



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 2, 99–114

УДК 624.042:624.074

(16)-0346-1

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МОНТАЖНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕЛИКОПРОГОНОВИХ ШАРНІРНО-СТЕРЖНЬОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

О. Б. Бондарев

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.

E-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru

Отримана 27 квітня 2016; прийнята 27 травня 2016.

Анотація. У статті виконано короткий огляд раніш виконаних досліджень в галузі монтажних навантажень та геометричних відхилень. Також у статті наведено методику та результати дослідження монтажного напружено-деформованого стану великопрогонового шарнірно-стержньового металевих покриття з урахуванням монтажних впливів, що викликані відхиленнями при монтажі. Розрахунок виконано за допомогою модуля «МОНТАЖ» обчислювального комплексу SCAD 11.5. Збірні відхилення, що виникають при складанні оболонки, отримані та досліджені за допомогою авторської комп'ютерної програми – Обчислювальний Комплекс «Розмірний Аналіз Стержньових Конструкцій» (ОК РАСК). Наведена блок-схема методики визначення монтажного напружено-деформованого стану. За результатами досліджень отримані величини монтажних зусиль, що викликані відхиленнями при зведенні одношарової шарнірно-стержньової металевих оболонки у конструктивну систему. Запропоновані заходи щодо зниження впливу відхилень на монтажний напружено-деформований стан, точність збирання і живучість каркаса досліджуваної шарнірно-стержньової оболонки, що захищені патентами.

Ключові слова: великопрогонові металеві просторові покриття, монтажні впливи, збірні відхилення, геометричне моделювання, теорія управління, генетична нелінійність.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОНТАЖНОГО НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А. Б. Бондарев

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.

E-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru

Получена 27 апреля 2016; принята 27 мая 2016.

Аннотация. В статье выполнен краткий обзор ранее выполненных исследований в области монтажных нагрузок и геометрических отклонений. Также в статье приведена методика и результаты исследования монтажного напряжённо-деформированного состояния большепролетного шарнирно-стержневых металлических покрытий при учёте монтажных воздействий, вызванных отклонениями при монтаже. Расчёт выполнен при помощи модуля «МОНТАЖ» вычислительного комплекса SCAD 11.5. Сборочные отклонения, возникающие при сборке оболочки, получены и исследованы с помощью авторской компьютерной программы – Вычислительный Комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК). Приведена блок-схема методики определения монтажного напряжённо-деформированного состояния. По результатам исследований получены величины монтажных

усилий, вызванных отклонениями при монтаже однополюсной шарнирно-стержневой металлической оболочки в конструктивную систему. Предложены мероприятия по снижению влияния отклонений на монтажное напряжённо-деформированное состояние, точность сборки и живучесть каркаса исследуемой шарнирно-стержневой оболочки, которые защищены патентами.

Ключевые слова: большепролетные металлические пространственные покрытия, монтажные воздействия, сборочные отклонения, геометрическое моделирование, теория управления, генетическая нелинейность.

THE METHOD OF DETERMINATION OF MOUNTING STRESS-STRAIN STATE-SPAN HINGE-ROD METAL COATINGS

Alexey Bondarev

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, 86123.*

E-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru

Received 27 April 2016; accepted 27 May 2016.

Abstract. The article made overview previous studies in installation loads and geometrical deviations. The article shows the methodology and findings of the mounting stress-strain state-span hinged-rod metal coating by taking into account installation effects caused by deviations during assembly. The calculation is made using the module «Installation» computing complex SCAD 11.5. Assembly deviations, arising during assembly shell, have been obtained and examined by the author of a computer program – Computer Complex «Dimensional analysis of beam structures» (VC RASK). Block diagram of methods for determining the mounting stress-strain state has been given. According to the results of researches, it has been found out the magnitude of installation forces, caused by deviations during assembly of single layer hinged-rod metal shell in the structural system. The measures to reduce the impact of deviations on the mounting stress-strain state, the assembly accuracy have been suggested.

Keywords: spatial-span metal coating, installation impact, assembly deviation, geometric modeling, control theory, genetic nonlinearity.

Введение

В процессе монтажа строительных конструкций зданий и сооружений или их частей возникает большое количество «мгновенных» расчётных состояний. Проверка возможного поведения конструкций и параметров их напряжённо-деформированного состояния (НДС) на восприятие монтажных воздействий возможно только на основе расчётов. Эти расчёты необходимо выполнять как проверочные с целью обеспечения прочности, устойчивости, пространственной неизменяемости и жёсткости, принятых в результате проектирования конструкций с учётом эксплуатационных и монтажных нагрузок. Таким образом проверяется «приспособленность» запроектированных конструктивных схем к принятым методам или способам монтажа конструкций.

Проверка «приспособленности» большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий к восприятию монтажных нагрузок – сборочных усилий, вызванных как разнообразными схемами сборки, так и наличием отклонений, которые можно получить из расчёта точности, например, при помощи авторской компьютерной программы – Вычислительный комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК) [1], является важной и главное – актуальной задачей.

Получаемые из расчёта точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий отклонения на этапе проектирования необходимы, в том числе и для разработки конструктивных мероприятий, например системы конструктивной или конструктивно-технологической компенсации отклонений или

других мероприятий. Вместе с этим с целью борьбы с отклонениями необходима разработка новых конструктивных решений оболочек и управление отклонениями. Такой комплексный подход к проектированию покрытий позволит повысить их несущую способность, а не учёт отклонений при расчёте, проектировании и конструировании может привести к его аварийному состоянию.

Учитывая сказанное выше, можно как минимум утверждать, что в настоящее время для учёта отклонений в большепролетных шарнирностержневых металлических покрытиях необходима разработка методики определения монтажного НДС с учётом стадийности возведения и возможного наличия отклонений при монтажной сборке.

Краткий обзор и анализ работ, выполненных ранее

В настоящее время в области строительства появилось множество работ, посвящённых изучению поведения конструкций зданий или сооружений, или их частей под влиянием монтажных воздействий – работа М. С. Барабаш [3], работы автора [4–8], О. В. Кабанцева [9, 42], В. Г. Колесниченко, А. М. Югова, С. В. Колесниченко [10–12, 36], Е. В. Лебеда и его учеников – А. А. Григоряна, В. А. Етеревского, О. В. Шибалиной [13–26], В. А. Савельева с Е. В. Лебедем [32–34], А. В. Перельмутера, О. В. Кабанцева [30, 31, 50], Н. S. Jadhav [41], A. Kaveh [44], Z. S. Makowski [47].

В последнее время появились исследования, рекомендуемые для борьбы с отклонениями создавать управляемые конструкции – работы Н. П. Абовского [2], Charles R. Farrar [37], Chars J. Gantes [38], L. Gaul [39], R. Hasan [40], М. Е. Kartal [43], A. Kaveh [44], Kohtaro Matsumoto [46], Ömer Keleşoğlu [48], A. Preumont [51], Tokunbo Ogunfunmi [52] и др. В этих работах рекомендуют создавать конструкции с «полуактивным управлением» (semi-active), в том числе для борьбы с несовершенствами формы. В их основу положен анализ виброустойчивости радиотелескопов и гелиоскопов – Н. М. Kim [45], J. E. Pearson [49], A. Preumont [51].

В своём большинстве все указанные выше авторы занимаются исследованием поведения

металлических конструкций – многоэтажных зданий и большепролетных покрытий, т. к. именно для металлических конструкций проблема монтажных воздействий наиболее актуальна. Действующие в настоящее время нормативные документы о расчётах на монтажные воздействия и проверки «приспособленности» конструкций под монтаж говорят неконкретно или противоречиво. Об обязательности проведения таких расчётов говорит пункт 1.4 СП 16.13330.2011. В дальнейшем содержании указанный нормативный документ не уточняет и не регламентирует технологию и параметры таких расчётов.

Современные действующие нормативные документы Российской Федерации – СП 20.13330.2011, СП 63.13330.2012, СП 70.13330.2012, Украины – ДБН В.1.2-2:2006, ДБН В.2.6-163:2010, ДСТУ-Н Б EN 1991-1-6:201X, Белоруссии – ТКП EN 1991-1-6-2009. Раскрытию содержания пункта 1.4 СП 16.13330.2011 посвящено много публикаций. Однако нельзя сказать, что они полностью охватывают или не охватывают все этапы прохождения конструкцией тех или иных монтажных состояний, т. к. содержание таких расчётов в указанных выше нормативных документах регламентировано не полностью, отсутствуют методики таких расчётов. Например, в СП 70.13330.2012 приведён расчёт фермы покрытия одноэтажного каркасного промышленного здания при её раскреплении расчалками, и это только одно из возможных монтажных состояний.

Повышенный научный интерес к данной теме вызван в первую очередь появлением у исследователей понимания необходимости нормирования монтажных воздействий, так как монтажные нагрузки являются неизбежными при производстве работ. Вместе с этим интерес проявлен к теме монтажных нагрузок из-за развитых возможностей современных вычислительных комплексов – SCAD, ЛИРА и других, которые позволяют смоделировать НДС конструкции с учётом стадийности (последовательности) монтажа.

В. А. Савельев при определении отклонений и НДС конструкций с отклонениями монтажа использовал метод статистических испытаний в своих ранних работах – до аварии купольного сооружения Федерального Государственного

Унитарного Предприятия «Всероссийский Электротехнический Институт» (ВНИЦ ВЭИ) им. В. И. Ленина в г. Истра, Московская область в 1985 году. Для определения сборочных отклонений В. А. Савельев предложил и развил совместно с Е. В. Лебедем и О. В. Шебалиной метод геометрического моделирования монтажа сооружения с отклонениями [16, 22, 23, 32]. В основе указанного метода лежат известные уравнения геометрии, которые используются в геодезии.

Автором разработана компьютерная программа Вычислительный Комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК - РАСК) [1, 4]. Программа предназначена для расчёта точности стержневых конструкций с осеболтовыми и многоболтовыми соединениями. Создан ВК РАСК при помощи системы программирования Delphi 7 и предназначен для работы под управлением ОС Windows. В основе алгоритма ВК РАСК использованы уравнения точности, а также известные в геометрии и геодезии уравнения, которые, например в геодезии, используются в так называемом методе «круговых засечек», а также при выполнении других геометрических приёмов в геодезии – процедуры впервые, по сведениям автора, использовал В. А. Савельев с Е. В. Лебедем.

В европейских нормах проектирования EN 1991-1-6 (2005), Eurocode 3 и их аналогах в РФ, Белоруссии и Украине появилась некоторая ясность относительно того, какие нагрузки могут считаться монтажными, т. е. действующими на конструкции или их части в предэксплуатационный монтажный период «жизни конструкции». Однако европейские нормы и их аналоги не регламентируют, какие нагрузки и воздействия должны учитываться при проверке той или иной конструкции как монтажное состояние, каким образом такие проверки осуществлять и какие решения принимать в случаях, если конструкция в процессе монтажа не отвечает требованиям предельных состояний. Другими словами, величины и перечень нагрузок, действующих на конструкцию или её части при монтаже, инженер должен определять, руководствуясь своими знаниями и навыками в каждой конкретной ситуации индивидуально и самостоятельно.

Вместе с этим требуется разработка дополнительных рекомендаций к нормативным документам или расширение уже имеющихся на территории РФ, Белоруссии и Украины национальных приложений, содержащих основные правила разработки расчётных схем сооружений и конструкций на монтажные состояния. Среди прочих монтажных состояний следует учитывать такие, как прочность и устойчивость конструкций при поэлементном монтаже, влияние свешивающихся частей конструкций и монтажных блоков, соударение конструкций и частей сооружений, геометрическую неизменяемость и устойчивость смонтированной части сооружения при действии собственных и ветровых нагрузок, веса свешивающихся частей с учётом монтажных и такелажных приспособлений. Перечисленные здесь и многие другие монтажные состояния нуждаются в классификации как самих монтажных состояний, так и возникающих при возведении нагрузок и воздействий.

Доработка действующей нормативной документации в части монтажных нагрузок и воздействий создаст предпосылки для повышения надёжности зданий и/или их частей, а также снижения аварийности в процессе монтажа, обоснованного принятия изменений в проектную и рабочую документацию при необходимости на этапе проектирования, а не когда уже сделано и переделано всё возможное и невозможное. Актуальность исследования монтажных воздействий подтверждается ещё и тем, что вопросы моделирования жизненных циклов конструкций и сооружений на стадиях их возведения относятся к основным научным направлениям V Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», проводимого под эгидой РААСН [35].

В этой статье приведена методика и пример определения монтажного НДС шарнирно-стержневой оболочки покрытия с учётом стадийности возведения и отклонений – при монтажной сборке. В качестве примера принята однопоясная шарнирно-стержневая оболочка. Предлагаемая методика позволяет учесть накопление отклонений для большепролетных шарнирно-стержневых покрытий на НДС конструкций с учётом технологии их возведения.

Объект и цель исследования

Объект исследования – металлическая одно-поясная шарнирно-стержневая оболочка покрытия (рис. 1), схема маркировки (рис. 2).

Цель исследования – разработка методики определения монтажного НДС шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий, учитывающей отклонения длин стержней, форму и отклонение положения центров отверстий под болты с осеболтовыми и многоболтовыми стыками.

Метод исследования – метод конечных элементов, реализованный в BK SCAD 11.5.

Методика проведения исследования

Величины отклонений, полученные из BK PASC, являются величиной монтажной нагрузки, которая возникает в оболочке покрытия при появлении сборочных отклонений. Моделирование сборочного усилия выполнено с помощью температурного воздействия на замыкающий стержень вдоль длины стержня. При учёте процесса сборки оболочки на её НДС учитывается изменение расчётных схем оболочки покрытия. Расчётные схемы оболочки при сборке, например, со стадии 3 по стадию 7 даны на рис. 3.

Предлагаемую методику определения монтажного НДС большепролетных шарнирно-

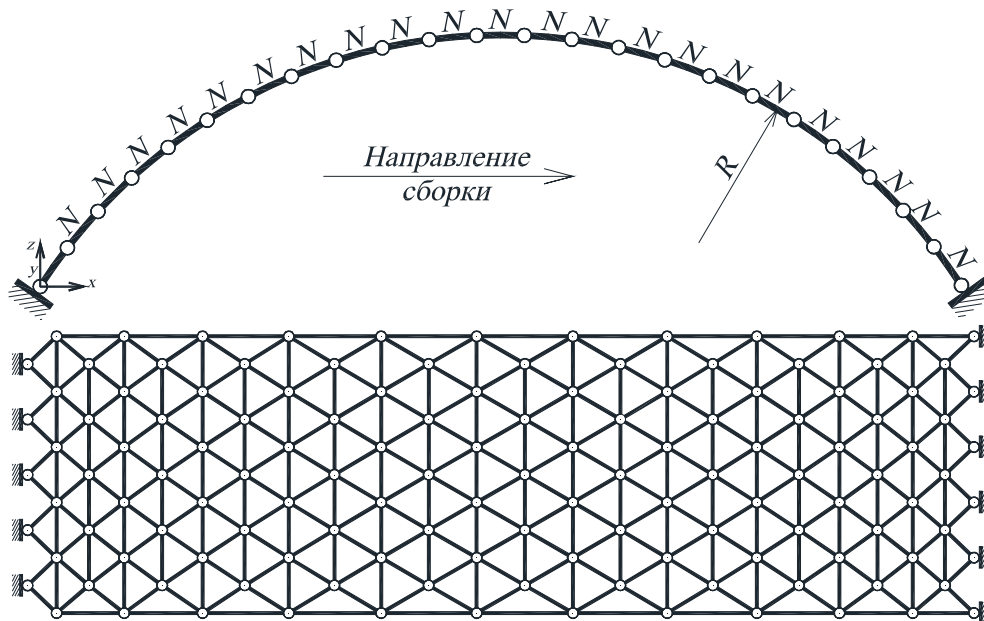


Рисунок 1. Расчётная схема однопоясной шарнирно-стержневой оболочки покрытия.

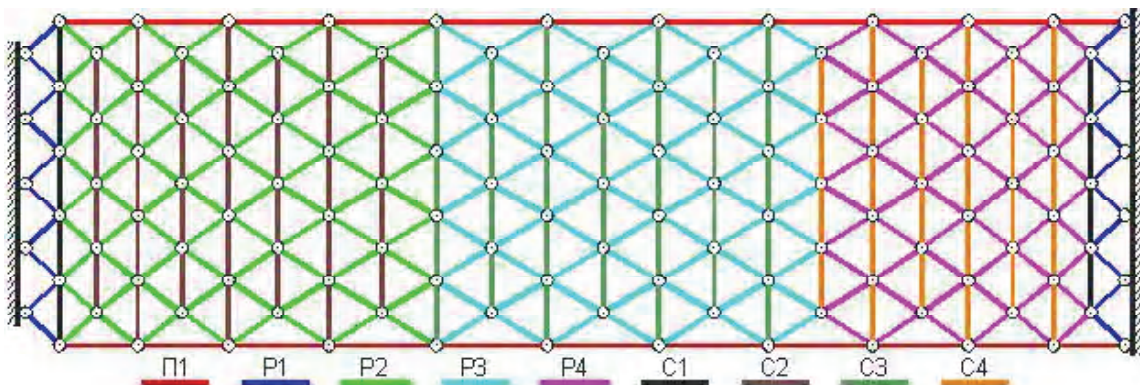


Рисунок 2. Схема маркировки элементов оболочки покрытия.

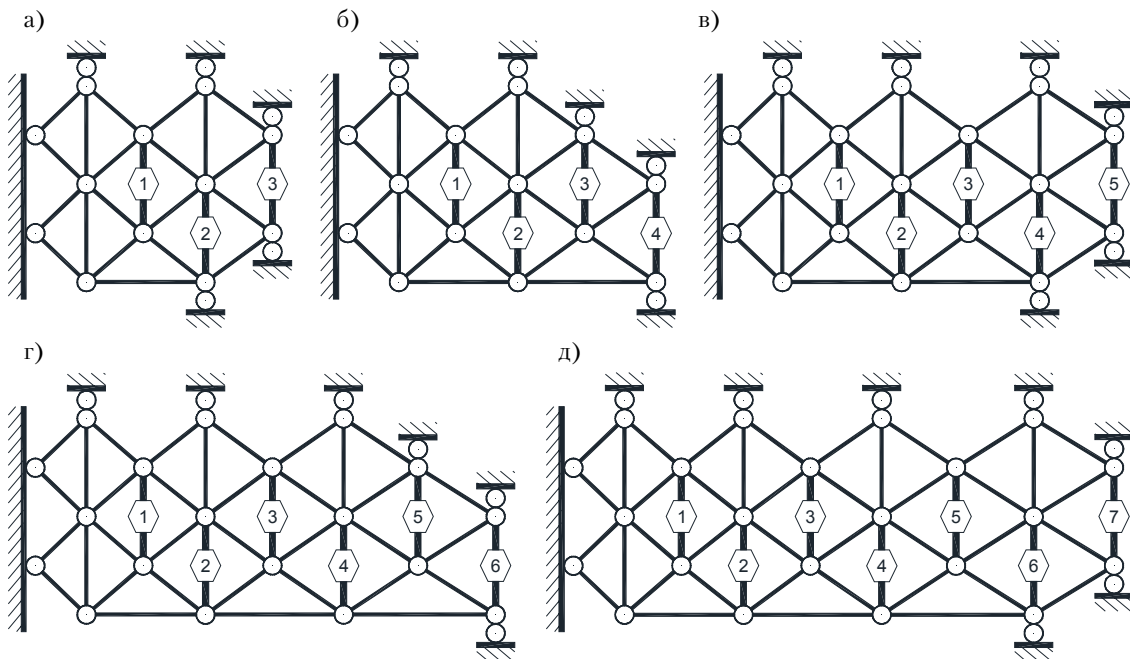


Рисунок 3. Расчётные схемы цилиндрической оболочки покрытия при сборке: а)...д) – стадия сборки 3...7 соответственно.

стержневых покрытий можно представить в виде блок-схемы алгоритма (рис. 4).

Определение монтажного НДС большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий по предлагаемой методике следует проводить в такой последовательности:

- создание номинальной геометрии шарнирно-стержневой оболочки в программном комплексе AutoCAD;
- определение и формирование массива координат узлов номинальной геометрии шарнирно-стержневой оболочки в программном комплексе AutoCAD Civil-3D;
- расчёт точности в авторской программе – ВК РАСК и обработка результатов расчёта точности в программном комплексе MS Excel;
- расчёт шарнирно-стержневой оболочки в ВК SCAD 11.5 с использованием модуля «МОНТАЖ» с использованием результатов статического расчёта и результатов из ВК РАСК;
- анализ результатов расчёта в ВК SCAD 11.5 и разработка мероприятий по обеспечению собираемости при необходимости.

Пример расчёта

Технологическая схема сборки однопоясной шарнирно-стержневой оболочки покрытия в продольном направлении с величинами отклонений дана на рис. 5. Замыкающие стержни – стержни, выполняющие роль замыкающих звеньев в пространственной размерной цепи. Замыкающие стержни на рис. 5 представлены зигзагообразными линиями. Схема со значениями температурных воздействий дана на рис. 6.

В качестве отклонений рассмотрены отклонения по СП 70.13330.2012. Длина стержня оболочки – $l_{об} = 985$ мм. В результате расчёта однопоясной шарнирно-стержневой оболочки покрытия получены величины накопленных узловых отклонений – перемещений (вернее уже деформаций) в линейной и нелинейной постановке и приведены на рис. 7–8. Величины усилий в элементах оболочки при продольной схеме сборки в линейной и нелинейной постановке даны на рис. 9–11. Сечение элементов покрытия принято по гибкости $\lambda = 120$ по СП 16.13330.2011.

Из представленных на рис. 9–11 схем с перемещениями узлов оболочки покрытия и уси-

лиями видно, что при учёте сборочных отклонений, а точнее монтажных воздействий при сборке несущей способности элементов покрытия будет недостаточно. Причём в нелинейной постановке данный аспект проявляется значительно сильнее, чем при линейной постановке. Вместе с тем если при линейном расчёте исчер-

пание несущей способности будет не во всех элементах, то при нелинейном расчёте исчерпание несущей способности фиксируется во всех элементах оболочки покрытия. Однако же явное разрушение покрытия может не произойти ввиду того, что будет происходить перераспределение усилий, характерное для статически

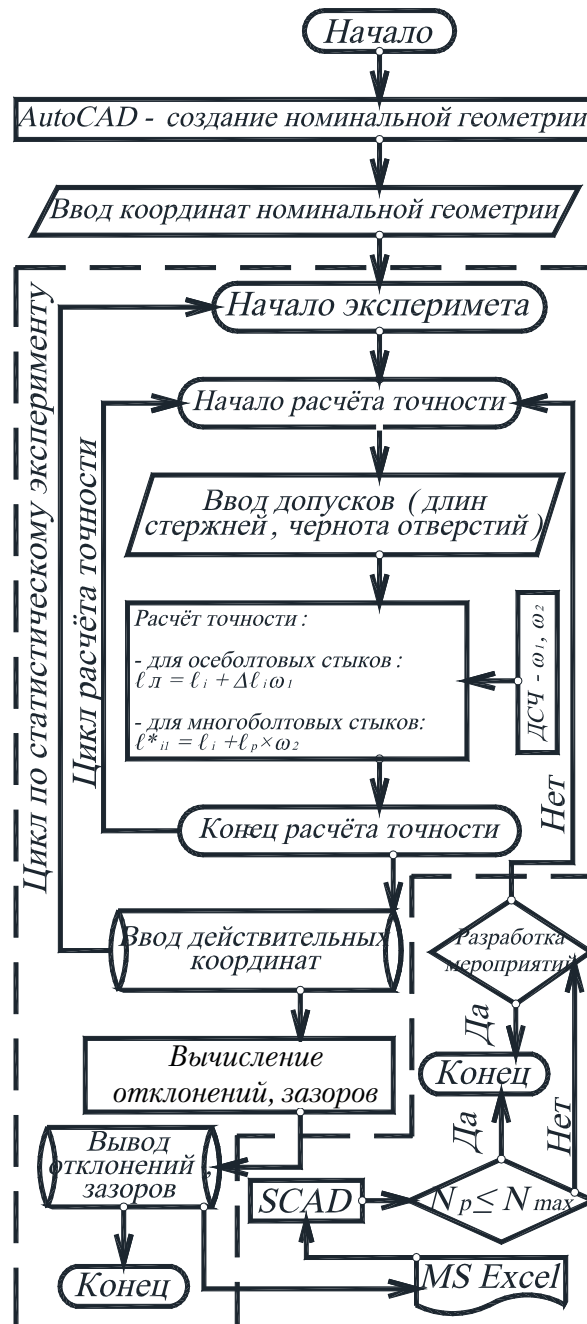


Рисунок 4. Блок-схема методики определения НДС большепролетных шарнирно-стержневых покрытий с учётом накопления отклонений.

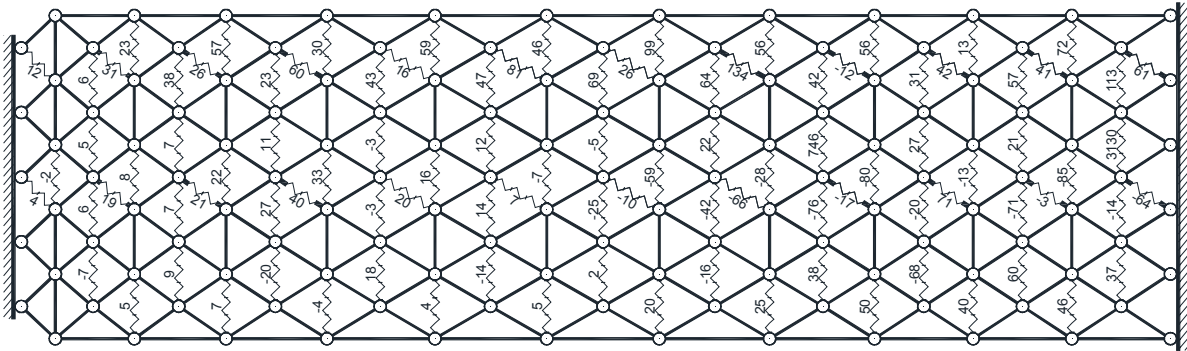


Рисунок 5. Схема оболочки со значениями отклонений при сборке.

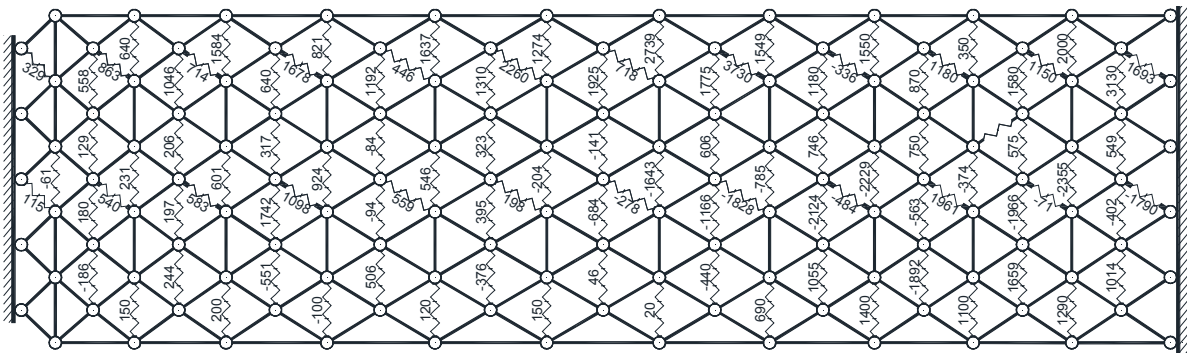


Рисунок 6. Схема со значениями температурных воздействий при сборке.

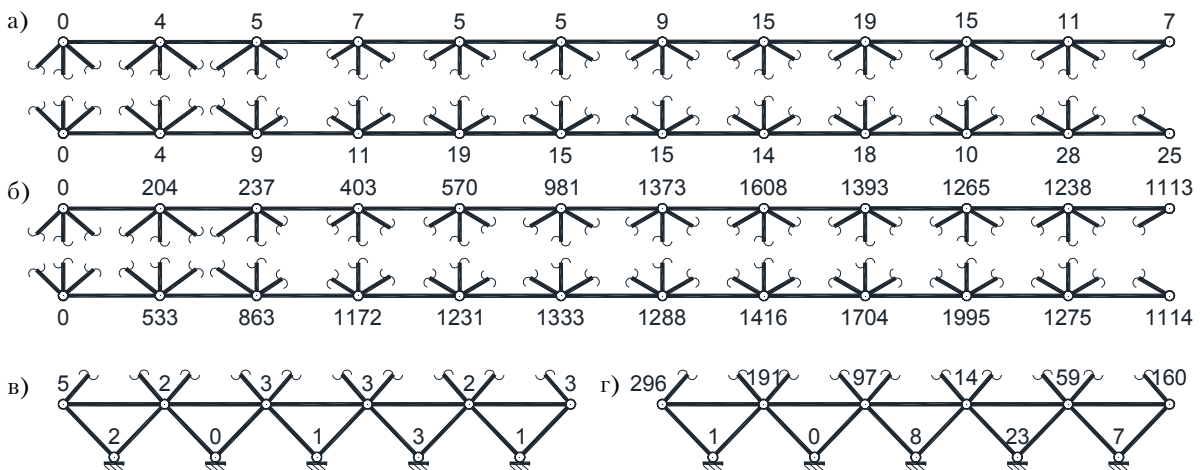


Рисунок 7. Мозаика суммарных перемещений (мм) в элементах: а) П1 – линейный расчёт; б) П1 – нелинейный расчёт, в) P1 и C1 – линейный расчёт; г) P1 и C1 – нелинейный расчёт.

неопределимых систем. Наличие монтажных усилий в покрытии также приводит к снижению его живучести.

Как показали расчёты, наличие отклонений при монтажной сборке однопоясной оболочки вызывает значительное увеличение как дефор-

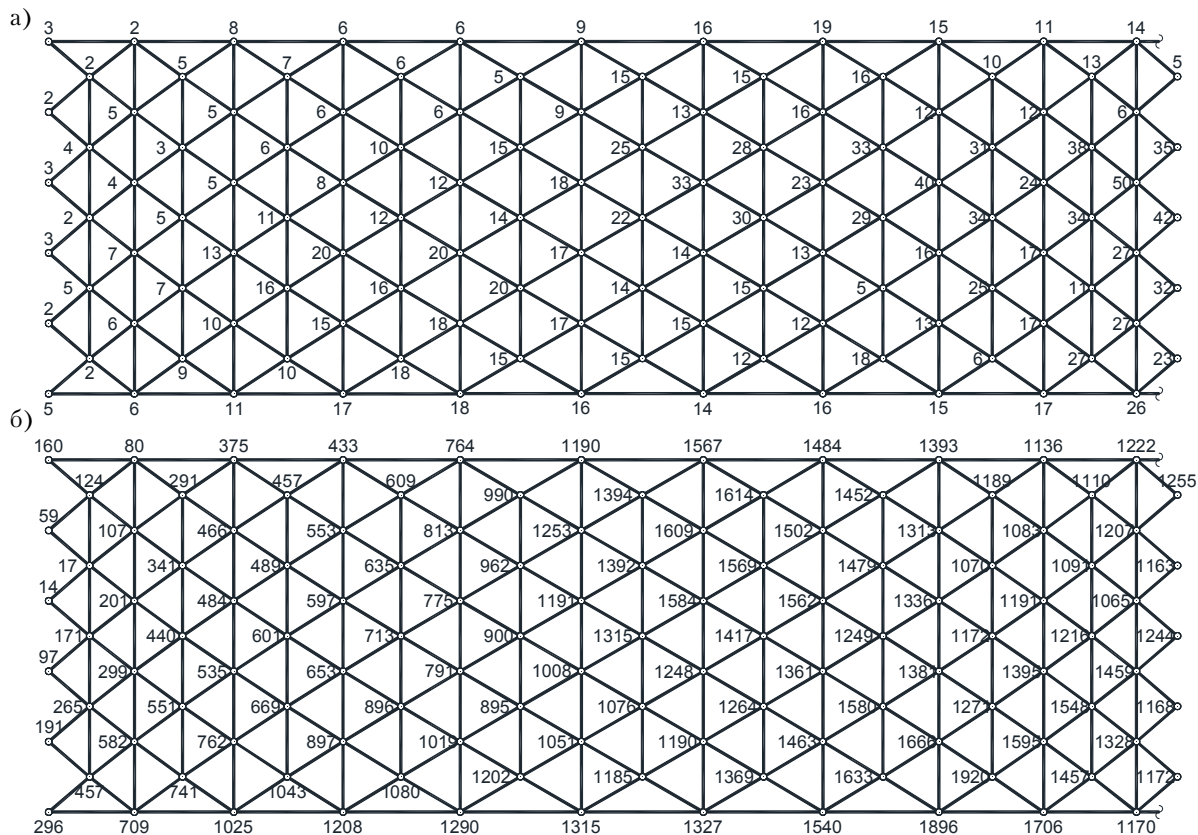


Рисунок 8. Мозаика суммарных перемещений в элементах: а) P2, P3, P4, C2, C3 и C4 – линейный расчёт; б) P2, P3, P4, C2, C3 и C4 – нелинейный расчёт.

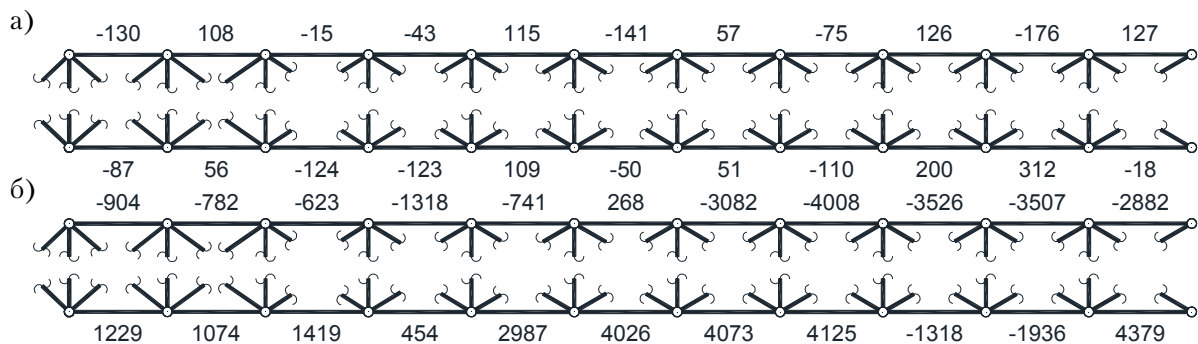


Рисунок 9. Мозаика усилий в элементах: а) П1 – линейный расчёт; б) П1 – нелинейный расчёт.

мации, так и напряжений при сравнении линейной и нелинейной постановки задачи. Для исключения влияния отклонений на НДС покрытия предлагается использовать способ монтажа [27], который позволяет управлять (регулировать) отклонениями и соответственно отклонениями при монтаже. Кроме того, для кор-

ректировки положения оболочки на отдельных стадиях сборки необходимо применять разработанные автором стыковые соединения стержней, которые также, как и способ монтажа, защищены патентами [28, 29].

Выполняя корректировку (управление поведением) положения отправочных марок,

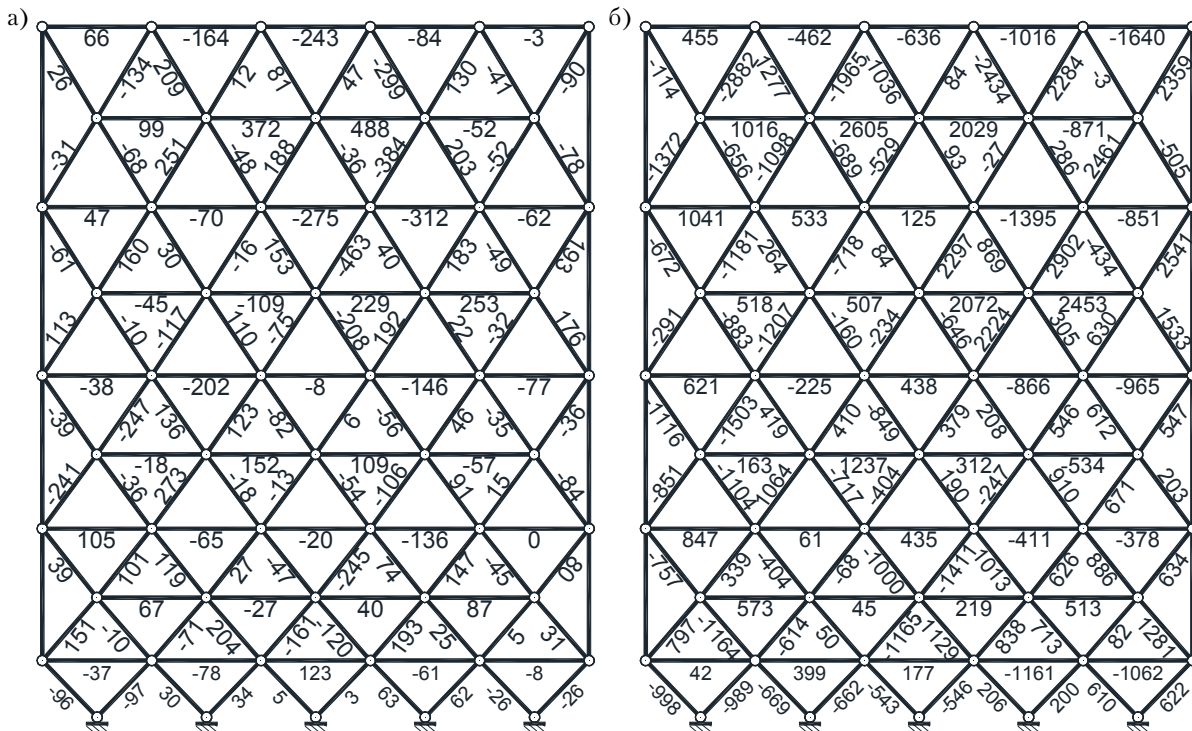


Рисунок 10. Мозаика усилий в элементах: а) P1, P2, C1 и C2 – линейный расчёт; б) P1, P2, C1 и C2 – нелинейный расчёт.

используя разработки автора, можно достичь 100 % соответствия проектным решениям, проектной геометрии, и тогда отклонения незначительно снизят несущую способность сооружения. Как видно, расчёт системы на точность и анализ сборочных отклонений на этапе проектирования позволяет предусмотреть мероприятия по снижению влияния отклонений на несущую способность сооружения. А не учёт геометрических отклонений при проектировании может привести к прогрессирующему увеличению деформаций и разрушению покрытия или всего сооружения. Последнее вызвано тем, что величины сборочных усилий с учётом расчётного усилия в 1,2–7,0 раз больше несущей способности сечения элементов покрытия.

Наибольшие монтажные усилия зафиксированы в опорных стержнях покрытия, что обусловлено накоплением отклонений при выполнении сборки стержней в конструктивную форму. Для корректировки положения элементов и покрытия в целом при монтаже необходимо предусмотреть установку подмостей с регулируемыми опорами. Задача регулировоч-

ных опор – обеспечение (выведение) монтажных стыков на плано-высотное положение согласно проекту. Увеличивать сечение элементов для повышения несущей способности и живучести покрытия – необдуманное и неверное решение, т. к. причина появления сборочных усилий – погрешности, и при увеличении сечения они никуда не исчезнут. Для снижения величин монтажных усилий до нуля и обеспечения собираемости покрытия требуется разработка конструктивно-технологических и других мероприятий в виде системы конструктивно-технологических мероприятий.

Выводы

Проблема расчётной оценки поведения железобетонных, металлических и сталебетонных конструкций на различных этапах монтажа и «жизненного цикла» является актуальной и вместе с тем не решённой задачей в настоящее время на нормативном уровне. Решение данной проблемы возможно за счёт таких мер, как обязательное требование в нормативных докумен-

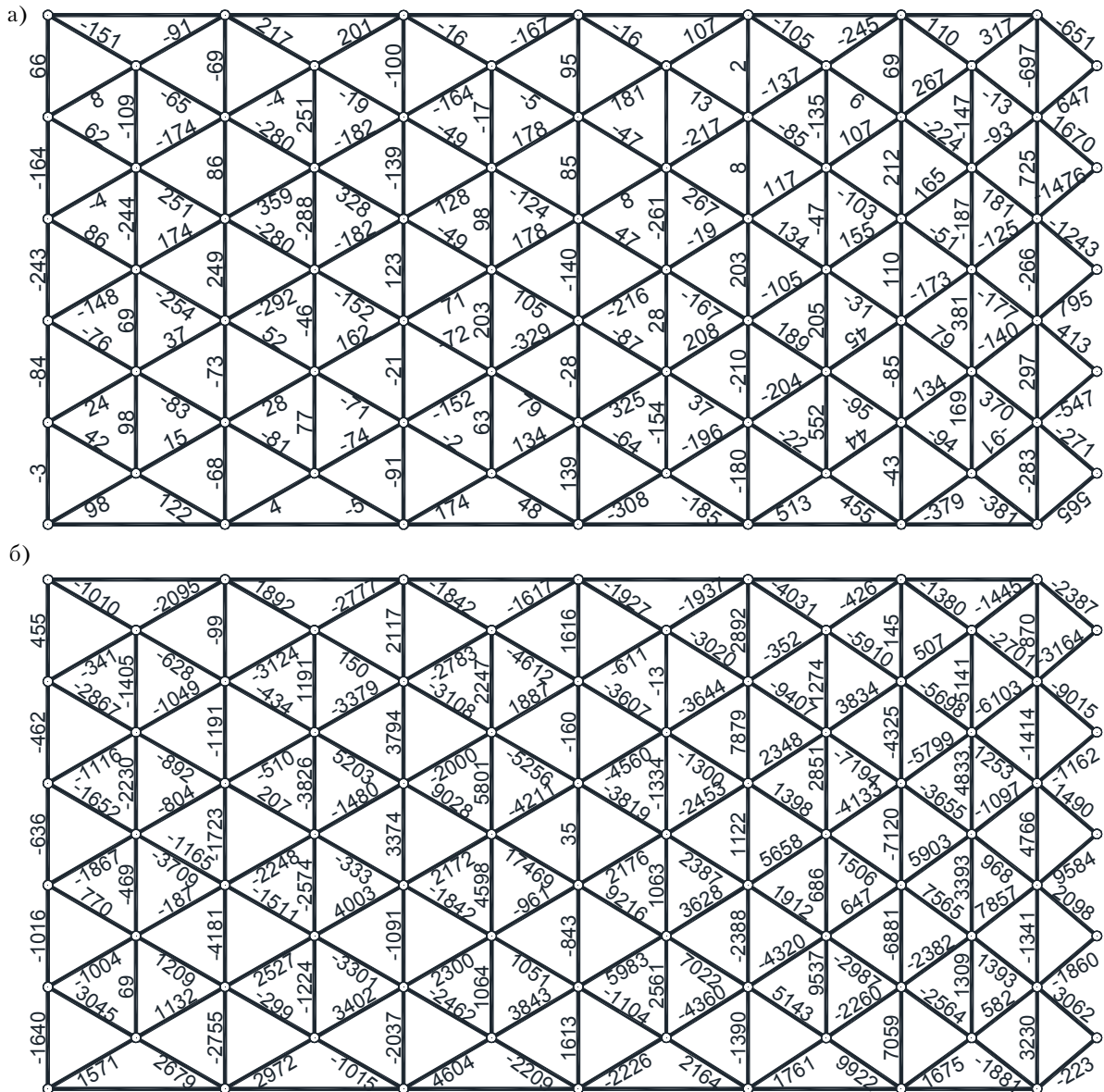


Рисунок 11. Мозаика усилий в элементах: а) РЗ...Р4 и СЗ...С4 – линейный расчёт; б) РЗ...Р4 и СЗ...С4 – нелинейный расчёт.

тах на необходимость проверки параметров предельных состояний конструкций и сооружений в целом, и в частности на монтажные состояния. На основании результатов проведённых исследований можно сказать, что:

1. Разработана методика определения монтажного НДС шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий, учитывающая отклонения длин стержней, форму и откло-

нение положения центров отверстий под болты с осеболтовыми и многоболтовыми стыками.

2. Получены величины сборочных (монтажных) усилий в однопоясной шарнирно-стержневой оболочке в нелинейной постановке при помощи разработанной методики, реализованной в ВК PASC и с использованием модуля «МОНТАЖ» из ВК SCAD 11.5.

3. Разработана система конструктивно-технологической компенсации в виде нового способа монтажа и стыковых соединений стержней шарнирно-стержневой оболочки, которые защищены патентами (№ 7968, 79683, 80327).

4. Необходимо предусмотреть регулировочные опоры в конструкции подмостей для корректировки положения элементов при сборке однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки покрытия.

Литература

1. А. с. 47952 Украина. Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций»» («ВК РАСК») [Текст] / А. Б. Бондарев, А. М. Югов (Украина). – № 48382 ; заявл. 20.12.2012 ; опублик. 20.02.2013, Бюл. № 1. – 2 с.
2. Абовский, Н. П. Управляемые конструкции [Текст] : Учебное пособие / Н. П. Абовский. – Красноярск : КамКрас, 1998. – 433 с.
3. Барабаш, М. С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий [Текст] / М. С. Барабаш // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 43–46.
4. Бондарев, А. Б. Методика расчёта точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] / А. Б. Бондарев, А. М. Югов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 1(61). С. 60–73.
5. Бондарев, А. Б. Определение и анализ сборочных отклонений в металлическом каркасе большепролетного сооружения с купольным покрытием [Текст] / А. Б. Бондарев // International journal for computational civil and structural engineering. 2015. Vol. 11, Issue 1. P. 90–96.
6. Бондарев, А. Б. Оценка монтажных воздействий в однопоясной стержневой металлической оболочки покрытия цилиндрической формы [Текст] / А. Б. Бондарев // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Вип. 2013–6(104). С. 54–59.
7. Бондарев, А. Б. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учётом сборки [Текст] / А. Б. Бондарев, А. М. Югов // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4(56). С. 28–37.
8. Бондарев, А. Б. Сборочные отклонения в шарнирно-стержневом металлическом покрытии [Текст] / А. Б. Бондарев // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3(30). С. 98–110.
9. Технология расчётного прогноза напряжённо-деформированного состояния конструкций с учётом истории возведения, нагружения и деформирования [Текст] / О. В. Кабанцев, В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Vol. 7, Issue 3. P. 110–117.
10. Колесниченко, В. Г. Анализ изменения усилий в несущих элементах каркаса здания при различ-

References

1. Certificate on registration of copyright in a computer program number 47952 Ukraine. Computer program «Computational Complex «Dimensional analysis of rod structures»» («CC DASC») / A. B. Bondarev, A. M. Yugov (Ukraine). No. 48382; declaration 20.12.2012; published 20.02.2013, Bul. No. 1. 2 p. (in Russian)
2. Abovskiy, N. P. Operated constructions. Textbook. Krasnoyarsk: KamKras, 1998. 433 p. (in Russian)
3. Barabash, M. S. Methods of computer simulation of high-rise buildings construction processes. In: *Industrial and Civil Engineering*, 2014, No. 3, pp. 43–46. (in Russian)
4. Bondarev, A. B.; Yugov, A. M. The method of calculation accuracy large-span metal rod systems. In: *Magazine of Civil Engineering*, 2016, No. 1(61), pp. 60–73. (in Russian)
5. Bondarev, A. B. Identification and analysis of deviations in the assembly-span metal framework structures with dome cover. In: *International journal for computational civil and structural engineering*, 2015, Vol. 11, Issue 1, pp. 90–96. (in Russian)
6. Bondarev, Alexey. Mechanical impact assessment in odnopoyasnoy rod metal shell cover cylindrical shape. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2013, Issue 2013–6(104), pp. 54–59. (in Russian)
7. Bondarev, A. B.; Yugov, A. M. Evaluation of installation efforts in metal coatings, allowing for assembly process. In: *Magazine of Civil Engineering*, 2015, No. 4(56), pp. 28–37. (in Russian)
8. Bondarev, A. B. Deviations in assembly hinged-rod metal coating. In: *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2015, No. 3(30), pp. 98–110. (in Russian)
9. Kabantsev, Oleg V.; Karpilovsky, Viktor S.; Kriksunov, Eduard Z.; Perelmuter, Anatoliy V. The technology of the design forecast of stressedly-deformed state of constructions with regard to the history of construction, loading and deformation. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2011, Vol. 7, Issue 3, pp. 110–117. (in Russian)
10. Kolesnichenko, V. G.; Kolesnichenko, S. V. Analysis of efforts changing in load-bearing elements of building frame in the process of different construction loads. In: *Proceeding of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 1998, No. 98–6(14), pp. 97–100. (in Russian)

- ных монтажных нагрузках [Текст] / В. Г. Колесниченко, С. В. Колесниченко // Вестник ДГАСА. 1998. № 98–6(14). С. 97–100.
11. Колесниченко, В. Г. К вопросу расчёта металлических конструкций на монтажные нагрузки и воздействия [Текст] / В. Г. Колесниченко, А. М. Югов // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. Т. 2, № 4. С. 195–202.
 12. Колесниченко, В. Г. Расчёт металлических конструкций и приспособлений при производстве монтажных работ [Текст] / В. Г. Колесниченко. – К. : Будивельник, 1981. – 152 с.
 13. Лебедь, Е. В. Анализ искажений геометрической формы при сборке составных металлических конструкций [Текст] / Е. В. Лебедь, О. В. Шебалина // Промышленное строительство. 1992. № 5. С. 23–24.
 14. Лебедь, Е. В. Анализ начальных усилий секториально-сетчатого купола при полносборной установке в сравнении со звездчатым куполом [Текст] / Е. В. Лебедь, В. А. Етеревский // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 4. С. 91–98.
 15. Лебедь, Е. В. Влияние монтажных расчётных схем рёбер двухъярусного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей [Текст] / Е. В. Лебедь, А. А. Григорян // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 66–79.
 16. Лебедь, Е. В. Геометрический расчет каркасов пространственных сооружений [Текст] : Учебное пособие / Е. В. Лебедь. – Саратов : СГТУ, 2001. – 40 с.
 17. Лебедь, Е. В. Начальные усилия в двухъярусных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций [Текст] / Е. В. Лебедь, А. А. Григорян // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 69–79.
 18. Лебедь, Е. В. К расчёту точности сборки составной конструкции [Текст] / Е. В. Лебедь, О. В. Шебалина // Промышленное и гражданское строительство. 1993. № 9. С. 27–28.
 19. Лебедь, Е. В. Компьютерное моделирование точности возведения двухъярусных металлических куполов [Текст] / Е. В. Лебедь // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 89–92.
 20. Лебедь, Е. В. Начальные усилия в стержнях односетчатого купола из-за несовершенства его формы при полносборной установке [Текст] / Е. В. Лебедь, В. А. Етеревский // Вестник МГСУ. 2011. Т. 2, № 2. С. 137–144.
 21. Лебедь, Е. В. Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола [Текст] / Е. В. Лебедь // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2003. Выпуск 3(9). С. 81–86.
 22. Лебедь, Е. В. Оценка возможных отклонений от идеальной геометрической формы при сборке
 11. Kolesnichenko, V. G.; Yugov, A. M. On the Calculation of Metalwork for Assembly Loads and Effects. In: *Modern Industrial and Civil Construction*, 2006, Volume 2, No. 4, pp. 195–202. (in Russian)
 12. Kolesnichenko, V. G. Analysis of metal constructions and means in the process of manufacturing of erecting work. Kiev: Budivelnik, 1981. 152 p. (in Russian)
 13. Lebed, E. V.; Shebalina, O. V. Analysis of Distortions of the Geometric Shape in the Assembly of Composite Metal Structures. In: *Industrial Construction*, 1992, No. 5, pp. 23–24. (in Russian)
 14. Lebed, E. V.; Eterevsky, V. A. Analysis of initial stresses in a sectorial-lattice dome during installation as an assembled structure in comparison with a star-lattice dome. In: *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*, 2012, No. 4, pp. 91–98. (in Russian)
 15. Lebed, E. V.; Grigoryan, A. A. Influence of assembly analytical models of the ribs of a double-layer metal dome on the initial forces in case of elimination of imperfections. In: *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2015, No. 8, pp. 66–79. (in Russian)
 16. Lebed, E. V. Geometric calculation of space structures frame. Textbook. Saratov: SSTU, 2001. 40 p. (in Russian)
 17. Lebed, E. V.; Grigoryan, A. A. Initial stresses in two-layer metal domes due to imperfections of their production and assemblage. In: *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2015, No. 4, pp. 69–79. (in Russian)
 18. Lebed, E. V.; Shebalina, O. V. Calculation of the Accuracy of Composite Structures Assembling. In: *Industrial and Civil Engineering*, 1993, No. 9, pp. 27–28. (in Russian)
 19. Lebed, E. V. Computer Modeling of the Accuracy of Erecting Two-Layer Metal Domes. In: *Industrial and Civil Engineering*, 2013, No. 12, pp. 89–92. (in Russian)
 20. Lebed, E. V.; Eterevsky, V. A. Initial stresses in the bars of a one-layer lattice dome due to the imperfections of its form during installation as an assembled structure. In: *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, Vol. 2, No. 2, pp. 137–144. (in Russian)
 21. Lebed, E. V. Particularities of numerical simulation of carcassing of single-grid dome. In: *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*, 2003, Issue 3(9), pp. 81–86. (in Russian)
 22. Lebed, E. V.; Shebalina, O. V. Evaluation of Possible Deviations from the Ideal Geometric Shape When Assembling Composite Structures. In: *Mounting and Special Construction Works. Manufacture of Metal Structures and Installation of Building Structures: Informational Collection of TsBNTI*, Moscow, 1992, No. 1, pp. 1–6. (in Russian)
 23. Lebed, E. V. Assessment of accuracy of calculation of root-mean-square deviation of chance variable. Moscow, 1991. 5 p. (in Russian)

- составных конструкций [Текст] / Е. В. Лебедь, О. В. Шебалина // Монтажные и специальные строительные работы. Изготовление металлических и монтажных строительных конструкций. Информационный сборник ЦБНТИ. М., 1992. № 1. С. 1–6.
23. Лебедь, Е. В. Оценка точности вычисления среднеквадратического отклонения случайной величины [Текст] / Е. В. Лебедь ; ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова. – М., 1991. – 5 с. – Библиогр.: с. 5. – Деп. в ВИНТИ 23.12.91, № 437 – В91.
 24. Лебедь, Е. В. Прогнозирование погрешностей возведения большепролетных металлических куполов на основе геометрического моделирования их монтажа [Текст] : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Евгений Васильевич Лебедь ; ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 1988. – 171 с.
 25. Лебедь, Е. В. Прогнозирование погрешностей возведения каркаса большепролетного 8-ярусного ребристого купола [Текст] / Е. В. Лебедь // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Технические науки. 2003. Выпуск 2–3(8). С. 11–17.
 26. Лебедь, Е. В. Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и её прогнозирование [Текст] / Е. В. Лебедь // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 4. С. 5–12.
 27. Пат. 79680 Україна, МПК E04B 1/32, E04B 1/58. Спосіб монтажу великопролітних стержньових металевих покриттів [Текст] / Бондарев О. Б., Югов А. М.; власники Бондарев О. Б., Югов А. М. – № u 2012 13187 ; заявл. 19.11.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 1. – 5 с.
 28. Пат. 79683 Україна, МПК E04B 1/38, E04B 1/58. Стыкове з'єднання стержнів із різними розмірами поперечного перетину [Текст] / Бондарев О. Б., Югов А. М.; власники Бондарев О. Б., Югов А. М. – № u 2012 13191 ; заявл. 19.11.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 1. – 7 с.
 29. Пат. 80327 Україна, МПК E04B 1/38, E04B 1/58. Стыкове з'єднання стержнів із рівними розмірами поперечного перетину [Текст] / Бондарев О. Б., Югов А. М.; власники Бондарев О. Б., Югов А. М. – № u 2012 13193 ; заявл. 19.11.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 1. – 6 с.
 30. Перельмутер, А. В. Проверка устойчивости конструкций, расчёт которых выполняется с учётом стадийности монтажа [Текст] / А. В. Перельмутер // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10, Issue 4. P. 22–28.
 31. Перельмутер, А. В. Управление поведением несущих ограждающих конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – М.: АСВ, 2011. – 184 с.
 32. Савельев, В. А. Численное моделирование действительной формы консольной составной конструкции [Текст] / В. А. Савельев, Е. В. Лебедь ;
 24. Lebed, E. V. Forecasting of errors of large-span metal dome construction based on geometric modeling of their installation: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Moscow, 1988. 171 p. (in Russian)
 25. Lebed, E. V. Forecasting of errors of carcassing of large-span high-rise ribbed dome. In: *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Technical science*, 2003, Issue 2–3(8), pp. 11–17. (in Russian)
 26. Lebed, E. V. Accuracy in construction of metal space framed roofs and its predicting. In: *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*, 2013, No. 4, pp. 5–12. (in Russian)
 27. Patent 79680 Ukraine, MPK E04B 1/32, E04B 1/58. Method for mounting large-span rod metal coatings / A. B. Bondarev, A. M. Yugov; informer and patent owner A. B. Bondarev, A. M. Yugov. No. u 2012 13187; declaration 19.11.2012; published 25.04.2013, Bul. No. 1. 5 p. (in Ukrainian)
 28. Patent 79683 Ukraine, MPK E04B 1/38, E04B 1/58. Butt joint of rods with different dimensions of cross section / A. B. Bondarev, A. M. Yugov; informer and patent owner A. B. Bondarev, A. M. Yugov. No. u 2012 13191; declaration 19.11.2012; published 25.04.2013, Bul. No. 1. 7 p. (in Ukrainian)
 29. Patent 80327 Ukraine, MPK E04B 1/38, E04B 1/58. Butt joint of rods with equal dimensions of cross sections / A. B. Bondarev, A. M. Yugov; informer and patent owner A. B. Bondarev, A. M. Yugov. No. u 2012 13193; declaration 19.11.2012; published 25.04.2013, Bul. No. 1. 6 p. (in Ukrainian)
 30. Perelmuter, A. V. Stability check of structures analyzed with the consideration of erection stages. In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2014, Vol. 10, Issue 4, pp. 22–28. (in Russian)
 31. Perelmuter, A. V. Behavior control of cladding. Second edition revised and enlarged. Moscow: ASV, 2011. 184 p. (in Russian)
 32. Savelev, V. A.; Lebed, E. V. Numerical simulation of real shape of overhanging composite construction. Moscow, 1988. 24 p. (in Russian)
 33. Savelev, V. A.; Lebed, E. V.; Shebalina, O. V. Mathematical Modeling of Spatial Structures Installation. In: *Industrial Construction*, 1991, No. 1, pp. 18–20. (in Russian)
 34. Savelev, V. A.; Lebed, E. V. Computer mathematic simulation of process of space structure erection. Moscow, 1989. 37 p. (in Russian)
 35. Travush, V. I.; Akimov, P. A.; Belostotsky, A. M.; Dmitrieva, T. L.; Sidorov, V. N. About History and Main Results of the Fifth International Symposium «Actual Problems of Computer Simulations in Civil Engineering». In: *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2014, Vol. 10, Issue 3, pp. 176–183. (in Russian)
 36. Yugov, Anatoliy; Bondarev, Alexey. Assembly Efforts in Wide-Span Spatial Rod System Determining Technique. In: *Metal Constructions*, 2013, Volume 19, No. 3, pp. 137–142. (in Russian)

- ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова. – М., 1988. – 24 с. – Библиогр.: С. 23–24. – Деп. в ВНИИИС 09.07.87, № 8102.
33. Савельев, В. А. Математическое моделирование монтажа пространственных конструкций [Текст] / В. А. Савельев, Е. В. Лебедь, О. В. Шибалина // Промышленное строительство. 1991. № 1. С. 18–20.
34. Савельев, В. А. Математическое моделирование на ЭВМ процесса возведения пространственных сооружений [Текст] / В. А. Савельев, Е. В. Лебедь; ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова. – М., 1989. – 37 с. – Библиогр.: С. 36–37. – Деп. во ВНИИПТИ 23.12.88, № 9811.
35. Об истории и основных итогах пятого международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» [Текст] / В. И. Травуш, П. А. Акимов, А. М. Белостоцкий, Т. Л. Дмитриева, В. Н. Сидоров // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10, Issue 3. С. 176–183.
36. Югов, А. М. Методика определения сборочных усилий в большепролетной пространственной стержневой системе [Текст] / А. М. Югов, А. Б. Бондарев // Металлические конструкции. 2013. Т. 19, № 3. С. 137–142.
37. Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance [Текст] / Charles R. Farrar, Keith Worden, Michael D. Todd, Gyuhae Park, Jonathon Nichols, Douglas E. Adams, Matthew T. Bement, Kevin Farinholt. – Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory, 2007. – 143 p.
38. Structural analysis and design of deployable structures [Текст] / Chars J. Gantes, Jerome J. Connor, Robert D. Lwxher, Yechiel Rosenfeld // Computers and Structures. 1989. Vol. 32(3–4). P. 661–669.
39. Gaul, L. Semi-active friction damping of large space truss structures [Текст] / L. Gaul, H. Albrecht, J. Wurnitzer // Shock and Vibration. 2004. Vol. 11. P. 173–186.
40. Hasan, R. Push-over analysis for performance-based seismic design [Текст] / R. Hasan, L. Xu, D. E. Grierson // Computers and Structures. 2002. № 80. P. 2483–2493.
41. Jadhav, H. S. Parametric study of double layer steel dome with reference to span to height ratio [Текст] / H. S. Jadhav, Ajit S. Patil // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. № 8. P. 110–118.
42. Kabantsev, O. V. Modeling transition in design model when analyzing specific behaviors of structures [Текст] / O. V. Kabantsev, A. V. Perelmuter // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 479–488.
43. Effects of semi-rigid connection on structural responses [Текст] / M. E. Kartal, H. B. Basaga, A. Bayraktar, M. Muvafik // Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. P. 22–35.
44. Kaveh, A.; Nouri, M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. In: *International Journal of Space Structures*, 2009, Vol. 24, No. 1, pp. 13–26.
45. Kim, H. M.; Bartkowicz, T. J. Damage detection and health monitoring of large space structures. In: *Sound and Vibration*, 1993, Vol. 27, No. 6, pp. 12–17.
46. Matsumoto, Kohtarō; Wakabayashi, Sachiko; Nouni, Masahiro; Yoshida, Tetsuji; Ueno, Hiroshi; Fukase, Yutaro. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. In: *Automation and Robotics in Construction XVI: Proceedings / Universidad Carlos III de Madrid; Editor C. Balaguer*. Madrid: UC3M, 1999, pp. 225–230.
47. Makowski, Z. S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. In: *Lightweight Structures in Civil Engineering: Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24–28 June, 2002 / Edited by Jan B. Obrebski*. Warsaw: Micro-Publisher Jan B. Obrebski Wydawnictwo Naukowe, 2002, pp. 17–41.
48. Keleşoğlu, Ömer; Ülker, Mehmet. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. In: *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2005, Vol. 80, No. 5, pp. 321–329.
49. Pearson, J. E.; Hansen, S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. In: *Journal of Optical Society America*, 1977, No. 67, pp. 360–369.
50. Perelmuter, A. V.; Mikitarenko, M. A.; Burygin, S. G. Structural analysis with layouts changed during the

44. Kaveh, A. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures [Текст] / A. Kaveh, M. Nouri // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24, № 1. P. 13–26.
45. Kim, H. M. Damage detection and health monitoring of large space structures [Текст] / H. M. Kim, T. J. Bartkowicz // Sound and Vibration. 1993. Vol. 27, No. 6. P. 12–17.
46. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII [Текст] / Kohtaro Matsumoto, Sachiko Wakabayashi, Masahiro Noumi, Tetsuji Yoshida, Hiroshi Ueno, Yutaro Fukase // Automation and Robotics in Construction XVI : Proceedings / Universidad Carlos III de Madrid ; Editor C. Balaguer. – Madrid : UC3M, 1999. – P. 225–230.
47. Makowski, Z. S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures [Текст] / Z. S. Makowski // Lightweight Structures in Civil Engineering : Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24–28 June, 2002 / Edited by Jan B. Obrębski. – Warsaw : Micro-Publisher Jan B. Obrębski Wydawnictwo Naukowe, 2002. – P. 17–41.
48. Keleşoğlu, Ömer. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design [Текст] / Ömer Keleşoğlu, Mehmet Ülker // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2005. Vol. 80, № 5. P. 321–329.
49. Pearson, J. E. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System [Текст] / J. E. Pearson, S. Hansen // Journal of Optical Society America. 1977. № 67. P. 360–369.
50. Perelmuter, A. V. Structural analysis with layouts changed during the action of load [Текст] / A. V. Perelmuter, M. A. Mikitarenko, S. G. Burygin // Engineering Mechanics. 1996. Vol. 3, № 4. P. 245–251.
51. Preumont, A. Vibration control of active structures an introduction [Текст] / A. Preumont. – 2nd Edition. – New York ; Boston ; Dordrecht ; London ; Moscow : Kluwer Academic Publishers, 2002. – 385 p.
52. Ogunfunmi, Tokunbo. Adaptive Nonlinear System Identification [Текст]. The Volterra and Wiener Model Approaches / Tokunbo Ogunfunmi. – USA : Springer Science+Business Media, LLC, 2007. – 229 p. – ISBN 978-0-387-68630-1.

Бондарев Олексій Борисович – аспірант кафедри технології і організації будівництва Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування, монтаж металевих та комбінованих конструкцій.

Бондарев Алексей Борисович – аспірант кафедры технологии и организации строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация металлических и комбинированных конструкций.

Bondarev Alexey – postgraduate, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Construction Engineering and Management Department. Scientific interests: designing, erection of steel and complex construction.