

Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 624.014.2(043.3)

ГЛУШКО

Константин Константинович

**УСТОЙЧИВОСТЬ ФОРМЫ СТАЛЬНЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ
СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ С ЖЁСТКИМИ УЗЛАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности

05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Брест, 2019

Работа выполнена в учреждении образования «Брестский государственный технический университет»

Научный руководитель

Драган Вячеслав Игнатьевич

кандидат технических наук, доцент, первый проректор Учреждения образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Официальные оппоненты:

Босаков Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «БелНИИС», г. Минск

Мартынов Юрий Семёнович, кандидат технических наук, профессор, г. Минск

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Защита состоится «14» июня 2019 г. в 13⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при Учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 1/323.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять по адресу: 224017, Республика Беларусь г. Брест, ул. Московская, 267, БрГТУ, на имя ученого секретаря совета по защите диссертаций Д 02.09.01, тел.: +375 162 40 60 87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан «___» мая 2019 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

В. Л. Шевчук

ВВЕДЕНИЕ

Однослойные сетчатые купола имеют высокую архитектурную выразительность и являются одними из самых эффективных пространственных конструкций, которые способны перекрывать большие пролёты с минимальным расходом материалов. Значительными их преимуществами являются также высокая жёсткость, стандартизация отдельных элементов и эстетические качества. Широкому распространению этих сооружений в практике строительства препятствует относительно малая изученность их поведения под нагрузкой и сложность оценки отдельных видов их устойчивости.

Особенностью однослойных сетчатых куполов является склонность к явному геометрически нелинейному деформированию при действии внешней нагрузки. Один из видов потери устойчивости формы, сопровождающийся геометрически нелинейным процессом деформирования, проявляется в продавливании к центру кривизны описанной сферы отдельных узлов. Это явление связано с некоторым укорочением стержней, в результате чего внешняя нагрузка не может быть воспринята с сохранением выпуклой формы отдельных стержневых многогранников, образующих сетчатый купол.

В основе известных аналитических решений, описывающих это явление, использованы два подхода, один из которых основан на применении континуальной модели, а второй – на рассмотрении напряжённо-деформированного состояния изолированных стержневых многогранников. В последнем подходе часто отсутствует учёт напряжённо-деформированного состояния стержней однослойных сетчатых куполов, смежных с рассматриваемым фрагментом. Вместе с тем, недостаточно полно изучено влияние начальных несовершенств формы однослойных сетчатых куполов на величину критической узловой нагрузки.

При использовании численных методов необходимо обращать внимание на точность полученного решения и его сходимость. Отсутствие в широко распространённых программных комплексах для расчёта зданий и сооружений критериев достижения критической узловой нагрузки препятствует их широкому применению.

Вопрос об устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами в виде продавливания их отдельных узлов в настоящее время является мало изученным, существующие решения имеют ряд несовершенств, что ограничивает практическое применение таких конструкций. Из этого следует, что разработка методики проверки устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами в виде продавливания их узлов является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

В основу диссертационной работы положены материалы исследований, проведённых в рамках программ:

- «Строительные материалы и технологии» «Разработка новых эффективных большепролётных металлических конструкций системы «БрГТУ» и методики оценки их надёжности на стадии проектирования» (№ госрегистрации 20142165);
- «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» «Разработка систем комплексного научно-технического сопровождения проектирования и эксплуатации большепролётных металлических структурных конструкций системы «БрГТУ» (№ госрегистрации 20163676).

Цель и задачи исследований

Цель работы: разработать научно обоснованную методику проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

Основные задачи исследования:

- выполнить анализ влияния геометрических параметров стержневых многогранников, образующих стальные однослойные сетчатые купола с жёсткими узлами, и геометрических характеристик поперечных сечений стержней на величину критической узловой нагрузки;
- определить зависимости, позволяющие описать геометрически нелинейное изменение напряжённо-деформированного состояния стержневых многогранников, образующих стальные однослойные сетчатые купола с жёстким узлами;
- разработать новые конструктивные решения узлов, позволяющих повысить технологичность сборки и упростить монтаж стальных однослойных сетчатых конструкций, а также определить величины их жесткостей;
- выполнить верификацию предложенной методики на основании экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния крупноразмерных фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами при действии внешней узловой нагрузки.

Объект исследования: стальной однослойный сетчатый купол с жёсткими узлами, образованный из стержневых многогранников.

Предмет исследования: устойчивость формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

Научная новизна

– Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены зависимости, описывающие геометрически нелинейное изменение напряжённо-деформированного состояния стержневых многогранников, образующих стальные однослойные сетчатые купола с жёсткими узлами, которые составлены с учётом продольно-поперечного изгиба их стержней и начальных геометрических несовершенств формы.

– Разработаны новые конструктивные решения узлов в виде полых стальных шаров, позволяющих соединять стержни стальных однослойных сетчатых конструкций сложной формы, экспериментально определены величины их жесткостей, которые могут быть использованы в качестве критериальных при классификации узлов по жёсткости и при проектировании стальных однослойных сетчатых конструкций.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами, основанная на аналитических зависимостях, описывающих геометрически нелинейное деформирование образующих их стержневых многогранников, продольно-поперечный изгиб стержней, влияние начальных геометрических несовершенств формы.

2. Конструктивные решения узлов с использованием полых стальных шаров, позволяющих повысить технологичность сборки и упростить монтаж стальных однослойных сетчатых конструкций, обеспечить сложную пространственную ориентацию их стержней.

3. Экспериментально полученные величины жесткостей узлов в виде полых стальных шаров, которые могут быть использованы для классификации их по жёсткости и для точного определения напряжённо-деформированного состояния стальных однослойных сетчатых конструкций.

4. Результаты экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния одноярусного и двухъярусного фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов.

Личный вклад соискателя

Положения, выносимые на защиту, результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. Научный руководитель к.т.н., доцент В. И. Драган принимал участие в обсуждении цели и задач исследований, анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований доложены автором на следующих научных собраниях:

– XX Международный научно-методический семинар «Инновационные перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», Гродно, 17 – 19 февраля 2016 г.

– I Международная конференция «Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте», Белосток, 22 – 23 июня 2016 г.

– Международная научно-техническая конференция «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования», Брест, 30 – 31 марта 2017 г.

– II Международная конференция «Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте», Брест, 27 октября 2017 г.

– II Международная научно-техническая конференция «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования», Брест, 29 – 30 марта 2018 г.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них:

– 4 статьи в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь, общий объём 1,6 авторских листа;

– 8 статей в сборниках научных докладов и конференций, общий объём 2,94 авторских листа;

– 4 патента на полезные модели.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит разделы: Введение, Общая характеристика работы, 4 главы основной части, Заключение, Библиографический список (117 наименований), 5 приложений. Общий объём диссертации 202 страницы, библиографический список составляет 11 страниц. Работа содержит 60 рисунков на 32 страницах, 4 таблицы на 1 странице, 5 приложений на 74 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе даётся анализ факторов, влияющих на величину критической узловой нагрузки, вызывающей потерю устойчивости формы однослойных сетчатых куполов в виде продавливания их узлов к центру описанной сферы.

Важнейшей и наиболее ответственной стадией проектирования однослойных сетчатых куполов является построение их геометрических схем. Разработкой методов формообразования таких конструкций занимались *R.B. Fuller*, М. С. Туполев, В. А. Савельев, Г. Н. Колесников, А. Н. Косолапов и другие. Наряду с предложенными ими методами используются методы Чебышева, локсодром, сдваивания и деления, проецирования и метод Кайвитта. Установлено, что вне зависимости от выбранного метода построения геометрических схем однослойных сетчатых куполов их стержневые сети могут образовывать близкие к правильным пятиугольные и шестиугольные в плане выпуклые стержневые многогранники.

Соответствие действительного и расчётного напряжённо-деформированного состояния однослойных сетчатых конструкций при действии внешней узловой нагрузки в значительной мере зависит от конструкций и жесткостей узлов. Наиболее часто применяются соединения стержней трёх типов: при помощи сварки без использования узловых элементов, при помощи сварки с использованием узловых элементов, на болтах посредством узловых элементов. Соединения стержней при помощи сварки как с использованием, так и без использования узловых элементов обладают наименьшей конструктивной податливостью, обеспечивают наилучшую передачу внутренних усилий, но в то же время трудоёмки в исполнении и требуют соблюдения малых допусков, а также содержат большое количество монтажной сварки. К этим группам соединений относятся узлы систем «Октаплатт», «ЦНИИСК», SDC, LDS. Болтовое соединение стержней посредством узла хорошо обеспечивает передачу осевых усилий, но часто обладает некоторой конструктивной податливостью. В результате анализа существующих узловых соединений установлено, что они во многом определяют особенности статической работы однослойных сетчатых куполов под нагрузкой, технологичность монтажа и возможность сборки.

Существующие методики проверки устойчивости формы однослойных сетчатых куполов наиболее часто основаны на аналитических и численных методах расчёта. Разработкой методик, содержащих в себе аналитическое решение, занимались *K. Klöppel*, *R. Schardt*, *D. Wright*, В. А. Савельев, А. А. Журавлёв, *T. Suzuki*, *T. Ogawa*, *K. Ikarashi*, *M. Saitoh*, *Y. Hangai*, *I. Toda*, *T. Yamagiwa*, *T. Okuhara* и другие. Анализ результатов их исследований позволил установить, что наиболее существенное влияние на величину критической узловой нагрузки, вызывающей продавливание к центру кривизны описанной поверхности узлов однослойных сетчатых куполов, имеют такие факторы, как: методы формообразования, начальные геометрические несовершенства формы, геометрические характеристики поперечных сечений стержней, жёсткости узлов.

Наряду с разработкой аналитических методов совершенствовались численные методы расчёта. Их применение позволило снизить трудоёмкость расчётов и уменьшить количество дополнительных математических упрощений, рассмотреть

напряжённно-деформированное состояние стальных однослойных сетчатых куполов более полно. Разработкой численных методов расчёта занимались *V. Gioncu, A. Lopez, S. Kato, K. Abedi* и другие. Авторами отмечено, что при решении задач немонотонного характера следует уделять внимание повышению точности решения и использовать алгоритмы, улучшающие его сходимость. В силу немногочисленности экспериментальных исследований не всегда удаётся произвести верификацию полученных методик. Отсутствие критериев наступления потери устойчивости формы однослойных сетчатых куполов в используемых конечно-элементных программных комплексах усложняет их использование.

Несмотря на широкое развитие численных методов, аналитические методы по-прежнему остаются актуальны из-за своей простоты и однозначности решений. Развитие систем компьютерной математики позволяет уменьшить количество математических упрощений, снижающих точность аналитических методов, увеличить количество наиболее значимых переменных на стадии формализации и построения математической модели.

В результате анализа существующих подходов к решению задачи потери устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами отдано предпочтение разработке методики проверки устойчивости их формы, основанной на аналитических зависимостях, учитывающих геометрически нелинейное деформирование образующих их стержневых многогранников, продольно-поперечный изгиб стержней, влияние начальных геометрических несовершенств формы.

Во второй главе произведена разработка методики проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами, проявляющейся в продавливании их узлов к центру кривизны описанной поверхности.

Рассмотрены трёхъярусный и двухъярусный однослойные сетчатые купола, планы и меридиональные сечения которых изображены на рисунках 1а и 1б. с целью сравнения геометрически нелинейных процессов деформирования их верхних стержневых многогранников: для определения необходимого и достаточного для точного решения рассматриваемой задачи количества переменных величин перемещений узлов различных ярусов.

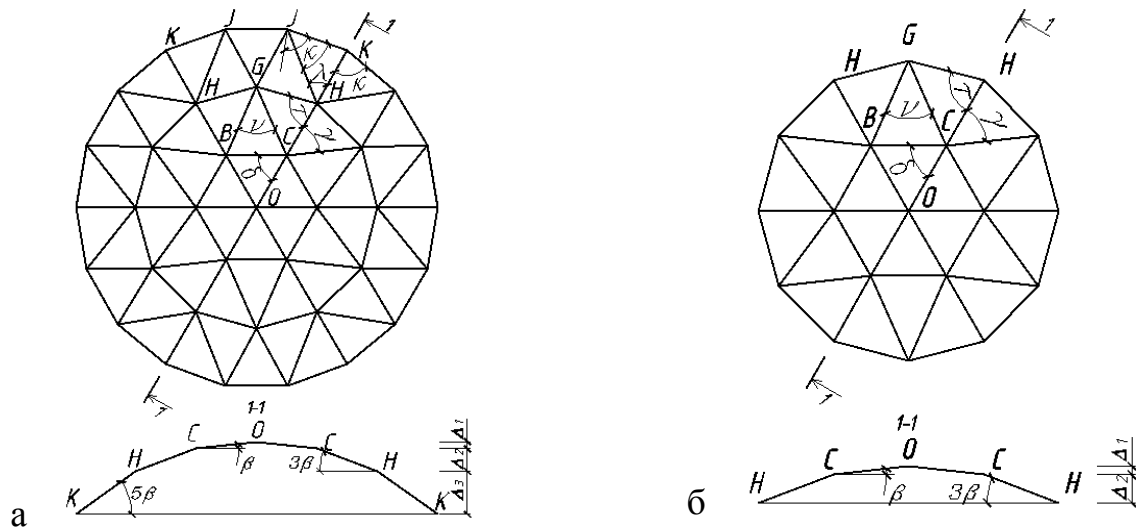


Рисунок 1. – Планы и меридиональные сечения трёхъярусного (а) и двухъярусного (б) однослойных сетчатых куполов

В основе предложенной методики заложено соблюдение равновесия между внешней узловой нагрузкой и внутренними усилиями в стержнях, спроецированными на ось её действия. Изменение внутренних усилий в стержнях описывается при помощи зависимостей от перемещений узлов однослойных сетчатых куполов, величины которых полагаются переменными.

При определении внутренних усилий в стержнях в радиальных плоскостях от перемещений узлов рассматриваемых однослойных сетчатых куполов использованы следующие допущения:

- 1) форма равновесия симметрична, вертикально действующая внешняя нагрузка, приложенная к узлам трёх- и двухъярусных однослойных сетчатых куполов, является осесимметричной;
- 2) длины стержней могут быть приняты одинаковыми;
- 3) моменты инерции и площади поперечных сечений стержней одинаковы;
- 4) деформирование стержней полагается линейно-упругим;
- 5) форма изгиба стержня принимается плоской в силу симметрии задачи;
- 6) влиянием податливостей и размерами узлов на напряжённо-деформированное состояние однослойных сетчатых куполов можно пренебречь;
- 7) воздействия на однослойные сетчатые купола являются силовыми;
- 8) стержни кольцевых направлений горизонтальны;
- 9) радиальные плоскости, проходящие через ось либо хорду стержня и центр сферы, описанной вокруг рассматриваемых трёх- и двухъярусных стальных однослойных сетчатых куполов, могут быть приняты вертикальными;
- 10) в силу малости углов наклона рассматриваемых стержней к горизонтальным плоскостям принято, что направление действия поперечных сил в стержнях является вертикальным.

Для оценки величины критической нагрузки, вызывающей потерю устойчивости формы однослойного сетчатого купола, введено значение эквивалентной гибкости стержневого многогранника

$$n = \sqrt{\frac{l^2 \beta^2 EA}{EI}} = \frac{\beta \cdot l}{i} = \frac{\Delta_1}{i}, \quad (1)$$

где l – длина стержня;

β – угол между горизонтальной плоскостью и осью стержня рассматриваемого стержневого многогранника в исходном состоянии;

E – модуль упругости стали;

I – момент инерции поперечного сечения стержня в вертикальной плоскости;

A – площадь поперечного сечения стержня;

Δ_1 – стрела подъема стержневого многогранника;

i – радиус инерции поперечного сечения стержня в вертикальной плоскости.

Соотнося вертикальные проекции внутренних усилий и величин узловых нагрузок, можно определить взаимосвязь между величинами параметров перемещений узлов:

$$\begin{cases} \frac{P_C}{P_O} = \frac{3(\bar{\varepsilon}_{CH} + 2\bar{\varepsilon}_{CG})(1-\eta) - \bar{\varepsilon}_{OC}(1-\chi) + \bar{V}_{OC} - \bar{V}_{CH} - 2\bar{V}_{CG}}{k(\bar{\varepsilon}_{OC}(1-\chi) - \bar{V}_{OC})}; \\ \frac{P_H}{P_O} = \frac{5(\bar{\varepsilon}_{HK} + 2\bar{\varepsilon}_{HJ})(1-\xi) - 3\bar{\varepsilon}_{CH}(1-\eta) + \bar{V}_{CH} - \bar{V}_{HK} - 2\bar{V}_{HJ}}{k(\bar{\varepsilon}_{OC}(1-\chi) - \bar{V}_{OC})}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – безразмерный параметр осевой силы;

\bar{V} – безразмерный параметр поперечной силы;

k – число стержней, соединяемых в верхнем узле;

χ , η , ξ – безразмерные параметры перемещений узлов первого, второго и третьего яруса, численно равные отношению вертикального перемещения одного конца стержня относительно другого к полной высоте яруса в проектном положении.

Решение системы нелинейных уравнений (2) производилось относительно параметров перемещений η и ξ , для заданных параметров перемещений верхнего узла χ , величин эквивалентной гибкости n и величин соотношений нагрузок в соседних и рассматриваемом узлах. Значение нагрузки в верхнем узле принималось равным по величине значениям нагрузки в остальных узлах либо превышало эти значения. На этом этапе наличие начальных геометрических несовершенств формы и влияние продольно-поперечного изгиба в стержнях не учитывалось. Найденные параметры перемещений узлов третьего яруса ξ малы по сравнению с единицей и вызывают

практически линейные приращения величин внутренних усилий в стержнях и, как следствие, величин внешней узловой нагрузки при принятых значениях квадрата эквивалентной гибкости $1 \leq n^2 \leq 40$. При сравнении значений внешней нагрузки в верхнем узле как результата суммы вертикальных проекций внутренних усилий в стержнях верхнего стержневого многогранника было установлено, что увеличение числа ярусов более двух практически не сказывается на точности расчёта. Таким образом, в загруженной части однослойного сетчатого купола можно выделить двухъярусный фрагмент, нагрузка на узлы которого может быть принята осесимметричной и перпендикулярной его основанию без значительной погрешности. Величины критических узловых нагрузок, вызывающих продавливание к центру кривизны описанной сферы узлов однослойных сетчатых куполов, будут соответствовать величинам критических узловых нагрузок, вызывающих продавливание к центру кривизны описанной сферы центральных узлов двухъярусных однослойных сетчатых куполов. Геометрические характеристики поперечных сечений стержней в двухъярусном однослойном сетчатом куполе и однослойном сетчатом куполе с большим числом ярусов, а также соответствующие геометрические характеристики образующих их стержневых многогранников должны быть одинаковыми.

Наличие начальных геометрических несовершенств формы ведёт к изменению расчётной схемы однослойных сетчатых куполов, а также к изменению величин критических узловых нагрузок, вызывающих потерю устойчивости их формы. В большинстве методов построения геометрических схем однослойных сетчатых куполов, содержащих первоначальное разбиение стержней меридионального направления на отрезки равной длины, высота верхнего яруса, как правило, в три раза меньше высоты нижележащего яруса. Начальные геометрические несовершенства формы осесимметричного характера учтены при помощи коэффициента m , показывающего величину отклонения отношения высот верхнего и нижележащего ярусов от $1/3$ для однослойных сетчатых сферических куполов. Значения $m < 1$ соответствуют более выпуклой форме верхнего стержневого многогранника, $m > 1$ – более пологой форме. Изменение безразмерных параметров поперечных сил на концах стержней описывается при помощи следующих уравнений с учётом продольно-поперечного изгиба:

$$\bar{V}_C^{OC} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{OC}) \chi + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{OC}) \Theta_C; \quad (3)$$

$$\bar{V}_B^{BC} = 0; \quad (4)$$

$$\bar{V}_C^{CH} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CH}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CH}) (\Theta_C + \Theta_H); \quad (5)$$

$$\bar{V}_C^{CG} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CG}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CG}) (\Theta_C \cos \gamma + \Theta_H \cos 0,5\gamma), \quad (6)$$

где Θ_C – параметр угла поворота узла C :

$$\Theta_C = \frac{F(\chi, \eta)}{\Phi(\chi, \eta)}, \quad (7)$$

где числитель и знаменатель $F(\chi, \eta)$ и $\Phi(\chi, \eta)$ могут быть записаны в следующем виде:

$$F(\chi, \eta) = 3\chi\varphi_4(u_{OC}) + 9\eta m(\varphi_4(u_{CH}) + 2\varphi_4(u_{CG})\cos\gamma) - \eta m(B_H\varphi_3(u_{CH}) + 2B_G\varphi_3(u_{CG})\cos\gamma\cos 0,5\nu); \quad (8)$$

$$\Phi(\chi, \eta) = 2(\varphi_2(u_{CH}) + \varphi_2(u_{OC})) + A_H\varphi_3(u_{CH}) + 2\cos^2\delta(2\varphi_2(u_{BC}) - \varphi_3(u_{BC})) + 2\cos\gamma(2\varphi_2(u_{CG})\cos\gamma + A_G\varphi_3(u_{CG})\cos 0,5\nu), \quad (9)$$

где $\varphi_2(u)$, $\varphi_3(u)$, $\varphi_4(u)$, $\eta_2(u)$ – функции параметра осевой силы, учитывающие её влияние на величины изгибных деформаций стержней, поскольку эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в стержнях имеют криволинейное очертание.

Величина u в этих формулах выражается следующим образом:

$$u = l\sqrt{\frac{N}{EI}} = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon}\beta^2 l^2 EA}{EI}} = n\sqrt{\bar{\varepsilon}}. \quad (10)$$

Параметры углов поворота узлов G и H можно определить из выражений:

$$\Theta_H = A_H\Theta_C + \eta \cdot B_H; \quad (11)$$

$$\Theta_G = A_G\Theta_C + \eta \cdot B_G, \quad (12)$$

где величины A_H , A_G , B_H , B_G можно записать в виде следующих выражений с учётом начальных геометрических несовершенств формы:

$$A_H = -\frac{\cos^2\tau(\varphi_3(u_{CG})\cos(\gamma)\cos 0,5\nu + \varphi_3(u_{CH})) + \varphi_2(u_{CG})\varphi_3(u_{CH})\cos^2 0,5\nu}{Z_H}; \quad (13)$$

$$B_H = m \cdot 9 \frac{\cos^2\tau(\varphi_4(u_{CG})\cos 0,5\nu + \varphi_4(u_{CH})) + \varphi_2(u_{CG})\varphi_4(u_{CH})\cos^2 0,5\nu}{Z_H}; \quad (14)$$

$$A_G = -\frac{\cos^2\tau(4\varphi_3(u_{CG})\cos\gamma \cdot \cos 0,5\nu + \varphi_3(u_{CH}))}{Z_G} - \frac{2\varphi_2(u_{CH})\varphi_3(u_{CG})\cos 0,5\nu \cdot \cos\gamma}{Z_G}; \quad (15)$$

$$B_G = m \cdot 9 \frac{\cos^2 \tau (4\varphi_4(u_{CG}) \cos 0,5\nu + \varphi_4(u_{CH})) + 2\varphi_2(u_{CH})\varphi_4(u_{CG}) \cos 0,5\nu}{Z_G}. \quad (16)$$

Знаменатели Z_H , Z_G в выражениях (13) – (16) определяются из следующих выражений:

$$Z_H = \cos^2 \tau (4\varphi_2(u_{CG}) \cos^2 0,5\nu + 2\varphi_2(u_{CH}) + 3\cos^2(\tau)) + 2\varphi_2(u_{CG})\varphi_2(u_{CH}) \cos^2 0,5\nu; \quad (17)$$

$$Z_G = 2Z_H. \quad (18)$$

Величины параметров осевых сил, стоящих в уравнениях (2) и (10), могут быть определены при помощи выражений:

$$\bar{\varepsilon}_{OC} = \chi(1 - 0,5\chi) + 0,5 \cdot \bar{\varepsilon}_{BC} \sec \delta; \quad (19)$$

$$\bar{\varepsilon}_{CH} = \frac{4 \cos^2 \tau}{1 + 4 \cos^2 \tau} (9\eta m^2 (1 - 0,5\eta) - 0,5 \bar{\varepsilon}_{BC} \sec \delta); \quad (20)$$

$$\bar{\varepsilon}_{CG} = 0,5 \cdot \bar{\varepsilon}_{CH} \sec 0,5\nu; \quad (21)$$

$$\bar{\varepsilon}_{BC} = 2 \cos \delta \frac{\chi(1 - 0,5\chi)(1 + 4 \cos^2 \tau) + 36\eta \cdot m^2 \cdot (1 - 0,5\eta) \cos^2 \tau (1 + \cos \gamma \cdot \sec 0,5\nu)}{(1 + 4 \cos^2 \tau)(1 + 4 \cos^2 \delta) + 4 \cos^2 \tau (1 + \cos \gamma \cdot \sec 0,5\nu)}, \quad (22)$$

где δ , γ , ν – углы между стержнями в плане.

Взаимосвязь между параметрами перемещений χ и η в двухъярусном однослойном сетчатом куполе с учётом начальных геометрических несовершенств формы устанавливается при помощи следующего уравнения:

$$\frac{P_C}{P_O} = \frac{3m \cdot (\bar{\varepsilon}_{CH} + 2\bar{\varepsilon}_{CG})(1 - \eta) - \bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) + \bar{V}_{OC} - \bar{V}_{CH} - 2\bar{V}_{CG}}{k(\bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) - \bar{V}_{OC})}. \quad (23)$$

Критерием устойчивости формы однослойных сетчатых куполов является следующее неравенство:

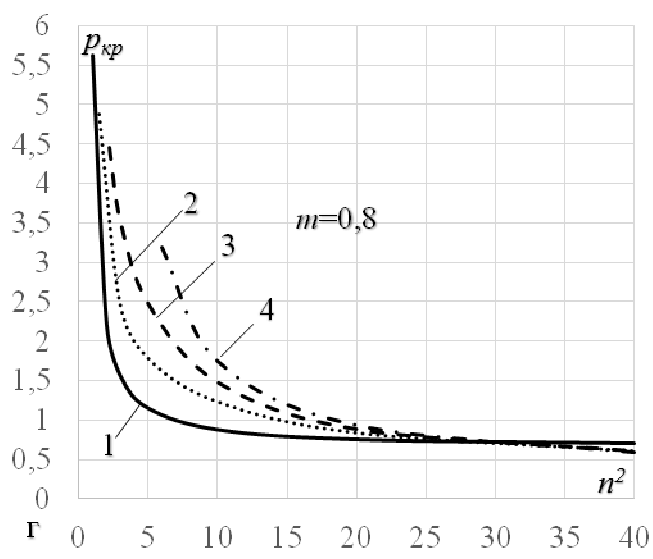
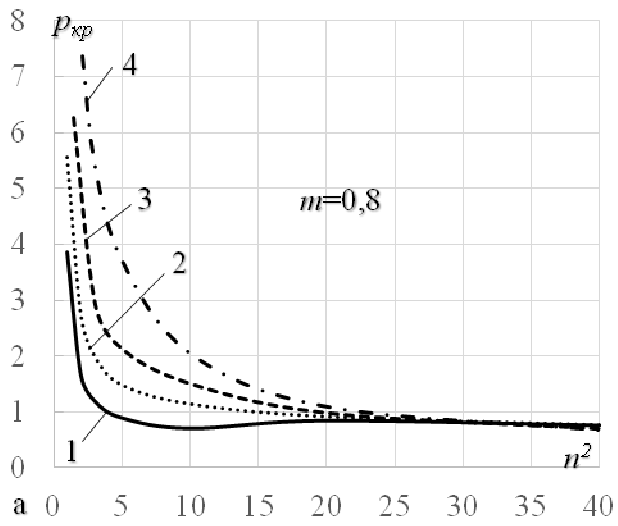
$$\frac{P_{уз}}{\beta^3 EA} < P_{кр}, \quad (24)$$

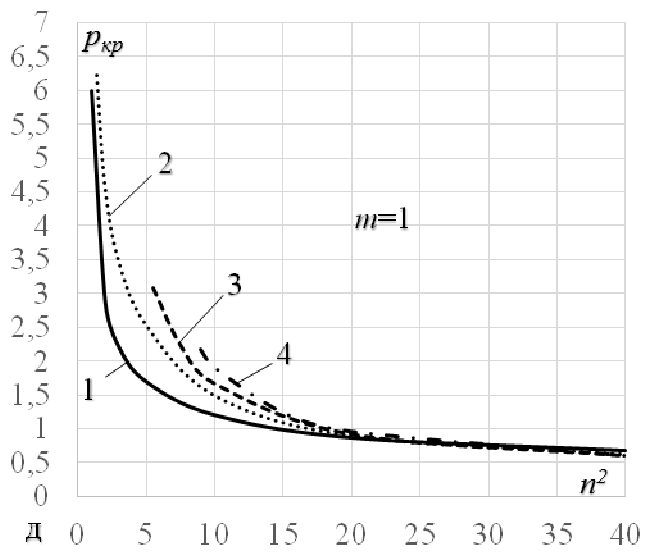
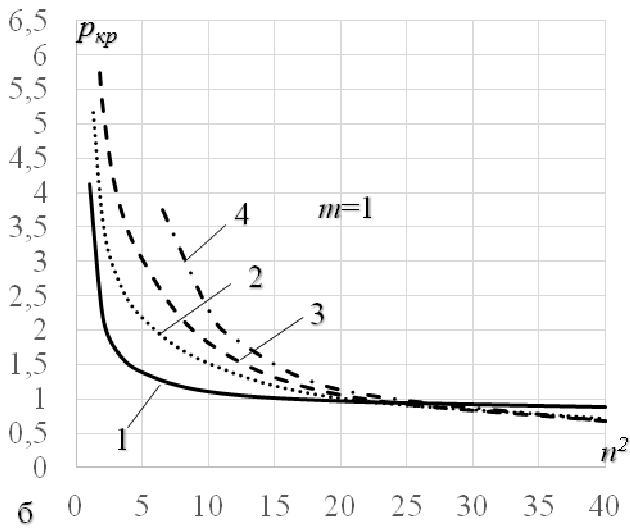
где $P_{уз}$ – узловая нагрузка, приложенная к центральному узлу рассматриваемого стержневого многогранника;

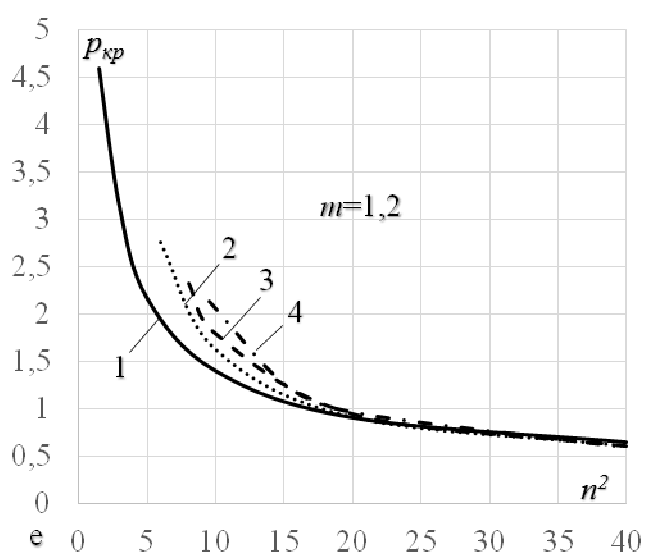
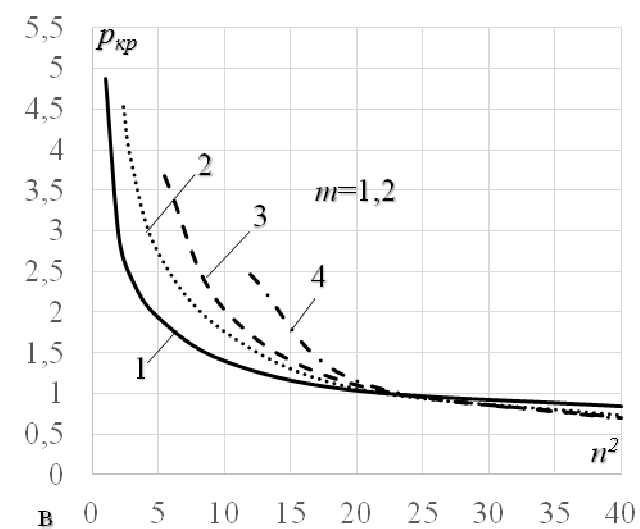
$P_{кр}$ – значение безразмерного параметра критической узловой нагрузки.

Выражение, стоящее в левой части неравенства (24), является безразмерным параметром узловой нагрузки, приложенной к узлам при проведении статического расчёта.

Для проверки устойчивости формы стального однослойного сетчатого купола с жёсткими узлами на основе исходных данных необходимо определить величину эквивалентной гибкости исследуемого стержневого многогранника n и его форму в плане, величину неравномерности загрузки P_c/P_0 . При проверке устойчивости формы существующей конструкции, форма которой известна, необходимо определить также коэффициент, учитывающий начальное геометрическое несовершенство формы m , в случае проверки устойчивости формы проектируемой конструкции $m=1$. Используя критерий устойчивого состояния в виде неравенства (24), произвести сравнение вычисленного безразмерного параметра нагрузки с его критическим значением, который следует определять по графическим зависимостям безразмерных параметров критических узловых нагрузок, изображённых на графиках рисунка 2, вычисленных для шестиугольных (а – в) и пятиугольных (г – е) в плане стержневых многогранников.







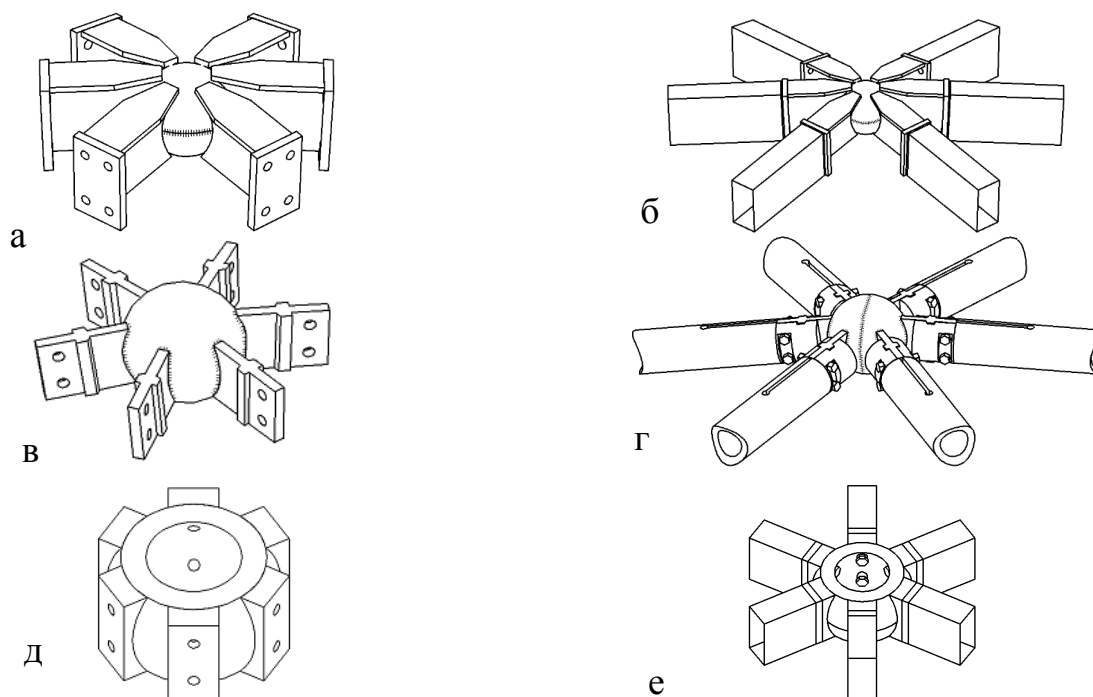
1 – $P_c/P_0 = 1$, 2 – $P_c/P_0 = 0,5$, 3 – $P_c/P_0 = 0,25$, 4 – $P_c/P_0 = 0$

Рисунок 2. – Графики зависимостей безразмерных параметров критических узловых нагрузок, вычисленных для шестиугольных (а – в) и пятиугольных (г – е) в плане стержневых многогранников, от величин квадрата эквивалентной гибкости n^2 и неравномерности загрузки P_c/P_0

В третьей главе описаны результаты разработки новых конструктивных решений узловых соединений и экспериментального определения их жесткостей.

Разработка узлов стальных однослойных сетчатых конструкций направлена на снижение конструктивной податливости соединения, повышение технологичности их сборки, унификацию соединений стержней.

Наиболее рациональным можно считать основной элемент узла в виде тела вращения – при этом достигается максимальная унификация узловых деталей, что позволяет создавать сложные конструкции произвольного очертания. Новые конструктивные решения применены при разработке изображённых на рисунках 3а, 3в, 3д узловых соединений [14–16], на рисунках 3б, 3г, 3е изображены они же с фрагментами стержней. Узлы, изображённые на рисунке 3а и 3в, выполнены в виде полого шара из двух половин, полученных прессованием из листового проката и соединяемых при помощи сварки.



а, в, – узлы с основным элементом в виде полого стального шара, д – то же с основным элементом в виде усечённого полого шара; б, г, е – они же с фрагментами стержней

Рисунок 3. – Узлы системы «БрГТУ» для однослойных сетчатых конструкций

Соединение стержней в узле, изображённом на рисунке 3а, осуществляется при помощи болтов, которые проводятся с внутренней стороны фланца через отверстия и устанавливаются во фланец на торце стержня, имеющий отверстия с резьбой.

Соединение стержней в узле, изображённом на рисунке 3в, осуществляется при помощи приваренной к полному шару фасонки с клиновидными выступами. Стержень имеет приваренные захваты на каждом из концов, плотно охватываю-

щие фасонку. При натяжении болтов, проводимых сквозь стержень и фасонку, происходит обжатие клиновидных выступов опорной консоли в торцевых захватах стержня, за счёт чего устраняется конструктивная податливость соединения.

Узел, изображённый на рисунке 3д, состоит из стального полого шара, усечённого с двух диаметрально противоположных сторон, и опорной пластины, повторяющей в меридиональном и кольцевом направлении форму его внешней поверхности. Отверстия в стальном полом шаре, полученные в результате его сечения, позволяют производить установку болтов изнутри узла. Такой узел позволяет упростить процесс сборки сетчатых конструкций. Основой элемент узла может быть представлен не только в виде полого усечённого с двух диаметрально противоположных сторон шара, но и в виде трубы [13], в том случае, если пространственная ориентация стержней сетчатой конструкции однотипна.

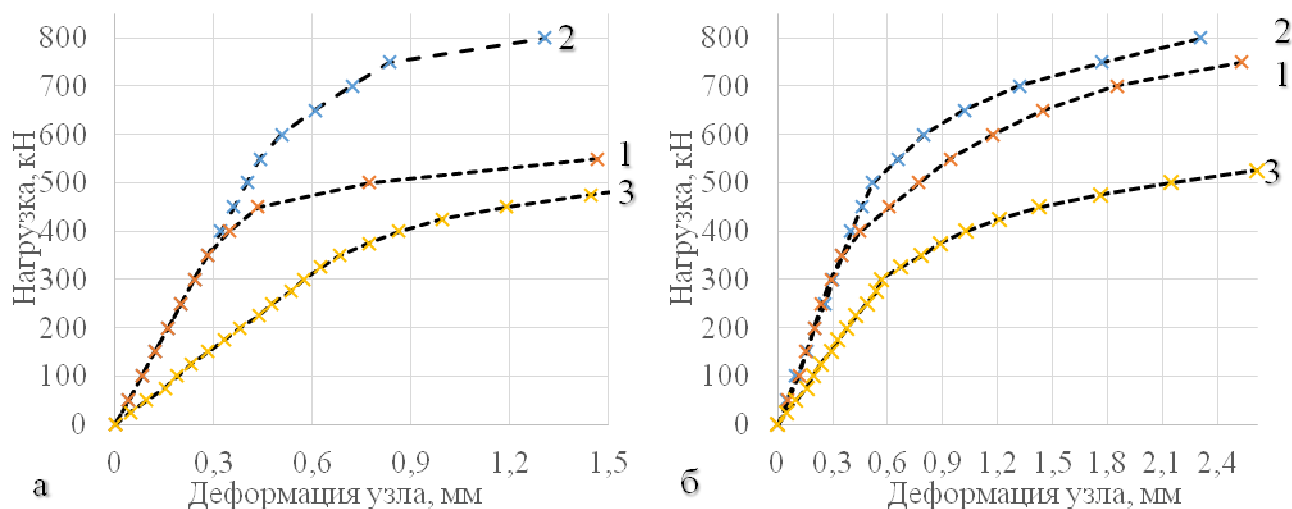
Учёт деформаций узлов может быть важным для описания напряжённо-деформированного состояния однослойных сетчатых конструкций. При определении вращательной жёсткости узлы, изображённые на рисунках 3а, 3в, 3д, располагались в центре однопролётной балки, нагрузка на них передавалась посредством рычага. Диаметры полых стальных шаров составляли 208 мм и 160 мм, толщины стенок 14 мм и 10 мм соответственно, диаметр усечённого стального полого шара составил 208 мм, толщина стенки – 14 мм. Класс стали узлов и фасонки С345. На каждом шаге нагружения измерялись деформации между сечениями узлов сверху и снизу в месте примыкания фасонки или стержней. Для определения жесткостей при сжатии и растяжении были испытаны описанные выше узлы. Каждый из узлов подвергался одноосному сжатию и растяжению с измерением деформаций в направлении действия внешней нагрузки. На рисунке 4 показан общий вид узлов при определении величин их жесткостей.



Рисунок 4. – Экспериментальное определение вращательной жёсткости (а), жёсткости при сжатии (б) и растяжении (в) узлов в виде стального полого шара

Предельное состояние узлов в виде полых стальных шаров проявляется в наступлении значительных пластических деформаций в стенке в зоне передачи нагрузки посредством фасонки. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для оценки напряжённо-деформированного состояния сетчатых куполов с применением данных узлов. На рисунке 5 показаны

диаграммы деформирования испытанных узлов при растяжении (а) и сжатии (б), полученные на основе результатов экспериментальных исследований.



1 – узел 160x10 мм, 2 – узел 208x14мм, 3 – узел 208x14мм в виде полого усечённого с двух диаметрально противоположных сторон шара

Рисунок 5. – Диаграммы деформирования узлов в виде полых стальных шаров при растяжении (а) и сжатии (б)

В таблице 1 приведены полученные величины вращательных жесткостей и жесткостей при действии сжимающих и растягивающих усилий испытанных узлов при сохранении их упругого деформирования.

Таблица 1. – Значения жесткостей узлов

Размеры узлов	Жёсткость узлов в виде полых стальных шаров		
	вращательная, кНм/рад	при растяжении, кН/мм	при сжатии, кН/мм
$\phi 160\text{мм}, t=10\text{мм}$	3378,38	1275,74	1162,15
$\phi 208\text{мм}, t=14\text{мм}$	9259,26	1249,35	975,09
$\phi 208\text{мм}, t=14\text{мм}^1$	444,44	404,25	404,59

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований напряжённно-деформированного состояния крупноразмерных фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

Задачей экспериментального исследования напряжённно-деформированного состояния фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов являлось определение характеров изменений внутренних усилий в стержнях и характера деформирования конструкции, сопоставление полученных результатов экспериментов с

¹ Примечание: значения жесткостей в этой строке приведены для полого усечённого с двух противоположных сторон шара.

результатами вычислений. Для этого было произведено исследование напряжённо-деформированного состояния одноярусного фрагмента стального однослойного сетчатого купола в виде стержневого многогранника с основанием в виде правильного пятиугольника. Стрела подъёма рассматриваемого стержневого многогранника составила 45 мм, тип поперечного сечения стержней – труба, внешний диаметр – 114 мм, толщина стенки – 6 мм, узел – полый стальной шар, внешний диаметр которого составил 208 мм, толщина стенки – 14 мм. Геометрические размеры рассматриваемого изолированного многогранника, обозначение опор и общий вид пятиугольного в плане фрагмента купола показаны на рисунке 6.

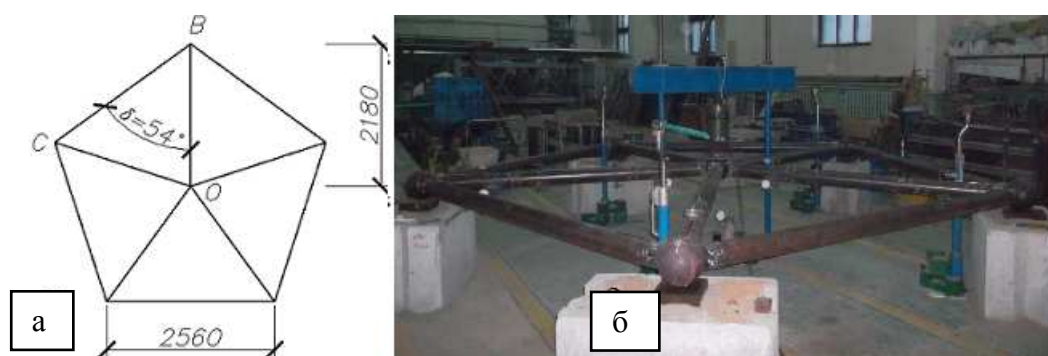
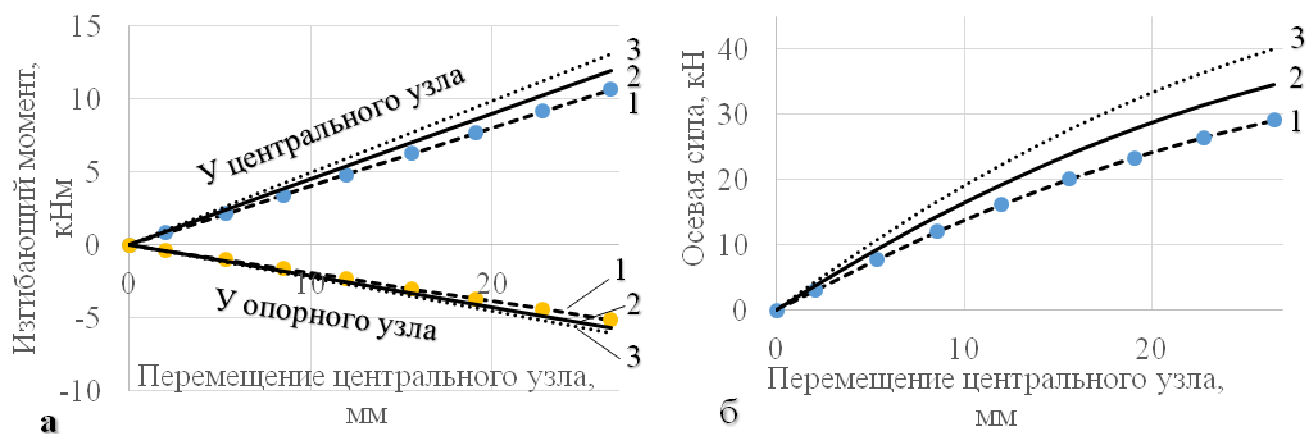


Рисунок 6. – Размеры исследуемого фрагмента в плане (а) и его общий вид (б)

В ходе эксперимента измерялись вертикальные перемещения центрального узла конструкции, осадки опор, фибровые деформации в стержнях вблизи узлов в вертикальной плоскости для вычисления изгибающих моментов и осевых сил. На рисунке 7а показаны графики изменения изгибающих моментов на концах стержней типа *OC* и графики изменения осевых сил в этих же стержнях на рисунке 7б.

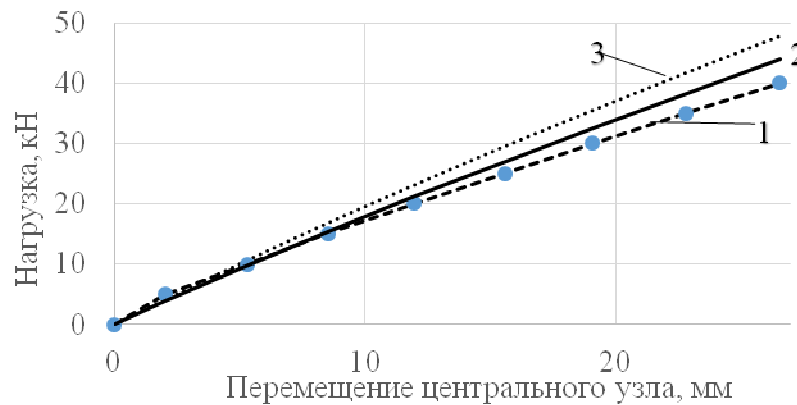


1 – эксперимент, 2 – вычисления с учётом податливости узлов, 3 – вычисления с жёсткими узлами

Рисунок 7. – Графики изменения изгибающих моментов (а) и осевых сил (б) в стержнях *OC* в зависимости от вертикального перемещения центрального узла

При сравнении результатов эксперимента и расчёта были учтены деформации узлов, также учтено, что фрагмент является одноярусным. Расхождения вели-

чин внутренних усилий, полученных в результате вычислений с учётом деформаций узлов и на основе экспериментальных данных, составили 12% для изгибающих моментов и 16% для осевых сил. Расхождения величин внутренних усилий, вычисленных с учётом деформаций узлов и с абсолютно жёсткими узлами, составили 8,7% для изгибающих моментов и 17% для осевых сил. На рисунке 8 показаны вычисленные и полученная в ходе эксперимента диаграммы деформирования фрагмента сетчатой конструкции.



1 – эксперимент, 2 – вычисления с учётом податливости узлов, 3 – вычисления с жёсткими узлами

Рисунок 8. – Вычисленные и экспериментальная диаграммы деформирования стержневого многогранника

Максимальное расхождение между экспериментальными и вычисленными значениями узловой нагрузки, которым соответствуют одинаковые величины перемещений, не превысило 10%. В результате экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния одноярусного фрагмента стального однослойного сетчатого купола установлено, что использованные узлы в значительной мере позволяют обеспечить жёсткое соединение его стержней.

Для верификации предложенной методики проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов и экспериментального подтверждения полученных зависимостей изменения внутренних усилий в стержнях было проведено исследование напряжённо-деформированного состояния крупноразмерного фрагмента двухъярусного стального однослойного сетчатого купола, стержневая сеть которого построена по системе Кайвитта. Отношение стрелы подъёма двухъярусного фрагмента сетчатого купола к диаметру его основания составило $1/53$, материал стержней – сталь 20, тип поперечного сечения – труба, внешний диаметр – 60 мм, толщина стенки – 4 мм, узел – полый стальной шар, внешний диаметр которого составил 160 мм, толщина стенки – 10 мм. Несовершенство его геометрической формы учтено при помощи коэффициента $m=0.94$, полученного по результатам измерений превышений узлов относительно уровня опор.

На рисунке 9а изображена проекционная сеть и размеры исследуемого фрагмента двухъярусного стального однослойного сетчатого купола в плане, на рисунке 9б представлен его общий вид.

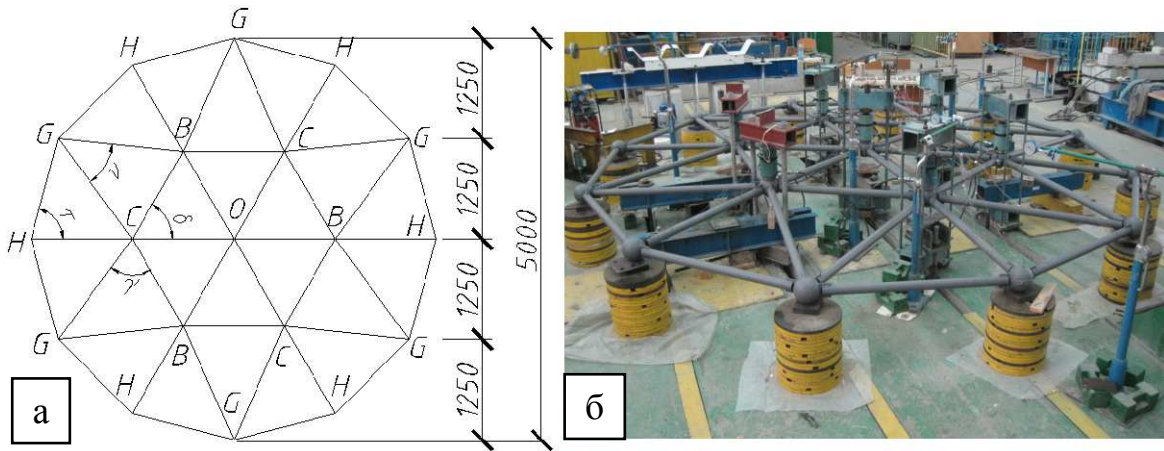


Рисунок 9. – План (а) и общий вид (б) двухъярусного фрагмента стального однослойного сетчатого купола

Экспериментальные исследования напряжённо-деформированного состояния фрагмента сетчатого купола проводились в три стадии. Каждой стадии соответствовали свои варианты приложения внешней нагрузки, изображённые на рисунке 10. Приложение нагрузки к узлам в каждой стадии экспериментальных исследований производилось пошагово. На каждом шаге нагружения измерялись фибровые деформации на каждом из концов стержней и вертикальные перемещения узлов. Нагружение конструкции во всех случаях производилось при сохранении её упругого деформирования.

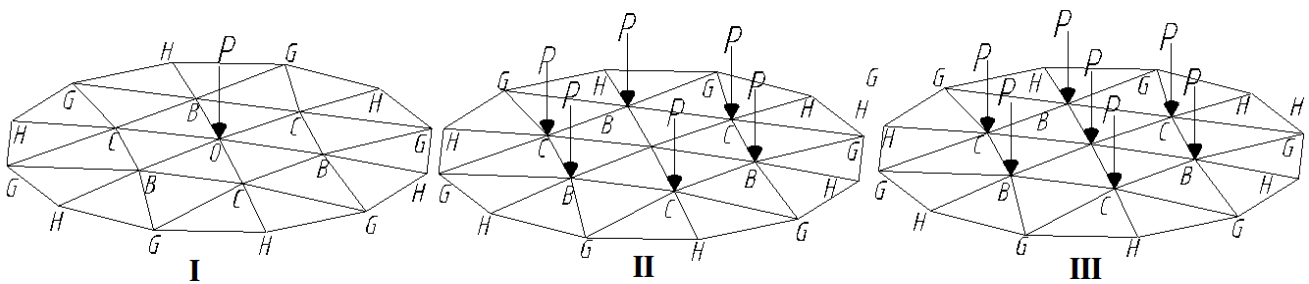


Рисунок 10. – Варианты приложения нагрузок двухъярусного фрагмента стального однослойного сетчатого купола

Максимальное значение нагрузки, приложенной в узел O в первой стадии экспериментальных исследований, составило 12,5 кН. Максимальное расхождение между величинами нагрузок, приложенных в ходе эксперимента и полученных расчётным путём, составило 14%. Максимальное значение внешней нагрузки составило 6,25 кН в ходе второй стадии экспериментальных исследований при сохранении упругого деформирования конструкции. Максимальное расхождение между величинами нагрузок, приложенных в ходе эксперимента и полученных

расчётным путём, соответствующим одним и тем же величинам перемещений, составило 12%. В ходе первых двух стадий экспериментальных исследований была произведена верификация полученных зависимостей изменения внутренних усилий в стержнях.

На рисунке 11а показаны графики вертикального перемещения центрального узла верхнего стержневого многогранника в пределах верхнего яруса при приложении нагрузки только на центральный узел, полученные в ходе первой стадии экспериментальных исследований и вычислений при $P_C/P_O=0$, на рисунке 11б – графики зависимостей вертикальных перемещений узлов типа $C(B)$ от приложенной на них нагрузки, полученные в ходе второй стадии экспериментальных исследований и вычислений при $P_O/P_C=0$.

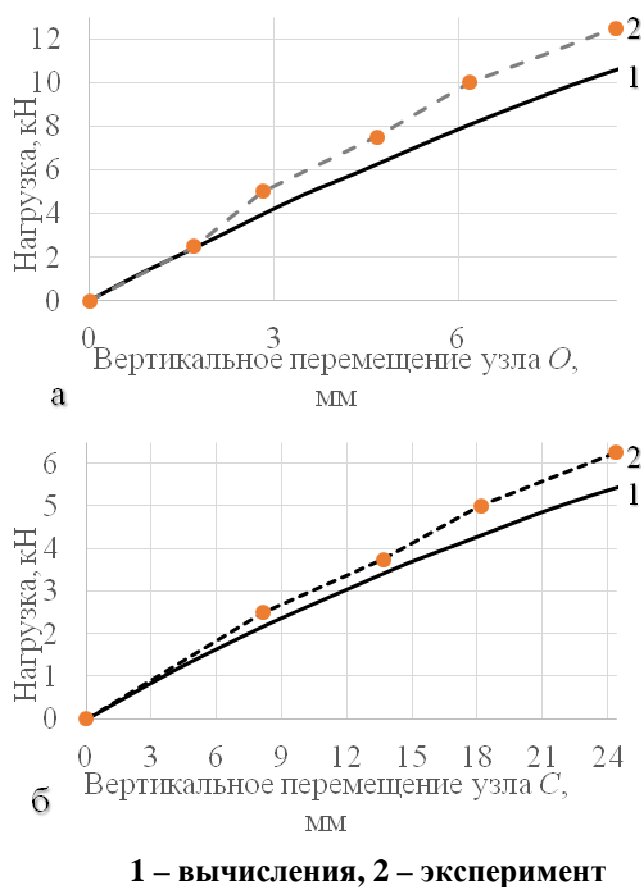


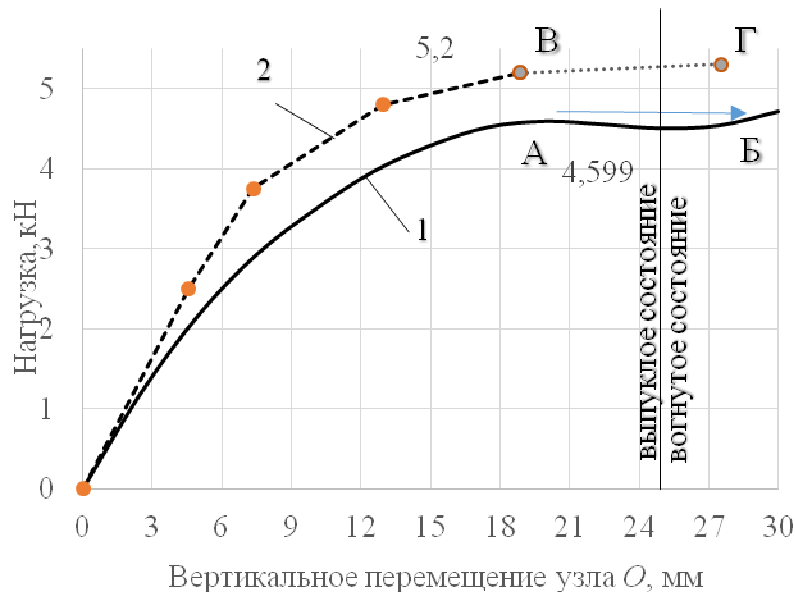
Рисунок 11. – Диаграммы деформирования верхнего стержневого многогранника в первой стадии экспериментальных исследований (а) и диаграммы перемещений узлов типа $C(B)$ нижнего яруса во второй (б) стадии экспериментальных исследований

На рисунке 12 изображены экспериментальная диаграмма деформирования верхнего стержневого многогранника, полученная в ходе третьей стадии экспериментальных исследований, и его же диаграмма равновесных состояний, полученная путём вычислений.

Стрелкой из точки А в точку Б на диаграмме, полученной путём вычислений, показан переход верхнего стержневого многогранника из одного равновесного

состояния в другое при достижении критической нагрузки. На участке АБ при фиксированном значении внешней нагрузки, значение которой равно критическому, равновесие между вертикальными проекциями внутренних усилий и внешней узловой нагрузкой невозможно. Первое равновесное состояние соответствует выпуклой форме верхнего стержневого многогранника, второе – вогнутой форме. Значение нагрузки в точках А и Б равны между собой.

Из анализа деформированного состояния верхнего стержневого многогранника установлено, что величина узловой нагрузки в точке В меньше критического значения, а в точке Г – превышает его. При этом на последнем шаге нагружения при приращении внешней нагрузки на 0,2 кН произошёл его переход из устойчивого выпуклого состояния (точка В на диаграмме) в устойчивое вогнутое (точка Г). На экспериментальной диаграмме пунктиром показан переход из одного равновесного состояния в другое, сопровождавшийся значительным приращением вертикальных перемещений центрального узла. Максимальное расхождение между ординатами диаграммы равновесных состояний, полученной расчётным путём, и экспериментальной диаграммы деформирования двухъярусного сетчатого купола составило 13,5%. Остаточный прогиб всей конструкции в центральном узле после снятия нагрузки составил 2 мм.



1 – вычисления, 2 – эксперимент

Рисунок 12. – Диаграммы деформирования верхнего стержневого многогранника, полученные в третьей стадии экспериментальных исследований

На всех стадиях экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния двухъярусного фрагмента стального однослойного сетчатого купола изменение внутренних усилий, определённых по измеренным в ходе эксперимента значениям фибровых деформаций в местах наклейки тензорезисторов, соответствует характеру изменения внутренних усилий, вычисленных в

тех же местах с использованием полученных аналитических зависимостей. Максимальное расхождение их значений не превышает 40%.

Вычисленные напряжения и напряжения, полученные на основе измеренных фибровых деформаций в ходе эксперимента, не превысили предела текучести стали стержней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Анализ геометрических параметров стержневых многогранников, образующих стальные однослойные сетчатые купола с жёсткими узлами, и геометрических характеристик поперечных сечений стержней позволил установить одну из важнейших величин, определяющих не только величину критической узловой нагрузки, но и характер их деформирования – эквивалентную гибкость стержневых многогранников. Полученная величина позволяет объединить геометрические характеристики стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами и геометрические характеристики поперечных сечений стержней, а также обобщить зависимости, определяющие деформирование стержневых многогранников. Стальные однослойные сетчатые купола с жёсткими узлами, стержневые сети которых образованы по одному методу, имеющие равные значения эквивалентной гибкости образующих их стержневых многогранников, имеют равные по значению параметры критических узловых нагрузок, вызывающих потерю устойчивости их формы в виде продавливания узлов к центру кривизны описанной сферы [4].

Полученные зависимости, описывающие процесс деформирования стержневых многогранников, образующих стальные однослойные сетчатые купола с жёсткими узлами, позволяют учитывать их геометрически нелинейное деформирование, продольно-поперечный изгиб в стержнях и начальные геометрические несовершенства формы, что даёт возможность наиболее точно вычислить величины критических узловых нагрузок [1 – 3, 5, 6, 8 – 11].

Предложены графические зависимости изменения безразмерных параметров критических узловых нагрузок для выпуклых стержневых многогранников в виде правильных шестиугольников и пятиугольников в плане для различных величин их эквивалентной гибкости и неравномерности загрузки. На основе предложенных зависимостей разработана методика проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами. Сформулирован критерий устойчивости их формы [9 – 11].

2. Разработаны и внедрены в практику строительства новые конструктивные решения узлов в виде полых стальных шаров с жёстко присоединёнными к ним стержнями. Применение узлов со сферической наружной поверхностью позволяет максимально унифицировать их детали и объединять стержни под любыми углами в пространстве, создавать покрытия сложной формы. Разработанные узлы позволяют повысить технологичность сборки и упростить монтаж стальных однослойных сетчатых конструкций. Предложенные конструктивные решения узлов реко-

мендуется применять как при беспрогонном устройстве кровли, так и с использованием прогонов [13 – 16].

3. Экспериментально полученные значения жесткостей узлов в виде полых стальных шаров могут быть использованы для точного определения напряжённо-деформированного состояния стальных однослойных сетчатых конструкций, а также могут быть использованы в качестве критериев для классификации узлов по жёсткости [6, 12].

4. Разработана методика экспериментального исследования напряжённо-деформированного состояния крупноразмерных фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами. В соответствии с ней проведены экспериментальные исследования напряжённо-деформированного состояния одноярусного и двухъярусного фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов. Результаты измерения вертикальных перемещений узлов конструкций и фибровых деформаций стержней позволили наиболее полно определить их действительное напряжённо-деформированное состояние и произвести сопоставление результатов экспериментальных исследований с результатами расчёта [7, 12].

По результатам экспериментальных исследований выполнена верификация предложенной методики проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами при действии узловых нагрузок. Установлено, что предложенная методика обладает удовлетворительной точностью. Характеры изменения внутренних усилий в стержнях, которые были получены в ходе экспериментальных исследований, соответствуют вычисленным по полученным зависимостям. Наибольшие значения расхождений между экспериментальными и вычисленными значениями внутренних усилий, как правило, соответствуют начальной стадии нагружения [6, 7, 12].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложенную методику проверки устойчивости формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами рекомендуется применять как при проектировании новых, так и при проверке устойчивости формы существующих конструкций.

2. Разработанные узловые соединения в виде полых стальных шаров рекомендуется применять как при беспрогонном устройстве кровли, так и с использованием прогонов. Экспериментально определённые величины жесткостей узлов в виде полых стальных шаров рекомендуется использовать для точного определения напряжённо-деформированного состояния однослойных сетчатых конструкций.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния одноярусного и двухъярусного фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов могут быть использованы для верификации методик проверки устойчивости стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

5. Объектами внедрений результатов диссертационных исследований являются:

5.1) проект металлических конструкций купола по объекту «Горнообогатительный комбинат мощностью 1,4 млн тонн в год хлорида калия на базе Горлыкского месторождения калийных солей в Лебапском велаяте Туркменистана. Первый пусковой комплекс. Второй этап. Рудник. Поверхностный комплекс. АБК горного цеха рудоуправления и фабрики»;

5.2) проект металлических конструкций покрытия световых фонарей для объекта «Многофункциональный общественный центр по адресу: г. Москва, Славянский бульвар, вл.3»;

5.3) проект металлических конструкций куполов для объекта «Торгово-развлекательный комплекс «Вегас – 3» по адресу: МО, Одинцовский район, с. Немчиновка».

Список публикаций соискателя учёной степени

Статьи

1. Драган, В. И. Исследование напряжённо-деформированного состояния стержней стальных сетчатых куполов с жёсткими узлами / В. И. Драган, К. К. Глушко // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 16–20.

2. Драган, В. И. Исследование напряжённо-деформированного состояния выпуклых стержневых многогранников, построенных на сферической поверхности при действии осесимметричной неравномерной нагрузки / В. И. Драган, К. К. Глушко // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 20–25.

3. Драган, В. И. Локальная устойчивость плоских многогранников сетчатых куполов // В. И. Драган, К. К. Глушко // Modern engineering. – 2016. – № 1. – С. 82–93.

4. Драган, В. И. Местная устойчивость однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами при действии осесимметричной узловых нагрузки / В. И. Драган,

К. К. Глушко // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 81–87.

Материалы конференций

5. Драган, В. И. Исследование напряжённно-деформированного состояния стержней стальных сетчатых куполов с жёсткими узлами при действии узловой нагрузки / В. И. Драган, К. К. Глушко // Материалы XX Международного научно-методического семинара, Гродно, 17–19 февраля 2016 г. / Гродн. гос. ун–т им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 34–36.

6. Драган, В. И. Экспериментальное исследование напряжённно-деформированного состояния фрагмента однослойной сетчатой конструкции при действии узловой нагрузки / В. И. Драган, К. К. Глушко // Материалы XX Международного научно-методического семинара, Гродно, 17–19 февраля 2016 г. / Гродн. гос. ун–т им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 36–41.

7. Драган, В. И. Исследование местной устойчивости фрагмента сетчатого купола при действии узловой нагрузки / В. И. Драган, К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 24–30.

8. Драган, В. И. Определение изгибающих моментов и поперечных сил в радиальной плоскости в стержнях сетчатого купола / В. И. Драган, К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 31–38.

9. Драган, В. И. Определение продольных сил в стержнях и критических нагрузок, вызывающих местную потерю устойчивости сетчатого купола / В. И. Драган, К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 39–46.

10. Глушко, К. К. Влияние начальных несовершенств формы на местную устойчивость сетчатого купола при действии осесимметричной узловой нагрузки / К. К. Глушко // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сборник статей II Международной научной конференции, Брест, 18–20 октября 2017 г. /

Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 32–36.

11. Глушко, К. К. Исследование устойчивости формы стержневых многогранников сетчатых куполов / К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 марта 2018 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. –С. 24–33.

12. Глушко, К. К. Потеря местной устойчивости формы сетчатых куполов с жёсткими узлами / К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 марта 2018 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – С. 33–42.

Патенты на полезные модели

13. Узел соединения пространственного каркаса из полых стержней : полез. модель ВУ 10683 / В. И. Драган , А. В. Драган, К. К. Глушко, В. Н. Пчёлин. – Оpubл. 12.03.2015.

14. Узел соединения пространственного каркаса из полых стержней : полез. модель ВУ 10764 / В. И. Драган , А. В. Драган, К. К. Глушко, В. Н. Пчёлин. – Оpubл. 15.05.2015.

15. Узел соединения пространственного каркаса из полых стержней : полез. модель ВУ 11204 / В. И. Драган , К. К. Глушко, А. В. Драган, В. В. Люстибер. – Оpubл. 30.10.2016.

16. Узел соединения пространственного каркаса из полых стержней : полез. модель ВУ 11679 / В. И. Драган , К. К. Глушко, А. В. Драган, В. В. Люстибер. – Оpubл. 30.04.2018.

РЭЗІЮМЭ

Глушко Канстанцін Канстанцінавіч

Устойлівасць формы сталёвых аднаслойных сеткавых купалоў з жорсткімі вузламі

Ключавыя словы: аднаслойны сеткавы купал, крытычная нагрузка, устойлівасць, вузел, геаметрычная нелінейнасць, пачатковыя недасканаласці формы.

Мэта даследвання: распрацаваць навукова абгрунтаваную методыку праверкі ўстойлівасці формы аднаслойных сеткавых купалоў з жорсткімі вузламі.

Метады даследвання. Тэарэтычнае абгрунтаванне і эксперыментальнае пацверджанне залежнасцей, якія дазваляюць апісаць геаметрычна нелінейны характар змены напружана-дэфармаванага стану аднаслойных сеткавых купалоў ад перамяшчэнняў вузлоў. Эксперыментальнае вызначэнне жорсткасцяў вузлоў у выглядзе полых сталёвых шароў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана методыка праверкі ўстойлівасці формы сталёвых сеткавых купалоў з жорсткімі вузламі. Прапанаваная методыка заснавана на аналітычных залежнасцях, якія дазваляюць апісваць пачатковыя недасканаласці формы аднаслойных сеткавых купалоў і падоўжна-папярэчны згін іх стрыжняў. Вызначаны крытэрыі устойлівага стану аднаслойных сеткавых купалоў з жорсткімі вузламі. Эксперыментальна вызначаны жорсткасці вузлоў у выглядзе полых сталёвых шароў. Пры параўнанні разлічанага і атрыманага ў выніку эксперыментальных даследванняў напружана-дэфармаванага стану буйнагабарытных фрагментаў аднаслойных сеткавых купалоў была вызначана, што прапанаваная методыка мае здавальняючую дакладнасць.

Рэкамендацыі па выкарыстанню. Прапанаваная методыка можа быць выкарыстана для праверкі формы сталёвых аднаслойных сеткавых купалоў з жорсткімі вузламі падчас іх праектавання і эксплуатацыі. Атрыманыя эксперыментальна велічыні жорсткасцяў вузлоў у выглядзе полых сталёвых шароў могуць быць выкарыстаны пры праектаванні сеткавых канструкцый і даследванні іх напружана-дэфармаванага стану, а таксама могуць быць выкарыстаны пры класіфікацыі дадзеных вузлоў па жорсткасці.

Вобласць выкарыстання. Праектаванне вялікапралётных канструкцый пакрыццяў грамадзянскіх і прамысловых збудаванняў.

РЕЗЮМЕ

Глушко Константин Константинович

Устойчивость формы стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами

Ключевые слова: однослойный сетчатый купол, критическая нагрузка, устойчивость, узел, геометрическая нелинейность, начальные несовершенства формы.

Цель исследования: разработать научно обоснованную методику проверки устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

Методы исследования. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение зависимостей, описывающих геометрически нелинейный характер изменения напряжённо-деформированного состояния однослойных сетчатых куполов от перемещения узлов. Экспериментальное определение величин жесткостей узлов в виде полых стальных шаров.

Полученные результаты и их новизна. Разработана методика проверки устойчивости формы стальных сетчатых куполов с жёсткими узлами. Предложенная методика основана на аналитических зависимостях, позволяющих описывать начальные несовершенства формы однослойных сетчатых куполов и продольно-поперечный изгиб их стержней. Определён критерий устойчивого состояния стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами. Экспериментально определены жёсткости узлов в виде полых стальных шаров. При сравнении расчётного и полученного в ходе экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния крупногабаритных фрагментов стальных однослойных сетчатых куполов было установлено, что предложенная методика имеет удовлетворительную точность.

Рекомендации по использованию. Предложенная методика может быть использована для проверки устойчивости формы проектируемых и эксплуатируемых стальных однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

Полученные экспериментально величины жесткостей узлов в виде полых стальных шаров могут быть использованы при проектировании сетчатых конструкций и исследовании их напряжённо-деформированного состояния, а также могут быть использованы для классификации данных узлов по жёсткости.

Область применения. Проектирование большепролётных конструкций покрытий общественных и промышленных зданий.

SUMMARY

Kanstantsin Hlushko

Stability of the shape of steel single-layer latticed domes with rigid joints

Keywords: single-layer latticed dome, critical load, stability, joint, geometric nonlinearity, initial shape imperfections.

The aim of the study is to develop a scientifically based method for checking the stability of the form of single-layer latticed domes with rigid joints.

Research methods. Theoretical substantiation and experimental confirmation of dependencies describing the geometrically nonlinear nature of changes in the stress-strain state of single-layer latticed domes. Experimental determination of the values of the stiffness of the nodes in the form of hollow steel balls.

The results and their novelty. A method for checking the stability of the shape of steel grid domes with rigid joints has been developed. The proposed method is based on analytical dependencies, which allow to take into account the initial imperfections of the form of single-layer latticed domes and the longitudinal-transverse bending of their rods. The criterion for the steady state of steel single-layer latticed domes with rigid joints is determined. The stiffness of nodes in the form of hollow steel balls experimentally determined. When comparing the calculated and obtained of the stress-strain state of large-sized fragments of steel single-layer grid domes during experimental studies, it was found that the proposed method has a satisfactory accuracy.

Recommendations for usage. The proposed technique can be used to test the stability of the shape of projected and operated steel single-layer latticed domes with rigid joints.

Experimentally determined values of the stiffnesses of the nodes in the form of hollow steel balls can be used in the design of latticed structures and the study of their stress-strain state, and can also be used to classify these joints according to stiffness.

Application area. Designing coverings of civil, industrial and agricultural buildings.

Научное издание

Глушко Константин Константинович

**УСТОЙЧИВОСТЬ ФОРМЫ СТАЛЬНЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ
СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ С ЖЁСТКИМИ УЗЛАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности

05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Подписано к печати 02.05.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага «Снегурочка»

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 110. Заказ № 618.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет»
224017, г. Брест, ул Московская, 267.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569 от 16.10.2017 г.