



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2013, ТОМ 19, НОМЕР 2, 81–91

УДК 624.072.33

(13)-0285-1

СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОДНОПОЯСНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТЕРЖНЬОВИХ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК ПОКРИТТЯ

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 20 лютого 2013; прийнята 26 квітня 2013.

Анотація. У статті представлено результати дослідження параметрів напружено-деформованого стану однопоєсних оболонок покриття при впливі розрахункового сполучення навантажень в умовах статичного завантаження. Наведено результати чисельного статичного розрахунку оболонок на сприйняття діючих навантажень та їх аналіз. Отримано значення напружень в елементах оболонки та переміщення вузлів оболонки покриття, що свідчать про необхідність розробки конструктивних заходів, які підвищують жорсткість оболонки. Запропоновані конструктивні заходи для досліджуваної однопоєсної металевої оболонки покриття, які підвищують показники її жорсткості до вимог згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Підходи, наведені у статті, можуть бути використані при розробці однопоєсних оболонок циліндричної, сферичної, еліптичної, тороїдальної та інших конструктивних форм.

Ключові слова: великопрольотні металеві просторові покриття, стержньова циліндрична оболонка, навантаження, напружено-деформований стан, МСЕ.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОДНОПОЯСНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОКРЫТИЯ

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 20 февраля 2013; принята 26 апреля 2013.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования параметров напряжённо-деформированного состояния однопоєсных оболочек покрытия при воздействии расчётного сочетания нагрузок в условиях статического нагружения. Приведены результаты численного статического расчёта оболочек на восприятие действующих нагрузок. Полученные значения напряжений в элементах оболочки и перемещения узлов оболочки покрытия свидетельствуют о необходимости разработки конструктивных мероприятий, которые повысят жёсткость оболочки. Предложены конструктивные мероприятия для исследуемой однопоєсной металлической оболочки покрытия, которые повысят её жёсткость до параметров, требуемых согласно ДСТУ Б В.1.2-3:2006 показателей. Подходы, приведенные в статье, могут использоваться при разработке однопоєсных оболочек цилиндрической, сферической, эллиптической, конической, тороидальной и других конструктивных форм.

Ключевые слова: большепролётные металлические пространственные покрытия, стержневая цилиндрическая оболочка, нагрузки, напряжённо-деформированное состояние, МКЭ.

STATIC CALCULATION SINGLE LAYER CYLINDRICAL ROD METAL SHELLS OF COVERING

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 20 February 2013; accepted 26 April 2013.

Abstract. Investigation of stress-strain state of single layer shell of coating when exposed to the design load combinations under the conditions of static loading have been in the article represented. The results of numerical static calculation of shells on the perception of operating loads have been analysed. The values of the stresses in the cell membrane, and the main traverse shell coating show the need for structural measures that will increase the stiffness of the shell. Constructive activities for exploring single layer metal shell of covering, which will increase its rigidity to the required according to DSTU B V.1.2-3:2006 figures have been suggested. Constructive solution of the shell given in the paper can be used to develop single-layer shells of cylindrical, spherical, elliptical, conical, toroidal, and other structural forms.

Keywords: spatial-span metal coating, rod barrel shell, loads, stress-strain state, FEM.

Введение

Стержневые металлические конструкции используются для возведения гражданских, промышленных зданий и инженерных сооружений или отдельных конструктивных элементов (покрытий, перекрытий). Широкое использование пространственных стержневых конструкций при возведении покрытий вызвано тем, что они обладают повышенной надёжностью и меньшей массой 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 [20, 21, 23].

Потому данные исследования необходимы как подготовительный этап для изучения работы проектируемых однопоясных оболочек покрытия с учётом дефектов, которые могут в них возникнуть при изготовлении и монтаже, а также служить причиной снижения живучести.

Анализ состояния вопроса

В. И. Травуш, обращаясь к коллегам и авторам публикаций научно-технического журнала «Вестник МГСУ», заметил: «...Не должно быть таких решений, когда от локального разрушения какого-либо элемента рушится всё сооружение. Необходима разработка теории живучести зданий и сооружений...» [18].

По мере развития подобных систем возрастает их чувствительность к различного рода внешним повреждениям, к примеру от аварийных воздействий стихийного, целенаправленного и технологического характера – точность изготовления и возведения. Под чувствительностью системы понимается характеристика, показывающая взаимосвязь между переменными проектирования и переменными состояния [19].

Прогнозирование возможных погрешностей изготовления и монтажа – один из возможных резервов повышения точности изготовле-

ния и монтажа строительных конструкций с целью возможного повышения надёжности и живучести большепролётных покрытий. Точность проектирования, изготовления и возведения конструкций большепролётных покрытий влияет на их надёжность и живучесть. Низкая точность изготовления и возведения конструкций приводит к большому количеству непредвиденных трудовых и финансовых затрат, как правило, не учтённых в общей стоимости строительного объекта. Кроме того, она приводит к снижению надёжности и работоспособности возведённого объекта. Повышение же требований к точности изготовления и возведения (монтажа) таких конструкций приводит к дополнительным затратам при их проектировании и изготовлении. Кроме того, накопление несовершенств – дефектов может привести к аварии покрытия или как минимум снижению его живучести [15].

Стоит уделить особое внимание истории осознанного применения термина живучесть. В отечественной литературе первооткрывателем термина считается А. Н. Крылов [9, 11, 13, 17].

Так, до 1902 года традиционная борьба за живучесть корабля при получении им пробоины сводилась к откачиванию воды из затопляемых отсеков. При этом, как правило, в пробоину поступало больше воды, чем могла откачать водоотливная установка пробитого отсека. И корабль тонул – не потому, что терял плавучесть, а из-за потери равновесия: груз воды, заполнившей отсеки с одного борта, переворачивал судно. Развивая гипотезу С. О. Макарова, А. Н. Крылов предложил такую идею: ввести систему затопления отделений судна для его выравнивания. А. Н. Крылов рассуждал так: раз нельзя выкачать воду из отсека корабля, получившего пробоину, необходимо срочно затопить симметричный ему отсек, вернуть кораблю устойчивость и управляемость, дать возможность дойти до порта. «Подразделение на отсеки должно определяться расчетом, коего принцип, чтобы корабль тонул, не опрокидываясь», – писал А. Н. Крылов. Это утверждение он положил в основу принципа таблиц непотопляемости. Они составлялись для каждого корабля индивидуально и помогали определить, как влияет затопление того или иного отсека на крен, дифферент и устойчивость корабля.

Согласно п. 3.18 [6] 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 [5].

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

Большое количество аварий и обрушений, произошедшие за последние годы [2–4, 10, 22]:
1999 г. – обрушение трансформирующегося тентового покрытия Олимпийского стадиона в г. Монреаль, Канада;
2002 г. – обрушение козырька над трибунами футбольного стадиона в Корею;
2004 г. – обрушение железобетонной оболочки «Трансвааль-парк» в г. Москва, РФ;
2005 г. – обрушение секции аэропорта в г. Париж, Франция;
2005 г. – обрушение кровли бассейна «Дельфин» в г. Чусовой Пермского края, РФ;
2006 г. – обрушение покрытия Бауманского рынка в г. Москва, РФ;
2006 г. – обрушение кровли катков в Германии и Австрии;
2009 г. – обрушение каркасно-тентового покрытия стадиона «Probing Cowboys» в г. Даллас, США;
2009 г. – обрушение половины покрытия еще не сданного в эксплуатацию стадиона «Gong Badak», что дополнительно обосновывает необходимость изучения и анализа живучести оболочек покрытия, а одной из возможных причин снижения живучести системы являются дефекты изготовления и монтажа.

Представленные выше некоторые примеры аварий поднимают вопросы контроля технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений на одно из первых мест в системе комплексной безопасности функционирования строительных объектов.

В. Н. Гордеев как один из членов Технической комиссии при ЦНИИСК им. Кучеренко по расследованию аварии – обрушения купола ВИС ВЭИ им. В. И. Ленина в г. Истра, РФ в

1985 г. заметил, что «...наиболее правдоподобной была версия о том, что действительная форма купола значительно отличалась от проектной. Монтаж вёлся навесным способом снизу вверх, и погрешности монтажа, накапливаясь, уменьшали и без того малую кривизну верхней части купола...» [1].

Большинство аварий (не только те, что представлены выше) большепролётных покрытий являются свидетельством тому, что несовершенства изготовления и монтажа являлись как сопутствующими, так и побуждаемыми причинами аварий.

Цель и объект исследования

На сегодняшний день цилиндрические оболочки, в том числе однопоясные, исследованы, в основном, в работах [12, 16]. Однако в этих работах не уделено должного внимания вопросу обеспечения жёсткости исследуемых однопоясных оболочек и не только этому вопросу, что и послужило одной их причин к написанию данной работы.

Цель исследования – оценка напряжённо-деформированного состояния однопоясных стержневых металлических оболочек покрытия цилиндрической формы без дефектов на их несущую способность и жёсткость. Объект исследования – однопоясные металлические оболочки покрытия цилиндрической формы, к примеру, одна из оболочек показана на рис. 1.

Предмет исследования – параметры напряжённо-деформированного состояния элементов и узлов оболочки.

Методика исследования

В исследуемых однопоясных цилиндрических металлических оболочках радиус $R = 10$ м. Образованы они из последовательно соединённых в поперечном направлении $N = 7...23$ монтажных элементов, угол раскрытия образующей $\varphi = 110^\circ$. Длина отдельного стержня оболочки находится в диапазоне $a = 935...3166$ мм. Сеть оболочки в плане образована равнобедренными треугольниками. Общее количество исследованных оболочек – 16 шт. Такое количество оболочек позволяет охватить весь диапазон длин монтажных элементов, которые используются при возведении таких и аналогичных объектов. Схема маркировки элементов, к примеру для оболочки 110-17, показана на рис. 1. В обозначении оболочки 110 – угол раскрытия образующей, т. е. угол φ , а 17 – количество элементов вдоль образующей. Длина отдельного стержня для оболочки 110-17 – $N = 1134$ мм. Поперечный разрез 1-1 с расположением стержней оболочки показан на рис. 2.

При стандартном проектировании однопоясных оболочек покрытия часто сталкиваются с такой проблемой, как обеспечение её жёсткости при действии эксплуатационных нагрузок без учёта несовершенств. Зачастую требование

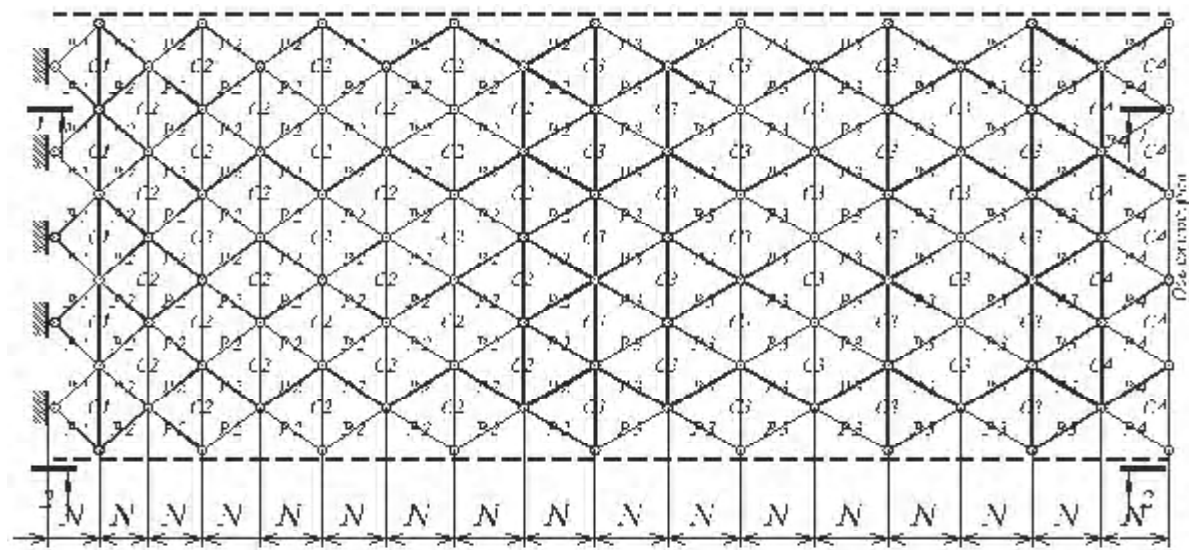


Рисунок 1. Схема оболочки 110-17.

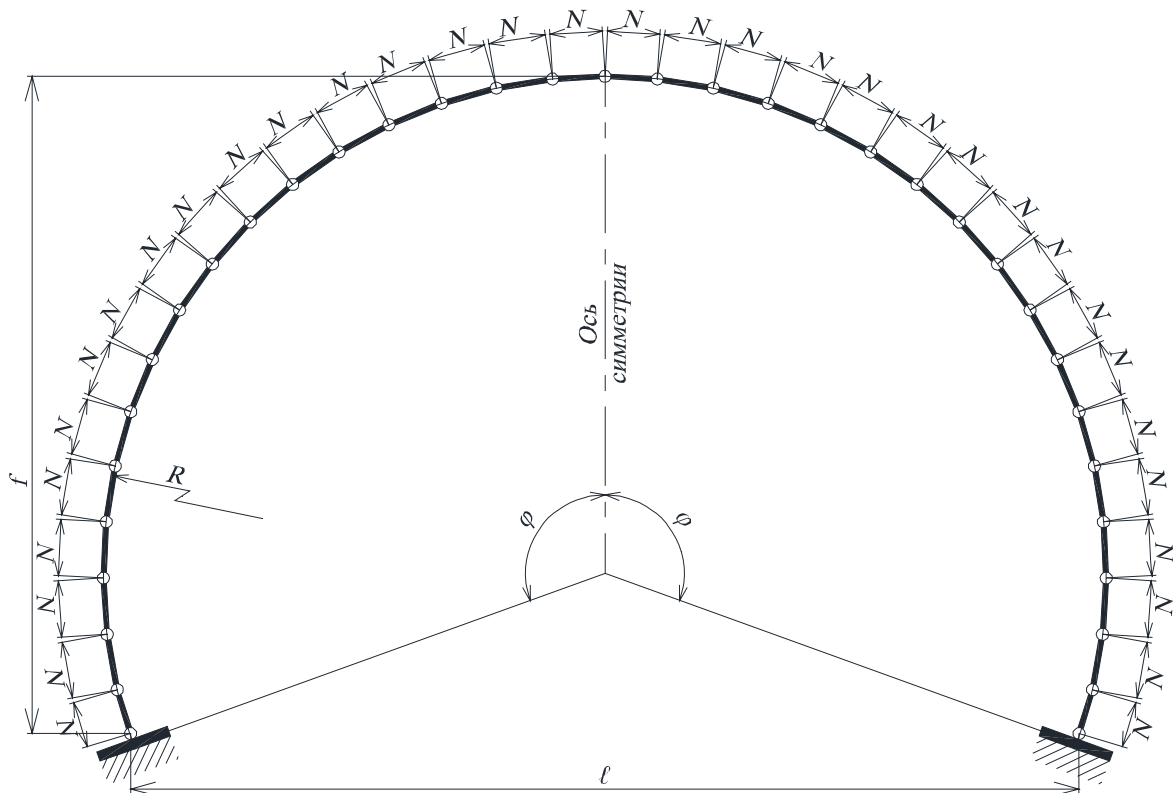


Рисунок 2. Поперечный разрез оболочки 110-17 в сечении 1-1.

второго предельного состояния – обеспечение жёсткости сложно или практически невозможно выполнить, во-первых, из-за малой изгибной жёсткости одноярусной оболочки, а во-вторых, из-за неучёта дефектов изготовления и монтажа, которые, как правило, не рассматриваются при проектировании, а при возведении неизбежно возникают и накапливаются.

Для оценки влияния эксплуатационных нагрузок на параметры напряжённо-деформированного состояния оболочек необходимо выполнить сбор нагрузок, которые действуют на оболочки 110-7...110-23, что и сделано согласно [3]. Численное определение напряжённо-деформированного состояния оболочки выполнено методом конечных элементов, реализованного в вычислительном комплексе (ВК) Structure CAD.

На основе сбора нагрузок сформированы отдельные схемы загрузок от собственного веса, полезной и временных нагрузок, из которых в свою очередь составлены комбинации загрузок, представленные в таблице 1. Для уменьшения количества монтажных элементов

(сокращения числа типоразмеров профилей) принято решение разбить всю оболочку на несколько участков с одинаковыми марками профилей.

Ориентировочное сечение элементов оболочки определено при гибкости $\lambda = 120$, а затем уточнено на основании статического и конструктивного расчёта. Материал конструкций – сталь С255. Сечение элементов – гнуто-сварной профиль. Для конструктивного оформления узловых соединений оболочки возможны как болтовые, сварные, так и комбинированные соединения. С точки зрения статической работы эти узлы будут считаться одинаковыми, т. е. шарнирными. Геометрические параметры всех оболочек приведены в таблице 2.

Анализ результатов расчёта

Наибольшие максимальные растягивающие и сжимающие напряжения в элементах, а также горизонтальные и вертикальные перемещения узлов для оболочек наблюдаются при несимметричной загрузке. Т. е. наибольшие

Таблица 1. Комбинации загружений

Наименование нагрузки	Комбинации загружений					
	1	2	3	4	5	6
1. Собственный вес металла оболочки	+	+	+	+	+	+
2. Полезная – вес кровли на оболочке	+	+	+	+	+	+
3. Снеговая вариант 1		+			+	
4. Снеговая вариант 2			+			+
5. Ветровая				+	+	+

Таблица 2. Геометрические параметры оболочек

№	f/ℓ	i	Сечение	№	f/ℓ	i	Сечение
110-7	0,26	2,64	80×3	110-16	0,26	1,19	80×3
110-8	0,26	2,31	80×3	110-17	0,26	1,12	80×3
110-9	0,26	2,05	80×3	110-18	0,26	1,06	80×3
110-10	0,26	1,85	80×3	110-19	0,26	1,00	80×3
110-11	0,26	1,68	80×3	110-20	0,26	0,95	80×3
110-12	0,26	1,61	80×3	110-21	0,26	0,90	80×3
110-13	0,26	1,48	80×3	110-22	0,26	0,90	80×3
110-14	0,26	1,37	80×3	110-23	0,26	0,90	80×3
110-15	0,26	1,27	80×3				

Обозначения, принятые в таблице, см. на рис. 2; f – стрела подъёма оболочки; ℓ – пролёт оболочки; i – радиус инерции.

перемещения и усилия (напряжения) в оболочках зафиксированы при действии 3 комбинации схем нагрузок. В соответствии с таблицей 1 [8] относительный, в нашем случае, вертикальный прогиб ($f_{\text{в}}$) элементов балок и ферм покрытий и чердачных перекрытий, не несущих технологическое оборудование, равен $\ell/150$. Таким образом, при пролёте покрытия, равном 10 м, вертикальный предельный прогиб $f_{\text{в}} = 67$ мм.

Поскольку конструкция цилиндрической оболочки – стержневая система, то максимальные напряжения определялись в трёх составных элементах стержневой системы – стойки (С), пояса (П), раскосы (Р). В результате расчётов выявлены закономерности напряженно-деформированного состояния. Основные результаты расчёта цилиндрической оболочки покрытия как пространственной шарнирно-стержневой системы представлены в таблице 3.

Анализируя полученные закономерности параметров напряженно-деформированного состояния для разных типов систем и схем нагрузок оболочек, можно утверждать, что существенное влияние на характер и величины деформаций влияет несимметричная схема при-

ложения нагрузки. Для обеспечения требуемого вертикального прогиба покрытия выполнен ряд мероприятий:

- заменим шарнирное крепление оболочки к фундаменту на жёсткое;
- заменим шарнирное сопряжение элементов между собой на жёсткое;
- повысим изгибную и осевую жёсткость элементов оболочки – увеличим сечение стержней;
- повысим изгибную и осевую жёсткость опорных раскосов в два раза;
- установим диафрагмы в меридиональном сечении оболочки (рис. 3).

С целью обеспечения необходимой жёсткости покрытия принимались узловые соединения такими, чтобы обеспечить жёсткое соединение стержней в направлении нормали к поверхности покрытия. Снижение величин деформаций, на 10...15 % от первоначального варианта параметров оболочки. Кроме того, требуемая жёсткость достигалась за счёт двукратного повышения изгибной жёсткости опорных элементов – раскосов.

Замена шарнирного закрепления оболочки на жёсткое снижает величины деформаций по всем направлениям приблизительно в два и

Таблица 3. Основные результаты расчёта оболочек

№	σ^+_{\max} , кН/см ²		σ^-_{\max} , кН/см ²		$\delta_{z \max}$, мм		$\delta_{y \max}$, мм	
	сим.	несим.	сим.	несим.	сим.	несим.	сим.	несим.
110-7	8,3	11,1	-16,2	-21,4	-14240	-17603	-10145	-12670
110-8	6,4	8,2	-13,9	-19,1	-12948	-11234	-9021	-11234
110-9	7,4	9,6	-17,0	-23,2	-11800	-14543	-8470	-10558
110-10	5,7	18,0	-14,3	-19,9	-7726	-13383	-7726	-9615
110-11	5,6	7,4	-15,8	-21,5	-9978	-12279	-7009	-8720
110-12	4,5	6,0	-14,6	-19,3	-6564	-9201	-6564	-8160
110-13	4,9	6,4	-17,0	-21,6	-8623	-10596	-6164	-7661
110-14	4,0	5,4	-15,6	-19,8	8049	-9871	-5692	-7065
110-15	3,3	4,4	-14,3	-17,5	-7628	-9364	-5440	-6751
110-16	2,8	3,7	-13,1	-16,1	-7298	-8942	-5191	-6439
110-17	2,6	3,1	-11,8	-14,5	-6845	-8388	-4901	-6070
110-18	2,4	2,9	-10,9	-13,4	-6582	-8055	-4671	-5786
110-19	1,9	2,5	-9,9	-12,1	-6235	-7633	-4436	-5492
110-20	1,7	2,2	-9,5	-11,5	-5942	-7264	4214	-5216
110-21	1,7	2,2	-9,0	-10,8	-5667	-6932	-4046	-5004
110-22	1,9	2,4	8,3	10,1	-5514	-6734	-3913	-4837
110-23	1,5	1,7	7,9	9,5	-5267	-6433	-3741	-4620

Сим. – симметричная нагрузка – 1 комбинация; несим. – несимметричная нагрузка – 3 комбинация, см. таблицу 1. В качестве σ^+_{\max} , σ^-_{\max} , $\delta_{z \max}$, $\delta_{y \max}$ взяты максимальные усилия и перемещения в соответствующих оболочках.

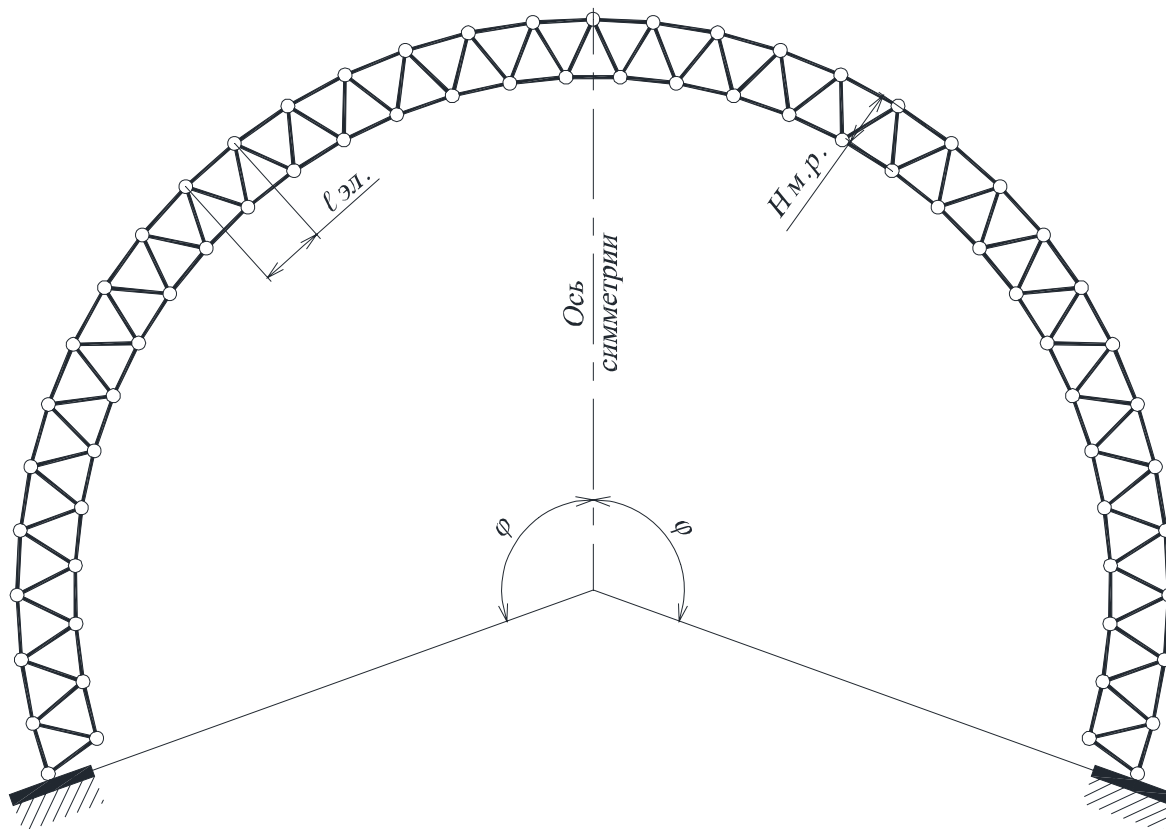


Рисунок 3. Поперечный разрез оболочки 110-17 в сечении 2-2.

более раза. Крепление оболочки к фундаменту принято шарнирным, т. к. наиболее часто встречаемый способ объединения конструкции покрытия с фундаментом. Для повышения жёсткости оболочки покрытия предпочтительно закрепление её опорных узлов и поперёк образующей – вдоль оси ОУ.

Однако при выполнении указанных выше мероприятий жёсткость оболочки покрытия недостаточна и потому подробные результаты по усилиям и деформациям покрытия в данной работе не представляются. Требуемый эффект дало только последнее мероприятие – установка меридиональных диафрагм. К примеру, расположение диафрагм в плане для оболочки 110-17 показано на рис. 1 пунктирной линией. В результате установки диафрагм получены параметры напряжённо-деформированного состояния оболочки, которые представлены в таблице 4.

Жёсткость элементов диафрагмы принята в два раза больше, чем у элементов решётки. Высоту меридионального ребра ($H_{\text{мр}}$) на основании вариантных расчётов рекомендуется принимать равной $0,5 \times \ell_{\text{эл}}$. Гибкость элементов диафрагмы рекомендуется принимать равной $\lambda = 60$. Гибкость остальных элементов оболочки – $\lambda = 120$ осталась без изменений, т. к. её достаточно для восприятия эксплуатационных

нагрузок. Меньшую жёсткость, т. е. большую гибкость торцевой диафрагмы, брать не рекомендуется, т. к. вертикальный прогиб узлов оболочки выше допустимого согласно [8]. До разработки мероприятий, обеспечивающих жёсткость покрытия, диафрагм как на рис. 3, не было, т. е. разрез 2-2 и 1-1 были полностью идентичны до установки диафрагм.

При устройстве таких покрытий главной задачей является обеспечение жёсткости системы в целом, а также рациональное конструктивное решение соединения элементов друг с другом в узлах, что и было достигнуто в результате численного исследования параметров напряжённо-деформированного состояния оболочки от действия эксплуатационных нагрузок. Таким образом, по результатам расчётов разработано усовершенствованное конструктивное решение оболочки – установлены торцевые диафрагмы в известную ранее систему [16].

Следует заметить, что технологические особенности возведения таких покрытий требуют разработки новых конструктивных решений, позволяющих выполнить сборку элементов в проектную конструктивную форму с минимальными трудовыми затратами на работы по подгонке. Неучёт при проектировании таких факторов, как погрешности изготовления и монтажа, приводят к снижению несущей способнос-

Таблица 4. Основные результаты расчёта оболочек при установке диафрагм

№ оболочки	σ^+_{max} , кН/см ²		σ^-_{max} , кН/см ²		δ_z_{max} , мм		δ_x_{max} , мм	
	сим.	несим.	сим.	несим.	сим.	несим.	сим.	несим.
110-7	8,3	11,1	-16,2	-21,4	-27	-35	-32	-40
110-8	6,4	8,2	-13,9	-19,1	-12	-16	-30	-37
110-9	7,4	9,6	-17,0	-23,2	-10	-14	-30	-37
110-10	5,7	18,0	-14,3	-19,9	-7	-10	-28	-35
110-11	5,6	7,4	-15,8	-21,5	-9	-12	-26	-32
110-12	4,5	6,0	-14,6	-19,3	-9	-11	-23	-28
110-13	4,9	6,4	-17,0	-21,6	-10	-13	-23	-28
110-14	4,0	5,4	-15,6	-19,8	-10	-12	-21	-26
110-15	3,3	4,4	-14,3	-17,5	-18	-22	-32	-40
110-16	2,8	3,7	-13,1	-16,1	-13	-16	-25	-31
110-17	2,6	3,1	-11,8	-14,5	-23	-28	-35	-43
110-18	2,4	2,9	-10,9	-13,4	-17	-20	-28	-34
110-19	1,9	2,5	-9,9	-12,1	-16	-32	-26	-31
110-20	1,7	2,2	-9,5	-11,5	-26	-31	-40	-48
110-21	1,7	2,2	-9,0	-10,8	-25	-31	-37	-45
110-22	1,9	2,4	8,3	10,1	-25	-31	-38	-46
110-23	1,5	1,7	7,9	9,5	-56	-65	-38	-46

ти как отдельных элементов, так и всей оболочки покрытия, но результаты этих исследований будут рассмотрены в следующей работе авторов.

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Получены параметры напряжённо-деформированного состояния оболочек с углом раскрытия дуги 110° при симметричной и несимметричной схеме расположения нагрузок, на основе которых обоснована не-

обходимость разработки конструктивных мероприятий.

2. Установка торцевых рёбер – диафрагм в покрытии обеспечивает требуемую жёсткость согласно [8].
3. Торцевые диафрагмы позволяют более полно использовать несущую способность системы. На основании вариантных расчётов рекомендуется принимать высоту меридионального ребра ($H_{\text{мр}}$) равной $0,5 \times \ell_{\text{эл}}$, а гибкость элементов диафрагмы рекомендуется принимать равной $\lambda = 60$.

Литература

1. Арошенко, М. Тайны стальных конструкций [Текст] / М. Арошенко, В. Гордеев, И. Лебедич. – К. : Сталь, 2004. – 304 с.
2. Белостоцкий, А. М. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк». Часть 1. Постановка задач и методология численного моделирования. Часть 2. Моделирование нагрузок и воздействий [Текст] / А. М. Белостоцкий // Вестник МГСУ. – 2006. – № 3. – С. 20–40.
3. Белостоцкий, А. М. Численное моделирование в экспертных исследованиях причин обрушения и локального разрушения конструкций большепролетных зданий [Текст] / А. М. Белостоцкий // International journal for computational civil and structural engineering. – 2008. – Vol. 4, Issue 2. – С. 26–27.
4. Мониторинг сложных технических систем [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, В. Р. Касимов [и др.] // Металлические конструкции. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 299–313.
5. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введен впервые ; дата введения 01.07.90. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 37 с.
6. 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.
7. 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.
8. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини

References

1. Aroshenko, M.; Gordeev, V.; Lebedich, I. Secrets of steel constructions. Kyiv: Steel, 2004. 304 p. (in Russian)
2. Belostotskij, A. M. Analysis of causes of breakdown of roof construction SOK «Transvaal-park». The first part. Statement of problem. The second part. Model analysis of loads and effects. In: *Proceeding MSBU*, 2006, Number 3, p. 20–40. (in Russian)
3. Belostotskij, A. M. Numerical simulation in forensic studies of breakdown and local action destruction of constructions of spans. In: *International journal for computational civil and structural engineering*, 2008, Vol. 4, Issue 2, p. 26–27. (in Russian)
4. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Kasimov, V. R.; Nazim, Ya. V.; Kuznetsov, S. G.; Vasylev, V. N. Monitoring of complex engineering systems. In: *Metal Constructions*, 2008, Volume 14, Number 4, p. 299–313. (in Russian)
5. ГОСТ 27.002-89. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions. Moscow: Standard Publishing house, 1990. 37 p. (in Russian)
6. ДБН В.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)
7. ДБН В.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)
8. ДСТУ В В.1.2-3:2006. The system of reliability and safety assurance in building projects. Deflections and displacements. Design rules. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 9 p. (in Ukrainian)
9. Zabirow, T. A. Survivability of surface vessel. Moscow: Voenizdat, 1994. 360 p. (in Russian)

- і переміщення. Вимоги проектування [Текст]. – Введено вперше ; чинний від 2007-01.01. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 9 с.
9. Забиров, Т. А. Живучесть надводного корабля [Текст] / Т. А. Забиров. – М. : Воениздат, 1994. – 360 с.
 10. Канчели, Н. В. Строительные пространственные конструкции [Текст] : Учеб. пособие / Н. В. Канчели. – 3-е издание, дополненное и переработанное. – М. : АСВ, 2009. – 112 с.
 11. Ляхов, Г. Очерки по живучести боевого корабля [Текст] / Г. Ляхов. – Л. : УВМС РККА, 1932. – 149 с.
 12. Матюнов, С. А. Цилиндрические сетчатые металлические своды. Теоретические и экспериментальные исследования прочности и устойчивости [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук / С. А. Матюнов. – Пенза, 2002. – 150 с.
 13. Мейлер, М. А. Живучесть надводного корабля [Текст] / М. А. Мейлер. – М.-Л. : Государственное военно-морское издательство НКВМФ ССР, 1940. – 36 с.
 14. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надёжности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – М. : АСВ, 2007. – 256 с.
 15. Савельев, В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов [Текст] : автореферат диссертации ... доктора технических наук / В. А. Савельев. – М., 1995. – 40 с.
 16. Сиянов, А. И. Металлические однослойные цилиндрические стержневые покрытия [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук / А. И. Сиянов. – К., 2002. – 200 с.
 17. Травиничев, А. Живучесть корабля [Текст] / А. Травиничев. – М.-Л. : Красный пролетарий, 1930. – 48 с.
 18. Травуш, В. И. Обращение к авторам [Текст] / В. И. Травуш // Вестник МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 5.
 19. Хог, Э. Анализ чувствительности при проектировании конструкций [Текст] : Пер. с англ. / Э. Хог, К. Чой, В. Комков. – М. : Мир, 1988. – 428 с.
 20. 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.
 21. Bujakas, V. I. Petal-Type Deployable Space Antennas for Radio Astronomy [Текст] / V. I. Bujakas, A. S. Gvamichava, A. G. Rybakowa // Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Vol. 2. / City University of Hong Kong. Telecommunications Research Centre. – Hong Kong : Telecommunications Research Centre, City University of Hong Kong, 1997. – P. 380.
 10. Kancheli, N. V. Building space structures. Textbook. Third revised and enlarged edition. Moscow: ASV, 2009. 112 p. (in Russian)
 11. Lyahov, G. Sketch of durability of combating vessel. Leningrad: UVMS RKKA, 1932. 149 p. (in Russian)
 12. Mayuniov, S. A. Circumferential netted metal concamerations. Theoretical and experimental investigations of strength and stability: PhD in Technical Sciences dissertation. Penza, 2002. 150 p. (in Russian)
 13. Meiler, M. A. Durability of surfaced vessel. Moscow-Leningrad: State of fleet publishing house, 1940. 36 p. (in Russian)
 14. Perelmutter, A. V. Select problems of reliability and safety of building constructions. Moscow: ASB, 2007. 256 p. (in Russian)
 15. Savelyev, V. A. Theoretical foundations of metal cupolas. Doctoral Dissertation abstract. Moscow, 1995. 40 p. (in Russian)
 16. Sijanov, A. I. Metal single-ply cylindrical rod covering: PhD in Technical Sciences dissertation. Kyiv, 2002. 200 p. (in Russian)
 17. Travinichev, A. Durability of ship damage control. Moscow-Leningrad: Red proletary, 1930. 48 p. (in Russian)
 18. Travush, V. I. Adress to authors. In: Proceeding MSBU, 2013, Number 2, p. 5. (in Russian)
 19. Hog, E.; Choi, K.; Komkov, V. Sensivity analysis during design of constructions. Translated from English. Moscow: World, 1988. 428 p. (in Russian)
 20. 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.
 21. Bujakas, V. I.; Gvamichava, A. S.; Rybakowa, A. G. Petal-Type Deployable Space Antennas for Radio Astronomy. In: *Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Vol. 2*. Hong Kong: Telecommunications Research Centre, City University of Hong Kong, 1997, p. 380.
 22. Chilton, John. Space Grid Structures. Great Britain: Architectural Press, 2000. 180 p.
 23. Makoto, Ohsaki. Optimization of Finite Dimensional Structures. Japan: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 405 p.

22. Chilton, John. Space Grid Structures [Текст] / John Chilton. – Great Britain : Architectural Press, 2000. – 180 p.
23. Makoto, Ohsaki. Optimization of Finite Dimensional Structures [Текст] / Makoto Ohsaki. – Japan : CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. – 405 p.

Югов Анатолий 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 кафедри технології і організації будівництва Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування, монтаж металевих та комбінованих конструкцій.

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

Anatoliy Yugov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Construction Engineering and Management Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: designing, erection, exploitation, technical diagnostics, estimation of technical state, reconstruction, reinforcement and dismantled 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 complex construction.