

На правах рукописи

**Бондарев Алексей Борисович**



**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
БОЛЬШЕПРОЛЁТНЫХ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С УЧЁТОМ НАКОПЛЕНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Югов Анатолий Михайлович,**  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, заведующий кафедрой технологии и организации строительства.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Корчак Михаил Дмитриевич,**  
ООО «Старый Дом», главный специалист;

кандидат технических наук, доцент  
**Хусаинов Дамир Миннигалиевич,**  
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»,  
доцент кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений.

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет».

Защита состоится 17 декабря 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал учёного совета. Тел. / факс: +38 (0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, Донецкая обл., г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 01.006.02



Назим Ярослав Викторович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Здания и сооружения из металлоконструкций приобретают отклонения длины, осей, формы на всех этапах жизненного цикла – проектирование → изготовление → монтаж → эксплуатация → реконструкция, и особенно вследствие неточного изготовления и монтажа. Следовательно, вопросы, связанные с учетом отклонений длины стержней в металлических конструкциях на их напряженно-деформированное состояние (НДС) всегда будут актуальными. В связи с появлением отклонений в стержнях и узлах геометрическая форма, пространственное положение узлов шарнирно-стержневой оболочки и её НДС будут отличаться от теоретического. При отклонении фактического положения стержней и узлов в статически неопределимых конструкциях от номинального (проектного) возникают дополнительные (начальные) усилия (напряжения). Геометрические отклонения и начальные усилия, как правило, не учитывают при статическом расчёте. Учёт при проектировании точности изготовления и сборки конструкций большепролетных покрытий может повысить их несущую способность и надёжность.

Наличие отклонений приводит к большому количеству непредвиденных трудовых и финансовых затрат, которые не учитываются в стоимости строительного объекта. Повышение требований к точности изготовления и сборке конструкций приводит к появлению дополнительных затрат при их проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации. Определение отклонений и оценка НДС большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий с учётом точности изготовления и последовательности сборки при статическом расчёте представляет собой важную и актуальную научно-техническую задачу.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Тема диссертации соответствует актуальным направлениям научно-технической политики в области проектирования и расчета строительных металлоконструкций. Диссертационная работа выполнена в рамках ряда госбюджетных и хоздоговорных работ, в т.ч.:

- Д2-01-13 «Определение областей оптимального использования строительных металлоконструкций в современных экономических условиях Украины», № 0113U001918, 2013–2014 гг. (заказчик МОН Украины);

- К2-13-11 «Разработка и совершенствование ресурсосберегающих и безопасных конструктивных и организационно-технологических решений при строительстве, эксплуатации, реконструкции и ликвидации зданий и сооружений в сложных условиях», № 0111U008174, 2011-2015 гг. (заказчик МОН Украины);

- «Разработка проекта Национального Приложения ДСТУ-Н Б EN 1991-1-6:2012 «ЕВРОКОД 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-6: Общие воздействия – Воздействия в процессе возведения (EN 1991-1-6:2005, IDT)», – хоздоговорная тема № 0113U005743, 2013 г. по договору № Н-12/170-2013 (заказчик Минрегионстрой Украины).

Тема и содержание работы соответствуют тематике плана научных исследований, проводимых на кафедре технологии и организации строительства, а также на кафедре металлических конструкций Донбасской

национальной академии строительства и архитектуры начиная с 2010 года и по настоящее время.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка экспериментально-теоретического аппарата оценки, прогнозирования, апробирования и регулирования НДС большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий за счет прогнозирования отклонений в зависимости от точности и последовательности укрупнительной и монтажной сборки.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- разработать математическую модель формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями и методику определения геометрических отклонений;
- разработать методику определения сборочных напряжений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытиях;
- разработать алгоритм и программу расчета точности шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке и апробировать их на примере пространственных большепролетных шарнирно-стержневых покрытий и сооружений;
- выполнить исследование геометрических отклонений при сборке меридиональных рёбер, которые являются основными несущими конструкциями большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий;
- разработать новые конструктивные решения, способ монтажа большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий;
- экспериментально получить сборочные усилия в плоской шарнирно-стержневой системе при наличии заданных геометрических отклонений.

**Объект исследования** – большепролетные пространственные шарнирно-стержневые металлические покрытия.

**Предмет исследования** – параметры НДС большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытий при наличии геометрических отклонений, вызванные отклонениями их изготовления, сборки и монтажа.

**Методы исследования.** В основу научного аппарата диссертационной работы положены:

- метод конечных элементов (МКЭ) – при численном исследовании работы объекта исследования под действием эксплуатационных нагрузок и сборочных напряжений;
- метод Монте-Карло – для определения статистических характеристик отклонений;
- теория размерных цепей и геометрический метод – при определении величин геометрических отклонений и решении систем алгебраических уравнений;
- экспериментальный метод – при исследовании сборочных напряжений в шарнирно-стержневой системе.

**Научная новизна полученных результатов:**

- разработана математическая модель формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями и методика

определения геометрических отклонений и сборочных напряжений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытиях (впервые);

- разработан алгоритм и программа расчёта точности большепролетных шарнирно-стержневых пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке (впервые);

- предложена и разработана система конструктивной компенсации отклонений в виде нового конструктивного решения шарнирно-стержневой системы и нового способа монтажа большепролетных металлических покрытий, защищенные патентами Украины на полезную модель (впервые);

- получены экспериментальные данные сборочных напряжений в плоской шарнирно-стержневой системе при наличии заданных геометрических отклонений (впервые).

**Практическое значение полученных результатов** состоит в следующем:

- разработан вычислительный комплекс размерного анализа стержневых конструкций (ВК РАСК) (А.с. № 47952), который использован для исследования геометрических отклонений при проектировании «Склада усреднения основного сырья цементного завода» (АР Крым);

- на основе анализа предложенной математической модели формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями разработана методика определения геометрических отклонений и сборочных напряжений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытиях;

- получены закономерности отклонений узлов при сборке конструкций меридиональных рёбер цилиндрических оболочек, которые могут быть применены для определения геометрических отклонений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытиях;

- разработана и предложена система конструктивной компенсации отклонений в виде нового конструктивного решения шарнирно-стержневой системы и нового способа монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий, защищенные патентами Украины на полезную модель (№ у 2012 13187, № у 2012 13193, № у 2012 13191), которая может быть использована для компенсации отклонений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических оболочках покрытия и других сооружений стержневого типа.

Положения и результаты этого научного исследования автора внедрены:

- при исследовании геометрических отклонений и сборочных усилий в сооружении склада усреднения основного сырья цементного завода (АР Крым);

- при разработке проекта Национального Приложения ДСТУ-Н Б EN 1991-1-6:2012 «ЕВРОКОД-1. Воздействия на конструкции. Часть 1-6: Общие воздействия – Воздействия в процессе возведения (EN 1991-1-6:2005, IDT);

- в учебном процессе в ряде дипломных и курсовых проектов, двух магистерских работах по специальности «Промышленное и гражданское строительство»;

- в учебном процессе в качестве «Пособия по моделированию геометрических отклонений и сборочных напряжений в пространственных шарнирно-стержневых металлических покрытиях в ВК РАСК», разработанного

в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры для студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство»;

- в виде трёх патентов Украины на полезную модель (№ и 2012 13187, № и 2012 13193, № и 2012 1319) и одного авторского свидетельства на компьютерную программу (А.с. № 47952).

**Личный вклад соискателя.** Приведенные в диссертационной работе результаты исследований получены соискателем самостоятельно. Личный вклад автора состоит в следующем:

- выполнен расчет и обоснование температурного воздействия, для моделирования линейных отклонений в стержневых системах на примере плоской П-образной рамы;
- выполнен анализ существующих методов расчета стержневых систем с учетом отклонений и осуществлена постановка задач исследований;
- выполнено численное статистическое исследование сборочных усилий в шарнирно-стержневых металлических оболочках покрытия;
- выполнен расчет и анализ результатов статического расчета однослойных цилиндрических стержневых металлических оболочек покрытия на восприятие эксплуатационных нагрузок;
- выполнено численное статистическое исследование геометрических отклонений в шарнирно-стержневых металлических покрытиях;
- выполнен расчет и анализ результатов расчета живучести стержневых металлических оболочек покрытия цилиндрической формы при наличии геометрических отклонений;
- создана методика определения сборочных усилий в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных оболочках покрытий;
- создана экспериментальная конструкция и специализированный стенд, для проведения эксперимента;
- проведена экспериментальная проверка сборочных усилий при наличии заданных геометрических отклонений, а также их статистическая обработка и анализ на примере плоской шарнирно-стержневой конструкции (системы) с использованием системы конструктивной компенсации отклонений;
- разработана математическая модель формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающих звеньями для большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытий;
- разработан и реализован на ПК алгоритм расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке;
- разработан и предложен новый способ монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий;
- разработана и предложена система конструктивной компенсации отклонений в шарнирно-стержневой системе за счет нового конструктивного решения стыкового соединения стержней с равными и разными размерами поперечного сечения;
- разработана компьютерная программа для расчёта точности стержневых конструкций.

**Апробация результатов диссертации.** Основные научные и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на: IV и V

Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2012 г. и 2013 г.); Научно-практической конференции «Расчет и проектирование металлических конструкций» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2013 г.); II Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») (г. Москва, НИУ МГСУ, 2013 г.); International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEMF-2015 (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); Международной научно-технической интернет-конференции «Проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций. Опыт и перспективы развития» (г. Киев, 2013 г.); Научно-технических конференциях Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, 2009-2014 гг. В полном объеме работа представлена на расширенном заседании кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (20.03.2014 г.).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 18 печатных работах, в том числе в 15 рецензируемых научных изданиях: 10 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утверждённый МОН Украины; 3 – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённый ВАК РФ; 2 – в специализированных периодических изданиях за рубежом (10 публикаций включены в международные наукометрические базы: 9 – в РИНЦ, 1 – в Scopus). По результатам исследований получено 3 патента Украины на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти основных разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 230 страниц, в том числе 119 страниц основного текста, 10 полных страниц с рисунками и таблицами, 22 страницы использованных источников, 79 страниц приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** диссертации раскрывает актуальность темы, выбранной для исследования, определяет и обосновывает объект, предмет, научную новизну и практическую ценность работы, содержит характеристику и структуру работы.

В **первом разделе** диссертации приведен обзор конструкций и методов монтажа большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, возведенных к настоящему времени в Украине, России и за рубежом. Отмечено наличие большого разнообразия конструктивных схем несущих каркасов большепролетных покрытий и способов их монтажа. На основе обзора сделан вывод о том, что цилиндрическая форма шарнирно-стержневых оболочек покрытия достаточно широко применяется во многих странах (Рис. 1).

Изложено современное состояние вопросов, связанных с точностью изготовления и монтажа строительных конструкций, системой допусков, правилами их определения и программ размерного анализа. Дан анализ существующих способов определения отклонений в строительных конструкциях вследствие неточностей изготовления и монтажа. Одним из способов определения отклонений является расчёт точности конструкций. Он

опирается на положения теории размерных цепей. Приведен анализ конструктивных решений узлов пространственных стержневых систем.

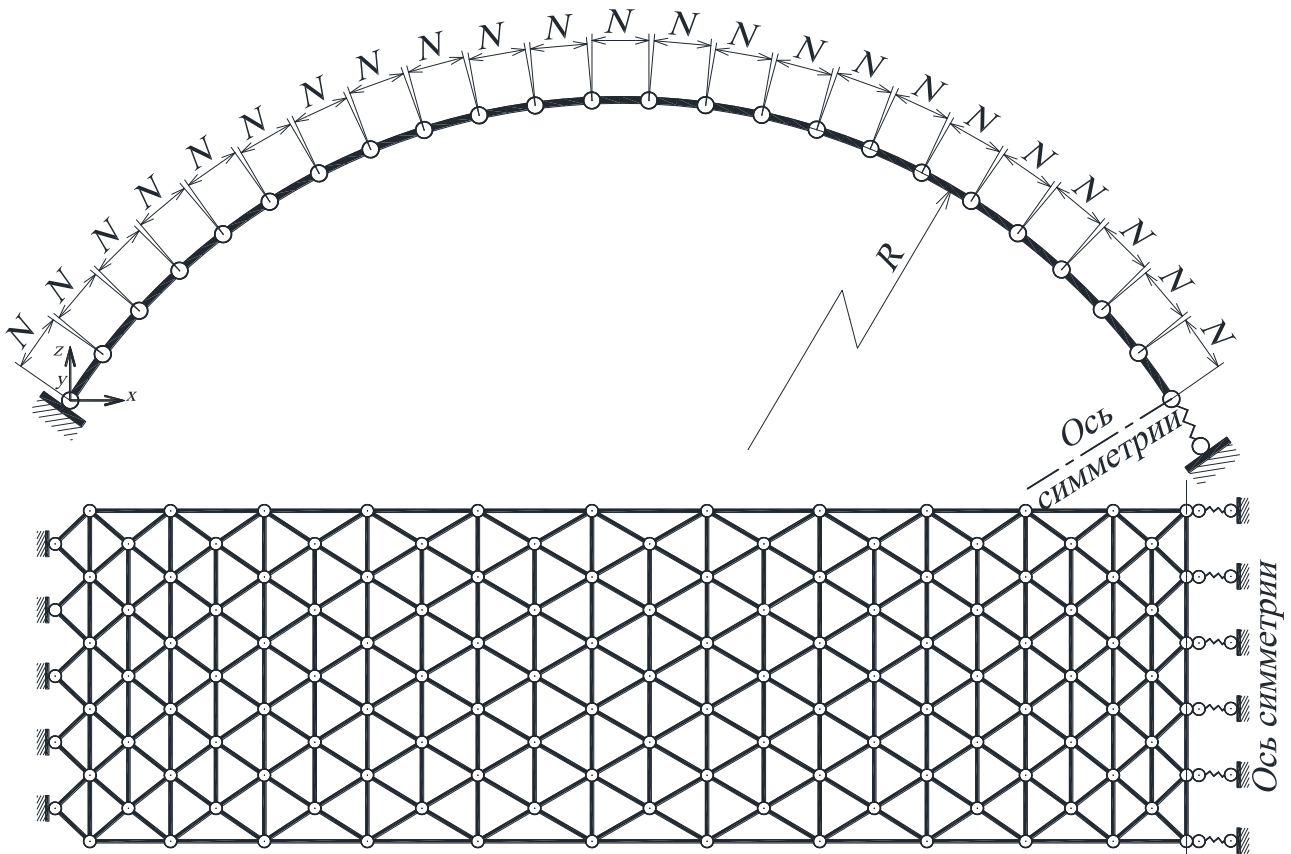


Рис. 1. Схема однослойной цилиндрической оболочки покрытия.

Исследованием работы конструкций большепролетных пространственных стержневых покрытий с учётом отклонений и дефектов занимались Г.И. Белый, А.С. Гвамичава, В.Н. Гордеев, Е.В. Горохов, И.И. Зуева, М.Д. Корчак, И.Л. Кузнецов, Е.В. Лебедь, Н.П. Мельников, В.Ф. Мушанов, А.В. Перельмутер, В.А. Савельев, Э.В. Третьякова, В.Д. Свердлов, А.И. Шимановский, В.Н. Шимановский, В.В. Филлипов, А.М. Югов и другие. Теоретические положения и расчет точности изложены в работах Б.И. Беляева, М.Я. Егнуса, Р.А., Кашубы, Г.Н. Колесникова, И.В. Колечицкой, А.Ф. Котлова, Д.М. Лаковского, В.Ф. Лукьянова, Б.Я. Мойжеса, В.С. Сытника, В.А. Тарасова, и других. Среди зарубежных ученых этой теме посвятили свои работы Charles R. Farrar, Chars J. Gantes, Chung-Yue Wang, Hiroshi Ueno, Kaouk, Zimmerman, Kaveh A., Kohtaro Matsumoto, Masahiro Noumi, Mehmet ÜLKER, Nouri M., Ömer KELEŞOĞLU, Sachiko Wakabayashi, Shen M.-H., Tetsuji Yoshida, Tokunbo Ogunfunmi, Tsou P., Yutaro Fukase и другие.

Расчёт точности монтажа осуществляется путём выявления размерных связей в конструктивно-технологических схемах конструкций и составления размерных цепей, и решения уравнений точности. Другой способ основан на статическом расчете шарнирно-стержневых систем методами строительной механики, которые используют известную формулу Мора. Вероятностный характер задачи при этом учитывается с использованием метода Монте-Карло. При определении геометрических отклонений простых конструкций неточности сборки могут быть учтены расчетом по методу минимум-максимум



на основе теории размерных цепей. Из анализа литературных источников установлено, что:

- для исследования возможных отклонений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытиях использование методов теории размерных цепей затруднено, а чаще невозможно в связи с конструктивной многосвязностью их каркасов;

- статический расчет методом Мора не учитывает последовательность сборки шарнирно-стержневого покрытия в конструктивную форму.

Несовершенства являются как сопутствующими, так и побудительными причинами большинства аварий большепролетных покрытий, среди них:

- 1985 г. – авария купола Федерального Государственного Унитарного Предприятия Всероссийский Электротехнический Институт им. В.И. Ленина в г. Истра, Московская область. Причина: при проектировании не было учтено накопление деформаций и внутренних напряжений в процессе монтажа купола;

- 2006 г. – авария покрытия Бауманского рынка, г. Москва. Причина: локальное превышение нагрузок на антресоль покрытия;

- 2009 г. – авария половины покрытия, еще не сданного в эксплуатацию стадиона Gong Badak в Малайзии. Причина: ошибки при проектировании, выбрана «опасная» конструктивная форма;

- 2011 г. – авария покрытия над трибунами футбольного стадиона De Grolsch Veste, г. Энсхед, Нидерланды. Причина: не учтены монтажные нагрузки.

Обзор и анализ научно-технических и нормативных литературных источников позволил сформулировать актуальность работы, цель и задачи исследования.

Во **втором разделе** обоснован выбор направления исследований, изложена общая методика проведения исследования, развернуто приведены методы решения поставленных задач и их сравнительная оценка. Кратко изложены основные методы расчета, рассмотрена гипотеза исследования, характеристики использованных вычислительных комплексов, а также методика оценки ошибок измерения экспериментальных данных.

Для определения теоретических значений параметров НДС в элементах большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий с учетом геометрических отклонений необходимо определить величину температурного воздействия. Температурным воздействием в ВК SCAD смоделированы, отклонения, которые могут возникнуть в стержневых оболочках покрытия. Величина температурного воздействия, при котором элемент увеличится в длину, определяется по формуле

$$\Delta t = \delta_i / (\alpha_i \times \ell_i), \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – величина температурного воздействия, необходимая для перемещения стержня на единицу длины;

$\delta_i$  – величина перемещения, для стержня оболочки, полученная из расчёта собираемости;

$\alpha_i$  – коэффициент линейного расширения материала стержня;

$\ell_i$  – номинальная длина стержня оболочки по проекту.

В третьем разделе разработана методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, основанная на расчете пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями. Суть методики заключается в численном моделировании на персональном компьютере (ПК) процесса сборки сооружения в соответствии с технологической последовательностью его возведения. С целью получения случайных отклонений используется датчик случайных чисел (ДСЧ), который позволяет смоделировать искаженную геометрическую форму любой пространственной шарнирно-стержневой металлической конструкции. Также в разделе приведены результаты статистического анализа ДСЧ. В общем, моделирование сооружения состоит из моделирования установки в проектное положение отдельных элементов согласно технологической последовательности сборки.

Моделирование формы монтажных элементов осуществляется путем геометрического построения и определения положения их вершин. Для получения действительной геометрической формы конструкции при построении используются значения ее расчетных геометрических параметров. Длины отрезков в расчетной схеме являются исходными параметрами при геометрическом построении математической модели формы монтажных элементов и блоков. Значения расчетных геометрических параметров определяют по формуле:

$$\ell_i^* = \ell_i + \delta\ell_{m,i} + \delta\ell_{\sigma,i}, \quad (2)$$

где  $\ell_i^*$  – расчетное значение геометрического параметра;

$\ell_i$  – проектное значение геометрического параметра;

$\delta\ell_{m,i}$  – систематическое отклонение параметра от номинального значения;

$\delta\ell_{\sigma,i}$  – случайное отклонение параметра от номинального значения.

Случайное отклонение  $\delta\ell_{\sigma,i}$  по своей природе является результатом совокупности большого количества элементарных ошибок, допускаемых на первоначальных операциях – изготовления, обработки и сборки монтажного элемента. В процессе геометрического моделирования монтажного блока действительной формы вычисляются координаты всех узлов (вершин) его расчетной схемы. Для каждого узла решается конкретная задача пересечения геометрических объектов: прямой и сферы; двух окружностей; двух сфер и плоскости, трех сфер и других. При этом в качестве радиусов окружностей или сфер используется значение расчетных геометрических параметров  $\ell_i^*$ . Такой подход к решению геометрических задач впервые применён и распространён в геодезии.

Рассмотрим стадии построения формы шарнирно-стержневой системы на примере ячейки фермы, используя предлагаемый подход. Сборка ячейки шарнирно-стержневой системы состоит из четырех стадий. Порядок сборки представлен как последовательность геометрических преобразований номинальных и фактических координат её элементов (Рис. 2).

В начале расчёта определим исходную пространственную базу для построения. Примем, что узлы  $A^*$  и  $D^*$  совмещены с проектными  $A$  и  $D$ , действительное ребро  $A^*D^*$  совмещено по направлению с проектным –  $AD$ , действительные узлы  $B^*$ ,  $C^*$ ,  $E^*$  находятся в той же плоскости, что и узлы  $A$  и

Д. Таким образом, действительный узел Е находится в точке пересечения двух окружностей с радиусом  $R_1$  и  $R_2$ .  $R_1 = A^*E^* = AE + \Delta\ell_i$ , и  $R_2 = D^*E^* = DE + \Delta\ell_i$  – первая стадия (Рис. 2).

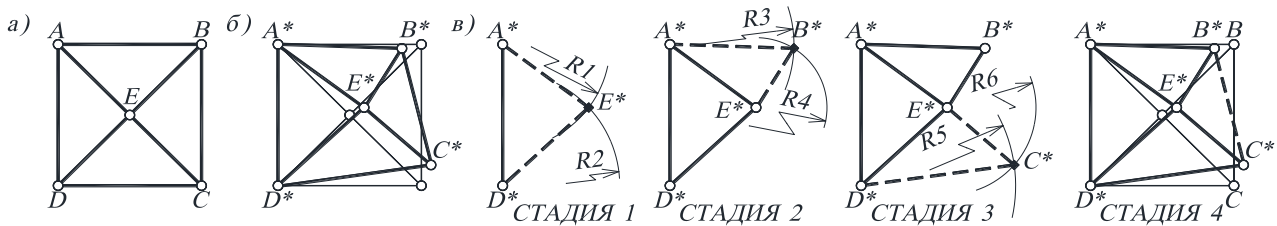


Рис. 2. Схема ячейки шарнирно-стержневой системы:

- а – номинальная;
- б – действительная;
- в – на стадии сборки.

Вторая стадия сборки – поиск действительного положения координат узла  $B^*$ . Действительное положение узла  $B^*$  находится как пересечение двух окружностей –  $R_3 = A^*B^* = AB + \Delta\ell_i$  и  $R_4 = E^*B^* = EB + \Delta\ell_i$ . Аналогично определяется положение узла  $C^*$ . Узел  $C^*$  находится на пересечении двух окружностей радиусом  $R_5 = D^*C^* = DC + \Delta\ell_i$  и  $R_6 = E^*C^* = EC + \Delta\ell_i$ . Возможная действительная длина стержня  $BC - B^*C^*$  находится как разница действительных координат точек  $C^*$ ,  $B^*$  – четвертая стадия построения геометрической формы ячейки шарнирно-стержневой системы. Величина суммарного линейного отклонения ( $\Sigma\Delta x_i$ ) в замыкающем стержне определяется как разница номинальной длины стержня  $BC$  и действительной  $B^*C^*$ . Т.е.,  $\Sigma\Delta x_{BC} = BC - B^*C^*$ .

В работе рассмотрено два варианта сборки оболочек – продольная и поперечная относительно главной продольной оси сооружения. Определены величины накопления отклонений геометрической формы оболочки и размеры замыкающих стержней в зависимости от количества звеньев  $N = 7-23$  единиц в поперечном направлении, оболочки с  $\varphi = 110^\circ$  и  $N = 23$  единицы (Рис. 1).

Приведены результаты статистических исследований возможных геометрических отклонений в однослойных цилиндрических шарнирно-стержневых оболочках покрытия при разных последовательностях сборки. На примере цилиндрической оболочки показано использование предложенной методики расчёта геометрических отклонений, которая реализована ВК РАСК.

В этом разделе приведено описание ВК РАСК, реализованный на ПК. Блок-схема ВК РАСК и алгоритм методики определения дополнительных напряжений даны на рис. 3, 4. В разделе приведены результаты исследований геометрических отклонений при сборке большепролетного сооружения на примере покрытия «Склада усреднения основного сырья цементного завода». Для определения теоретического НДС конструкций с учетом геометрических отклонений необходимо: определить величину температурного воздействия в замыкающем стержне конструкции, создать расчетную схему в ВК SCAD; собственно, расчёт конструкции с отклонениями; анализ результатов и при необходимости корректировка модели путем разработки конструктивных или технологических мероприятий для снижения влияния геометрических отклонений на сборочные усилия в конструкции.

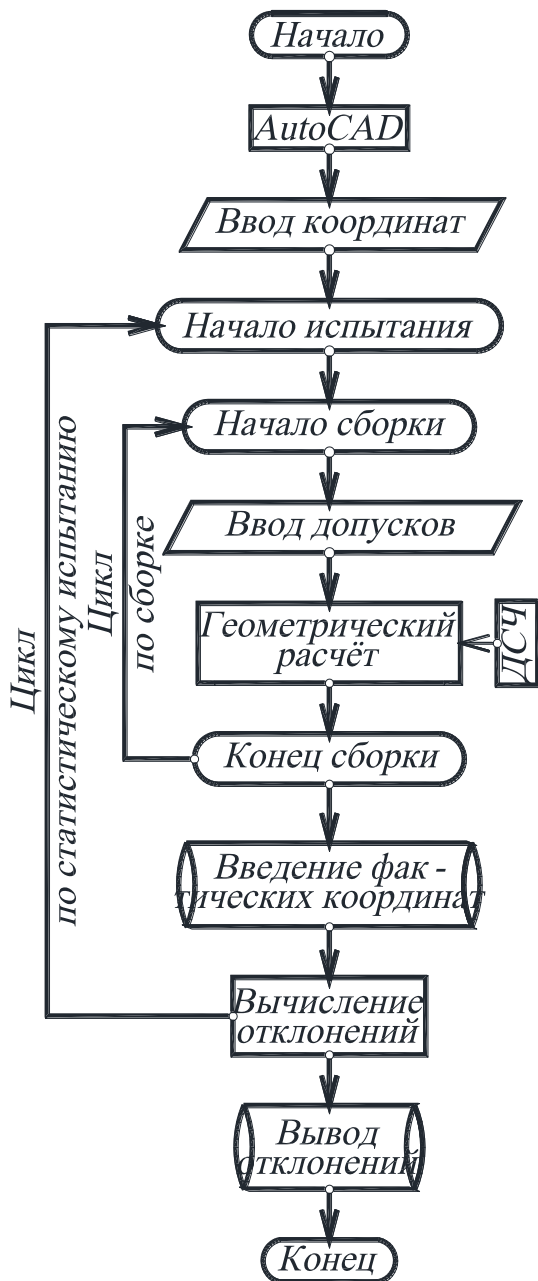


Рис. 3. Блок-схема ВК РАСК.

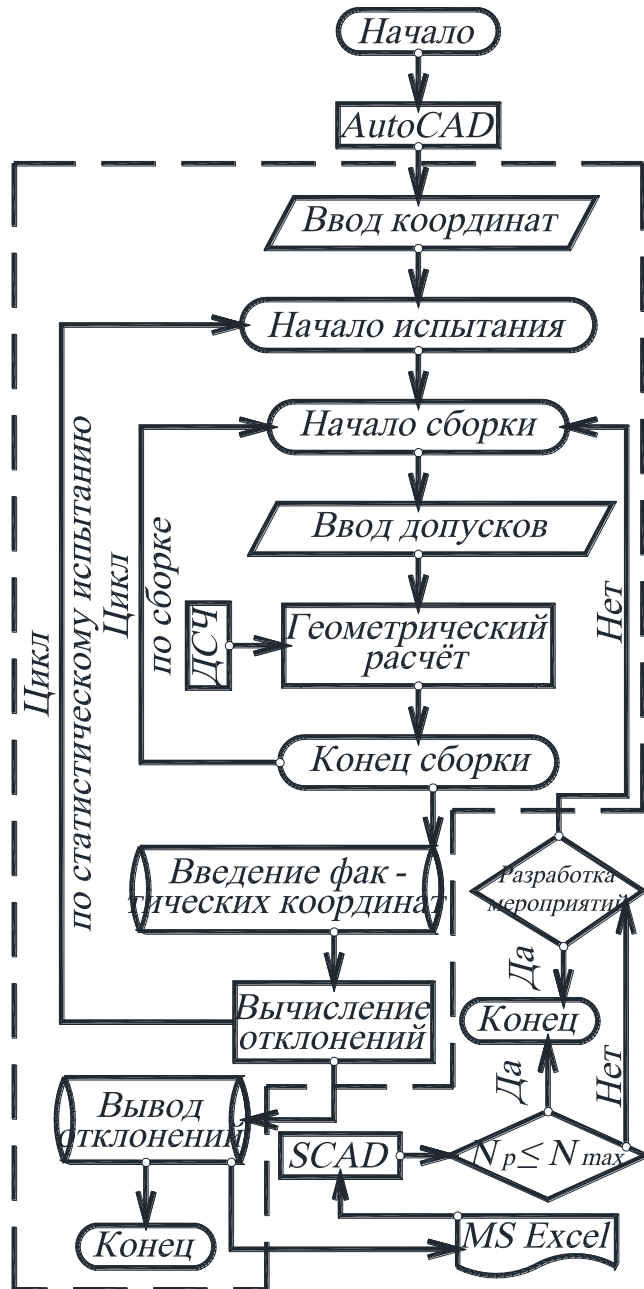


Рис. 4. Блок-схема методики определения сборочных напряжений.

Рассмотрим и приведём результаты исследования большепролетного сооружения «Склад усреднения основного сырья цементного завода». На рис. 5 дана общая схема сооружения склада усреднения основного сырья цементного завода. Сооружение склада представляет собой круглое здание диаметром 107 м, высотой 35,3 м, состоящее из цилиндрической и купольной частей.

Цилиндрическая часть здания высотой 10 м состоит из 48 решётчатых колонн, объединённых между собой системой колец и крестовых связей. Расстояние между ветвями колонн 0,84 м, расстояние между колоннами в меридиональном направлении составляет  $\approx 6,99$  м. На отм. +10 м колонны имеют перегиб, переходящий от цилиндрической части сооружения к сферической, образуя опоры для купольного покрытия. Купольное покрытие сооружения запроектировано по ребристо-кольцевой схеме со стрелой подъёма  $\approx 22,1$  м. Каркас купола состоит из 48-ми решетчатых ребер высотой 1,2 м. Сечение поясов и решетки ребер и связей купола выполнено из гнутосварного профиля. Ребра связаны между собой 10 ярусами промежуточных колец.

Меридиональные ребра очерчены по дуге радиусом  $\approx 77$  м. Каждое ребро купольного покрытия объединено со смежным ребром системой связей в пространственную арку.

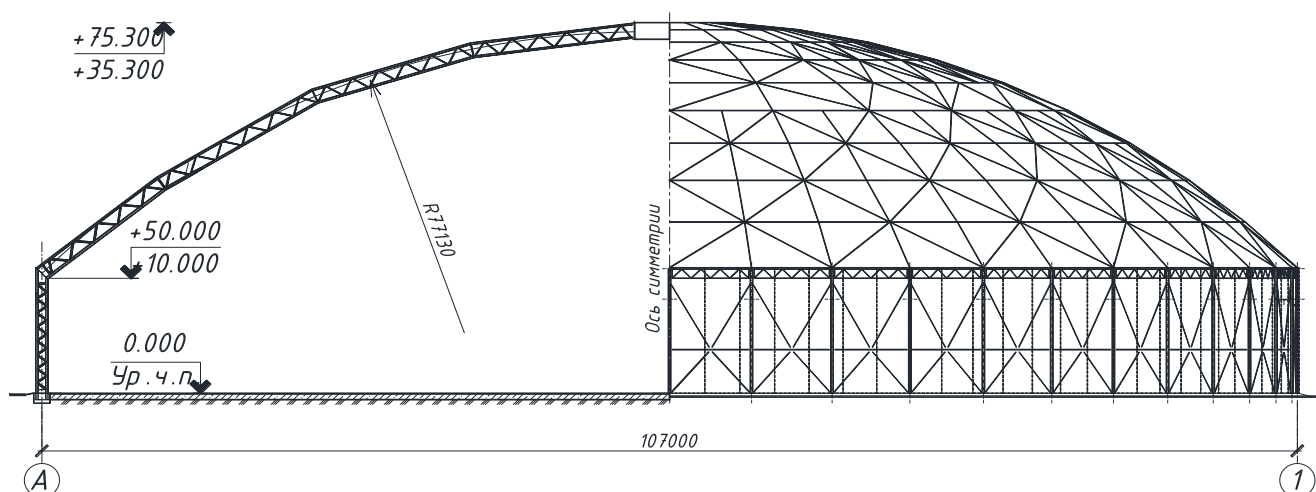


Рис. 5. Схема сооружения склада усреднения основного сырья цемента.

В проекте производства принято вести монтаж начиная с установки колонн. Потом собирают купольное покрытие на подмостях в направлении от внешнего опорного кольца к внутреннему. Цилиндрическую часть монтируют плоскими монтажными блоками, состоящими из отправочных марок, собранных на укрупнительной площадке. Параллельно с монтажом колонн монтируют вертикальные и кольцевые связи между колоннами и т.д. Параллельно с монтажом цилиндрической части в центре сооружения методом наращивания устанавливается монтажная стойка, на которую устанавливают в проектное положение внутреннее кольцо.

Конструкцию купольной части сооружения монтируют блоками (секторами), которые состоят из ребер, связей, распорок, прогонов, внутренних и внешних ограждающих панелей. Из отправочных марок собирают пространственные арки на двух передвижных сегментных подмостях, диаметрально размещенных относительно друг к другу. После закрепления концов арок на нижнем и верхнем кольцах подмости опускают и перемещают в новое положение под углом  $30^\circ$  в плане по отношению к первоначальному положению и т.д. Замыкание колец купола выполняют после завершения монтажа всех ребер путем установки связей и распорок по проекту. Затем выполняют демонтаж передвижных подмостей и монтажной стойки с использованием операции раскружаливания. Для статистического исследования возможных отклонений возведения сооружения достаточно провести моделирование монтажа пяти смежных блочных части цилиндрической и сферической части сооружения.

По результатам численного исследования отклонений в ВК РАСК видно, что с увеличением количества узлов в направлении сборки увеличиваются отклонения узлов и стержней сооружения. В результате 1000 численных полных построений расчётной схемы исследуемого сооружения получены эпюры среднеквадратических отклонений узлов в нормальном, тангенциальном и меридиональном направлении. Анализ НДС сооружения свидетельствует, что

несущая способность отдельных стержней недостаточна при наличии сборочных усилий.

В четвертом разделе приведены результаты исследования геометрических отклонений при сборке меридиональных ребер, которые являются основными несущими конструкциями как однослойных цилиндрических оболочек, так и сферических (Рис. 6). В качестве предмета исследования рассмотрены две схемы сборки меридионального ребра: консольная с фиксированным положением первого элемента и свободная, при которых изучались искривления номинальной геометрической формы меридионального ребра по величинам радиальных и тангенциальных отклонений узлов ребра оболочки от номинального положения. Систематические отклонения расчетных параметров монтажных элементов не учитывались.

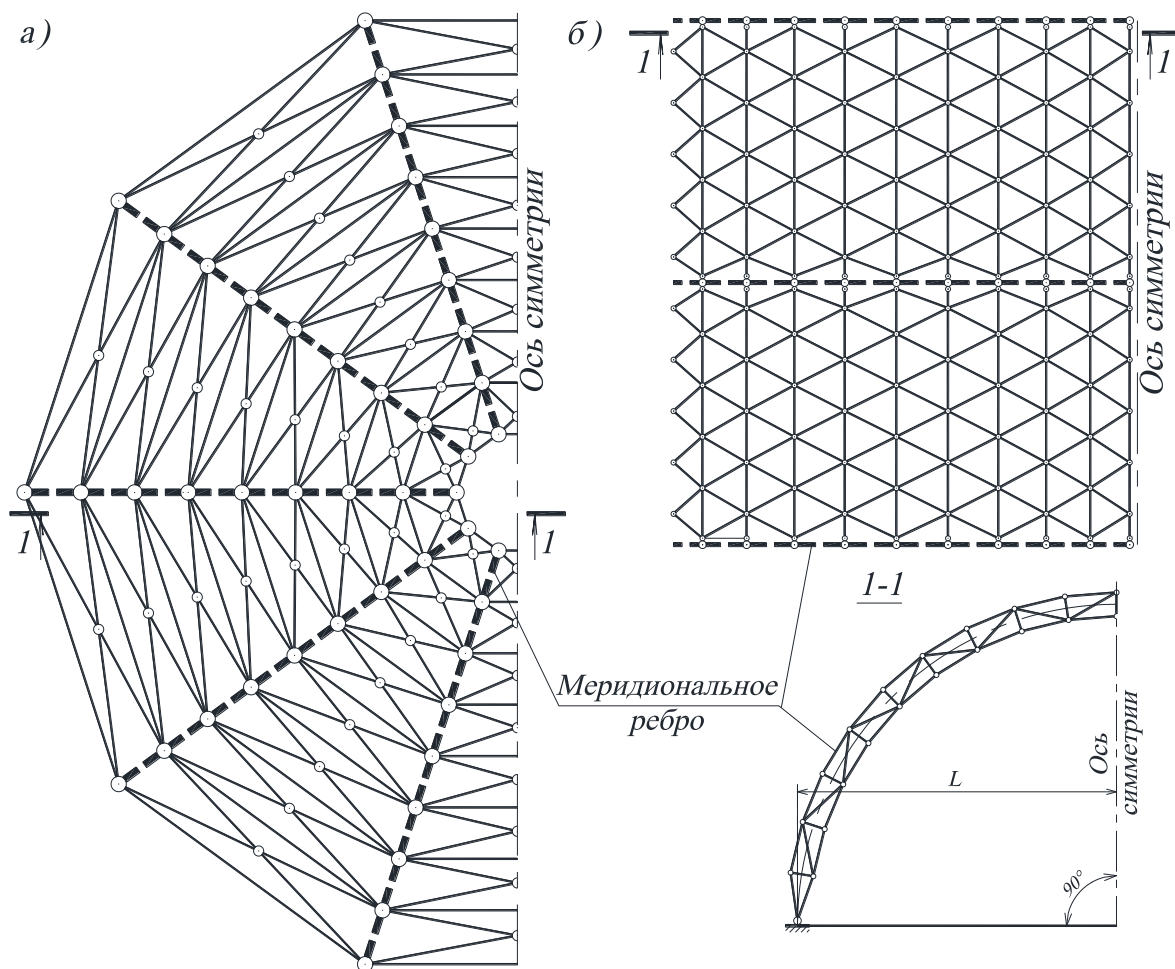


Рис. 6. Схемы шарнирно-стержневых оболочек:

а – сферической формы;

б – цилиндрической формы.

На рис. 7 показана зависимость отклонения последнего звена меридионального ребра в радиальном направлении в зависимости от количества элементов ребра в направлении сборки при  $L = \text{const}$ ,  $h = \text{const}$ . На рис. 8 дана зависимость среднеквадратических отклонений формы в середине меридионального ребра  $\sigma_{\delta R, L/2}$  от величины угла его дуги.

Для оценки точности вычисления значений среднеквадратических отклонений построены графики, отображающие зависимость этой точности от объема выборки для разных уровней надежности. На примере меридионального ребра однослойного большепролетного шарнирно-стержневого металлического



покрытия показано использование полученных зависимостей для оценки геометрических отклонений, связанных с неточностью монтажных элементов меридионального ребра.

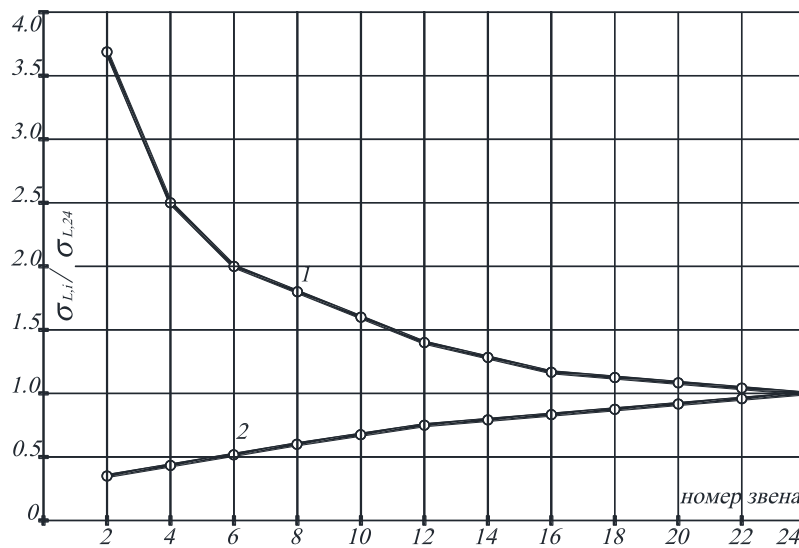


Рис. 7. Зависимость отклонения последнего звена меридионального ребра в радиальном направлении от количества звеньев при  $L = \text{const}$ ,  $h = \text{const}$ :

- 1 -  $(\Delta\ell_i/2) = \text{const}$ ;  
 2 -  $\Delta\ell_{1,2}/2 = \text{const}$ .

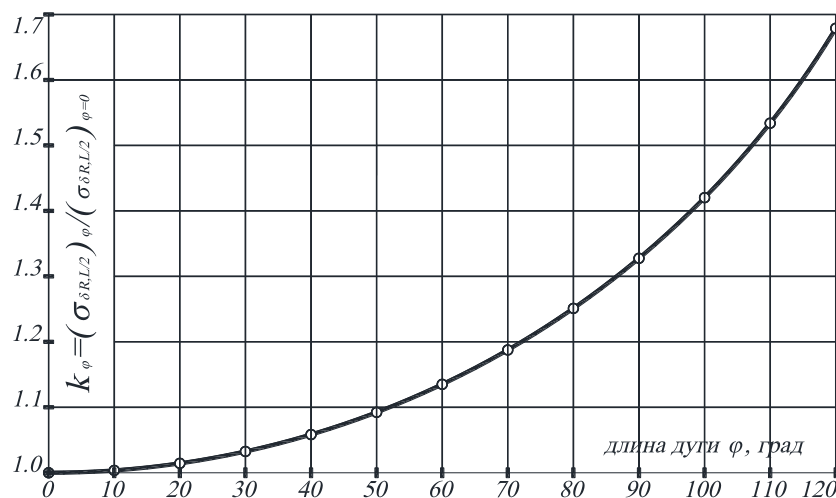


Рис. 8. Зависимость среднеквадратических отклонений формы в середине меридионального ребра  $\sigma_{\delta R,L/2}$  от размера угла его дуги.

Выявлена характерная зависимость геометрических отклонений равноудаленных от основания узлов меридиональных ребер, состоящих из разного количества элементов одинаковой высоты. Установлено, что:

- отклонения меридиональных ребер прямо пропорциональны допускам расчетных параметров элементов и согласуются с законом Гаусса;
- отклонения меридиональных ребер обратно пропорциональны относительной высоте монтажных элементов; в меридиональных ребрах, состоящих из четырех и больше монтажных элементов, отклонения определяются допусками продольных расчетных параметров;
- меридиональные ребра большой кривизны характеризуются уменьшением радиальных отклонений, а в случае свободной схемы

меридиональное ребро большой кривизны характеризуется увеличением радиальных отклонений;

- увеличение кривизны меридионального ребра приводит к значительному увеличению тангенциальных отклонений, причём эти отклонения находятся в обратно пропорциональной зависимости с радиальными отклонениями относительно номинального положения.

В этом разделе разработана и предложена система конструктивной компенсации отклонений в виде нового конструктивного решения шарнирно-стержневой системы и нового способа монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий (Рис.9), которые защищены патентами Украины на полезную модель (№ и 2012 13187, № и 2012 13193, № и 2012 13191). Предлагаемая система расположения элементов компенсации может быть использована для устранения отклонений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических оболочках покрытия и других сооружений стержневого типа.

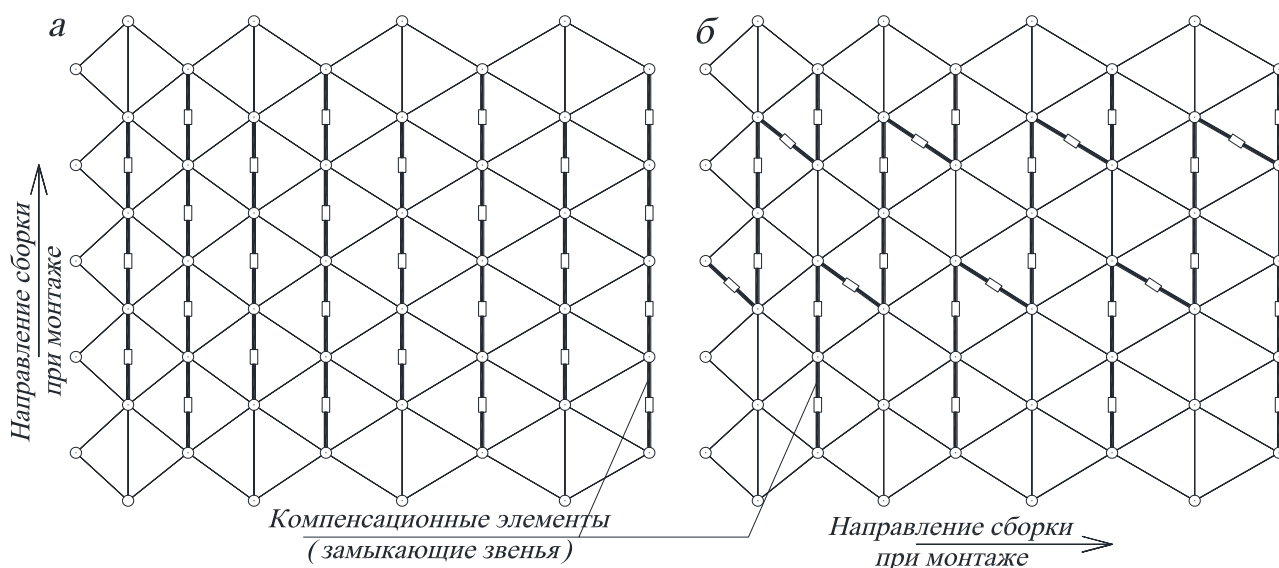


Рис. 9. Схема расположения элементов компенсации (патент № и 2012 13187):

а – при продольной схеме монтаже (сборки);

б – при поперечной схеме монтаже (сборки).

В пятом разделе изложены результаты экспериментальной проверки методики определения сборочных напряжений в шарнирно-стержневой системе при наличии заданных геометрических отклонений и без них. Расчётная схема и общий вид экспериментальной установки приведены на рис. 10, 11.

С целью исключения изгиба исследуемой системы при касании с поддерживающими ригелями были установлены катковые опоры, показанные на рис. 12. Создание геометрического отклонения в стержнях выполнено с помощью муфты. Для контроля геометрических отклонений в стержнях по деформациям на них были установлены тензодатчики. В процессе экспериментальной проверки НДС шарнирно-стержневой системы исследовано влияние отклонений либо их отсутствие. Задание отклонений выполнено с помощью системы управления, т.е. системы конструктивной компенсации отклонений. Напряжения в системе определяются тензометрическим методом с помощью системы измерительной тензометрической (СИИТ-3).



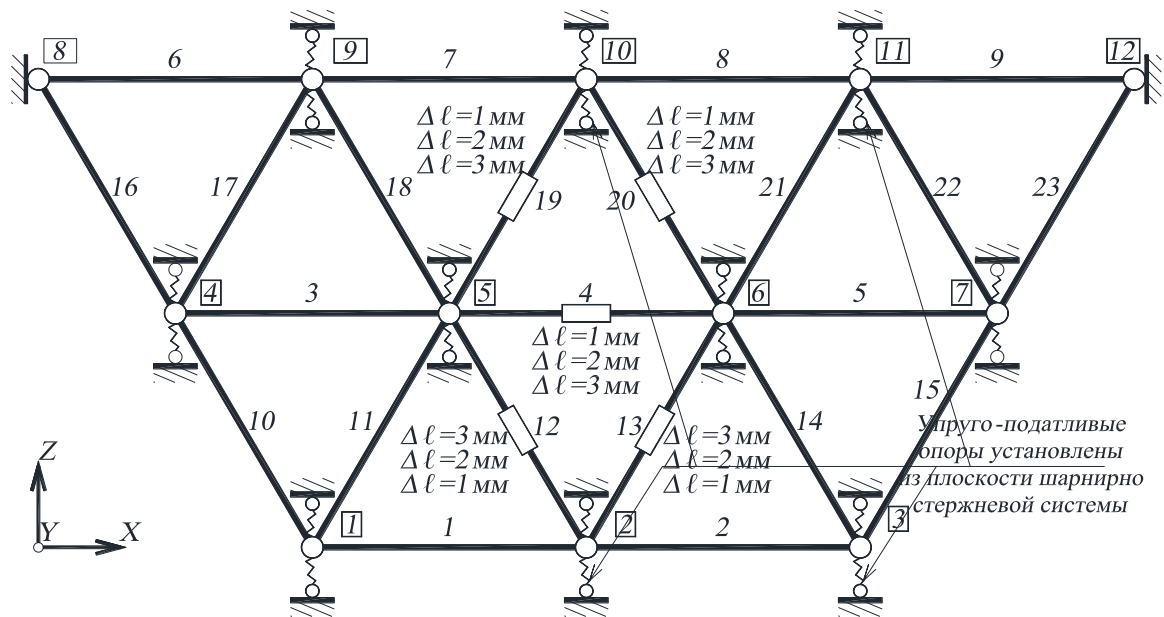


Рис. 10. Расчётная схема шарнирно-стержневой системы.



Рис. 11. Общий вид экспериментальной установки.

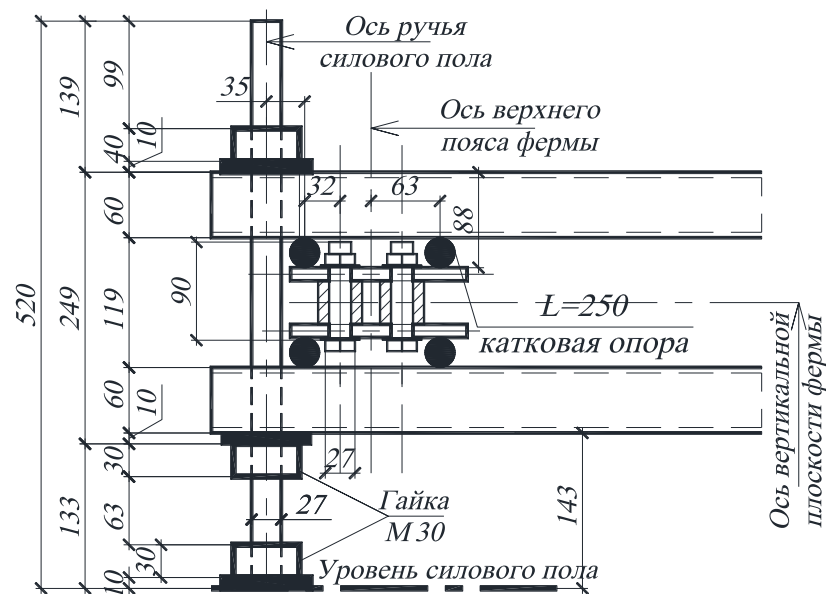


Рис. 12. Схема установки катковой опоры.

Для измерения деформаций, вызванных отклонением длины стержней с муфтами, во время испытаний использовались проволочные тензодатчики сопротивления с базой 20 мм на бумажной основе (марки ПКБ с электрическим сопротивление  $R = 201-203 \text{ Ом}$ ). Схема распыки тензодатчиков по стержням системы дана на рис. 13, но не по всем сечениям стержней. Такое расположение датчиков необходимо для получения полной информации об НДС системы, т.е. продольных усилий и напряжений.

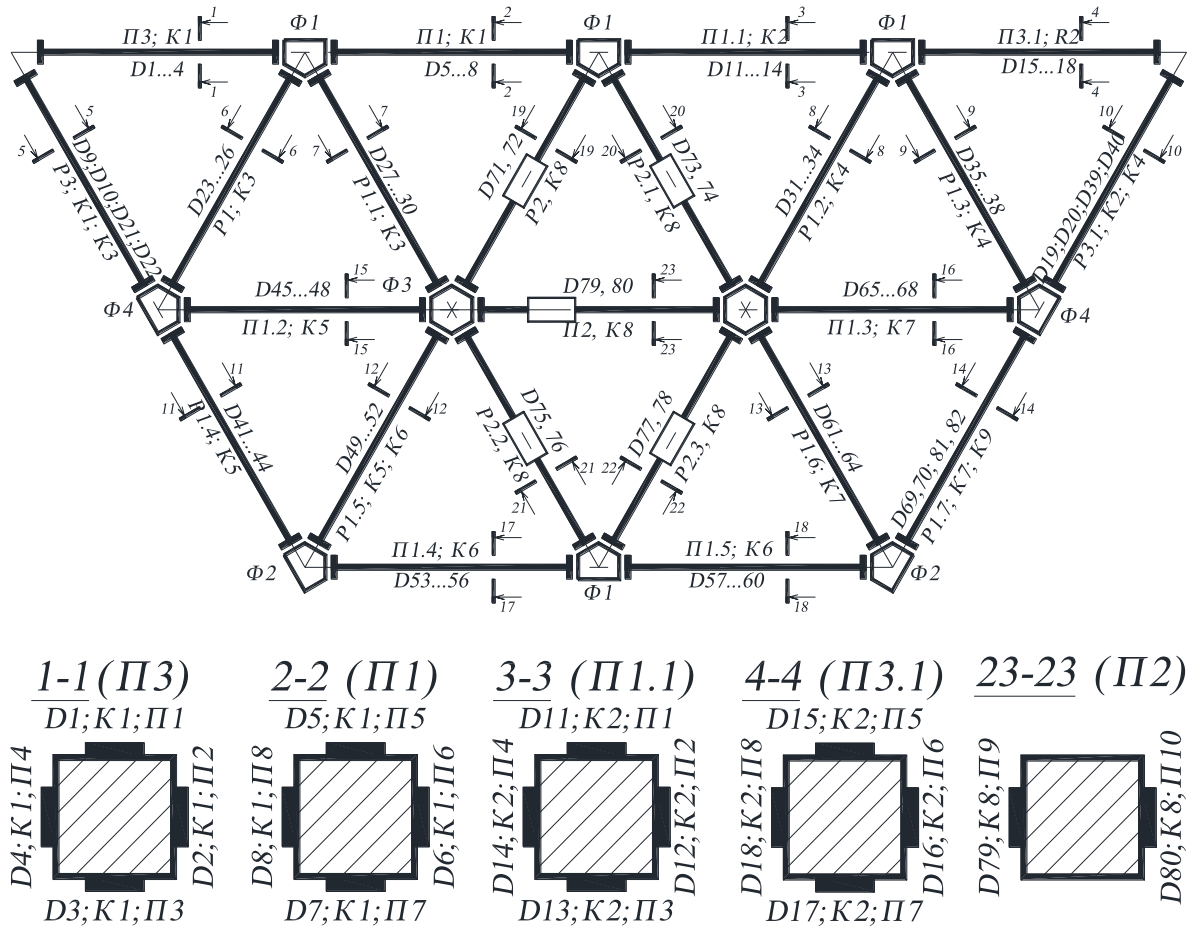


Рис. 13. Схема размещения тензодатчиков по стержням системы.

Для наклейки тензодатчиков на конструкцию применялся клей Сујаноран Chemistik. Выбор датчиков с базой 20 мм обусловлен исследованием НДС стержней с шириной грани 40 мм. Для определения цены деления датчиков была выполнена их контрольная тарировка на эталонной консольной балке. Средняя цена деления датчиков, закреплённых на клее Сујаноран Chemistik составляет  $S = 0,315 \text{ МПа} = 3,15 \text{ кгс/см}^2$ , с коэффициентом вариации среднеквадратического отклонения 3,32 %. На рис. 14 представлены сравнительные графики теоретических и экспериментальных значений сборочных усилий в шарнирно-стержневой системе.

Итак были проверены величины напряжений, определённые в ВК SCAD с экспериментальными усилиями в шарнирно-стержневой системе, которые отличаются от теоретических в пределах 1-3 %. Если сравнить усилия в поясе П1, то они отличаются от теоретических на 1-3%. Общий анализ напряжений показал, что во всех случаях экспериментальные значения отличаются от теоретических в пределах 1-5 % с надёжностью  $\gamma = 0,95$ , и это обусловлено конструктивным несовершенством системы, т.е. податливостью болтовых соединений в узлах и т.п.

В результате исследований установлены величины сборочных напряжений в шарнирно-стержневой системе при наличии заданных величин отклонений длин стержней. Следовательно, обоснована практическая применимость методики определения сборочных напряжений для использования её при проектировании.

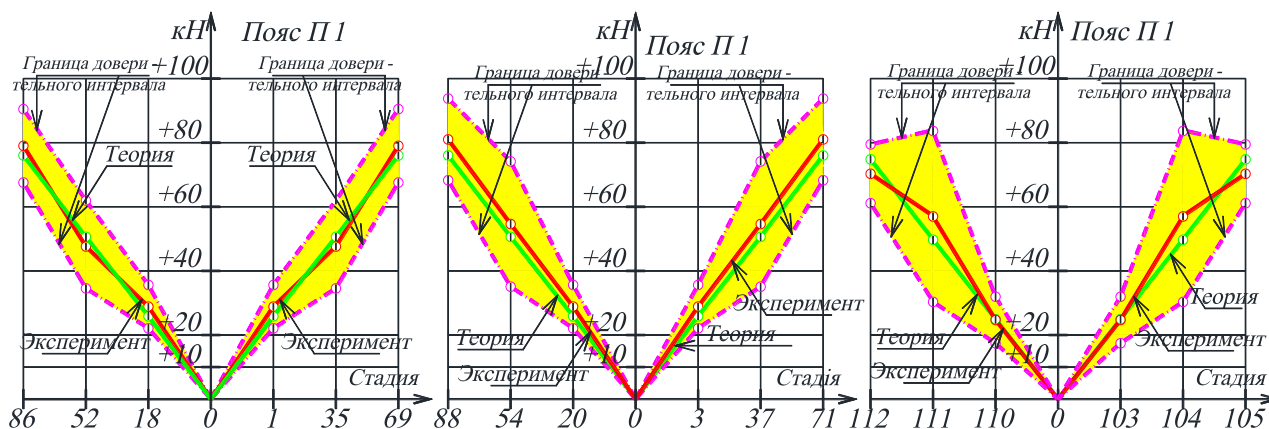


Рис. 14. Сборочные усилия в элементе П1.

## ВЫВОДЫ

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложен экспериментально-теоретический аппарат оценки, прогнозирования, апробирования и регулирования НДС большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий за счёт прогнозирования отклонений в зависимости от точности и последовательности укрупнительной и монтажной сборки.

1. Разработана математическая модель формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями и методика определения геометрических отклонений, и сборочных напряжений, которые позволяют спрогнозировать НДС в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытиях с учётом накопления геометрических отклонений.

2. Разработан и реализован алгоритм и программа ВК РАСК для расчета точности шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке (А.с. № 47952), что даёт возможность оценить отклонения в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытиях.

3. Разработаны новые конструктивные решения стыковых соединений стержней и способ монтажа большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, защищённые патентами Украины на полезную модель (№ и 2012 13187, № и 2012 13193, № и 2012 13191), которые позволяют достичь 100% уровня собираемости и снизить сборочные напряжения до нуля.

4. Исследованы при помощи ВК РАСК геометрические отклонения и получены их статистические характеристики на примере однослойных шарнирно-стержневых металлических оболочек покрытия и сооружения «Склада усреднения основного сырья цементного завода». Установлено, что отклонения меридионального ребра оболочки обратно пропорциональны отношению высоты монтажного элемента к длине ( $h/l$ ). Распределение отклонений меридиональных рёбер согласуется с законом Гаусса. В меридиональных рёбрах, состоящих из четырёх и более элементов, отклонения,

в основном, определяются допусками продольных расчётных геометрических параметров – отклонением длины марки.

5. Установлено, что меридиональные ребра различной кривизны характеризуются различными величинами отклонений. При этом с увеличением кривизны наблюдается уменьшение радиальных отклонений ребер от номинальной геометрической формы. Увеличение кривизны меридионального ребра приводит к значительному увеличению отклонений последнего звена в тангенциальном направлении, и это отклонение находится в обратно пропорциональной зависимости с радиальными отклонениями среднего звена по отношению к номинальной форме ребра.

6. Получены зависимости между среднеквадратичными отклонениями и основными геометрическими характеристиками ребер, которые могут быть использованы для определения геометрических отклонений шарнирно-стержневых металлических оболочек, и других сооружений с несущими конструкциями в виде арок – цилиндрических оболочек и куполов.

7. Экспериментально обоснована практическая применимость методики определения сборочных напряжений и геометрических отклонений на примере исследования работы плоской шарнирно-стержневой системы. В ходе эксперимента выявлено, что распределение напряжений в элементах зависит от величин отклонений. Величины экспериментальных напряжений отличаются от теоретических не более чем на 1-3% с надёжностью  $\gamma = 0,95$ . Итак, проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность методики определения сборочных напряжений, которая разработана в диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях,  
рекомендованных МОН Украины:

1. Югов, А. М. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов плоской рамы с учетом геометрических несовершенств [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 1. – С. 51-61. *(Выполнен расчет и обоснование температурного воздействия для моделирования линейных отклонений в стержневых системах на примере плоской П-образной рамы).*

2. Югов, А. М. Напряженно-деформированное состояние однопоясной стержневой металлической оболочки покрытия цилиндрической формы при наличии погрешностей изготовления и монтажа [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19, № 1. – С. 27-36. *(Выполнено численное статистическое исследование сборочных напряжений в шарнирно-стержневых металлических оболочках покрытия).*

3. Югов, А. М. Статический расчет однопоясных цилиндрических стержневых металлических оболочек покрытия [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19, № 2. – С. 81-91. *(Выполнен расчет и анализ результатов статического расчета однослойных цилиндрических стержневых металлических оболочек покрытия на восприятие эксплуатационных нагрузок).*

4. Югов, А. М. Методика определения сборочных усилий в большепролетной пространственной стержневой системе [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19, № 3. – С. 137-142. *(Создана методика определения сборочных напряжений в большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных оболочках покрытия).*

5. Vasylev, V. N. The methodology of experimental and theoretical research efforts in the assembly hinge-core system with use a control system [Текст] / V. N. Vasylev, A. N. Myronov, A. M. Yugov, **A. B. Bondarev** // Металлические конструкции. – 2013. – Том. 19, № 4. – С. 215-223. *(Создана экспериментальная конструкция и специализированный стенд, для проведения эксперимента).*

6. Vasylev, V. N. The results of experimental and theoretical research efforts in the assembly hinge-core system using a control system. / V. N. Vasylev, A. N. Myronov, A. M. Yugov, **A. B. Bondarev** // Металлические конструкции. – 2014. – Том. 20, № 1. – С. 5-14. *(Проведена экспериментальная проверка сборочных напряжений при наличии заданных геометрических отклонений, их статистическая обработка и анализ на примере плоской шарнирно-стержневой конструкции [системы] с использованием системы конструктивной компенсации отклонений).*

7. Югов, А. М. К вопросу расчета стержневых конструкций с учетом дефектов изготовления и монтажа [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. научн. трудов. – Одесса: ОГАСА. – 2011. – № 16. – Часть 1. – С. 269-274. *(Выполнен анализ существующих методов расчета стержневых систем с учетом отклонений, и постановка задач исследования).*

8. Югов, А. М. Моделирование монтажа пространственных стержневых конструкций [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, зданий и сооружений: сб. научн. трудов – Ровно: НУВХП. – 2013. – Вып. 25. – С. 629-632. *(Разработана математическая модель формирования пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями для большепролетных шарнирно-стержневых металлических пространственных покрытий).*

9. **Бондарев, А. Б.** Оценка монтажных воздействий в однопоясной стержневой металлической оболочке покрытия цилиндрической формы [Текст] / А. Б. Бондарев // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры: сб. научн. трудов. – Макеевка: ДонНАСА. – 2013. – Вып. 6 (104). – С. 54-59.

10. Югов, А. М. Программный комплекс расчета пространственной размерной цепи для металлических стержневых конструкций [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Сб. научн. трудов Украинского института стальных конструкций им. В. Н. Шимановского / под общей редакцией заслуженного деятеля науки и техники Украины, члена-корреспондента НАН Украины, д.т.н., профессора А. В. Шимановского. – К.: Сталь. – 2013. – Вып. 11. – С. 63-71. *(Разработан алгоритм расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке).*

– публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

11. Югов, А. М. Оценка живучести однопоясной металлической оболочки покрытия цилиндрической формы вследствие погрешностей изготовления и монтажа [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // International journal for computational civil and structural engineering. – 2013. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 124-131. (*Выполнен расчет и анализ результатов расчета живучести стержневых металлических оболочек покрытия цилиндрической формы при наличии геометрических отклонений*).

12. **Бондарев, А. Б.** Определение и анализ сборочных отклонений в металлическом каркасе большепролетного сооружения с купольным покрытием [Текст] / А. Б. Бондарев, А. М. Югов // International journal for computational civil and structural engineering. – 2015. – Vol. 11. – Issue 1. – P. 90-96. (*Выполнен расчёт и анализ сборочных отклонений в металлическом каркасе большепролетного сооружения с купольным покрытием*).

13. **Бондарев, А. Б.** Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учётом сборки [Текст] / А. Б. Бондарев, А. М. Югов // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – Том. 56. – №4. – С. 28-37 (*Выполнен расчёт и оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учётом сборки*).

– публикации в иностранных периодических изданиях:

14. **Bondarev, A. B.** The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence [Text] / A. B. Bondarev, A. M. Yugov // Procedia Engineering – 2015. – Vol. 117. – P. 953–963. (*Разработан метод генерации шарнирно-стержневой системы с учётом последовательности сборки и наличия отклонений в стержнях, также выполнены расчёты однопоясной шарнирно-стержневой оболочки с учётом отклонений*).

15. **Бондарев, А. Б.** Сборочные отклонения в шарнирно-стержневом металлическом покрытии [Текст] / А. Б. Бондарев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – Том. 30. – № 3. – С. 98-110.

– публикации в других изданиях:

16. **Бондарев, А. Б.** К вопросу расчета криволинейного стержня с учетом дефектов изготовления и монтажа [Текст] / А. Б. Бондарев // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях: сборник докладов IV Международной научно-практической конференции (Москва, 26-29 июня 2012 г.) / Минобрнауки РФ, Правительство Москвы, ВВЦ, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет». – М.: МГСУ. – 2012. – С. 25-28.

17. Югов, А. М. Численное статистическое исследование возможных погрешностей возведения однопоясной металлической оболочки покрытия цилиндрической формы [Текст] / А. М. Югов, **А. Б. Бондарев** // Расчет и проектирование металлических конструкций: сборник докладов научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Е. И. Белени. Москва, 25 марта 2013 г. / под. ред. А. Р. Туснина. – М.: МГСУ. – 2013. – С. 247-251. (*Выполнено численное статистическое исследование геометрических отклонений в шарнирно-стержневых металлических покрытиях*).



18. **Бондарев, А. Б.** Вычислительный комплекс для моделирования большепролетных стержневых систем с учетом дефектов изготовления и технологии возведения [Текст] / А. Б. Бондарев // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях: сборник докладов V Международной научно-практической конференции (Москва, 26-28 июня 2013 г.) / Минобрнауки РФ, Правительство Москвы, ВВЦ, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет». – М.: МГСУ. – 2013. – С. 24-27.

19. Пат. № 79680 Украина, МПК E04B 1/32; E04B 1/58 Способ монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий [Текст] / **Бондарев А. Б.**, Югов А. М.; заявитель и патентообладатель Бондарев А. Б., Югов А. М. – № u 2012 13187; заявлено 19.11.2012; опубликовано 25.04.2013, Бюллетень № 1. – 5 с. (*Разработан и предложен новый способ монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий*).

20. Пат. № 80327 Украина, МПК E04B 1/38; E04B 1/58 Стыковое соединение стержней с равными размерами поперечного сечения [Текст] / **Бондарев А. Б.**, Югов А. М.; заявитель и патентообладатель Бондарев А. Б., Югов А. М. – № u 2012 13193; заявлено 19.11.2012; опубликовано 25.04.2013, Бюл. № 1. – 6 с. (*Разработано новое конструктивное решение стыкового соединения стержней с равными размерами поперечного сечения*).

21. Пат. № 79683 Украина, МПК E04B 1/38; E04B 1/58 Стыковое соединение стержней с разными размерами поперечного сечения [Текст] / **Бондарев А. Б.**, Югов А. М.; заявитель и патентообладатель Бондарев А. Б., Югов А. М. – № u 2012 13191; заявлено 19.11.2012; опубликовано 25.04.2013, Бюллетень № 1. – 7 с. (*Разработано новое конструктивное решение стыкового соединения стержней с разными размерами поперечного сечения*).

## АННОТАЦИЯ

Бондарев А.Б. Напряженно-деформированное состояние большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий с учетом накопления геометрических отклонений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка, 2015.

Диссертация посвящена оценке влияния сборочных отклонений в большепролетных пространственных шарнирно-стержневых металлических покрытиях на их НДС.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные результаты, полученные автором, показана их научная новизна, практическая ценность, апробация и практическое применение.

**В первом разделе** диссертации приведен обзор конструкций и методов монтажа большепролетных металлических покрытий, построенных к настоящему времени в Украине и за рубежом. Дан анализ современного состояния вопросов, связанных с точностью изготовления и монтажа строительных конструкций, ее характеристиками, системой допусков,

правилами их назначения, программных комплексов размерного анализа. Приведен анализ существующих способов определения начальных отклонений строительных конструкций вследствие неточностей изготовления и монтажа отдельных элементов. Дано описание и анализ конструктивных решений узловых соединений. Выполнен анализ существующих на сегодняшний день ВК для размерного анализа строительных и машиностроительных конструкций.

Во **втором разделе** обоснован выбор направления исследований, изложена общая методика проведения диссертационного исследования, подробно приведены методы решения поставленных задач и их сравнительной оценки. Описаны основные методы расчета, рассматриваемая гипотеза, характеристики использованных ВК, а также методика оценки погрешностей измерения экспериментальных данных.

В **третьем разделе** разработана методика расчета собираемости пространственных большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, основанная на расчете пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями статико-вероятностным методом. Сущность такого подхода заключается в численной имитации на ПК всех стадий возведения сооружения в соответствии с технологической последовательностью. Чтобы получить случайные отклонения, которые будут распределены, к примеру, по нормальному закону Гаусса необходимо использовать ДСЧ, дающий возможность смоделировать действительную геометрическую форму любой пространственной металлической шарнирно-стержневой системы.

Приведены результаты статистического исследования геометрических отклонений при сборке однопоясных цилиндрических оболочек и меридиональных ребер, являющихся основными несущими конструкциями большепролетных покрытий. Исследования проводилось на ПК с помощью ВК РАСК. В качестве предмета исследования рассматривалось две последовательности сборки оболочек – продольная и поперечная, при которых изучалось искажение номинальной геометрической формы и размеры замыкающих звеньев  $N$  в зависимости от их количества поперечном направлении. Дано описание ВК РАСК, предназначенного для численного исследования геометрических отклонений в пространственных шарнирно-стержневых металлических конструкциях. ВК РАСК реализован на ПК. Даны результаты исследований геометрических отклонений в сооружении усреднительного склада цемента.

В **четвертом разделе** приведены результаты статистического исследования возможных сборочных отклонений при сборке меридиональных ребер, которые являются основными несущими конструкциями однопоясных оболочек. Исследования проводились на ПК с помощью ВК РАСК. Полученные в результате исследований зависимости между отклонениями и основными геометрическими характеристиками меридионального ребра, и могут, быть использованы, для определения отклонений в сооружениях с несущими конструкциями в виде арок.

Кроме того, работе рассмотрены две последовательности сборки однопоясных стержневых оболочек – продольная и поперечная. Определены величины искажений геометрической формы оболочки и размеры запирающих



стержней в зависимости от количества звеньев  $N = 7-23$  единицы в поперечном направлении. В результате исследований изучены искажения формы оболочек покрытия, величины замыкающих звеньев и величины сборочных усилий.

В пятом разделе даны результаты экспериментальной проверки параметров НДС в шарнирно-стержневой системе с отклонениями и без них. Напряжение в системе определялись тензометрическим методом, с помощью СИИТ-3. Для измерения деформаций, вызванных отклонением длины стержней с муфтами, во время испытаний использованы проволочные тензодатчики сопротивления с базой 20 мм на бумажной основе (марки ПКБ с электрическим сопротивлением  $R = 201-203 \text{ Ом}$ ). Общий анализ усилий показал, что во всех случаях экспериментальные значения отличаются от теоретических в пределах 1-25% с надежностью  $\gamma = 0,95$ . Различия в теоретических и экспериментальных значениях усилий обусловлены конструктивными несовершенством системы – податливостью болтовых соединений в узлах и т.д. создание отклонение в системе выполнены с помощью системы управления – регулировочными муфтами. Создание геометрического отклонения в стержнях выполнено с помощью рожкового ключа № 60.

Ключевые слова: большепролетные металлические покрытия, сборочные отклонения, статистические характеристики, размерный анализ, моделирование монтажа, конструктивные решения, система компенсации.

## SUMMARY

Bondarev A.B. The stress-strain state of large-jointed rod metal coatings based on the accumulation of geometrical deviations. – The manuscript.

PhD (Engineering) dissertation. Specialty 05.23.01 – structures, buildings and constructions. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makiyivka, 2015.

The dissertation is devoted assessing the impact of variations in the assembly of large-span spatial hinged-rod metallic coatings on their stress-strain state.

In this paper, a mathematical model of the spatial dimension chain with several trailing links and method of determining the geometrical deviations and fictitious efforts span hinged - metal rod spatial surfaces. Also developed algorithm for calculating collection span hinged-rod spatial metal coatings in the Stochastic (C.a. № 47952). The regularities of the RMS values of geometrical deviations during assembly pivotally span structures – rod of metal coatings , proposed and developed a system of constructive compensate deviations - new design hinged - rod system and a new method of assembly of production of metal coatings , which are protected by patents of Ukraine (№ u 2012 13187 , № u 2012 13193, № u 2012 13191). The experimental checking bogus efforts the presence of given geometrical deviations in flat hinged-rod system using a system of positive deviations compensation.

Key words: large-span metal coating, assembly deviation, statistical characteristics, dimensional analysis, modeling, editing, design solutions, compensation system.

## АНОТАЦІЯ

Бондарев А.Б. Напружено-деформований стан великопрольотних шарнірно-стержньових металевих покриттів із урахуванням накопичення геометричних відхилень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Макіївка, 2015.

Дисертація присвячена оцінці впливу збиральних відхилень у великопрогонових просторових шарнірно-стержньових металевих покриттях на їх НДС.

У роботі розроблено математичну модель формування просторового розмірного ланцюга з декількома замикаючими ланками і методику визначення геометричних відхилень і збиральних напружень у великопрогонових шарнірно-стержньових металевих просторових покриттях. Також розроблено та реалізовано алгоритм розрахунку точності великопрогонових шарнірно-стержньових просторових металевих покриттів в ймовірнісній постановці (А.с. № 47952). Встановлено закономірності величин середньоквадратичних геометричних відхилень при складанні конструкцій великопрогонових шарнірно-стержньових металевих покриттів, запропонована і розроблена система конструктивної компенсації відхилень – нове конструктивне рішення шарнірно-стержньової системи і новий спосіб монтажу великопрогонових металевих покриттів, які захищені патентами України на корисну модель (№ u 2012 13187, № u 2012 13193, № u 2012 13191). Здійснено експериментальну перевірку збиральних напружень при наявності заданих геометричних відхилень у плоскій шарнірно-стержньовій системі із використанням системи конструктивної компенсації відхилень.

Ключові слова: великопрогонові металеві покриття, збиральні відхилення, статистичні характеристики, розмірний аналіз, моделювання монтажу, конструктивні рішення, система компенсації.

