

УДК 692.426:624.014

Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках

Вячеслав Игнатьевич ДРАГАН, кандидат технических наук, доцент, первый проректор

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

УО «Брестский государственный технический университет», Республика Беларусь, 224017 Брест, Московская ул., 17

Аннотация. Разработана рациональная конструкция большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты. Для покрытия большого пролета использованы две самостоятельные конструкции, которые ранее для совместной работы не применяли. Основная конструктивная идея такого сооружения заключается в том, что комбинированная конструкция обеспечивает совместную работу структурной плиты и затяжки на восприятие распора арок, что приводит к уменьшению прогибов конструкции и усилий в элементах арок. Разработана модель работы узлового соединения структурной конструкции на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие. Проведены исследования по определению параметров деформирования этих соединений. Установлено, что податливость узловых элементов на пространственных листовых фасонках способствует появлению дополнительных прогибов в структурной плите и перераспределению внутренних усилий в системе. В элементах структурной плиты в малонагруженных стержнях возможно изменение знака продольного усилия, что может привести к потере устойчивости. Выполнено сравнение результатов натуральных испытаний большепролетного комбинированного структурного покрытия спортивного комплекса с данными статического расчета разработанной конечно-элементной модели с учетом податливости узлов структурной конструкции. Действительная работа комбинированной конструкции соответствует принятой расчетной модели.

Ключевые слова: податливость, арка, структурная конструкция, большепролетное покрытие, узловое соединение, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель.

DUCTILITY OF ROD SYSTEMS WITH NODAL CONNECTIONS ON DIMENSIONAL LEAF CORNER PLATES

Vjacheslav I. DRAGAN, Andrei B. SHURYIN, e-mail: shuryin@mail.ru

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

Abstract. An efficient construction of a large-span combined roofing of metallic arches and a structural slab has been worked out. For covering a large span, two independent constructions, which have never been applied before for joint work, are used. The main constructive idea of such a structure is that the combined construction ensures the joint work of the structural slab and the tie-beam on the perception of the arch thrust, which leads to decreasing the construction sags and reducing the strain in the arch elements. A model of operation of the nodal junction of the structural construction on dimensional leaf corner plates with bolt junctions that work on shear and crushing, has been developed. The research in defining its deformation parameters has been conducted. It is established that the ductility of nodal elements on dimensional leaf corner plates leads to appearing additional sags in the structural slab and redistributing inner strains in the system. The change in the longitudinal strain in the elements of the structural slab in low-loaded rods is possible, which may lead to loss of stability. The comparison of the on-location testing results of the large-span combined structural roofing of the sports complex in Brest with the data of static calculation of the developed finite-element model with due regard for the ductility of the structural construction units is carried out. The correspondence of the combined construction actual operation with the adopted calculated model is determined.

Key words: ductility, arches, structural construction, large-span roofing, nodal junction, stress-strain state, finite-element model.

При конструировании большепролетных комбинированных структурных покрытий становится важным выбор типа узлового соединения. По видам применяемых соединений узловые решения структурных конструкций можно подразделить на три группы: на монтажной сварке,

болтовые и комбинированные соединения.

Существенный фактор, влияющий на действительное напряженно-деформированное состояние (НДС) большепролетных комбинированных структурных покрытий, — повышенная податливость ряда узловых соедине-

ний. Влияние податливости узловых соединений на работу структурных конструкций изучали многие ученые из разных стран [1–5].

Экспериментально-теоретические исследования, проведенные В. В. Трофимовым, позволили установить, что податливость

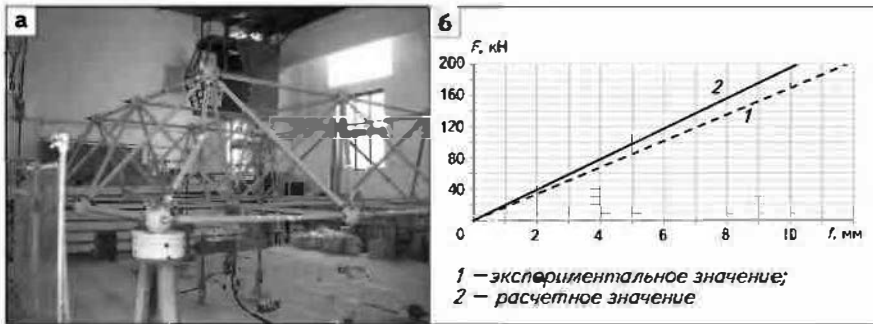


Рис. 1. Испытание фрагмента с узловыми соединениями системы «БрГТУ» (а) и максимальные вертикальные перемещения узлов фрагмента при приложении нагрузки к нижнему поясу (б)

болтовых соединений искажает НДС конструкции. Наличие остаточных прогибов в узловых элементах увеличивает прогиб в структурном блоке до 40 %. В конструкции происходит перераспределение внутренних усилий, что также может привести к тому, что растянутые элементы могут оказаться сжатыми [2].

Работу структурного блока конструкций (размеры в плане 6×4,5 м) с узловыми эксцентриситетами и податливостью узлов на пространственных листовых фасонках исследовал О. И. Ефимов [1]. При испытаниях структурного блока выявлено, что податливость узловых соединений привела к увеличению остаточных прогибов конструкции на 63 %.

В 2004 г. М. Р. Давуди (M. R. Davoodi) исследовал работу структурных конструкций системы «Меро» на двух блоках (размеры в плане 9,898×8,484 м) с высотой по осям поясов 1 м. Варьировалось усилие натяже-

ние болтов. Результаты испытаний позволили установить, что экспериментальные вертикальные перемещения узлов структуры превышают их численные значения [4]. В работе [5] определены действительные жесткостные характеристики узловых элементов системы «Меро» для случая одноосного растяжения. Как показали испытания, жесткость узловых элементов системы «Меро» складывается из жесткостей узлового элемента, двух болтов и конических вставок. Эти данные авторы [5] использовали при составлении расчетных схем, в которых податливость узловых элементов учитывали введением по концам стержневых элементов вставок с полученными жесткостными характеристиками, что позволило приблизить расчетные значения вертикальных перемещений к экспериментальным значениям.

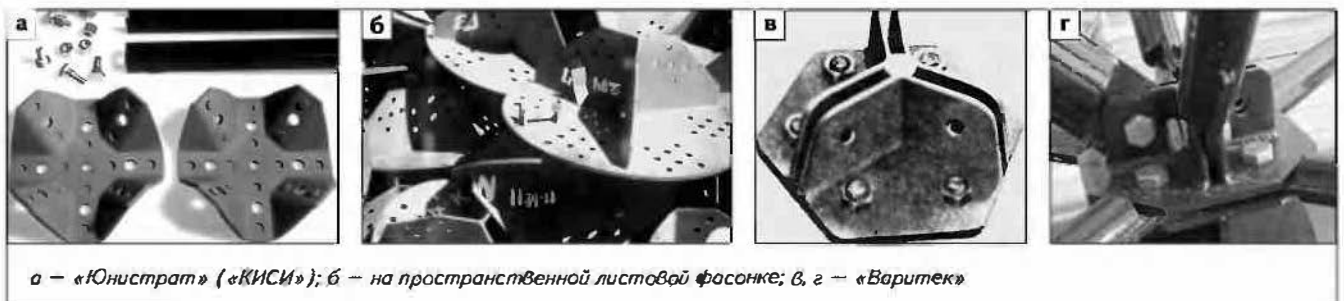
Специалисты кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического

университета (БрГТУ) при непосредственном участии авторов данной статьи в 2006 г. провели натурные испытания покрытия ледовой арены на 800 мест в г. Пружаны с узловыми соединениями «БрГТУ». Установлено, что измеренные вертикальные перемещения узлов структурной плиты отличаются от расчетных значений в среднем в 1,3–1,6 раза.

Податливость узловых соединений системы «БрГТУ» исследовали путем серии испытаний фрагмента структурной плиты с размером ячеек 2,2 м и размерами в плане 6,6×6,6 м. Отмечено превышение экспериментальных прогибов над значениями, полученными в результате статического расчета в 1,2–1,4 раза (рис. 1). Экспериментальными исследованиями также было установлено, что податливость узловых элементов системы «БрГТУ» имеет упругий характер и не влияет на распределение усилий в стержнях, расчетные усилия не отличаются от экспериментально измеренных [6, 7].

Классификация узлов пространственных стержневых систем. Учитывая вышеизложенное, авторы статьи предложили классификацию узловых элементов структурных конструкций по степени их локальной податливости. К первой группе можно отнести узловые элементы, локальной податливостью которых при расчетах можно пренебречь, так как она обусловлена упругой деформацией узлов. Это — узлы, вы-

Рис. 2. Узловые соединения структурных конструкций с повышенной локальной податливостью



а — «Юнистрат» («КИСИ»); б — на пространственной листовой фасонке; в, г — «Варитек»

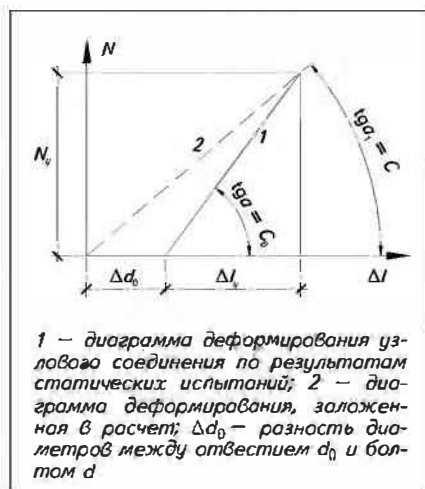


Рис. 3. Модель деформативности болтового соединения

полненные на монтажной сварке [8], и некоторые узлы комбинированных систем («Меро», «Веймар», «МАрХИ», «БрГТУ»). Во вторую группу (рис. 2) входят узловые элементы с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (соединения типа «Варитек», «Юнистрат», «КИСИ»). В таких соединениях разность между диаметром отверстия и болта приводит к появлению дополнительных прогибов, часть стержней в конструкции вступает в работу только после выбора зазоров в соединении, либо не включается в работу даже при загрузке полной нагрузкой. Все это способствует перераспределению внутренних усилий, различию между расчетной моделью и действительной работой конструкции. Однако данные конструкции легче монтировать и они имеют менее жесткие допуски на изготовление.

Как отмечалось, основной недостаток узловых соединений второй группы – большая вероятность одновременного включения всех стержней в работу и их повышенная податливость, приводящая к дополнительным прогибам и остаточным деформациям после снятия временных нагрузок. В узловом соединении структурной конструкции, кроме

смещений, определенных разностью диаметра отверстия и диаметра болта Δ (смещение 1-го рода), наблюдается смятие по контуру нагружаемых отверстий, удлинение соединяемых элементов на участке между болтами и вблизи ослабленного сечения, изгиб болтов (соединение двустороннее), деформации среза болтов (смещения 2-го рода).

Исследования О. И. Ефимова, В. И. Трофимова позволили установить, что податливость узлов структурной конструкции вырабатывается неравномерно [1, 2]. Предсказать, при каких усилиях начнутся сдвиги в болтовых соединениях и какова будет их последовательность, – маловероятно. В соответствии с этим разработали новую расчетную модель работы узлового соединения на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (рис. 3). В расчетную модель вводятся следующие допущения:

- податливость в узловых элементах вырабатывается на начальном этапе в связи с тем, что диаметр отверстия превышает диаметр болта на Δd_0 ;
- трение между соединяемыми элементами в узловом соединении не учитывается;
- податливость вырабатывается во всех элементах структурной конструкции;
- деформативность болтового соединения пропорциональна усилию. Деформации развиваются не по зависимости 1 (см. рис. 3), а происходят по прямой 2. Полные деформации узловых элементов будут складываться из упругой части Δl_y и Δd_0 , равной разности диаметров отверстия d_0 и болта d .

Для вычисления действительных жесткостных характеристик узловых соединений на пространственных листовых фасонках введем параметр деформи-

рования узлового соединения и обозначим его как C . Тогда в соответствии с графиком деформирования узлового соединения (см. рис. 3) параметр деформирования узлового соединения C вычислим по формуле

$$C = \frac{N_y}{\Delta d_0 + \Delta l_y} = \frac{N_y}{\Delta l_y} \left[\frac{1}{\Delta d_0 / \Delta l_y + 1} \right], \quad (1)$$

где Δl_y и N_y – упругие деформации узлового соединения и соответствующие им усилия, которые получены при испытаниях образцов узловых элементов на осевое растяжение; Δd_0 – разность диаметров между отверстием d_0 и болтом d в узловом соединении.

После замены $N_y / \Delta l_y = C_0$ в формуле (1) получим:

$$C = C_0 \left[\frac{1}{\Delta d_0 / \Delta l_y + 1} \right], \quad (2)$$

где C_0 – упругий параметр деформирования узлового соединения.

Для определения положения прямой 2 (см. рис. 3) и соответственно линейной жесткости узловых элементов на пространственных листовых фасонках провели их статические испытания. Образцы изготовили из той же стали, что и соответствующие элементы структурной конструкции (С345 по ГОСТ 27772). Элементы соединяли с помощью болтов нормальной точности, отобранных из партии, предназначенной для возведения покрытия. При сборке образцов болт устанавливали в крайнее положение таким образом, чтобы зазор $\Delta d_0 = 0$. По результатам испытаний построили диаграммы деформирования в осях N – Δl (рис. 4). Параметр деформирования C вычисляли по формуле (2) по значениям упругих деформаций узловых соединений Δl_y и соответствующего им усилия N_y .

Конструктивное решение комбинированного покрытия. Податливость узлов структурных конструкций исследовали на примере разработанного автора-

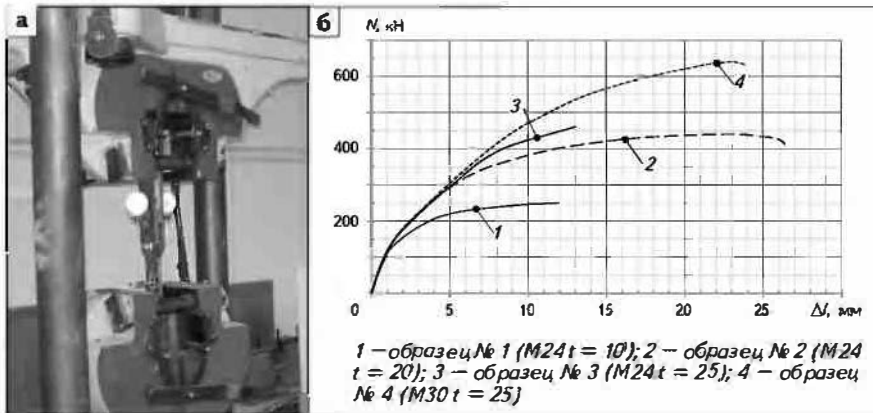


Рис. 4. Испытание образцов узловых элементов (а) и диаграммы деформирования образцов при испытаниях по осевое растяжение (б)

ми данной статьи большепролетного комбинированного покрытия Дворца спорта в г. Бресте (рис. 5). Для перекрытия пролета использовали большепролетную металлическую структурную плиту, представляющую собой двускатную складку с углом наклона в 15° . Размеры по диагонали ромба — 93 м. В средней части плита опирается на затяжки двух несущих двухшарнирных арок, установленных вдоль диагонали покрытия на расстоянии 11,2 м друг от друга. Пролет арок — 80,62 м. По периметру покрытие опирается на четыре диафрагмы жесткости и на сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6 м [9].

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

К достоинству разработанного авторами статьи комбинированного покрытия относится совместная работа арок и структурной плиты. Затяжки арок — это многопролетные неразрезные балки,

на которые опирается структурная плита в своей средней части. Структурная плита жестко связана с затяжкой, опорными узлами арок и включается в работу на восприятие распора арок. Применение данного конструктивного решения позволило увеличить изгибную жесткость покрытия в 2 раза, уменьшить пролет покрытия в поперечном направлении в 2,3 раза и снизить продольные усилия в элементах арок на 10 %. Расположение арок над кровлей значительно уменьшает внутренний отапливаемый объем здания без уменьшения полезного объема.

Во избежание провисания затяжки под собственным весом и весом структурной плиты арочная система дополнена подвес-

ками. Отличительная особенность покрытия — наличие в подвесках арок специально разработанных фаркопов с регулируемым натяжением, позволяющим включаться в совместную работу всем конструкциям покрытия [9, 10].

Учет податливости при разработке конечно-элементной модели. В структурной конструкции комбинированного покрытия применены узловые соединения на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (см. рис. 2г).

Характерным допущением в общепринятых расчетах пространственных структурных конструкций стала гипотеза о шарнирном соединении стержней в узлах. В этом случае в каждую угловую точку рассматриваемой пространственной системы вводят три связи, исключая линейные смещения узлов, поэтому в стержнях конструкции возникают только продольные усилия. Однако в узлах реальных сооружений присутствуют упругоподатливые перемещения между соединенными элементами. Поэтому возникает вопрос о формировании конечно-элементной модели (КЭМ), учитывающей соответствующие соединения элементов в узлах, с анализом и

Рис. 5. Покрытие Дворца для игровых видов спорта «Виктория» в г. Бресте





Рис. 6. Эпюры вертикальных перемещений верхних узлов структурной плиты

оценкой влияния таких соединений на НДС покрытия.

В натуральных конструкциях узловые сопряжения элементов имеют конечную жесткость, а расчетные модели [1, 2] не принимают во внимание действительные жесткостные характеристики узловых элементов. Введение в КЭМ узловых шарниров не будет учитывать податливость узловых соединений, вызванную разницей между диаметрами отверстия и болта.

Для определения НДС покрытия с учетом влияния податливости узловых элементов комбинированной структурной конструкции на пространственных листовых фасонках разработали соответствующую КЭМ. Численными исследованиями данной модели комбинированного покрытия с действительными жесткостными характеристиками узловых соединений структурной плиты установлено, что в элементах структурной плиты возникает перераспределение внутренних усилий. В наименее нагруженных стержневых элементах структурной плиты возможно изменение знака продольного усилия, растянутые элементы становятся сжатыми и могут потерять устойчивость.

Увеличение зазора в узловых соединениях структурной конструкции также приводит к изменению НДС элементов покрытия: прогибы структурной плиты увеличиваются, а продольные усилия в ее элементах уменьшаются в

связи с большим включением в работу арок. Расчетom установлено, что оптимальная величина зазора в узловых соединениях структурной плиты, при которой расход металла на 1 м² покрытия будет наименьшим, составляет 0,1–1 мм. Однако величина зазора менее 1 мм требует высокой точности изготовления и монтажа конструкций, поэтому в узловых соединениях комбинированной структурной конструкции на пространственных листовых фасонках зазор в болтовых соединениях принят 1 мм.

Натурные испытания. Испытательную нагрузку для проведения натуральных испытаний устанавливали согласно нормативным значениям постоянной и временной нагрузок, действующих на покрытие, т. е. это — собственный вес кровли и нормативное значения веса снегового покрова для снегового района IБ (0,8 кПа). Для создания испытательной нагрузки использовали бетонные фундаментные блоки и пакеты кровельного утеплителя, уложенные на дощатый настил (рис. 6).

Рассчитанный по методу оценки надежности первого порядка, приведенного в EN 1990 (англ. FORM-метод), коэффициент вариации V_5 подтвердил правильность разработанной КЭМ, которая учитывает действительную работу узловых соединений структурной плиты на пространственных узловых фасонках и включение в работу покрытия

прогонов и профилированного настила. Определенное по данной КЭМ напряженно-деформированное состояние соответствует действительной работе комбинированного покрытия.

Выводы

1. Предложена классификация узловых соединений структурных конструкций по степени их локальной податливости из двух групп. В первую группу входят узловые элементы, локальной податливостью которых при расчетах можно пренебречь, так как она обусловлена упругой деформацией узлов. Вторая группа — это узловые элементы с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие. Разность между диаметрами отверстия и болта в таких соединениях вызывает появление дополнительных прогибов, часть стержней в конструкции вступает в работу только после выбора зазоров в соединении, что приводит к перераспределению внутренних усилий и к различию между расчетной моделью и действительной работой конструкции.

2. Предложена модель работы узлового соединения структурной конструкции на пространственных листовых фасонках и проведены экспериментально-теоретические исследования по определению его жесткости. Применение полученных жесткостных характеристик в статическом расчете позволило разработать

конечно-элементную модель большепролетного комбинированного покрытия, адекватно отражающую действительный характер работы конструкции.

3. Разработанная конечно-элементная модель с учетом податливости узловых элементов стру-

ктурной конструкции, а также с включением в работу покрытия прогонов и профилированного настила дала возможность получить хорошее соответствие принятой расчетной схемы действительной работе конструкции. Подтверждено, что податливость

узловых соединений структурной плиты приводит к увеличению прогибов покрытия и перераспределению внутренних усилий в системе. В элементах структурной плиты в малонагруженных стержнях возможно изменение знака продольного усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов О. И., Агафонкин В. С. Влияние податливости узловых соединений на работу структурных конструкций // Исследование, расчет и испытание металлических конструкций: межвуз. сб. Казань, 1980. С. 20–23.
2. Трофимов В. И., Третьякова Э. В., Зуева И. И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. № 7. С. 24–26.
3. Зуева И. И., Зуев В. В. Влияние податливости болтового соединения на напряженно-деформированное состояние структурных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2010. № 1. С. 40–46.
4. 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. № 1. Pp. 45–52.
5. Ghasemi M., Davoodi M. R., Mostafavian S. A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness // Journal of Applied Sciences. 2010. № 10(9). Pp. 724–730.
6. Драган В. И., Люстибер В. В. Особенности работы структурных металлических конструкций системы «БрГТУ» // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. 2008. № 1(49). С. 80–86.
7. Драган В. И., Шурин А. Б. Действительная работа металлической комбинированной структурной оболочки покрытия ледового катка по ул. Головацкого в г. Гомеле // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 1. С. 118–126.
8. Алпатов В. Ю., Холопов И. С., Соловьев А. В. Исследования узла пространственной стержневой конструкции, выполненного на ванной сварке // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 8. Цветная вкладка.
9. Драган В. И., Шурин А. Б. Экспериментальное исследование несущей способности большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте // Строительная наука и техника. 2005. № 2. С. 9–14.
10. Драган В. И., Шурин А. Б. Конструкции арок комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. 2006. № 1(37). С. 87–91.

REFERENCES

1. Efimov O. I., Agafonkin V. S. Effect of compliance nodal connections on the work of different designs. *Issledovanie, raschet i ispytanie metallicheskih konstruksiy*. Kazan, 1980, pp. 20–23. (In Russian).
2. Trofimov V. I., Tretyakova E. V., Zueva I. I. Accounting for the effects of compliance bolting work of structural design. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy*, 1976, no. 7, pp. 24–26. (In Russian).
3. Zueva I. I., Zuev V. V. The influence of the flexibility of bolting on the stress-strain state of structural designs. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta*, 2010, no. 1, pp. 40–46. (in Russian).
4. 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.
5. 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.
6. Dragan V. I., Lustiber V. V. Features of work of structural metal constructions of the «BrGTU». *Vestnik BrGTU. Stroitelstvo i arhitektura*, 2008, no. 11(49), pp. 80–86. (In Russian).
7. Dragan V. I., Shuryin A. B. Actual work of the metal combined structural shell, covering the ice rink on the street holovatsky in Gomel. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 118–126. (In Russian).
8. Alpatov V. Ju., Kholopov I. S., Soloviev 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).
9. Dragan V. I., Shuryin A. B. Experimental study of bearing capacity of long-span metal coating of the building of a universal sports complex in Brest. *Stroitel'naya nauka i tehnika*, 2005, no. 2, pp. 9–14. (In Russian).
10. Dragan V. I., Shuryin A. B. Design arches combined coverage universal sports complex in Brest. *Vestnik BrGTU. Stroitelstvo i arhitektura*, 2006, no. 1(37), pp. 87–91. (In Russian).