

УДК 624.014.2

А. С. ЕГОРОВА^а, В. Ф. МУЩАНОВ^б^а ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ^б ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАРКАСНО-ТЕНТОВОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ В ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Аннотация. Объектом исследования является рациональное конструктивное решение большепролетного каркасно-тентового покрытия над трибунами многофункционального стадиона вместимостью 20 000 зрителей. Каркас покрытия представляет собой структурную плиту, поддерживаемую V-образным пилоном и системой оттяжек. В качестве ограждающей системы покрытия приняты два слоя политетрафторэтилена на основе стекловолокна. В ходе исследования выполнена рационализация геометрии структурной плиты путем «вспарушивания» конструкции, т. е. придания конструкции строительного подъема в несколько итераций, в результате которого определено очертание плиты. Также выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния несущих элементов конструкции покрытия в линейной и нелинейной постановке под действием основных расчетных сочетаний нагрузок. Задача в нелинейной постановке решается методом конечных элементов с использованием метода Ньютона-Рафсона. Исследование конструкции произведено с помощью программного комплекса Autodesk Robot Structural Analysis.

Ключевые слова: большепролетные конструкции, структурные конструкции, тентовые конструкции, НДС, нелинейность, САПР, обратный выгиб.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Проведенный анализ конструктивных форм большепролетных покрытий [4, 5, 8, 10] свидетельствует о том, что каркасно-тентовые покрытия в общей массе проанализированных конструктивных решений составляют менее 1 %, что свидетельствует о недостаточной разработанности данной конструктивной формы.

В предлагаемом к исследованию объекте каркасная система каркасно-тентового покрытия принята в виде структурной плиты, поддерживаемой вантовой системой. Для указанной конструктивной формы при действии основного сочетания нагрузок предварительно выполнен поиск рационального геометрического очертания структурной плиты, и для ее установленной схемы проанализировано совместное влияние учета геометрической и физической нелинейностей на основные параметры напряженно-деформированного состояния.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Расчетные сочетания нагрузок

Расчет конструкции производится для двух основных сочетаний нагрузок:

- собственный вес несущих и ограждающих конструкций + снег (снеговая нагрузка принимается по [7] как равномерно-распределенная на покрытие для III ветрового района);
- собственный вес несущих и ограждающих конструкций + ветер (ветровая нагрузка берется по [7] как для IV ветрового района). Отличительной особенностью приложения ветровой нагрузки являются значения аэродинамических коэффициентов, принятые на основе результатов исследований, приведенных в работе [4], как для покрытия со схожей конфигурацией (рис. 1).

© А. С. Егорова, В. Ф. Мущанов, 2020

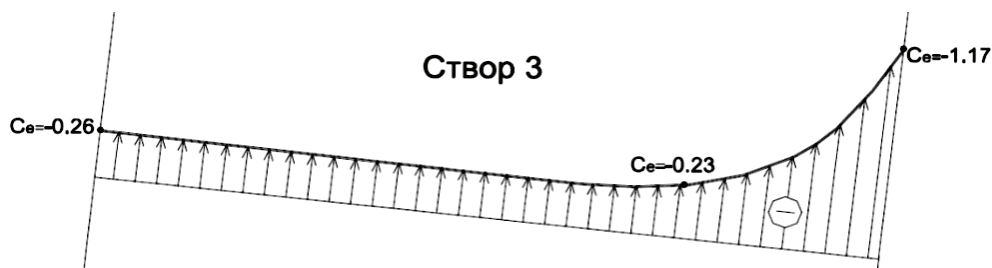


Рисунок 1 – Аэродинамические коэффициенты, действующие на покрытие.

Также, в качестве дополнительных сведений об особенностях рассматриваемых расчетных сочетаний нагрузок следует указать:

- для элементов металлического каркаса коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,05$ согласно [3] (в таблице 1 не приведен их вес, так как он учитывается в программе автоматически и меняется в зависимости от выбранных сечений труб);
- в качестве ограждающей системы покрытия приняты два слоя политетрафторидэтилена [далее – PTFE] – ткань, на основе стекловолокна толщиной 2 мм (рис. 2. Материалы, используемые в каркасно-тентовых покрытиях, рассмотрены в источниках [3, 7, 9, 11, 12]);

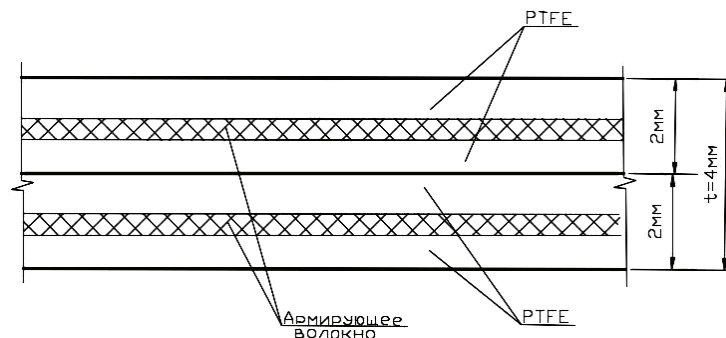


Рисунок 2 – Состав выбранного покрытия: PTFE-ткань на основе стекловолокна.

– коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1,1$ принимается как для сооружения с повышенным уровнем ответственности согласно [1].

В таблице 1 приведены итоговые нагрузки на покрытие.

Таблица 1 – Нагрузки, действующие на покрытие

Вид нагрузки	Нормативное значение, кН/м	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетное значение, кН/м
Вес PTFE-мембраны	0,001	1,200	0,001
Снеговая нагрузка (III снеговой район)	1,500	1,400	2,100
Ветровая нагрузка (IV ветровой район) $c = -0,26$	0,550	1,400	0,770
Ветровая нагрузка (IV ветровой район) $c = -0,23$	0,542	1,400	0,759
Ветровая нагрузка (IV ветровой район) $c = -1,17$	0,800	1,400	1,120

Рационализация геометрии структурной плиты

Для уменьшения величин усилий в поясных элементах структурной плиты, а также, для повышения жесткости системы (уменьшения вертикальных перемещений), определено рациональное очертание

структурной плиты. С этой целью использован метод «вспарушивания», когда исходные координаты узлов структурной плиты корректируются на величину перемещения, полученного по результатам линейного расчета, или, говоря иначе, конструкции придается строительный подъем [4]. Результаты примененной процедуры приведены в таблице 2, а также на рис. 3–5.

Таблица 2 – Изменение максимального усилия в поясных элементах структурной плиты и максимального прогиба в зависимости от «вспарушивания» конструкции

№ итерации	Параметр НДС	Элементы структурной плиты
0	N_{max} , кН	4 386
	U_{max} , мм	379
1	N_{max} , кН	4 281
	U_{max} , мм	362
2	N_{max} , кН	4 209
	U_{max} , мм	347
3	N_{max} , кН	4 207
	U_{max} , мм	333
4	N_{max} , кН	4 059
	U_{max} , мм	324

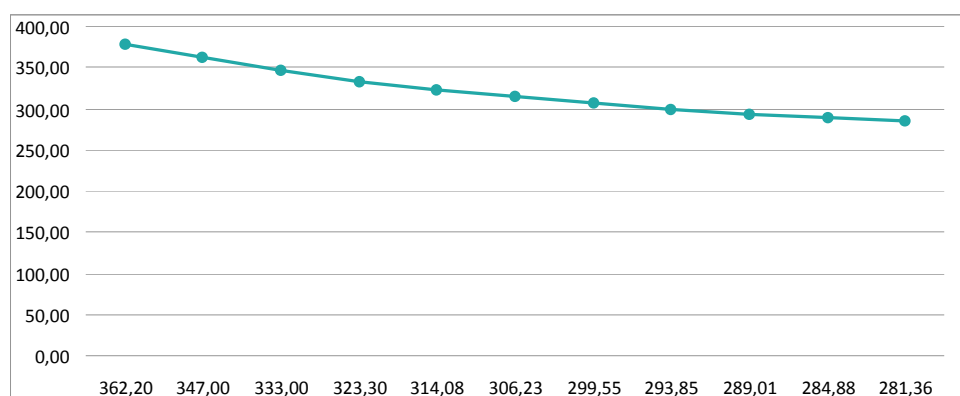


Рисунок 3 – Изменение величины максимального прогиба: ось ординат – задаваемая величина выгиба (мм), ось абсцисс – прогибы, полученные в результате расчета (мм).

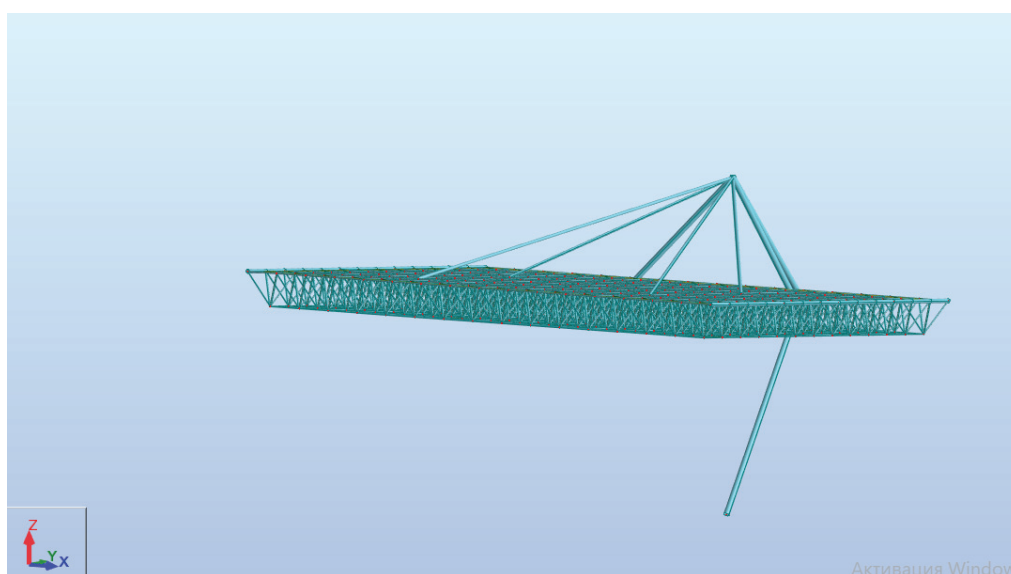


Рисунок 4 – Первоначальная форма конструкции.

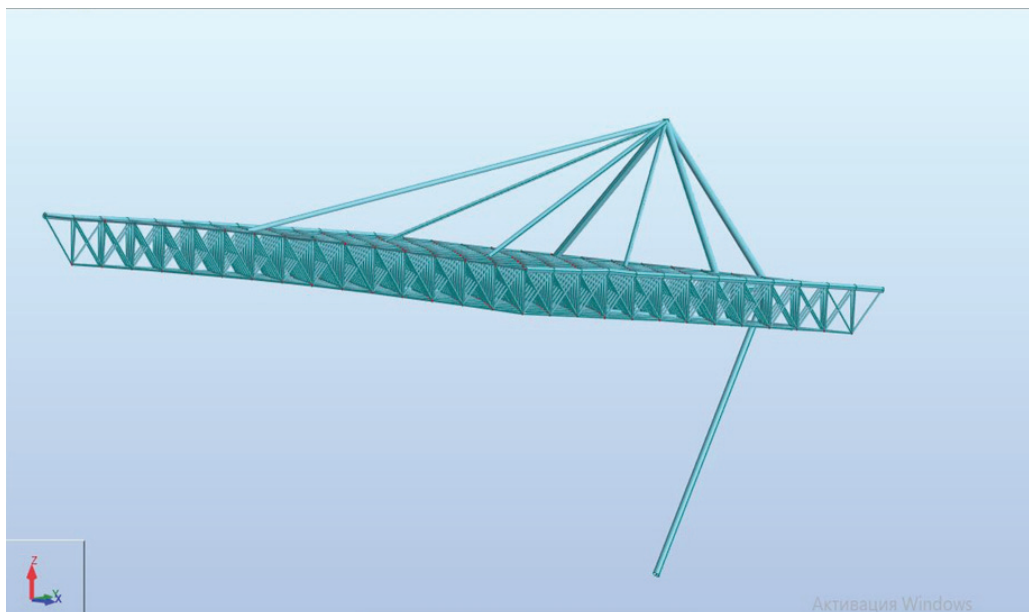


Рисунок 5 – Форма конструкции, принятая в результате «вспарушивания».

С помощью программы Advanced Grapher получена функция (1) и спрогнозированы дальнейшие перемещения, определяющие эффективность применяемой процедуры.

$$Y(x) = 0,851581 \cdot x + 38,7656824, \quad (1)$$

где Y – полученное максимальное перемещение;
 x – отложенное максимальное перемещение.

Как видно из графика на рис. 3, линейная зависимость нарушается уже на третьей итерации, то есть дальнейший выгиб будет мало эффективен.

Анализ учета влияния геометрической нелинейности на основные параметры напряженно-деформированного состояния каркасной системы

Для уточнения параметров напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта проведем сравнительный анализ этих параметров, полученных в результате выполнения расчетов конструкции с рационализированной геометрией в линейной постановке и с учетом нелинейных эффектов (геометрической и физической нелинейностей) (рис. 6).

В рамках нелинейного расчета учитываются:

- эффекты Р-дельта,
- большие значения перемещений,
- физическая нелинейность в варианте, когда материал принят упруго-идеально-пластический, разгрузка – упругая.

Система нелинейных алгебраических уравнений, формируемая в результате решения задачи методом конечных элементов в рамках комплекса Autodesk Robot Structural Analysis, решается с использованием метода Ньютона-Рафсона.

Использование постпроцессорных процедур анализа несущей способности элементов, составляющих систему, позволило своевременно скорректировать сечения отдельных элементов по результатам нелинейного расчета. Так, сечения наиболее напряженных элементов структурной плиты, первоначально запроектированные из трубы 133×8 мм, были увеличены до 140×5 мм, а сечения вантовых оттяжек – до 356×6 мм. Окончательные сечения и сравнение с результатами линейного расчета представлены в таблице 3.

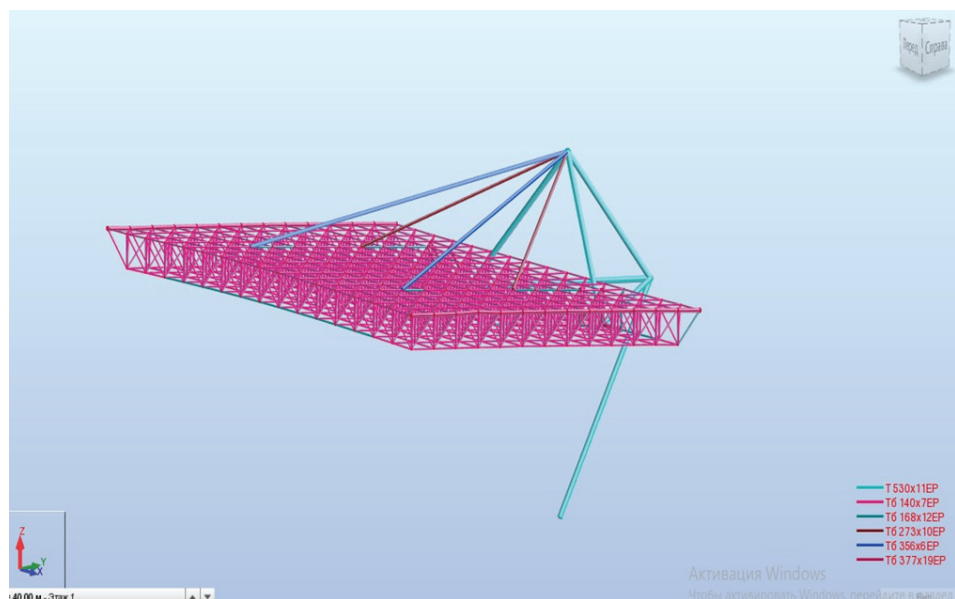


Рисунок 6 – Карта сечений по результатам расчета в нелинейной постановке.

ВЫВОДЫ

1. Определяющей комбинацией для подбора сечений элементов системы является 1-е сочетание нагрузок – *собственный вес + снег*. Ветровая нагрузка в данное сочетание не включается, так как при принятом угле наклона структурной плиты силы ветрового потока направлены вверх (от покрытия), и оказывает разгружающий эффект.

2. При приложении нагрузок по 2-му сочетанию в большинстве элементов системы знак усилий изменился на противоположный (кроме раскосов и ниспадающих оттяжек). Однако в силу незначительных величин ветровых нагрузок по сравнению с нагрузками 1-го сочетания все сечения, принятые на основании их действия, остаются прежними.

3. Сравнительный анализ результатов линейного и нелинейного расчетов позволил зафиксировать перераспределение усилий для отдельных элементов системы: увеличение до 10...30 %, уменьшение до 10 %, в некоторых элементах усилия не изменились. За счет корректировки сечений удалось повысить жесткость системы и снизить величину максимальных перемещений на 5,5 % (с 324 до 306 мм).

4. Наибольшее влияние учет нелинейных эффектов оказал на усилия в элементах верхнего пояса, примыкающих к другим секциям: усилия увеличились на 28 %, что в свою очередь вызвало пропорциональное увеличение площади сечений в пределах 35 %.

5. Метод «вспарушивания» для рассматриваемой несущей конструкции в виде подвешенной структурной плиты продемонстрировал сравнительно невысокую эффективность, по сравнению, например, со структурной плитой, неподвижно опертой по контуру. Это объясняется тем, что в анализируемом варианте большие перемещения системы, прежде всего, обусловлены упругими деформациями вант, а не пролетной частью покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст]. – Введен впервые ; введ. 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 50 с.
2. ГОСТ Р 58064-2018. Трубы стальные сварные для строительных конструкций. Технические условия. [Текст]. – Введен впервые ; введ. 2018-09-01. – М. : Стандартинформ, 2018. – 27 с.
3. Еремеев, П. Г. Тентовые мембраны для ограждающих конструкций покрытий над трибунами стадионов [Текст] / П. Г. Еремеев // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 4. – С. 33–36.
4. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов (2-е издание, исправленное и дополненное) [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, Р. И. Кинаш, А. В. Шимановский [и др.] ; под общей ред. Е. В. Горохова и А. В. Шимановского. – Макеевка : РИО ДонНАСА, 2008. – 404 с.
5. Еремеев, П. Г. Современные конструкции покрытий над трибунами стадионов [Текст] / П. Г. Еремеев. – М. : АСВ, 2015. – 236 с.

Таблица 3 – Сравнительные результаты расчета

Элемент	Марка стали	Линейный расчет				Нелинейный расчет				1-е сочетание ΔN_i , кН	2-е сочетание ΔN_i , кН
		1-е сочетание		2-е сочетание		1-е сочетание		2-е сочетание			
		N_p	Труба	N_p	Труба	N_p	Труба	N_p	Труба		
<i>Элементы структуры</i>											
Верхний пояс а1	ВСтЗсп	573	133×8	-10	133×8	574	140×7	-24	133×8	1	-14
Верхний пояс а2	С245	2 973	377×14	-24	377×14	3 800	377×19	-26	377×14	827	-2
Верхний пояс а3	С245	987	168×12	-16	168×12	971	168×13	-16	168×12	-16	0
Нижний пояс б1	ВСтЗсп	-586	133×8	-24	133×8	-520	140×7	-22	133×8	66	2
Нижний пояс б2	С245	2 160	377×14	-85	377×14	2 483	377×19	-82	377×14	323	3
Нижний пояс б3	С245	-1 300	168×12	-51	168×12	-1 389	168×13	-50	168×12	-89	1
Нижний пояс б4	С245	4 059	377×19	-49	377×19	3 645	377×19	-45	377×19	-414	4
Раскос с1	ВСтЗсп	440	133×8	24	133×8	562	140×7	24	133×8	122	0
Раскос с2	С245	695	168×12	22	168×12	631	168×13	22	168×12	-64	0
Раскос с3	С245	1 695	377×14	-55	377×14	1 699	377×19	-47	377×14	4	8
Опорный раскос	ВСтЗсп	280	133×8	-20	133×8	332	140×7	-19	133×8	52	1
Опорный раскос	ВСтЗсп	470	133×8	-9	133×8	613	168×13	-10	133×9	143	-1
<i>Элементы вантовой системы</i>											
Оттяжка на структуру а1	16Г2АФ	-1 266	273×9	10	273×9	-1 285	279×10	22	273×9	-19	12
Оттяжка на структуру а2	16Г2АФ	-900	273×9	6	273×9	-987	356×6	-9	357	-87	-15
Ниспадающая оттяжка б1	16Г2АФ	-3 226	530×10	45	530×10	-3 403	530×11	13	530×10	-177	-32
Ниспадающая оттяжка б2	16Г2АФ	-2 863	530×10	104	530×10	-3 035	530×11	80	530×10	-172	-24
V-образный подкос	М20	2 310	530×10	-49	530×10	2 623	530×11	-42	530×10	313	7

- СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [Текст]. – Взамен СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»; введ. 2017-06-04. – М.: Стандартинформ, 2017. – 104 с.
- СП 384.1325800.2018. Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования [Текст]. – Введен впервые; введ. 2019-02-14. – М.: Стандартинформ, 2019. – 22 с.
- Brown, N. C. Design for Structural and Energy Performance of Long Span Buildings Using Geometric Multi-Objective Optimization [Текст] / N. C. Brown, C. T. Mueller // Energy Buildings. – 2016. – V. 127. – P. 748–761.
- Roshan, P. High Performance Technical Textiles [Текст] / Roshan, P. – [S. l.] : John Wiley & Sons Ltd, 2019. – 504 p.
- Integrating multi-functional space and long-span structure in the early design stage of indoor sports arenas by using parametric modeling and multi-objective optimization [Текст] / W. Pan, M. Turrin, C. Louter, S. Sariyildis, Y. Sun // Journal of Building Engineering. – 2019. – Vol. 22. – P. 464–485.
- Šamec, E. Economic aspects and particularities in building of lightweight tensile structures [Текст] / E. Šamec // Proceedings of the 12th International Conference : OTMC, A. Cerić, J. Kotarytarova, M. Radujković, M. Vukomano-

- vić, I. Završki (September 2015, Primošten). – Primošten : Hrvatska Udruga za organizaciju građenja i Sveučilište u Zagrebu, 2015. – P. 122–135.
12. Tao Yu. Applied Research of ETFE Membrane Gas Pillow Structure in Modern Stadiums [Текст] / Tao Yu, Yanhui Zhu // Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology. – 2013. – No. 5(13). – P. 3654–3660.

Получена 30.03.2020

A. С. ЄГОРОВА ^a, В. П. МУЩАНОВ ^b
АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
КАРКАСНО-ТЕНТОВОГО ПОКРИТТЯ ПРИ РОЗРАХУНКУ В ЛІНІЙНІЙ І
НЕЛІНІЙНІЙ ПОСТАНОВЦІ

^a ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого»,

^b ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Об'єктом дослідження є раціональне конструктивне рішення великопрогонових каркасно-тентового покриття над трибунами багатofункціонального стадіону місткістю 20 000 глядачів. Каркас покриття являє собою структурну плиту, підтримувану V-подібним пілоном і системою відтяжок. За огорожувальні системи покриття прийняті два шари політетрафторетилену на основі скловолокна. В ході дослідження виконана раціоналізація геометрії структурної плити шляхом «знищення» конструкції, тобто надання конструкції будівельного підйому в кілька ітерацій, в результаті якого визначено обрис плити. Також виконано порівняльний аналіз напружено-деформованого стану несучих елементів конструкції покриття в лінійній і нелінійній постановці під дією основних розрахункових сполучень навантажень. Завдання в нелінійній постановці вирішується методом кінцевих елементів з використанням методу Ньютона-Рафсона. Дослідження конструкції зроблено за допомогою програмного комплексу Autodesk Robot Structural Analysis.

Ключові слова: великопрогонові конструкції, структурні конструкції, тентові конструкції, ПДВ, нелінійність, САПР, зворотний вигин.

ANASTASIIA EGOROVA ^a, VOLODYMYR MUSHCHANOV ^b
ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE
FRAME TENT COATING IN THE CALCULATION IN LINEAR AND NON-LINEAR
STAGES

^a Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, ^b Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The object of research is a definition of the rational geometry of the long-span frame tent cover over stadium tribunes. Stadium is multifunctional with a capacity of 20 000 spectators. The coating frame is a structural plate supported by V-shaped pylon and a guy system. Two layers of fiberglass-based on polytetrafluoroethylene are used as protecting layers. In the process of research, rationalization of the geometry of a structural plate is done by using the method of reverse bending in several iterations to define outline of the plate. Moreover, in the article comparative analysis of the stress-strain state of load-bearing structural elements in linear and non-linear stages is preformed under the influence of the basic load combinations. The problem in a non-linear stage is solved by the finite element method using the Newton-Raphson method. Research completed using Autodesk Robot Structural Analysis.

Key words: long-span structures, structural structures, frame tent structures, SSS, nonlinearity, CAD, reverse bend.

Егорова Анастасия Сергеевна – магістрант ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Научні інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор по науковій роботі ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут громадянських інженерів» і міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Научні інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування і технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Єгорова Анастасія Сергіївна – магістрант ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Мущанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Egorova Anastasiia – master's student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Scientific interests: analysis and design of spatial metal structures.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vicerector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures». Scientific interests: include the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.