-

делировании в расчетной модели варьировали такие параметры, как различные типы загрузок локальными нагрузками (одноосное, двухосное и сложное), геометрические размеры полой толстостенной сферы (радиус и толщина), диаметры и толщины подкрепляющих шайб [3, 6].

Для построения модели использовали конечный элемент (КЭ) «Solid» (рис. 2). Разбивку проводили с помощью твердотельных пространственных пяти- и шестигранных элементов «Solid» типа «Brick» («Брусоч») и «Wedge» («Клин») со сторонами, отвечающими линейной функции формы. Толщина принятых КЭ не превышала 1 мм, что позволяло разбить сферу толщиной 10 мм не менее чем на 10 слоев. Для достоверной оценки был выполнен детальный анализ по нескольким критериям: эквивалентным напряжениям по Губеру—Мизесу—Генки ( $\sigma_{экв}$ ); максимальным главным напряжениям ( $\sigma_1$ ) и максимальным касательным напряжениям ( $\tau_{max}$ ).

Как показывают экспериментальные результаты и данные численных расчетов, при одноосном растяжении максимальный уровень эквивалентных напряжений формируется на внешней поверхности сферы в месте сопряжения с подкрепляющими шайбами. При этом по границе подкрепляющего элемента узла — шайбы формируется характер-

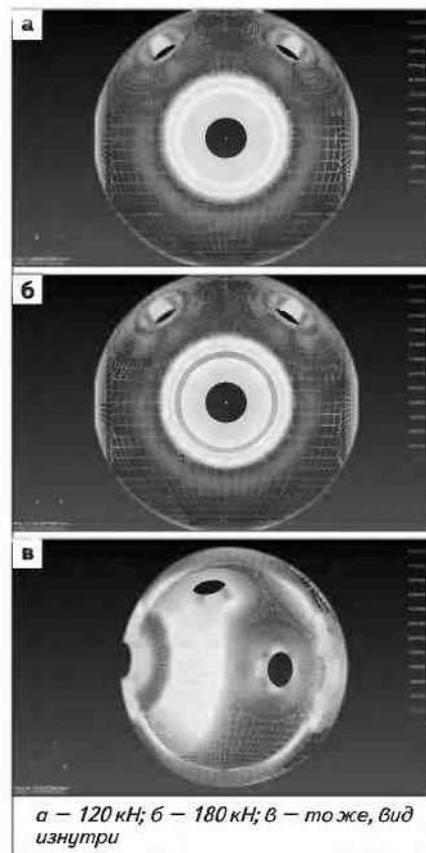


Рис. 3. Изополя распределения эквивалентных напряжений в зависимости от уровня нагрузки

ная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений, что наглядно представлено на рис. 3 в виде изменения интенсивности изолей эквивалентных напряжений.

Экспериментальные и численные графики изменения эквивалентных напряжений при нагрузке 100 кН приведены на рис. 4. Начало координат принято совпадающим с местом стыка оболочки и подкрепляющей шайбы  $r/R = 0,35$ . Зону вокруг отверстия в сфере, где присутствует влияние краевых эффектов вблизи отверстий, не рассматриваем.

Как видно из графиков (см. рис. 4), характерное изменение эквивалентных напряжений на внутренней и наружной поверхностях сферы свидетельствует о наличии изгиба. Выделяются две характерные кольцевые зоны с

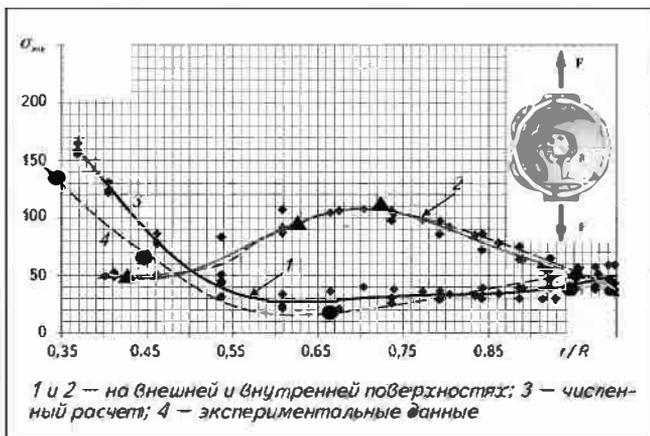


Рис. 4. Изменение распределения эквивалентных напряжений

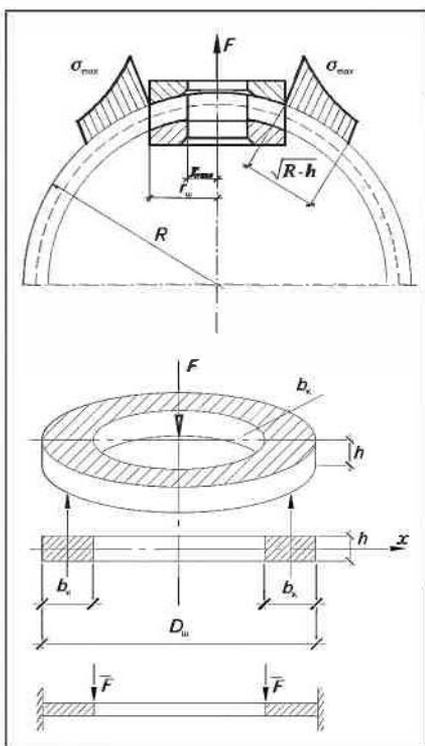


Рис. 5. Расчетная схема к определению усилий в оболочке

высокими уровнями напряжений: на внешней поверхности по границе подкрепляющей шайбы и на внутренней — в центральной зоне полусферы.

При одноосном нагружении на внешней поверхности оболочки у края площадки приложения нагрузки максимальный уровень эквивалентных напряжений достигает 165,15 МПа. По мере удаления от внешней границы контакта шайбы со сферой происхо-

дит резкое уменьшение значений эквивалентных напряжений. На участке длиной, соответствующей толщине сферы  $h$ , значение эквивалентных напряжений на внешней поверхности снижается практически вдвое и составляет 86,8 МПа, а при длине  $(1,5...1,7)h$  напряжения снижаются до 35–50 МПа, что соответствует четверти от принятых максимальных напряжений на данном уровне загрузки.

Иначе распределяются напряжения на внутренней поверхности сферы. В начальной зоне длиной, равной толщине сферы, эквивалентные напряжения составляют 48–52 МПа. Далее происходит постепенный рост эквивалентных напряжений. При  $r/R = 0,65...0,75$  имеет место второй пиковый уровень напряженности в сфере, при котором эти значения достигают 106,3 МПа. По мере удаления к полюсу эквивалентные напряжения также снижаются до уровня 40–55 МПа.

Анализ взаимовлияния многоосного нагружения узла усилиями в поясах и раскосах показали, что эквивалентные напряжения на внешней поверхности сферы в первой опасной зоне имеют значения ниже или сопоставимые с данными, полученными при одноосном растяжении. Установлено, что при двухосном растяжении и локальном усилии в пер-

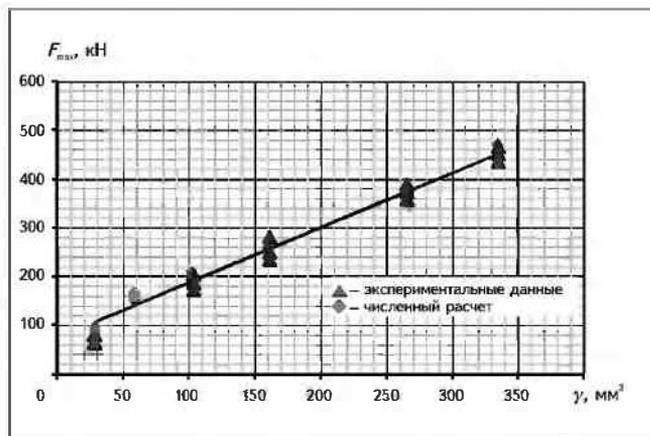


Рис. 6. Зависимость расчетной несущей способности узла от его геометрических параметров

пендикулярной плоскости  $F$  до 0,53–0,55 наиболее нагруженная область будет располагаться на ее внешней поверхности вокруг подкрепляющей шайбы. При двухосном растяжении–сжатии для любого соотношения усилий максимальные эквивалентные напряжения на внутренней поверхности сферы не превышают максимальных эквивалентных напряжений по наружной поверхности по контуру шайбы.

На основе изучения различных схем сложного нагружения толстостенной сферы локальными усилиями, возможными при реальной работе узла в составе структурной конструкции, выявлена третья область, в которой эквивалентные напряжения могут принимать значения, превышающие уровень напряжений на внешней поверхности сферы по кромке шайбы. Эта область образуется на внутренних волокнах сферы в полюсе между четырьмя локальными силами. Данная ситуация возникает, когда сфера загружена локальными силами в раскосах, имеющими различное направление действия, при их соотношении до 0,45–0,5.

Проведенными исследованиями установлено, что во всех случаях сложного нагружения наиболее опасной будет кольцевая зона на наружной поверхности сферы вокруг подкрепляющей

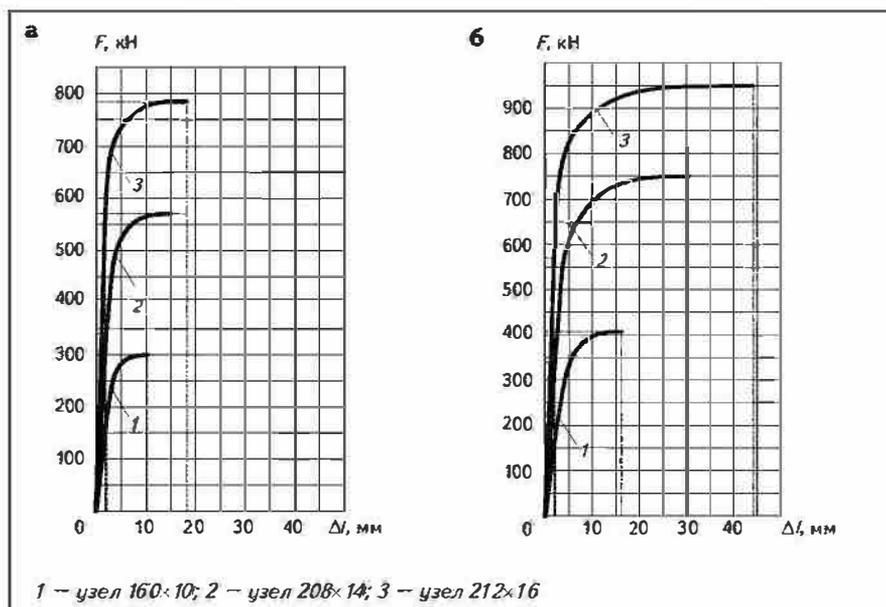


Рис. 7. Диаграммы деформирования узлов системы «БрГТУ» при растяжении (а) и сжатии (б)

шайбы. При этом уровень эквивалентных напряжений в данной зоне практически не зависит от схемы нагружения. Поэтому оценку несущей способности толстостенной сферы возможно проводить в условиях одноосного растяжения или сжатия.

Чтобы выяснить влияние геометрических параметров шайб со сферическими поверхностями на величину напряженности сферы, было выполнено численное моделирование различных видов нагружения сферы и серия экспериментальных исследований при одноосном нагружении осесимметричной нагрузкой с варьированием геометрических размеров подкрепляющих шайб (толщины и радиуса). В результате установлена зависимость, определяющая оптимальное отношение диаметра накладки к радиусу сферы, при которой обеспечивается максимальная ее несущая способность при заданном уровне нагрузки.

**Методика расчета на прочность узла структурной конструкции системы «БрГТУ».** Данные экспериментальных исследований и проведенные числен-

ные расчеты различных КЭ-моделей сфер позволили установить, что основными определяющими состоянием полой сферы являются меридиональные напряжения. В этом случае при действии локальной силы  $F$ , направленной вдоль оси отверстия радиусом  $r_{отв}$ , подкрепленного шайбой радиусом  $r_{ш}$ , прилегающая к шайбе область оболочки подвержена действию изгибных напряжений, распространяющихся вдоль меридиана на длину зоны краевого эффекта, размер которого зависит от геометрического фактора оболочки  $\sqrt{Rh}$  (рис. 5).

Принимая условную работу зоны краевого эффекта оболочки, подобной работе кольцевой пластины на жестких опорах и считая ширину такого кольца  $b_k$ , равной протяженности зоны краевого эффекта, для определения максимальных нормальных напряжений в зоне краевого эффекта можно использовать зависимость

$$\sigma_{\max} = \frac{kF_{\max}}{y} \leq R_y \gamma_c, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от

геометрических характеристик сферы  $\sqrt{Rh}$ ;  $\gamma$  — геометрический параметр, равный  $\sqrt{Rh}h^2/r_{ш}$ ;  $R$  — внешний радиус сферы;  $h$  — толщина подкрепляющей шайбы;  $r_{ш}$  — радиус подкрепляющей шайбы [3];  $R_y$  — расчетное сопротивление стали по пределу текучести;  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы.

В таком случае связь между расчетной несущей способностью  $F_{\max}$  и геометрическими характеристиками сферы узла запишем следующим образом:

$$F_{\max} = \frac{1}{k} \gamma R_y \gamma_c. \quad (3)$$

Построив график зависимости  $F_{\max} \sim \gamma$  (рис. 6), можно определить расчетное значение несущей способности узла в упругой области работы материала от геометрических параметров элементов узлового соединения — толщины и радиуса сферы, диаметра болтов, размеров подкрепляющих шайб.

Как показало сопоставление расчетных и экспериментальных данных, использование полученного геометрического параметра  $\gamma$  позволяет определить уровень максимальных нагрузок для сфер узловых элементов «БрГТУ» с точностью, достаточной для проектирования структурных конструкций.

Для оценки несущей способности узлов металлической структурной конструкции системы «БрГТУ» были выполнены статические испытания при осевом растяжении—сжатии с построением диаграмм деформирования. Испытания проводили для всего сортамента узловых соединений с размерами наружного диаметра сферы и толщины стенки: 160 и 10 мм, 208 и 14 мм, 212 и 16 мм (рис. 7). В процессе нагружения узлов наблюдались упругая, упругопластическая и пластическая деформации. При этом во всех случаях узлы по сварному шву или по металлу полой сферы не разрушались.

### Выводы

1. Анализ полученных результатов исследований позволил установить, что величина расчетной несущей способности узловых соединений стержневых элементов металлической структурной конструкции системы «БрГТУ»  $F_{\max}$  по формуле (3) хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. Авторами статьи разработан сортамент узлов металлической структурной конструкции системы «БрГТУ» и определены уровни допустимых нагрузок на узлы.

3. Разработанный авторами статьи узловой элемент системы «БрГТУ» использовался при проектировании и возведении более 20 большепролетных пространственных стержневых конструк-

ций на территории Республики Беларусь, таких как ледовые дворцы в городах Пружаны, Кобрин, Лунинец и т. д.; покрытие летнего амфитеатра в Витебске; навес над ледовой площадкой в г. Гомеле; купол национального олимпийского комитета Республики Беларусь; навес над западной трибуной стадиона «Спартак» в г. Могилеве и т. д. [7].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Davoodi M. R., Pashaei M. H., Mostafavian S. A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behavior of MERO-type double layer grids [Экспериментальное исследование влияния натяжения болтов на поведение двухслойных структурных конструкций с узловыми соединениями типа Меро] // *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2007. No. 1. Pp. 45–52.
2. Ghasemi M., Davoodi M. R., Mostafavian S. A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness [Жесткость при растяжении узлового соединения типа Меро в зависимости от натяжения болта] // *Journal of Applied Sciences*. 2010. No. 10(9). Pp. 724–730.
3. Шалобыта Н. Н. Экспериментальное исследование несущей способности узлов структурных конструкций системы «БрГТУ» // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2008. № 1(49). С. 94–102.
4. Драган В. И., Шурын А. Б. Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на простран-

ственных листовых фасонках // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 7. С. 37–44.

5. Алпатов В. Ю., Холопов И. С., Соловьев А. В. Исследования узла пространственной стержневой конструкции, выполненного на вазной сварке // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 8. С. 38–40.
6. Драган В. И., Шалобыта Н. Н., Мухин А. В., Шурын А. Б., Зинкевич И. В. Новая металлическая структурная конструкция системы «БрГТУ» // *Опыт проектирования, исследований и строительства в Республике Беларусь: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Промышленное и гражданское строительство в современных условиях»*. М.: МГСУ, 2011. С. 34–37.
7. Драган В. И., Люстибер В. В. Особенности работы структурных металлических конструкций системы «БрГТУ» // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2008. № 1(49). С. 80–86.

### REFERENCES

1. Davoodi M. R., Pashaei M. H., Mostafavian S. A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behavior of MERO-type double layer grids. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2007, no. 1, pp. 45–52.
2. Ghasemi M., Davoodi M. R., Mostafavian S. A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness. *Journal of Applied Sciences*, 2010, no. 10(9), pp. 724–730.
3. Shalobyta N. N. Experimental study of bearing capacity of the node structural designs system «BrGTU». *Vestnik BrGTU. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2008, no. 1(49), pp. 94–102.
4. Dragan V. I., Shuryin A. B. Ductility of rod systems with nodal connections on dimensional leaf corner plates.

*Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 7, pp. 37–44. (In Russian).

5. Alpatov V. Ju., Holopov I. S., Solov'ev A. V. Study of a unit of spatial rod structure tub welded. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2010, no. 8, pp. 38–40. (In Russian).
6. Dragan V. I., Shalobyta N. N., Muhin A. V., Shurin A. B., Zinkevich I. V. New metal structural design system "Brgtu". *Experience in the design, research and development in the Republic of Belarus. Sbornik trudov nauchn.-tehn. konferencii "Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo v sovremennykh usloviyah"*. Moscow, MGSU Publ., 2011. Pp. 34–37. (In Russian).
7. Dragan V. I., Ljustiber V. V. Features of work structural metal structures system "Brgtu". *Vestnik BrGTU. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2008, no. 1(49), pp. 80–86.

**Для цитирования:** Драган В. И., Шурын А. Б., Шалобыта Н. Н. Напряженно-деформированное состояние узлового элемента структурной конструкции системы «БрГТУ» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 6. С. 39–44.

**For citation:** Dragan V. I., Shuryin A. B., Shalobyta N. N. Stress-Strain State of a Nodal Element of the «BrSTU» Structural Construction System. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2017, no. 6, pp. 39–44. (In Russian).