

## Влияние криволинейной формы на распределение массы металлических цилиндрических сетчатых оболочек

*А.И. Сиянов*

*Технический институт (филиал) «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», г. Нерюнгри*

**Аннотация:** Исследовано влияние изменения геометрии металлической цилиндрической сетчатой оболочки без подкреплений, с затяжками и с горизонтальными фермами на удельный весовой показатель. В качестве заданных параметров приняты пролет и угол описанной окружности оболочки. Они определили изменение радиуса кривизны, стрелы подъема, размера ячейки, длины оболочки и характеристик жесткости стержней. Для выявления искомого удельного весового параметра количество элементов распределялось по типоразмерам. Расчеты произведены с использованием прикладного программного обеспечения ПК ЛИРА. Проанализированы полученные данные, в результате чего определено оптимальное расстояние между опорами, которое позволило найти минимальную массу и установить приемлемые геометрические параметры конструкции. Кроме того, выявлены экстремальные значения, за пределами которых исследование влияния изменения геометрических параметров на удельный весовой показатель становится не целесообразным.

**Ключевые слова:** цилиндрическая сетчатая оболочка, элемент подкрепления, геометрический параметр, удельный весовой показатель, затяжка, горизонтальная ферма.

### Введение

Из практики проектирования и строительства известно, что металлические цилиндрические сетчатые оболочки являются уникальными большепролетными пространственными конструкциями, использование которых обеспечивает архитектурную выразительность и придает значительный экономический эффект.

Проводимый 3-й Международный форум технологий и элементов собрал многочисленную аудиторию профессионалов в области проектирования строительных объектов и показал огромный интерес к внешним оболочкам [1]. За рубежом инновационные разработки воплощены в уникальных строительных комплексах компании MERO [2] и сложных криволинейных сетчатых поверхностях в стиле архитектурной бионики [3].

Форма цилиндрической оболочки отличается особым спросом у заказчиков, позволяет создавать целостную композицию в городской

застройке [4,5] и способствует реализации самых смелых идеи в строительстве. Появляется необходимость учета многих факторов [6], влияющих на разработку большепролетной сетчатой конструкции. Как правило, приходится применять длинные и очень сложные математические выражения [7], описывающие состояние и геометрические параметры поверхности. Здесь следует отметить, что чем больше размер пролета, тем оказывается целесообразнее применение цилиндрических сеток по сравнению с плоскими системами. Однако увеличение размера между опорами приводит к существенному утяжелению конструкции [8] и, как следствие, к серьезному негативному изменению удельного весового параметра. Поэтому лишь определенными геометрическими соотношениями можно выявить варианты с меньшей весовой характеристикой, которые, безусловно, снизят стоимость оболочек и откроют перспективы по их серийному внедрению в строительстве.

### **Постановка задачи**

В связи с этим, в данной работе поставлена задача – исследовать влияние изменения геометрии цилиндрической сетчатой оболочки на распределение массы, начиная с минимально возможного, для данных систем, пролета. Для исследований приняты наиболее возможные конструктивные схемы оболочки без учета подкреплений, подкрепленные тросовыми стальными затяжками и укрепленные внутренними горизонтальными бортовыми фермами.

### **Исходная система и элементы подкрепления**

Рассмотрим схему оболочки (рис. 1) из элементов трубчатого сечения (модуль упругости стержней  $E=2,1 \times 10^4$  кН/см<sup>2</sup>, расчетное сопротивление стали ( $R_y=240$  МПа) с шарнирным креплением опорных элементов по контуру.

---

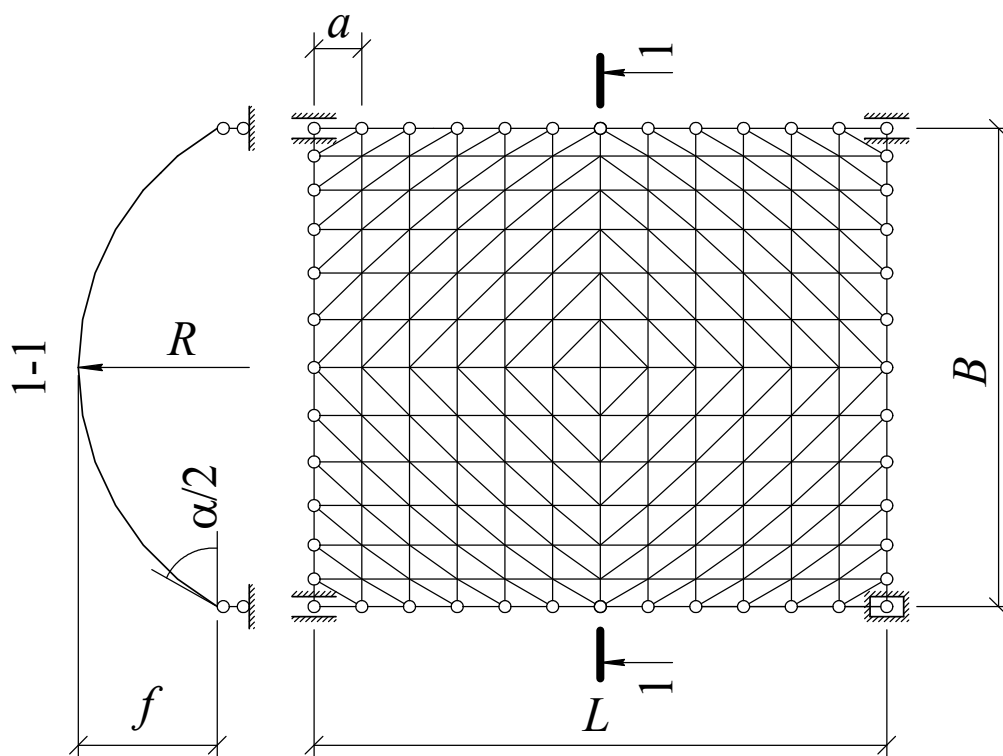


Рис. 1 – Расчетная неподкрепленная схема оболочки

Узловая нагрузка, как результат суммы собственной массы, действия снега и ветра, приложена как на одной стороне склона, так и по всей сетчатой поверхности. Количество ячеек вдоль длины оболочки, которые образуют грань и количество граней вдоль ломаной линии по направлению ширины, которые образуют пространственную систему – одинаковое ( $n=m=12$ ).

Для элементов подкрепления выбраны затяжки (стальные тросы) и горизонтальные фермы с подвесками (рис. 2), расположенные в опорной зоне оболочки.

Количество затяжек принято 5 ( $R_y=720$  МПа), а количество горизонтальных ферм 2 ( $R_y=240$  МПа), причем каждая горизонтальная ферма комплектуется пятью подвесками из арматурной стали  $d=20$  мм, с помощью которых равномерно через каждые две панели по длине жестко соединяется с конструкцией оболочки.

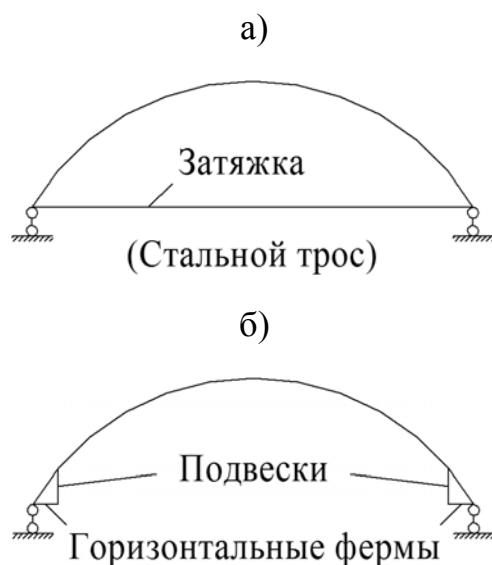


Рис. 2 – Схемы введения в состав оболочки элементов подкрепления:

а) затяжек; б) опорных горизонтальных ферм с подвесками

### Исследование влияния геометрических параметров на распределение массы оболочки

В качестве заданных параметров приняты пролет  $B$  и угол описанной окружности оболочки  $\alpha$ . Они определяли изменение радиуса кривизны  $R$ , стрелы подъема  $f$ , размера ячейки  $a$ , длины оболочки  $L$  и характеристик жесткости стержней  $EA$  и  $EJ$ . Пролет  $B$  изменялся от 12 до 42 м (с шагом 6 м), а угол  $\alpha$  варьировался в пределах  $100^{\circ} \dots 150^{\circ}$  (через  $10^{\circ}$ ).

Рассчитывая узловые нагрузки с учетом ограничения по вертикальным и горизонтальным перемещениям узлов и используя существующее программное обеспечение ПК ЛИРА [9, 10], задавали поперечное сечение стержней  $A$  для каждого  $B$  и  $\alpha$ .

Это позволило предварительно определить максимальные значения усилий и подобрать и ввести в программу новые (скорректированные) характеристики жесткости элементов.

На основании полученных данных, расчет производился повторно, и

определялись значения усилий в каждом элементе для оболочек с различными геометрическими параметрами и конструктивными схемами.

Всего было рассчитано 108 схем (18 для каждого пролета, учитывая изменение угла  $\alpha$ ).

Для определения искомого удельного весового параметра количество элементов распределяли по типоразмерам. Поскольку конструкция оболочки (рис. 1) представляла собой систему плоских ферм, то максимальные усилия определяли по составляющим элементам граней, то есть в направлении поясов, стоек и раскосов. Таким образом, было получено три типоразмера для двух вариантов – оболочек без подкреплений и с затяжками. Для конструкций с горизонтальными фермами количество типоразмеров выросло вдвое.

Сечения элементов определяли в тех же направлениях, что и максимальные усилия, пользуясь сортаментом прокатных профилей, проверяя по предельной гибкости, условию устойчивости или прочности, полученный вариант. Масса 1 м<sup>2</sup> оболочки без подкреплений и с затяжками рассчитывалась по формуле:

$$g = [(A_n + A_c) a n_c + (A_p l_p n_p)] \rho / B L, \quad (1)$$

где  $A$  и  $n$  – соответственно площади поперечного сечения и количество элементов (индексы  $n, c, p$  указывают на пояса, стояки и раскосы в гранях);  $a$  – размер ячейки;  $\rho$  – плотность стали, из которой изготовлены стержневые элементы ( $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>);  $l_p$  – длины раскосов;  $B$  и  $L$  – соответственно ширина и длина оболочки.

С введением в систему горизонтальных ферм, формула (1) приняла такой вид:

$$g = [(A_n + A_c) a n_c + (A_p l_p n_p) + (A_n^{\phi} a n_n^{\phi}) + (A_c^{\phi} l_c^{\phi} n_c^{\phi}) + (A_p^{\phi} l_p^{\phi} n_p^{\phi})] \rho / B L, \quad (2)$$

где индексы  $\phi$ . при параметрах  $A, n, l$  относились к элементам горизонтальных ферм.

Видим, что в формулах (1) и (2) отсутствуют строительные коэффициенты, которые для предлагаемых вариантов почти не влияют на определение массы 1 м<sup>2</sup> оболочки. Это позволяет не учитывать затраты на узлы и упростить выражения для определения параметра  $g$ . Кроме того, в (1) и (2) отсутствуют данные о затяжках и подвесках соответственно, максимальное влияние которых на величину  $g$  незначительное.

Основываясь на том, что масса 1 м<sup>2</sup> оболочки – это функция геометрических и физических параметров:

$$g = f(A, a, n, l, \rho, B, L), \quad (3)$$

поставим задачу исследовать влияние изменения геометрии конструкции для трех вариантов – оболочек без подкреплений, с затяжками и с горизонтальными фермами на распределение массы  $g$ , начиная с минимально возможного для данных систем пролета.

Исследуем влияние изменения геометрических параметров  $B$  и  $\alpha$  на величину  $g$  оболочки и сравниваем предложенные варианты с целью определения наиболее оптимального из них. Все операции для получения оптимального варианта сведены в специально разработанный алгоритм (рис. 3). Геометрические параметры, характеризующие принятые расчетные схемы оболочки приведены в таблицах 1–6.

По результатам расчета установлено, что увеличение пролета  $B$  при определенных соотношениях геометрических параметров характеризуется уменьшением массы 1 м<sup>2</sup> оболочки. В частности для пролетов от 12 м до 30 м при  $\alpha=100^{\circ}\dots 150^{\circ}$ , показатель  $g$  снижается с более равномерным изменением при  $\alpha=120^{\circ}$ , после чего  $g$  возрастает и при  $B=42$  м удельный весовой параметр достигает уровней 18 м и 24 м, а в отдельных случаях и уровня 12 м. То есть оптимальный пролет почти для всех вариантов (за исключением оболочки без подкреплений при  $\alpha=100^{\circ}$  и варианта 3 затяжками при  $\alpha=120^{\circ}$ ) составляет 30 м.

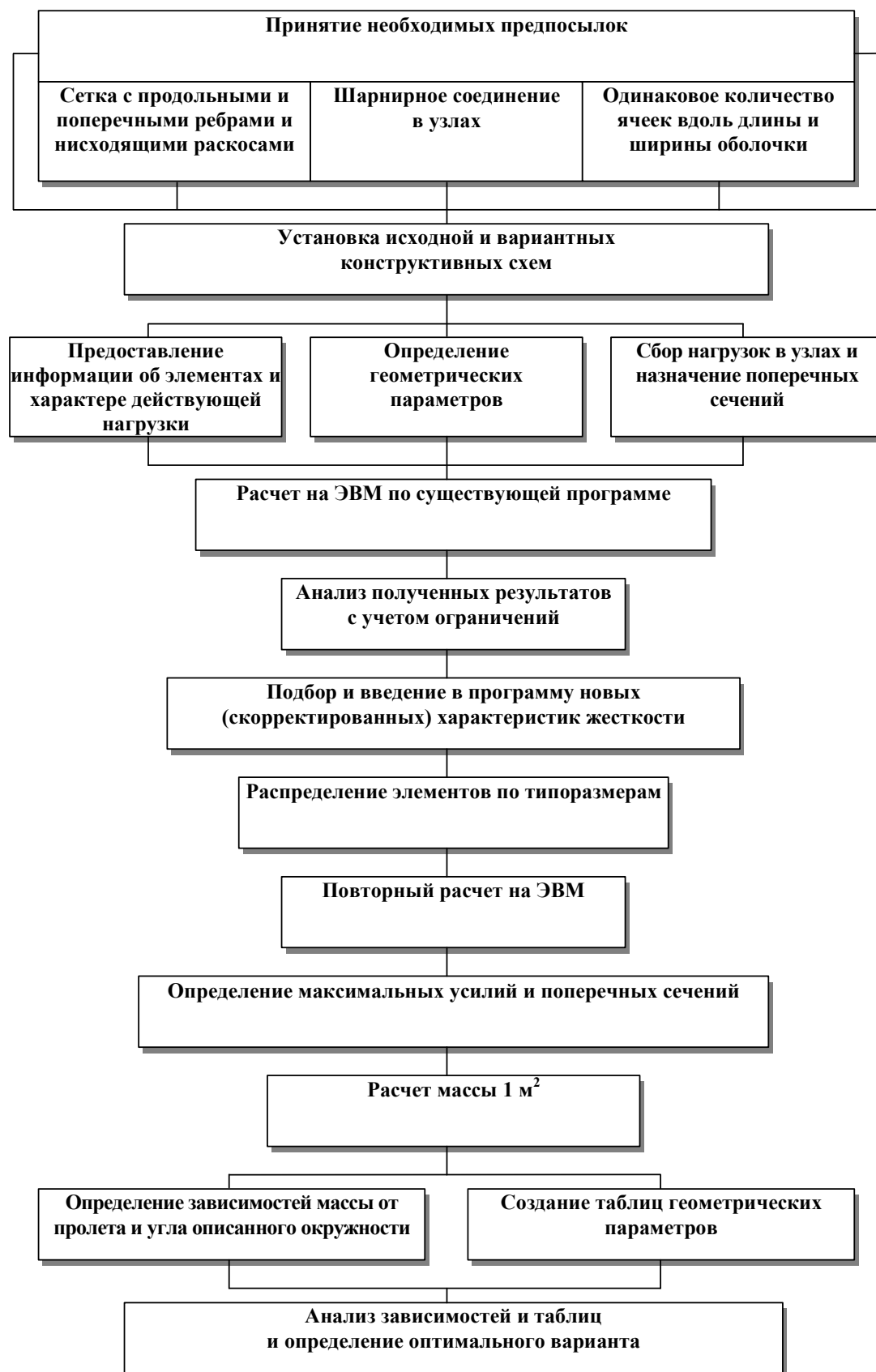


Рис. 3 – Алгоритм определения оптимального варианта

Таблица 1  
**V = 12 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	7,85	1,14	2,775	13,68
110	7,3	1,165	3,135	13,98
<b>120</b>	<b>6,95</b>	<b>1,19</b>	<b>3,435</b>	<b>14,28</b>
130	6,645	1,24	3,8	14,88
140	6,405	1,295	4,175	15,54
150	6,235	1,345	4,57	16,14

Таблица 2  
**V = 18 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	11,75	1,7	4,19	20,4
110	11	1,745	4,62	20,94
<b>120</b>	<b>10,4</b>	<b>1,8</b>	<b>5,145</b>	<b>21,6</b>
130	9,935	1,865	5,705	22,38
140	9,59	1,935	6,24	23,22
150	9,335	2,015	6,845	24,18

Таблица 3  
**V = 24 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	15,7	2,28	5,55	27,36
110	14,6	2,33	6,27	27,96
<b>120</b>	<b>13,9</b>	<b>2,38</b>	<b>6,87</b>	<b>28,56</b>
130	13,29	2,48	7,6	29,76
140	12,81	2,59	8,35	31,08
150	12,47	2,69	9,14	32,28

Таблица 4  
**V = 30 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	19,6	2,83	6,93	33,96
110	18,3	2,915	7,79	34,98
120	17,3	3,01	8,6	36,12
<b>130</b>	<b>16,59</b>	<b>3,1</b>	<b>9,55</b>	<b>37,2</b>
140	16	3,22	10,49	38,64
150	15,56	3,36	11,5	40,32

Таблица 5  
**V = 36 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	23,5	3,4	8,38	40,8
110	22	3,49	9,24	41,88
<b>120</b>	<b>20,8</b>	<b>3,6</b>	<b>10,29</b>	<b>43,2</b>
130	19,87	3,73	11,41	44,76
140	19,18	3,87	12,48	46,44
150	18,67	4,03	13,69	48,36

Таблица 6  
**V = 42 м**

$\alpha^0$	г, м	а, м	f, м	L, м
100	27,48	3,96	9,72	47,52
110	25,76	4,07	10,86	48,84
120	24,26	4,2	12,12	50,4
130	23,14	4,36	13,45	52,32
<b>140</b>	<b>22,39</b>	<b>4,51</b>	<b>14,7</b>	<b>54,12</b>
150	21,75	4,7	16,1	56,4

Вместе с тем, при  $\alpha=100^0$  и  $150^0$  для всех  $V$  заметна существенная разница либо, наоборот, сближение в значениях показателя  $g$  независимо от того, какой вариант оболочки рассматривается – без подкреплений, с затяжками или с горизонтальными фермами. Поэтому ограниченность по  $\alpha$  от начального значения, которому соответствует  $100^0$  до конечного значения, которому соответствует  $150^0$  вызвана тем, что при этих параметрах зафиксирован экстремум удельного весового параметра (при  $\alpha=100^0$  разброс



значений между вариантами резко возрастает, а при  $\alpha=150^0$  резко снижается). Учитывая вышесказанное, считаем, что продолжать исследования за пределами этого интервала становится не целесообразным.

Оценивая результаты, полученные в таблицах 1–6, можно проанализировать и влияние других геометрических параметров на показатель  $g$ . Такими параметрами являются радиус кривизны  $r$ , стрела подъема  $f$ , размер ячейки  $a$  и длина оболочки  $L$ . Характер изменения  $g$  от этих параметров зависит от начальных  $B$  и  $\alpha$ .

Анализ полученных данных показал, что независимо от рассматриваемого варианта, изменение параметров  $r$ ,  $f$ ,  $L$  и влияние их на массу  $1 \text{ м}^2$  оболочки происходит по аналогии с изменением и влиянием параметра  $B$ . Однако с увеличением  $\alpha$  при любом  $B$  уменьшается  $r$  и растут  $a$ ,  $f$ ,  $L$ .

В таблицах 1–6 для каждого пролета выделены жирным шрифтом и фоном строки геометрических параметров, которые соответствуют оптимальному (по удельному весовому параметру) варианту, откуда видим, что для пролетов 18 м...24 м, а также 36 м (табл. 1–3, 5) оптимальные геометрические параметры определяются при  $\alpha=120^0$ , а для пролетов 30 м и 42 м при  $\alpha=130^0$  и  $140^0$  соответственно. Для оболочек с затяжками, пролетом 12 м...36 м, оптимальные геометрические параметры можно рекомендовать также при  $\alpha=100^0$ .

Несмотря на введение в систему горизонтальных ферм в комплекте с подвесками, масса  $1 \text{ м}^2$  конструкции для всех рассмотренных пролетов и соответствующих  $\alpha$ , меньше, чем для аналогичных систем без подкреплений. Даже в максимальных значениях (при  $\alpha=150^0$  и  $B=42$  м) удельный весовой параметр снижается на 13 %, а при  $\alpha=100^0$  и  $B=24$  м на 36 %.

Важно отметить и тот факт, что наименьший весовой показатель при

---

всех рассмотренных геометрических параметрах и вариантах для сравнения, имеют оболочки с затяжками. Они оказываются значительно легче, и как следствие, экономичнее, чем другие два варианта. Уже при  $B=30$  м и  $\alpha=150^{\circ}$  по сравнению с оболочками без подкреплений масса  $1 \text{ м}^2$  конструкции уменьшается на 28 %, а при  $\alpha=100^{\circ}$  и том же пролете на 74 %.

### Выводы

1. Для трех вариантов металлической цилиндрической сетчатой оболочки – без подкреплений, с затяжками и с горизонтальными фермами при условии одинакового количества ячеек вдоль длины и ширины конструкции, одинаковых нагрузок и минимального количества типоразмеров элементов, исследовано влияние изменения геометрических параметров системы на удельный весовой показатель.

2. Определен оптимальный для всех вариантов пролет, который характеризуется минимумом массы  $1 \text{ м}^2$  конструкции и установлены оптимальные геометрические параметры оболочки.

3. Зафиксированы экстремальные значения, за пределами которых исследование влияния изменения геометрических параметров на удельный весовой показатель становится не целесообразным.

4. Показана эффективность использования элементов подкрепления для металлических цилиндрических сетчатых оболочек. Сопоставление обычных и подкрепленных вариантов показало, что, по отношению к системе без подкреплений, масса  $1 \text{ м}^2$  конструкции снижается с введением затяжек на 28...74 %, а с введением горизонтальных ферм на 13 %...36 %.

### Литература

1. III Форум Building Skin Russia 2019 // 3-й Международный форум технологий и элементов внешних оболочек зданий, 2019. URL: [fasad-rus.ru/bsr/index.php](http://fasad-rus.ru/bsr/index.php).



2. A Jewel on Progress // Company Construction Systems, 2018. URL: [mero.de/en/construction-systems/references-en/46-facade-roof-projects/964-jewel-changi-airport-en](http://mero.de/en/construction-systems/references-en/46-facade-roof-projects/964-jewel-changi-airport-en).

3. Application of circular surfaces to the architecture of the building, structures and products // Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon, 2015. URL: [researchgate.net/publication/302934584](http://researchgate.net/publication/302934584).

4. Rynkovskaya M., Simo D. Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon // 3rd International Scientific Conference “MoNGeometrija 2012”. pp. 487-498.

5. Great Court at the British Museum // Foster and Partners, 2000 URL: [fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/](http://fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/).

6. Шумейко В.И., Кудинов О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164).

7. Краснобаев И.А., Маяцкая И.А., Аарон Икуру Годфрей. Прочностной расчет блока составной конструкции из шестиугольной пластины, круговой цилиндрической оболочки и отбортовки // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667).

8. Siyanov A. I., Rynkovskaya M. I., Abu Mahadi M. I., Mathieu G. O. Improving the performance parameters of metal cylindrical grid shell structures // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.

9. Программы для расчета и проектирования конструкций // LiraLand Group, 2019. URL: [liraland.ru/](http://liraland.ru/).

10. Пакет обновления 2 для ЛИРА-САПР 2019 R1 // LiraLand Group, 2019. URL: [liraland.ru/](http://liraland.ru/).

## References

1. III Forum Building Skin Russia 2019 [3-y Mezhdunarodnyy forum tekhnologiy i ehlementov vneshnikh obolochek zdaniy]. URL: [fasad-rus.ru/bsr/index.php](http://fasad-rus.ru/bsr/index.php) (accessed 26-27.02.19).
  2. A Jewel on Progress [Company Construction Systems] URL: [mero.de/en/construction-systems/references-en/46-facade-roof-projects/964-jewel-changi-airport-en](http://mero.de/en/construction-systems/references-en/46-facade-roof-projects/964-jewel-changi-airport-en) (accessed 2018).
  3. Application of circular surfaces to the architecture of the building, structures and products [Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon]. URL: [researchgate.net/publication/302934584](http://researchgate.net/publication/302934584) (accessed 12/09/15).
  4. Rynkovskaya M., Simo D. Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon “3rd International Scientific Conference”: (Proc. Conference “MoNGeometrija 2012”), 2012, pp. 487-498.
  5. Great Court at the British Museum [Foster and Partners] URL: [fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/](http://fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/) (accessed 05/02/00).
  6. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164).
  7. Krasnobaev I.A., Mayatskaya I.A., Aaron Ikuru Godfrey. Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667).
  8. Siyanov A. I., Rynkovskaya M. I., Abu Mahadi M. I., Mathieu G. O. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.
  9. Programmy dlya rascheta i proektirovaniya konstruktsiy [LiraLand Group]. URL: [liraland.ru/](http://liraland.ru/) (accessed 13/08/19).
  10. Paket obnovleniya 2 dlya LIRA-SAPR 2019 R1 [LiraLand Group]. URL: [liraland.ru/](http://liraland.ru/) (accessed 09/08/19).
-