ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВОГО КОННЕКТОРА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ МАССИВНОЙ ДЕТАЛИ

В.Ю. Алпатов, Д.И. Жученко, А.О. Лукин

*Архитектурно-строительный институт, Самарский государственный технический университет
(АСИ СамГТУ), 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194*

Аннотация. В узлах пространственных решетчатых конструкций сходится множество элементов. Узел такой конструкции работает в сложном напряженном состоянии. Экспериментальные методы, традиционно используемые для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) узловых соединений, дают исключительно приближенные результаты, а для конструкций со сложной геометрией вообще бесполезны. Изучить распределение напряжений внутри узлового коннектора, представляющего собой массивное тело, можно с помощью расчетных программных комплексов. Авторами выполнено исследование НДС узла системы MArchI и произведен анализ уровня поверхностных напряжений и напряжений внутри узлового коннектора. На основании исследований сделаны выводы о работе узлового коннектора: напряжения по поверхности коннектора в основном не превышают предела условной текучести стали; их максимальные значения наблюдаются на опорной плоскости и в местах контакта гайки и коннектора; распределение материала при данной геометрии коннектора оказалось рациональным; снизить расход стали на узловой коннектор возможно путем изменения его принципиальной конструкции, например, рассмотрев вопрос формирования узла из полой оболочки.

Ключевые слова: пространственные решетчатые конструкции, напряженно-деформированное состояние, оптимальное проектирование, оптимизация, расчетные программные комплексы, система MArchI, расчетная модель, SolidWorks, CosmosWorks

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.142-149

RESEARCH OF THE SPATIAL STRUCTURE NODE CONNECTOR MADE OF A MASSIVE COMPONENT

V.Yu. Alpatov, D.I. Zhuchenko, A.O. Lukin

*Architecture and Civil Engineering Institute of Samara State Technical University (ACEI SSTU),
194 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001, Russian Federation*

Abstract. Many elements meet in nodes of spatial lattice structures. The node of such structure works in a complicated stressed state. Experimental methods traditionally used for assessment of the stress-strain state of nodals connections, give only approximate results, and for structures with complex geometry are generally useless. It is possible to study a distribution of stresses inside the nodal connector, which is a massive body, using calculation software packages. As a result of calculation of a model of nodal connection in the CosmosWorks environment, stresses both on the connector's surface and inside of it were obtained. The authors carried out the research of a stress-strain state of the MArchI (Moscow Institute of Architecture) system node and performed the analysis of the level of surface stresses and stresses inside the nodal connector. On the basis of the fulfilled research, conclusions on the work of the nodal connector were drawn: stresses on the connector's surface do not generally exceed the conventional yield strength of steel; maximum values thereof are observed on the reference plane and at points of contact of a nut and the connector; distribution of material for the given geometry of connector turned out to be rational; it is possible to reduce the volume of steel for the nodal connector by way of changing its conceptual design, for example, having considered the issue of formation of the node out of a hollow shell.

Key words: spatial lattice structures, stress-strain state, optimal design, optimization, calculation software packages, MArchI system, computed model, SolidWorks package, CosmosWorks environment

Особенность пространственных решетчатых конструкций (ПРК) заключается в наличии узлов, в которых сходится множество элементов. Каждый из этих элементов участвует в работе по восприятию внешней нагрузки, в нем возникает внутреннее усилие, которое че-

рез узловые соединения передается фундаменту [1–5]. Таким образом, узлы воспринимают множество разнонаправленных, разновеликих усилий от примыкающих к ним элементов, поэтому работают в сложном напряженном состоянии [2, 4–13].

Традиционно изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) узловых соединений выполнялось экспериментальными методами. Наиболее распространен метод электротензометрии. Особенностью экспериментальных методов является оценка уровня напряжений только по поверхности испытуемого элемента. Однако оценить внутренние напряжения экспериментальными методами оказывается затруднительно. На практике внутренние напряжения в испытуемом элементе определяют на основании напряжений, измеренных по его поверхности. Для тонкостенных элементов этот способ дает приемлемые результаты, для массивных тел — внутренние напряжения вычисляются только приблизительно. Для массивных тел, имеющих сложную внутреннюю геометрию, например, полости и отверстия, судить о внутренних напряжениях по величине поверхностных напряжений практически невозможно.

Современные расчетные программные комплексы (РПК) позволяют выполнять оценку внутренних напряжений в моделях практически любой сложности. При анализе НДС компьютерных моделей РПК позволяют «заглянуть» внутрь, построить любое сечение с распределением уровня внутренних напряжений [6, 8, 9].

Известный прием концентрации материала в местах с повышенным уровнем напряжений и в тех участках, где требуется повышенная надежность, широко используется при проектировании ПРК. Узлы ПРК зачастую выполняются массивными, для их изготовления используются стали повышенной и высокой прочности. Таким образом на практике пытаются повысить надежность ответственных узлов, в т.ч. заложить запас по причине «неопределенности» внутренних напряжений.

Широко известные узлы пространственных конструкций Метро, Orona, Cubotto, Веймар, МАРХИ, Кисловодск имеют в своей основе полнотелый шар или многогранник с отверстиями [1, 2, 4, 9]. В перечисленных системах могут одновременно сходиться до 16 стержней. Согласно исследованиям Р.И. Хисамова, масса узлов в общей массе ПРК может составлять до 40 % [11]. При этом в соответствии с теорией оптимального проектирования конструкций узловые элементы относятся к вспомогательным элементам, в отличие от стержней, которые считаются основными элементами [14, 15]. Одним из общепринятых путей оптимизации конструкций является сокращение величины и количества вспомогательных элементов. В качестве примера удачной реализации этого принципа можно

привести конструкцию бесфасоночных ферм из гнуто-сварных профилей. У них принцип отказа от узловых коннекторов (вспомогательных элементов) реализован в максимальной степени, из-за чего вес таких ферм значительно меньше ферм с узловыми фасонками. Таким образом, снижение массы узловых коннекторов ПРК может дать максимальную экономию стали до 40 %.

Возможность снижения материалоемкости ПРК с узлами, выполненными на основе полнотелой массивной детали типа МАРХИ, авторы настоящей статьи видят в исследовании резервов несущей способности узловых коннекторов методами компьютерного моделирования. Цель исследований авторов — изучение распределения внутренних напряжений в узловом соединении МАРХИ, поиск путей снижения его материалоемкости. Для реализации поставленной цели в качестве объекта исследований был взят опорный узел пространственной конструкции системы МАРХИ, реализованной на практике (рис. 1).

Необходимые исходные данные для исследования были взяты из соответствующего проекта. Опорный узел был выбран для исследований по ряду причин. Во-первых, этот узел является наиболее нагруженным в конструкции, во-вторых, закрепление этого узла на колонне наиболее очевидно для описания граничных условий закрепления, в-третьих к опорным элементам следует предъявлять требования максимальной надежности вследствие возможного максимального ущерба при развитии прогрессирующего разрушения [16, 17].

Моделирование геометрии узла выполнялось в программном комплексе SolidWorks (рис. 2). При создании модели узла авторы стремились максимально учесть существенные особенности его конструкции: внешняя и внутренняя геометрия узлового коннектора, прилегающие муфты (гайки) и болты, разность физико-механических характеристик материалов элементов (из-за использования различных сталей). Некоторыми особенностями узлового соединения пришлось пренебречь в силу сложности их учета в модели и незначительного влияния на конечный результат. Упрощению, в частности, подверглись резьбовое соединение и условия опирания коннектора на колонну. Резьбовое соединение было заменено сплошным контактом по поверхностям болта и коннектора (контактная задача).

Опираемость коннектора на практике является относительно «свободным» (см. рис. 1), реализуемым через центратор и установку страховочных упорных уголков. Вертикальные усилия

a

b

Рис. 1. Исходные проектные данные исследуемого узла

Fig. 1. Source design data of the researched node

с коннектора на колонну передаются по нижней грани коннектора. Горизонтальные нагрузки воспринимаются силами трения, а для аварийного случая применены страховочные упорные уголки. В исследуемой модели узла отсутствовала колонна с ее конструктивными элементами — центратором, упорными уголками и пр. Опираие узла моделировалось при помощи жесткого закрепления поверхности нижней грани коннектора. Это соответствует ситуации, при которой силы трения по поверхности нижней грани коннектора удерживают возможные горизонтальные усилия, т.е. ситуации нормального режима эксплуатации.

В результате расчета модели узлового соединения в среде CosmosWorks были получены напряжения как на поверхности коннектора, так и внутри его. Комплекс позволяет выполнять произвольные

Рис. 2. Расчетная модель узлового соединения

Fig. 2. Nodal connection computed model

сечения по модели с отображением изополей напряжений, а также визуализировать участки модели с напряжениями, превышающими заданный пользователем уровень. Последняя функция удобна для вычленения и анализа участков модели с напряжениями, достигающими уровня пластических. Результаты анализа напряжений в узловом коннекторе приведены на рис. 3, 4.

Как и следовало ожидать, напряжения на поверхности коннектора не превышают условного предела текучести для материала Сталь 45, что говорит о том, что внешне коннектор почти полностью находится в упругой стадии работы. Исключением являются участки под примыкающими гайками. В собранном узле эти участки скрыты, поэтому их следует отнести к внутренним участкам для узла в сборке.

Внутри коннектора были обнаружены небольшие участки с напряжениями, превышающими условный предел текучести стали, и

даже малые участки, где напряжения превышают предел прочности стали (см. рис. 4). Последние следует отнести к так называемым «выбросам», характерным для расчета моделей с помощью программных комплексов, работающих на основе метода конечных элементов. На этих участках наблюдается известное явление: в местах приложения узловой (точечной) нагрузки и узловых закреплений (граничных условий) имеются участки с пиковыми значениями результатов расчета, которыми следует пренебречь, определяя опытным путем область достоверного решения. Участки с пиковыми напряжениями присутствуют по кромкам опорной поверхности коннектора и гайки, а также по поверхностям контакта коннектор-болт. Отбрасывая из анализируемой геометрии коннектора указанные участки, можно заключить, что весь объем массивного тела коннектора находится в области напряжений, не превышающих предел

Рис. 3. Расчетные напряжения по поверхности коннектора

Fig. 3. Calculated stresses on the connector's surface

Рис. 4. Расчетные напряжения внутри коннектора

Fig. 4. Calculated stresses inside the connector

прочности, но внутри объема имеются ограниченные участки с напряжениями, превышающими условный предел текучести стали при учете наихудших расчетных сочетаний нагрузок, принятых в рассматриваемом проекте.

Для исследуемой геометрии коннектора распределение материала по его объему оказалось рациональным. Уменьшить его массу, т.е. оптимизировать конструкцию простым уменьшением его размера, оказалось невозможным.

Распределение внутренних напряжений в массивном теле с внутренними пустотами в виде пересечения отверстий под болты имеет характерный для кристаллических структур вид. Напряжения концентрируются начиная от мест приложений усилий и по кратчайшим расстояниям перераспределяются на опору. Имеющаяся пустотность массивного тела в верхней его части (места установки болтов) вызывает концентрацию напряжений в «узких» местах. В нижней части массивного тела коннектора (ближе к опорной плоскости), где материала больше, а пустотность меньше, уровень напряженности снижается. Поверхностные участки коннектора, находящиеся на удалении границ контактов коннектор-гайка и коннектор-болт, оказываются относительно мало задействованными в силовой работе узла. Речь идет об участках ребер наружных граней многогранника коннектора. В этих местах материал может быть совсем убран, вследствие чего внешне коннектор из многогранника превращается в шар, характерный для узла «Меро» (рис. 4).

Снизить расход стали на узловой массивный коннектор возможно путем изменения его принципиальной конструкции, например, рассмотрев вопрос формирования узла в виде по-

лой шарообразной оболочки из сталей высокой прочности. При таком подходе внутренние напряжения, характерные для описываемых массивных коннекторов, будут отсутствовать вообще [18–20]. В таком случае силовые линии будут проходить по поверхности оболочки, вызывая появление только поверхностных напряжений, которые легко верифицировать с помощью метода тензометрии. Примером таких узлов могут служить системы SDC, Nodus, NS, Oktaplatte, Vestrut и др.

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы:

- напряжения по поверхности коннектора, вызванные сочетанием расчетных нагрузок, в основном не превышают предела условной текучести стали;
- максимальные напряжения на поверхности коннектора наблюдаются на опорной плоскости и в местах контакта гайки и коннектора, т.е. под гайками;
- внутри коннектора были обнаружены небольшие участки с напряжениями, превышающими предел условной текучести стали;
- области с высокими внутренними напряжениями расположены в местах контакта болта и коннектора (область резьбового соединения) и внутри коннектора в местах пересечения отверстий под болты;
- для исследуемой геометрии коннектора распределение материала оказалось рациональным, уменьшить его массу простым снижением его размера невозможно;
- снизить расход стали на узловой коннектор возможно путем изменения его принципиальной конструкции, например, рассмотрев вопрос формирования узла из поллой оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холопов И.С., Бальзанников М.И., Алпатов В.Ю. Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28 (47). С. 225–232.
2. Трофимов В.Н., Бегун Г.Б. Структурные конструкции : исследование, расчет и проектирование. М. : Стройиздат, 1972. 272 с.
3. Холопов И.С., Алпатов В.Ю., Мочальников В.Н., Моисеев Н.Н., Вецин В.Ю. Опыт применения пространственных стержневых металлических конструкций типа структур в строительстве // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Самара, 24–26 сентября 2002 г.). Самара : СамГАСА. 2002. С. 199–206.
4. Файбищенко В.К. Металлические перекрестно-стержневые пространственные конструкции покрытий. М. : ВНИИТПИ, 1990. 83 с.
5. Perelmuter A., Yurchenko V. On the issue of structural analysis of spatial systems from thin-walled bars with open profiles // Металлические конструкции. 2014. Т. 20. № 3. С. 179–190.
6. Алпатов В.Ю., Холопов И.С., Соловьев А.В. Численные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния узла пространственной решетчатой конструкции с использованием нескольких САПР // Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитек-

туре : сб. ст. Междунар. конф. Липецк : ЛГТУ, 2009. С. 122–127.

7. *Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Роменский И.В., Муцанов А.В.* Влияние геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия на прямоугольном плане // *Металлические конструкции*. 2015. Т. 21. № 4. С. 191–206.

8. *Шалобыта Н.Н., Драган В.И.* Экспериментальное исследование несущей способности узлов структурных конструкций системы «БрГТУ» // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. 2008. № 1 (49). С. 94–102.

9. *Бузало Н.А., Алексеев С.А., Царитова Н.Г.* Применение программных комплексов для компьютерного моделирования узлов пространственных стержневых конструкций // *Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Ростов-на-Дону, 18–19 декабря 2014 г.)*. Ростов-н/Д. : ДГТУ, 2014. С. 215–216.

10. *Муцанов А.В., Муцанов В.Ф., Роменский И.В.* Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 2 (41). С. 18–29.

11. *Хисамов Р.И., Исаева Л.А.* Определение технико-экономических показателей структурных покрытий. Казань : КазИСИ, 1979. 80 с.

12. *Bondarev A., Yugov A.* The method of generating large — span rod systems with the manufacturer defect and assembly sequence // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. Pp. 948–958.

13. *Rosen A., Sabag M., Givoli M.* A general non-linear structural model of a multirod (multibeam) system — I. Theoretical derivations // *Computers & Structures*. 1996. Vol. 61. Issue 4. Pp. 617–632.

14. *Мажид К.И.* Оптимальное проектирование конструкций / пер. с англ. В.И. Дорофеева ; под ред. М.А. Колтунова. М. : Высшая школа, 1979. 239 с.

15. *Алпатов В.Ю.* Оптимальное проектирование металлических структур : дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2002. 270 с.

16. *Алпатов В.Ю., Лукин А.О., Петров С.М.* Учет требований устойчивости к развитию прогрессирующего разрушения при оптимальном проектировании металлических структурных покрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 3. С. 47–51.

17. *Гордеева Т.Е., Беломытцева Н.С.* Влияние конструктивной схемы здания на развитие прогрессирующих обрушений // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность : сб. ст. по материалам 72-й Всеросс. науч.-техн. конф. (г. Самара, 06 апреля–10 октября 2015 г.)*. Самара : СГАСУ, 2015. С. 406–410.

18. Пат. 2467133 RU, МПК E04B 1/58. Узловое соединение тонкостенных стержней пространственной конструкции / А.В. Тур, В.И. Тур, И.С. Холопов ; патентообл. УлГТУ. № 2011107494/03 ; заявл. 25.02.2011 ; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32.

19. Пат. 2468157 RU, МПК E04B 1/58. Узловое соединение стержней пространственной конструкции / С.А. Селин, А.В. Тур, В.И. Тур ; патентообл. УлГТУ. № 2011123836/03 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.

20. *Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В.* Исследование напряженно-деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012. № 4. С. 104–111.

Поступила в редакцию в октябре 2016 г.

Об авторах : **Алпатов Вадим Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, **Архитектурно-строительный институт, Самарский государственный технический университет (АСИ СамГТУ)**, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194, 8 (846) 339-14-65, avu75@mail.ru;

Жученко Дмитрий Игоревич — аспирант кафедры строительных конструкций, **Архитектурно-строительный институт, Самарский государственный технический университет (АСИ СамГТУ)**, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194, zagzag1094@gmail.com;

Лукин Алексей Олегович — ассистент кафедры сопротивления материалов и строительной механики, **Архитектурно-строительный институт, Самарский государственный технический университет (АСИ СамГТУ)**, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194, 8 (846) 339-14-30, a.o.lukin@rambler.ru.

Для цитирования : *Алпатов В.Ю., Жученко Д.И., Лукин А.О.* Исследование узлового коннектора пространственной конструкции, выполненного из массивной детали // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 2 (101). С. 142–149. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.142-149

REFERENCES

1. Kholopov I.S., Bal'zannikov M.I., Alpatov V.Yu. Primenenie reshetchatykh prostranstvennykh metallicheskih konstruktсий v pokrytiyakh mashinnykh zalov GES [Use of Lattice Spatial Metallic Structures in Roofs of HPP Main Generator Halls]. *Vestnik Volgogradskogo*

gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2012, issue 28 (47), pp. 225–232. (In Russian)

2. Trofimov V.N., Begun G.B. *Strukturnye konstrukt-sii : issledovanie, raschet i proektirovanie* [Structural Designs : Study, Calculation and Designing]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 272 p. (In Russian)

3. Kholopov I.S., Alpatov V.Yu., Mochal'nikov V.N., Moiseev N.N., Veshhin V.Yu. Opyt primeneniya prostranstvennykh sterzhnevyykh metallicheskiykh konstrukt-siy tipa struktur v stroitel'stve [Experience of Application of Spatial Frame Metallic Constructions of Structure Type in Civil Engineering]. *Sovremennyye problemy sovershenstvovaniya i razvitiya metallicheskiykh, derevyannykh, plastmassovykh konstrukt-siy v stroitel'stve i na transporte : sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (g. Samara, 24–26 sentyabrya 2002 g.)* [Modern Issues of Improvement and Development of Metallic, Wooden, Plastic Structures in Construction and in Transport : Collection of Scientific Papers, International Scientific and Technical Conference (City of Samara, September, 24–26, 2002)]. Samara, SamGASA Publ., 2002, pp. 199–206. (In Russian)

4. Faybishenko V.K. *Metallicheskie perekrestno-sterzhnevyye prostranstvennyye konstrukt-sii pokrytiy* [Metallic Grid Spatial Structures of Roofs]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1990, 83 p. (In Russian)

5. Perelmutter A., Yurchenko V. On the issue of structural analysis of spatial systems from thin-walled bars with open profiles. *Metallicheskie konstrukt-sii* [Metal Constructions Journal], 2014, vol. 20, no. 3, pp. 179–190.

6. Alpatov V.Yu., Kholopov I.S., Solov'ev A.V. Chislennyye eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzla prostranstvennoy reshetchatoy konstrukt-sii s ispol'zovaniem neskol'kikh SAPR [Numerical Experimental Studies of Stress-Strain State of the Node of a Spatial Lattice Structure with the Use of Several CAD Systems]. *Effektivnyye konstrukt-sii, materialy i tekhnologii v stroitel'stve i arkhitekture : sbornik statey mezhdunarodnoy konferentsii* [Effective Structures, Materials and Technologies in Construction and Architecture : Collection of Articles, International Conference]. Lipetsk, LGTU Publ., 2009, pp. 122–127. (In Russian)

7. Gorokhov E.V., Mushchanov V.F., Romenskiy I.V., Mushchanov A.V. Vliyaniye geometricheskikh parametrov na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye strukturnogo pokrytiya na pryamougol'nom plane [Influence of Geometrical Parameters on Stress-Strain State of Structural Roof on a Rectangular Plan]. *Metallicheskie konstrukt-sii* [Metal Constructions Journal], 2015, vol. 21, no. 4, pp. 191–206. (In Russian)

8. Shalobyta N.N., Dragan V.I. Eksperimental'noye issledovanie nesushchey sposobnosti uzlov strukturnykh konstrukt-siy sistemy «BrGTU» [Experimental study of Bearing Capacity of Nodes of the «BrGTU» System Structural Designs]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* ["Vestnik Brestskogo Universiteta" Academic Journal. Construction and Architecture]. 2008, no. 1 (49), pp. 94–102. (In Russian)

9. Buzalo N.A., Alekseev S.A., Tsaritova N.G. Primenenie programnykh kompleksov dlya komp'yuternogo modelirovaniya uzlov prostranstvennykh sterzhnevyykh konstrukt-siy [Application of Software Systems for Computer Simulation of Nodes of Spatial Frame Structures]. *Stroitel'stvo-2014: sovremennyye problemy promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Rostov-na-Donu, 18–19 dekabrya 2014 g.)* [Construction-2014 : Modern Issues of Industrial and Civil Engineering :

Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (City of Rostov-on-Don, December, 18–19, 2014)]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2014, pp. 215–216. (In Russian)

10. Mushchanov A.V., Mushchanov V.F., Romenskiy I.V. Ratsional'nye geometricheskie i zhestkostnyye parametry bol'sheproletnogo strukturnogo pokrytiya [Rational Geometrical and Rigidity Parameters of Large Span Structural Roof]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2016, no. 2 (41), pp. 18–29. (In Russian)

11. Khisamov R.I., Isaeva L.A. *Opreделение tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley strukturnykh pokrytiy* [Determination of Technical and Economic Indicators of Structural Roofs]. Kazan', KazISI Publ., 1979, 80 p. (In Russian)

12. Bondarev A., Yugov A. The Method of Generating Large — Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 117, pp. 948–958.

13. Rosen A., Sabag M., Givoli M. A General Nonlinear Structural Model of a Multirod (Multibeam) System — I. Theoretical derivations. *Computers & Structures*. 1996, vol. 61, issue 4, pp. 617–632.

14. Majid K. I. Optimum design of structures. John Wiley & Sons, Inc., 1974, Technology & Engineering, 264 p.

15. Alpatov V.Yu. *Optimal'noye proektirovanie metallicheskiykh struktur : dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Optimal Design of Metallic Structures : Thesis ... of Candidate of Technical Sciences]. Samara, 2002, 270 p. (In Russian)

16. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Petrov S.M. Uchet trebovaniy ustoychivosti k razvitiyu progressiruyushchego razrusheniya pri optimal'nom proektirovanii metallicheskiykh strukturnykh pokrytiy [Traceability to the Requirements for Progressive Failure Development Resistance at the Optimal Design of Metallic Structural Roofs]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 47–51. (In Russian)

17. Gordeeva T.E., Belomytseva N.S. Vliyaniye konstruktivnoy skhemy zdaniya na razvitiye progressiruyushchikh obrusheniy [Influence of a Building Structural Diagram on Progressive Collapse Development]. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Estestvennyye nauki i tekhnosfernaya bezopasnost' : sbornik statey po materialam 72 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (g. Samara, 06 aprelya–10 oktyabrya 2015 g.)* [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Natural Sciences and Technosphere Safety : Collection of Articles on Proceedings of the 72nd All-Russia Scientific and Technical Conference (City of Samara, April, 06 – October, 10, 2015)]. Samara, SGASU Publ., 2015, pp. 406–410. (In Russian)

18. Tur A.V. Patent No. 2467133 RU, MPK E04B 1/58. Uzlovoe soedineniye tonkostennykh sterzhney prostranstvennoy konstrukt-sii [Patent No. 2467133 RU, MPK E04B 1/58. Nodal Connection of Thin-Walled Bars of Spatial Structure]. Patent holder UIGTU, No. 2011107494/03, appl. 25.02.2011, publ. 20.11.2012, bulletin no. 32. (In Russian)

19. Selin S.A. Patent No. 2468157 RU, MPK E04B 1/58. Uzlovoe soedineniye sterzhney prostranstvennoy konstrukt-sii [Patent No. 2468157 RU, MPK E04B 1/58. Nodal Connection of Bars of Spatial Structure]. Patent holder UIGTU, No. 2011123836/03 ; appl. 10.06.2011, publ. 27.11.2012, bulletin no. 33. (In Russian)

20. Kholopov I.S., Tur V.I., Tur A.V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlovogo soedineniya setchatogo kupola [Research of the Grid Dome Nodal Connection Stress-Strain State]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012, no. 4, pp. 104–111. (In Russian)

Received in October, 2016.

About the authors: **Alpatov Vadim Yur'evich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal and Timber Structures, **Architecture and Civil Engineering Institute of Samara State Technical University (ACEI SSTU)**, 194 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001, Russian Federation; +7 (846)339-14-65; avu75@mail.ru;

Zhuchenko Dmitriy Igorevich — postgraduate student, Department of Building Structures, **Architecture and Civil Engineering Institute of Samara State Technical University (ACEI SSTU)**, 194 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001, Russian Federation; zagzag1094@gmail.com;

Lukin Aleksey Olegovich — Assistant Lecturer, Department of Mechanics of Materials and Structural Engineering Mechanics, **Architecture and Civil Engineering Institute of Samara State Technical University (ACEI SSTU)**, 194 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001, Russian Federation; +7 (846)339-14-30; a.o.lukin@rambler.ru.

For citation: Alpatov V.Ju., Zhuchenko D.I., Lukin A.O. Issledovanie uzlovogo konnektora prostranstvennoy konstruksii, vpolnennogo iz massivnoy detali [Research of the Spatial Structure Node Connector Made of a Massive Component]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 2 (101), pp. 142–149. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.142-149