



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2013, ТОМ 19, НОМЕР 1, 27–36

УДК 624.072.33

(13)-0280-1

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОДНОПОЯСНОЇ СТЕРЖНЬОВОЇ МЕТАЛЕВОЇ ОБОЛОНКИ ПОКРИТТЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ ПРИ НАЯВНОСТІ ПОХИБОК ВИГОТОВЛЕННЯ ТА МОНТАЖУ

А. М. Югов, О. Б. Бондарев

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: amyrus@mail.ru*

Отримана 22 січня 2013; прийнята 22 лютого 2013.

Анотація. У статті досліджено напружено-деформований стан однопоясної стержньової металевої оболонки покриття циліндричної форми у разі появи можливих похибок зведення. Наведено результати та аналіз чисельного статичного розрахунку оболонок на сприйняття монтажних навантажень – зусиль складання. Отримані значення напружень в елементах оболонки свідчать про необхідність розробки конструктивних заходів, які знизять вплив складальних напружень на несучу здатність оболонки. Методика оцінки можливих похибок зведення на напружено-деформований стан оболонки покриття циліндричної форми, що наведена у статті, може бути використана при реальному проектуванні оболонок циліндричної, сферичної, еліптичної, конічної, тороїдальної та інших форм.

Ключові слова: великопрольотні стержньові металеві просторові покриття, похибки збирання, монтажні навантаження, напружено-деформований стан, МСЕ.

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОДНОПОЯСНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОКРЫТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА

А. М. Югов, А. Б. Бондарев

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: amyrus@mail.ru*

Получена 22 января 2013; принята 22 февраля 2013.

Аннотация. В статье исследовано напряжённно-деформированное состояние однопоясной стержневой металлической оболочки покрытия цилиндрической формы при появлении возможных погрешностей возведения. Приведены результаты и анализ численного статического расчёта оболочек на восприятие монтажных нагрузок – сборочных усилий. Полученные значения напряжений в элементах оболочки свидетельствуют о необходимости разработки конструктивных мероприятий, которые снизят влияние сборочных напряжений на несущую способность оболочки. Методика оценки возможных погрешностей возведения на напряжённно-деформированное состояние оболочки покрытия цилиндрической формы, приведенная в статье, может использоваться при реальном проектировании оболочек цилиндрической, сферической, эллиптической, конической, тороидальной и других форм.

Ключевые слова: болшепролётные стержневые металлические пространственные покрытия, погрешности сборки, монтажные нагрузки, напряжённно-деформированное состояние, МКЭ.

STRESS-STRAIN STATE OF METAL SINGLE LAYER CYLINDRICAL COVERING SHELL OF AS A RESULT OF ERECTION ERRORS

Anatoliy Yugov, Alexey Bondarev

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: amyus@mail.ru

Received 22 January 2013; accepted 22 February 2013.

Abstract. In the article the stress-strain state of single layer cylindrical covering shell due to possible errors in construction has been investigated. The results of numerical analysis and static analysis of shells on the perception of mounting loads - the assembly effort have been given. The obtained values of the stresses in the shell element indicate the need for structural measures that will reduce the impact of the assembly stresses on the bearing capacity of the shell. Method of estimation of the possible errors in the erection of the stress-strain state of the cylindrical coating shell given in the paper can be used in the design of real single layer cylindrical shells, spherical, elliptical, conical, toroidal, and other forms.

Keywords: spatial-span metal covering, mounting stress, stress-strain state, FEM, assembly errors.

Введение

Стержневые металлические конструкции используются для возведения гражданских, промышленных зданий и инженерных сооружений или отдельных конструктивных элементов (покрытий, перекрытий). Широкое использование стержневых конструкций при возведении покрытий вызвано тем, что они обладают повышенной надёжностью в сравнении с другими конструкциями, к примеру балочными. Однако современные тенденции требуют всё большего снижения материалоемкости покрытий. Таковым тенденциям в полной мере могут соответствовать однопоясные сетчатые оболочки как одна из разновидностей пространственных стержневых покрытий.

Однопоясные сетчатые системы ещё недостаточно исследованы, а несовершенства, дефекты и повреждения несущих элементов покрытия, имеющие место при их изготовлении, транспортировке и монтаже, незначительное, на первый взгляд, несоответствие конечной геометрии сооружения идеализированной проектной конфигурации, которые для традиционных конструкций не имели бы существенного значения, для сооружений с уникальными параметрами приводят к возникновению существенных дополнительных усилий и перемещений [2, 21]. Потому данные исследования необходимы для изучения работы спроектиро-

ванных однопоясных оболочек покрытия цилиндрической формы с учётом дефектов, которые могут в них возникнуть при изготовлении и монтаже.

Анализ состояния вопроса

При возведении каркасов металлических большепролётных покрытий, состоящих из большого количества отправочных марок, неизбежен процесс постепенного накопления погрешностей, возникающих при их изготовлении, укрупнительной сборке и монтаже. Точность проектирования, изготовления и возведения конструкций большепролётных покрытий влияет на их надёжность и долговечность [12, 16, 22].

Низкая точность изготовления и возведения конструкций приводит к большому количеству непредвиденных трудовых и финансовых затрат, как правило, не учтённых в общей стоимости строительного объекта. При наличии в конструкции линейных и угловых отклонений её установку невозможно выполнить без подготовочных операций на стройплощадке. Кроме того, накопление несовершенств может привести к аварии покрытия или как минимум снижению его живучести.

Большое количество аварий и обрушений, произошедшие за последние годы [1, 12, 13] дополнительно обосновывают необходимость изучения и анализа параметров напряжённо-

деформированного состояния однопоясных оболочек покрытия с учётом дефектов изготовления и монтажа. Некоторые из аварий представлены на рис. 1.

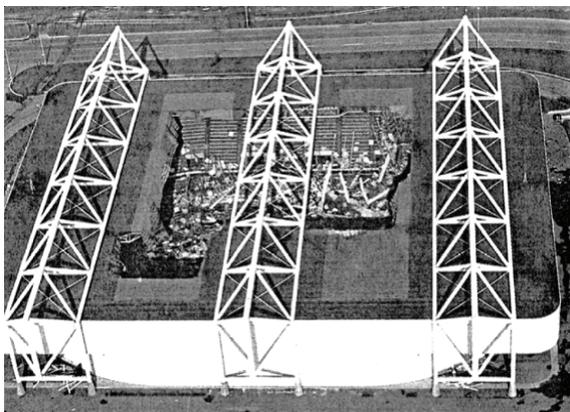
Согласно п. 3.18 [8] живучесть понимается как свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность под воздействиями, которые не предусмотрены условиями эксплуатации, при появлении некоторых дефектов и повреждений, а также из-за отказа некоторых компонентов объекта [7].

А. В. Перельмутер в работе [14] указывает, что «... свойство системы сохранять несущую способность при выходе из строя одного или нескольких элементов естественно называть живучестью ...».

Н. Н. Демидов, Г. Ю. Браженас в работе [11] отмечают, что от неточности изготовления и монтажа структурных конструкций «МАрХИ» образуются дефекты в виде зазоров узловых соединений. Результаты обследования показывают, что зазоры могут находиться в пределах

0,1...6,0 мм. Это приводит к тому, что симметричная конструкция работает не симметрично, отдельные стержни могут быть выключены из работы, существует возможность возникновения локальной геометрической изменяемости некоторой ограниченной группы стержней, а болты в узлах с большими зазорами интенсивно работают на изгиб, что не допускается в идеализированной расчётной схеме. Отмечается, что дефекты в виде зазоров образуются частично из-за низкого изготовления на заводе, а частично из-за низкого качества сборки. Аналогичные выводы получены Э. В. Третьяковой в работах [17–19], Ting E. C., Shih C., Wang Y. K. [26], Mousa A. I., El Naggat M. H. [23], по результатам которых рекомендуется расчёт таких конструкций с учётом физической, геометрической нелинейности и самое, по-видимому, главное с учётом генетической нелинейности.

В работе [15] А. В. Перельмутер отмечает, что регулирование напряжённо-деформированного состояния и других элементов, определяющих



Кемпер Арена, 1979 г.



Gong Badak, 2009 г.



Истринский купол, 1985 г.



Hartford Civic Center Arena, 1978 г.

Рисунок 1. Покрытия большепролетных покрытий, претерпевшие аварии.

поведение несущих конструкций, может использоваться для достижения различных целей. Одной из наиболее распространённых является улучшение использования материала несущей конструкции.

Другой целью регулирования является управление геометрической формой конструкции в связи с особыми условиями её функционирования. Примером достаточно поучительных работ, посвящённых регулированию поведения конструкции нужно отметить работы наших учёных А. С. Гвамичавы [3–5] и В. И. Буйкаса [2], посвящённых гелиоустановкам, радиотелескопам. Типичные примеры и результаты активного регулирования (читать управления) даёт авиационная и космическая промышленность. Некоторые значимые результаты изложены в трудах учёных Американского института аэронавтики и астронавтики (Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics [AIAA]) в работе Bruno R. J. [21], Kim, H. M. [22], Pearson J. E. [24], Sanayei M., Onipede O. [25] и др.

Цель и объект исследования

Цель исследования – оценка влияния возможных отклонений формы каркаса оболочки от проектного положения на её напряжённо-деформированное состояние.

Объект исследования – однополая металлическая оболочка покрытия цилиндрической формы, показанная на рис. 2. Исследуемая однополая цилиндрическая металлическая оболочка радиусом $R = 10$ м образована из последовательно соединённых в поперечном направлении $N = 23$ монтажных элементов, угол раскрытия образующей $\varphi = 110^\circ$. Длина отдельного стержня оболочки составляет 935 мм. Сеть оболочки в плане образована равносторонними треугольниками.

Методика исследования

Ранее отмечалось, что при возведении металлических каркасов большепролётных оболочек покрытия цилиндрической формы накапливаются погрешности геометрической формы от-

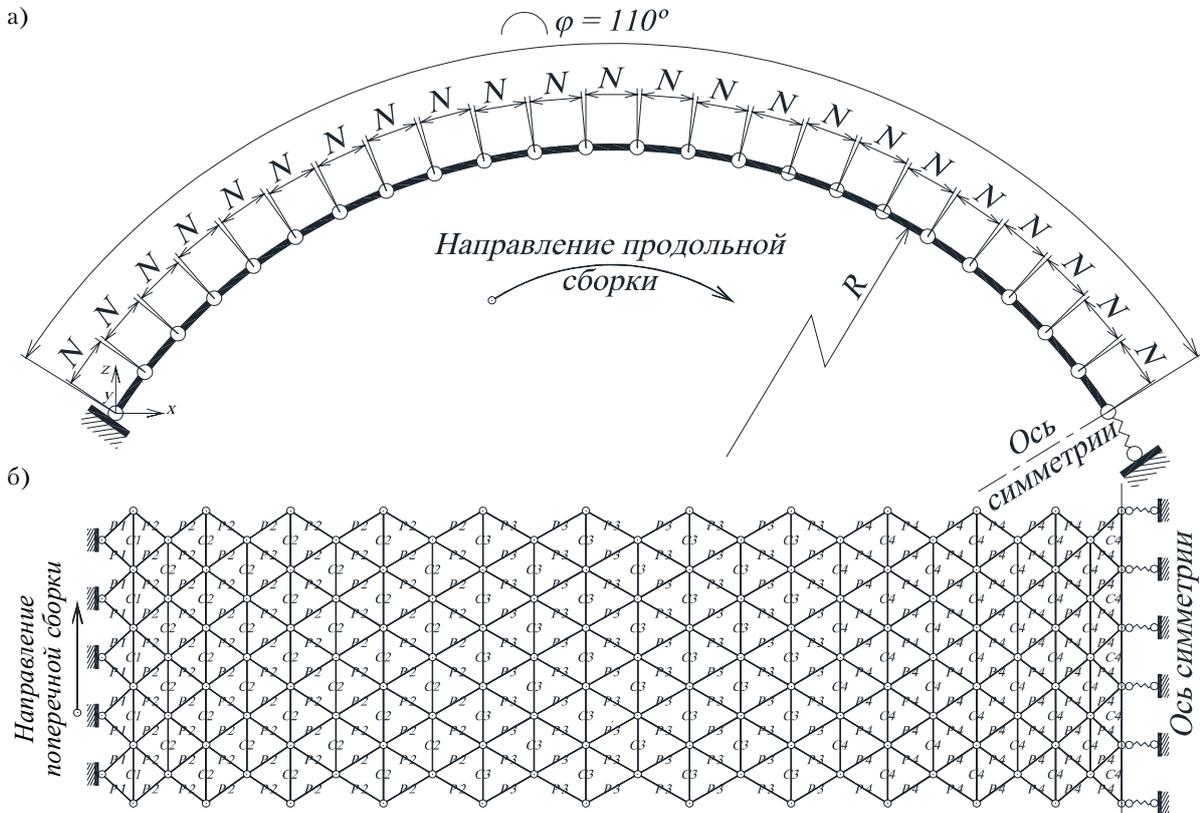


Рисунок 2. Расчётная схема исследуемой оболочки: а) вид сбоку; б) вид сверху с маркировкой элементов.

дельных монтажных элементов. Это накопление приводит к отклонению действительного пространственного положения элементов и узлов от проектного – т. е. начальному несовершенству (искажению) действительной геометрической формы каркаса оболочки по сравнению с номинальной. Определение и оценка погрешностей оболочки вследствие неточностей отдельных элементов выполнена по пространственному отклонению для узлов и линейному для замыкающих стержней от номинальной поверхности. Численное моделирование процесса монтажа исследуемой оболочки выполнено графоаналитическим методом. Крепление оболочки шарнирное. Опора справа принята упругоподатливая, т. к. с её помощью моделируется отсутствующая половина оболочки. Численное определение напряжённно-деформированного состояния оболочки выполнено методом конечных элементов реализованного в вычислительном комплексе (ВК) Structure CAD.

Сборка однослойной стержневой цилиндрической оболочки выполняется, как правило, поэлементно на подмостях в продольном или поперечном направлении, и поэтому рассмотрим в работе напряжённно-деформированное состояние оболочки при двух последовательностях сборки – продольная и поперечная. Допускаемое отклонение продольных размеров элементов равно ± 5 мм, соответствующее допуску размеров на монтаж [10], и $\pm 0,8$ мм – соответствует допуску размеров на изготовление элементов по первому классу точности по [6].

Полученные из расчёта собираемости теоретические отклонения длин элементов одно-

слойной оболочки, которые могут возникнуть от неточности её изготовления и монтажа, смоделированы с температурным воздействием. Технология и адекватность моделирования отклонений температурной нагрузкой обоснованы в работе [20]. При анализе сборки пространственной оболочки покрытия определяется положение замыкающих стержней. Замыкающие стержни – стержни, вызывающие при сборке системы появление сборочных усилий.

Чтобы определить теоретическое напряжённно-деформированное состояние однослойной цилиндрической оболочки с дефектами изготовления и монтажа, необходимо определить величину соответствующего температурного воздействия. Температурные воздействия на замыкающие стержни в совокупности образуют дополнительную схему загрузки оболочки покрытия, которую, по-видимому, необходимо включить в основное расчётное сочетание нагрузок и назвать его – загрузка монтажной нагрузкой. Исходными данными для монтажного нагружения оболочки служат величины сборочных погрешностей, которые определяются из расчёта собираемости.

Анализ результатов расчёта

Рассмотрим сборочные усилия в оболочке более подробно. Общее количество элементов составляет 334 (рис. 3). Несущая способность элементов оболочки значительно больше, чем усилия, возникающие от расчётного сочетания усилий. Это вызвано тем, что сечение элементов должно быть принято по гибкости $\lambda = 120$ согласно [10]. Изгибная и продольная жёсткость

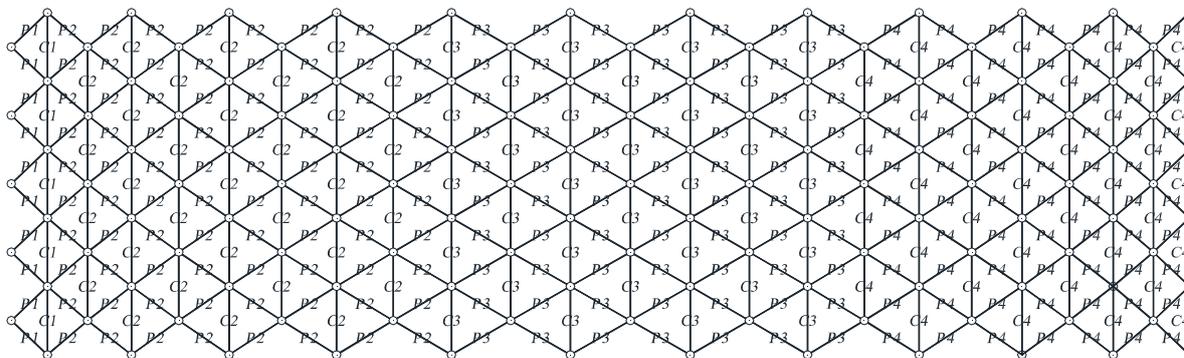


Рисунок 3. Схема маркировки элементов оболочки.

элементов оболочки определялась на основании статического расчёта оболочки на восприятие нагрузок согласно [9].

В результате оценки сборочных усилий на несущую способность оболочки приведены гистограммы, показывающие соотношения между усилиями от основного сочетания нагрузок и погрешностей изготовления и монтажа. Результаты расчёта для оболочки представлены на гистограммах рис. 4...6.

Объясним обозначения, принятые на гистограммах по горизонтали: 1 – усилие в элементе

от основного сочетания нагрузок ($N_{эл.}$); 2 – усилие в элементе от погрешности изготовления по 1 классу точности в соответствии с [6] при продольной сборке (N_1); 3 – усилие в элементе от погрешности изготовления по 1 классу точности в соответствии с [6] при поперечной сборке (N_2); 4 – усилие в элементе от погрешности монтажа в соответствии с [10] при продольной сборке (N_3); 5 – усилие в элементе от погрешности монтажа в соответствии с [10] при поперечной сборке (N_4). На гистограммах приведены усилия от основного сочетания нагрузок ($N_{эл.}$), и суммар-

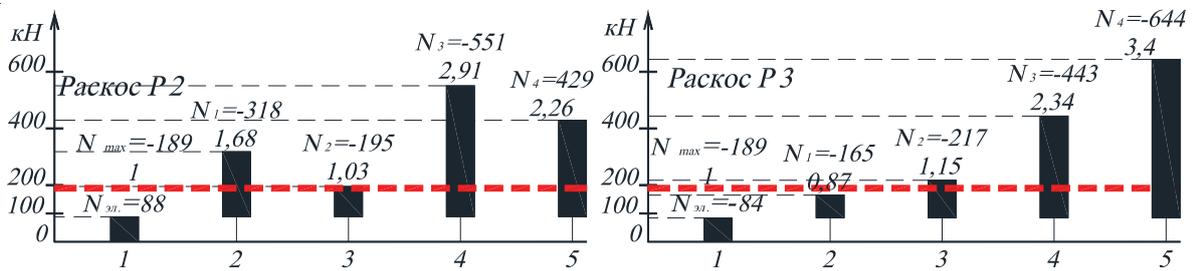


Рисунок 4. Величина усилий в элементах (P2, P3) оболочки.

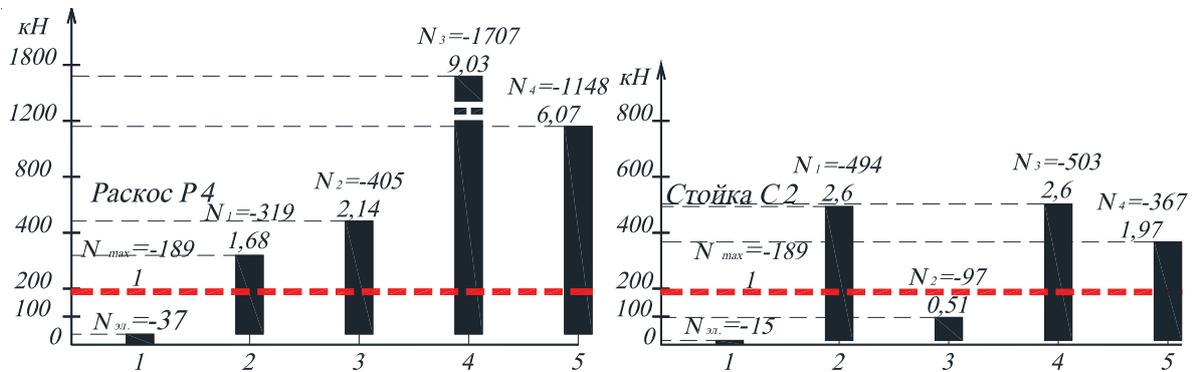


Рисунок 5. Величина усилий в элементах (P4, C2) оболочки.

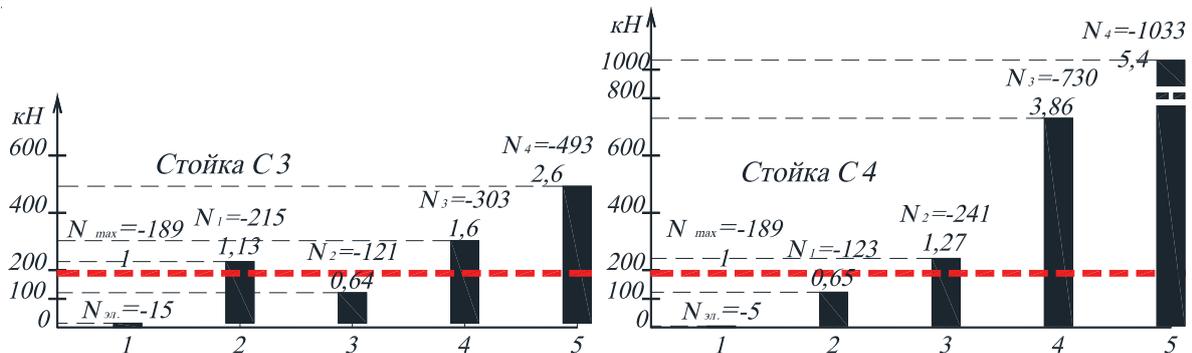


Рисунок 6. Величины усилий в элементах (C3, C4) оболочки 110-23.

ные ($N_1 \dots N_4$). Под значением суммарного усилия приведена величина перегрузки сечения в долях от единицы. Несущая способность элемента показана на гистограмме как N_{\max} .

На гистограммах показано изменение величин сборочных усилий по отношению к несущей способности сечения стержней. Несущая способность стержня на каждой гистограмме принята за 1, а величина сборочного усилия по отношению к несущей способности показана в частях от 1. Например, для элемента Р2 величина перегрузки сечения от действия сборочного усилия $N_1 = 1,68$ или 68 % (рис. 4).

Например, для элементов Р2 максимальное усилие от расчётной нагрузки составляет $N_{\text{эл.}} = -88$ кН. Максимальная величина дополнительного усилия от погрешностей изготовления при продольной сборке составляет $N_{\text{пдс-п.}} = -287$ кН. Величина суммарного усилия в элементе от погрешностей изготовления при продольной сборке составляет $N_1 = N_{\text{эл.}} + N_{\text{пдс-п.}} \times k_c = -88 + (-287 \times 0,8) \approx -318$ кН, где $N_{\text{пдс-п.}}$ – усилие в элементе от погрешностей изготовления при продольной сборке; k_c – коэффициент сочетаний согласно п. 4.18 [9]. Аналогично определены значения усилий во всех элементах оболочек, возникающие в них от погрешностей изготовления и монтажа. На гистограммах для остальных оболочек будут ана-

логичные обозначения. Величины усилий выражены в кН.

В оболочке зафиксировано исчерпание несущей способности раскосов (Р4) и стоек (С4). Такой результат может быть обоснован тем, что увеличение количества элементов в направлении сборки приводит к накоплению погрешностей. Накопленные величины погрешностей приводят к увеличению сборочных усилий, а сборочные усилия – к снижению несущей способности как отдельных элементов, так и оболочек в целом. Как минимум величины сборочных усилий могут привести к снижению такого свойства системы, как живучесть. Исследование живучести рассмотренной выше оболочки будет выполнено авторами в следующей работе.

Заключение

Выполненные исследования показывают, что возможные сборочные погрешности оболочки могут существенно повлиять на напряжённое состояние её элементов. Потому своевременный учёт влияния сборочных погрешностей позволяет не только повысить надёжность несущих конструкций оболочки покрытия, но и предусмотреть необходимые конструктивные мероприятия для снижения этого влияния и обеспечения собираемости её каркаса.

Литература

1. Арошенко, М. Тайны стальных конструкций [Текст] / М. Арошенко, В. Гордеев, И. Лебедич. – К. : Сталь, 2004. – 304 с.
2. Буякас, В. И. Статически определяемые регулируемые структуры и их приложения в технических задачах космической астрономии [Текст] : дис. ... доктора технических наук / В. И. Буякас. – М., 2004. – 190 с.
3. Гвамичава, А. С. Влияние технологических неточностей изготовления элементов на напряжённо-деформированное состояние стержневых конструкций [Текст] / А. С. Гвамичава // Экспериментально-теоретические исследования антенных сооружений и глубоководных оснований / Под редакцией Н. П. Мельникова. – М. : ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова, 1988. – С. 15–27.
4. Гвамичава, А. С. Определение вероятных значений начальных усилий и искажений формы стержневых конструкций [Текст] / А. С. Гвамича-

References

1. Aroshenko, M.; Gordeev, V.; Lebedich, I. Secrets of steel constructions. Kyiv: Steel, 2004. 304 p. (in Russian)
2. Buiakas, V. I. Statically determinate controlled structures and their imposition in engineering problems of space astronomy: Doctoral Dissertation. Moscow, 2004. 190 p. (in Russian)
3. Gvamichava, A. S. The influence of engineering deviations of units on strain-stress state of bar system. In: *Experimental and theoretical studies of antenna construction and deep water offshore platform* / Edited by N. P. Melnikov. Moscow: N. P. Melnic Central Research Institute of design steel constructions, 1988, p. 15–27. (in Russian)
4. Gvamichava, A. S. Adjustment of data of starting effort and deformation of bar system. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1989, No. 1, p. 65–68. (in Russian)
5. Gvamichava, A. S. Development and intercalation of design shapes and method of analysis of large-

- ва // Строительная механика и расчет сооружений. – 1989. – № 1. – С. 65–68.
5. Гвамичава, А. С. Разработка и внедрение конструктивных форм и методов расчета крупногабаритных космических антенных сооружений [Текст] : автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / А. С. Гвамичава. – М., 1984. – 57 с.
 6. ГОСТ 21779-82. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски [Текст]. – Взамен ГОСТ 21779-76 ; дата введения 1983-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 14 с.
 7. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введен впервые ; дата введения 01.07.90. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 37 с.
 8. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751 (СТ СЭВ 384-87), СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4868-84 ; чинні з 2009-12-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 45 с.
 9. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
 10. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81* окрім розділів 15*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
 11. Демидов, Н. Н. Количественная оценка несущей способности структурных конструкций МАрХИ с дефектами в виде зазоров [Текст] / Н. Н. Демидов, Г. Ю. Браженас // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 5. – С. 8–11.
 12. Дробот, Д. Ю. Живучість большепролётних металлических покриттів [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук / МГСУ, Д. Ю. Дробот. – М., 2010. – 212 с.
 13. Павлова, Т. А. Развитие метода расчета строительных конструкций на живучесть при внезапных структурных изменениях [Текст] : автореферат диссертации ... кандидата технических наук / ОГТУ, Т. А. Павлова. – Орел, 2006. – 22 с.
 14. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надёжности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – М. : АСВ, 2007. – 256 с.
 15. Перельмутер, А. В. Управление поведением несущих ограждающих конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – Издание 2-е дополненное и исправленное. – М. : АСВ, 2011. – 184 с.
 16. sized space antenna constructions: Doctoral Dissertation abstract. Moscow, 1984. 57 p. (in Russian)
 6. GOST 21779-82. System of ensuring of geometrical parameters accuracy in construction. Manufacturing and assembling tolerances. Moscow: Standard Publishing house, 1983. 14 p. (in Russian)
 7. GOST 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions. Moscow: Standard Publishing house, 1990. 37 p. (in Russian)
 8. DBN B.1.2-14-2009. The system of reliability and safety provision of constructional projects. General concepts of reliability control and constructive safety of buildings, structures and building constructions and supports. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 45 p. (in Ukrainian)
 9. DBN B.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 78 p. (in Ukrainian)
 10. DBN B.2.6-163:2010. The constructions of buildings and structures. The steel constructions. Norms for design, fabrication and erection. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 127 p. (in Ukrainian)
 11. Demidov, N. N.; Brazhenas, G. Yu. Quantitative assessment of load-carrying ability of structural constructions of Moscow Institute of Architecture with defects in the form of splits. In: *Institutes news. Civil Engineering and Architecture*, 1989, No. 5, p. 8–11. (in Russian)
 12. Drobot, D. Yu. Durability of large spans of steel coating. PhD in Technical Sciences Dissertation. Moscow, 2010. 212 p. (in Russian)
 13. Pavlova, T. A. The development of analysis technique of building constructions on durability during unexpected structural changes: Doctoral Dissertation abstract. Orel, 2006. 22 p. (in Russian)
 14. Perelmuter, A. V. Select problems of reliability and safety of building constructions. Moscow: ASB, 2007. 256 p. (in Russian)
 15. Perelmuter, A. V. Control of action of claddings. The second revised and corrected edition. Moscow: ASB, 2011. 184 p. (in Russian)
 16. Savelyev, V. A. Theoretical foundations of metal cupolas. Doctoral Dissertation abstract. Moscow, 1995. 40 p. (in Russian)
 17. Tretiakova, E. V. Researches of metal grids and shell structures: PhD Dissertation abstract. Moscow, 1971. 21 p. (in Russian)
 18. Tretiakova, E. V. About computer calculations of grids and shell structures taking into account the particularities of units deformation when in use elastic and elastoplastic material. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1981, No. 3, p. 52–56. (in Russian)
 19. Trofimov, V. I.; Tretiakova, E. V.; Zueva, I. I. Accounting of the influence of deformation capacity of bolt joints on operation of structural construction.

16. Савельев, В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов [Текст] : автореферат диссертации ... доктора технических наук / В. А. Савельев. – М., 1995. – 40 с.
 17. Третьякова, Э. В. Исследование металлических стержневых плит и оболочек [Текст] : автореферат диссертации кандидата технических наук / Э. В. Третьякова. – М., 1971. – 21 с.
 18. Третьякова, Э. В. О расчёте на ЭВМ стержневых плит и оболочек с учётом особенностей деформирования элементов при упругой и упругопластической материала [Текст] / Э. В. Третьякова // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1981. – № 3. – С. 52–56.
 19. Трофимов, В. И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции [Текст] / В. И. Трофимов, Э. В. Третьякова, И. И. Зуева // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1976. – № 7. – С. 24–26.
 20. Югов, А. М. Исследование напряжённо-деформированного состояния элементов плоской рамы с учётом геометрических несовершенств [Текст] / А. М. Югов, А. Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 1. – С. 51–61.
 21. Bruno, Robin J. Identification of nonlinear joints in a truss structure [Текст] / Robin J. Bruno // Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) / American Society of Mechanical Engineers (ASME) Adaptive Structures Forum, Hilton Head, SC. – Washington : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994. – P. 402–410.
 22. Kim, H. M. On-orbit modal identification of large space structures [Текст] / H. M. Kim, H. H. Doiron // Sound and Vibration. – 1992. – Vol. 26, № 6. – P. 24–30.
 23. Mousa, A. I. Shallow spherical shell rectangular finite element for analysis of cross shaped shell roof [Текст] / A. I. Mousa, M. H. El Naggar // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2007. – Vol. 7. – P. 41–51.
 24. 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.
 25. Sanayei, M. Damage assessment of structures using static test data [Текст] / M. Sanayei, O. Onipede // AIAA Journal. – 1991. – Vol. 29, № 7. – P. 1174–1179.
 26. Ting, E. C. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part II plane solid elements [Текст] / E. C. Ting, C. Shih, Y. K. Wang // Journal of Mechanics. – 2004. – Vol. 20, № 2. – P. 123–132.
- In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1976, No. 7, p. 24–26. (in Russian)
20. Yugov, Anatoliy; Bondarev, Oleksiy. Stressed and strained state of flat frame members investigation with regard to geometric imperfections. In: *Metal Constructions*, 2011, Tom 17, Number 1, p. 51–61. (in Russian)
 21. Bruno, Robin J. Identification of nonlinear joints in a truss structure. In: Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) / American Society of Mechanical Engineers (ASME) Adaptive Structures Forum, Hilton Head, SC. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994, p. 402–410.
 22. Kim, H. M.; Doiron, H. H. On-orbit modal identification of large space structures. In: *Sound and Vibration*, 1992, Vol. 26, Number 6, p. 24–30.
 23. Mousa, A. I.; El Naggar, M. H. Shallow spherical shell rectangular finite element for analysis of cross shaped shell roof. In: *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2007, Vol. 7, p. 41–51.
 24. Pearson, J. E.; Hansen, S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. In: *Journal of Optical Society America*, 1977, Number 67, p. 360–369.
 25. Sanayei, M.; Onipede, O. Damage assessment of structures using static test data. In: *AIAA Journal*, 1991, Vol. 29, Number 7, p. 1174–1179.
 26. Ting, E. C.; Shih, C.; Wang, Y. K. Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part II plane solid elements. In: *Journal of Mechanics*, 2004, Vol. 20, Number 2, p. 123–132.

Югов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция, усиление и демонтаж строительных металлических конструкций, технология и организация работ, при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

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

Югов Анатолій Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології і організації будівництва Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція, посилення та демонтаж будівельних металевих конструкцій, технологія і організація робіт, при будівництві і реконструкції будівель і споруд.

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

Anatoliy Yugov – Doctor in Engineering Sciences, Professor, Head of Construction Engineering and Management Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: designing, assembling, exploitation, technical diagnostics, estimation of technical state, reconstruction, reinforcement and dismantling of building metal constructions, construction engineering and management, white building and reconstruction of buildings and structures.

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