

УДК 539.3

Каюмов Р.А. – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: kayumov@ Rambler.ru

Мухамедова И.З. – кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: muhamedova-inzilija@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Ханафиев А.Г. – инженер

Казанский ГипроНИИавиапром

E-mail: hanafiev111@gmail.com

Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Дементьева, д. 1

Тазюков Б.Ф. – кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: bulat.tazioukov@kpfu.ru

Казанский федеральный университет

Адрес организации: 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Методика расчета тентовых покрытий*

Аннотация

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка численной методики расчета тентовой конструкции в геометрически нелинейной постановке.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в разработке методики расчета несущих элементов тентовой конструкции при действии статических и ветровых нагрузок. Также реализована расчетная модель поведения элементов тентовых конструкций в геометрически нелинейной постановке в программном комплексе «Лира-САПР». Проведены численные эксперименты для проведения анализа напряженно-деформированного состояния при варьировании геометрических параметров элементов тентовых конструкций.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что построенные регрессионные зависимости позволяют определить напряженно-деформированное состояние в тенте при варьировании геометрических параметров тентовой конструкции.

Ключевые слова: методика, модель, тент, напряжение, ферма, эксперимент, расчет, перемещение.

Введение

Как известно, покрытия играют очень важную конструктивную роль, защищая внутреннее пространство здания, в том числе обеспечивая звуко- и теплоизоляцию, которые напрямую влияют на комфортность сооружения. Схемы покрытий, основу которых составляют либо железобетонные плиты, либо деревянные или металлические элементы, массивны и абсолютно непригодны для стадионов, больших концертных или выставочных залов и павильонов, т.е. сооружений, связанных с массовым пребыванием людей и проведением масштабных зрелищ. Для создания большепролетной формы сооружения наиболее рационально использовать легкие тентовые покрытия. Конечно, сфера применения тентовых покрытий не ограничивается общественными зданиями. К типологическому списку можно добавить промышленные здания и сооружения специального назначения: склады, гаражи, ангары, цеха, лаборатории, теплицы, оранжереи и др.

Тентовое покрытие не подвержено коррозии, не реагирует на средне агрессивные химикаты. Конструкция, покрытая тентовой тканью, абсолютно герметична, поскольку при ее установке применяется особая технология сварки поливинилхлорид. Тентовое покрытие обладает рядом характерных черт, которые в определенных условиях превращаются в преимущества по сравнению с другими типами конструкций. В качестве основных таких свойств можно назвать возможность перекрытия больших пролетов, быстровозводимость, малый расход материалов, применимость практически во всех областях народного хозяйства, в том числе в сельском хозяйстве. При возведении

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-06018).

тентовых сооружений наряду с достоинствами необходимо учитывать и их недостатки, такие как трудности поддержания микроклимата и малую долговечность.

При построении расчетной модели был проведен анализ и, где это возможно, тестирование существующих программных средств, которые реализуют наиболее современные методы решения задач для вычисления напряжений и перемещений в расчетах тентовой конструкции с учетом собственного веса при воздействии постоянных и кратковременных нагрузок.

Основная часть

При описании сложных расчетных областей наиболее эффективным в настоящее время признан метод конечных элементов (МКЭ). В расчетной модели для тентового полотна применялся четырехузловой пластинчатый конечный элемент, а для фермы – стержневой конечный элемент. В работе построение объемной схемы конструкций покрытия была произведено с применением программного комплекса «Лира-САПР® 2013 (R3)» система ВИЗОР-САПР. На рис. 1 представлена конечно-элементная модель объемной тентовой конструкции. Металлические фермы запроектированы с уклоном в одну сторону 9 %, верхний и нижний пояса фермы соединяются между собой раскосами. Размеры панелей 1,2 м. Ферма пролетом 18 м комплектуется из трех отработочных марок по 6 м. Монтажные соединения фланцевые. Соединение элементов решетки с поясами ферм бесфасоночное. Все заводские соединения элементов ферм сварные. Элементы ферм выполнены из гнuto-сварных квадратных труб. Опираение металлической фермы к подстропильной конструкции – шарнирное. Класс стали для поясов ферм, для распорок (решетки фермы) – С255.

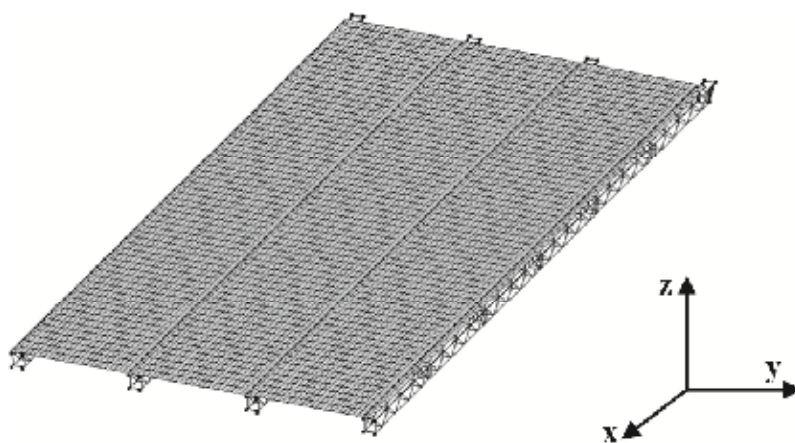


Рис. 1. Конечно-элементная модель объемной тентовой конструкции

В программном комплексе использовалась геометрически нелинейная модель поведения элементов тентовых конструкций. При этом выполнен сбор нагрузок, назначены жесткости по элементам, выполнен нелинейный расчет пространственной схемы, получены значения перемещений и напряжений в элементах фермы и в самом тенте.

Сбор нагрузок был разделен по следующей схеме:

- *загрузка № 1* (с коэффициентом для расчетной нагрузки 1,05): учитывается собственный вес металлических конструкций: фермы, шпильки.
- *загрузка № 2* (с коэффициентом для расчетной нагрузки 1): учитывается предварительное натяжения тента.
- *загрузка № 3*. Ветровая нагрузка принята из СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» по схеме III (рис. 2).
- *загрузка № 4*. Ветровая нагрузка принята из СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» по схеме IV (рис. 2). Следует отметить, что в программе загрузки № 3 и № 4 взаимоисключающиеся.

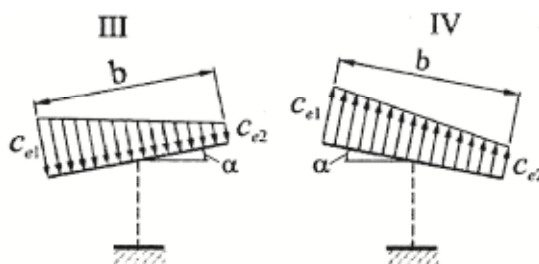


Рис. 2. Схемы воздействия ветровых нагрузок

Таблица 1

Сбор нагрузок

№ п/п	наименование нагрузки	ед. изм	нормативная нагрузка	gf	расчетная нагрузка
<i>Постоянные нагрузки</i>					
1	Собственный вес покрытия	кг/м ²	7,3	1,2	8,76
2	Вес стальных ферм	кг	828	1,05	869,4
	Итого на покрытие:		835,3	1,051	878,16
<i>Кратковременные нагрузки</i>					
3	Ветровая	кг/м ²	38	1,4	53

Таблица 2

Упрощенный расчет ветровой нагрузки на поверхность

исходные данные		обозначения	значения	ед. изм.
1	Скорость ветра	v_b	24,0	м/с
			86,4	км/ч
2	Плотность воздуха	ρ	1,293	кг/м ³
3	Ускорение свободного падения	g	9,81	м/с ²
4	Коэффициент, учитывающий аэродинамику формы и положения объекта	k	1,60	-
результаты расчетов		обозначения	значения	ед. изм.
5	Расчетный скоростной напор воздуха на стенку	Q	38,0	кг/м ²
6	Расчетная ветровая нагрузка на плоскую стенку	W	60,7	кг/м ²

Сбор нагрузок, как постоянных, так и кратковременных, произведен согласно табл. 1, а входные параметры для ветровой нагрузки на поверхность представлены в табл. 2, согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия».

Рассматриваются три варианта расчетной модели. Задается шаг опорных стержневых конструкций (металлическая ферма), для крепления тентового покрытия – 3 метра (вариант № 1), 4 метра (вариант № 2), 5 метра (вариант № 3). Для расчета принята толщина тента в виде 1 мм, 1,5 мм и 2 мм. Варьируются геометрические параметры тентового полотна и проводится сравнительный анализ численных экспериментов.

Результатами расчета металлической фермы являются:

- вид деформированной схемы;
- эпюры наибольших моментов и усилий M , N , Q наиболее нагруженных элементов.

Для каждого пункта приводятся максимальные значения усилий, соответствующие наиболее невыгодному сочетанию нагружения для конструкции.

На рис. 3 представлен график зависимости напряжения в тентовом покрытии от шага опорных элементов – металлические фермы и толщины тентового полотна. На рис. 4. приведены зависимости максимальных перемещений тентового покрытия от шага опорных элементов и толщины тента. На рис. 5 изображены результаты численных экспериментов и получены графики зависимости перемещения опорной конструкции – металлической фермы от шага и толщины тента при 1 мм, 1,5 мм и 2 мм.

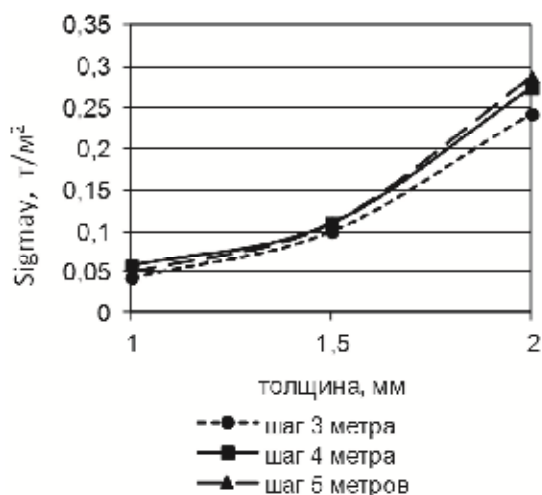


Рис. 3. Зависимость напряжения σ_y от шага опорных элементов – металлические фермы и от толщины тентового полотна

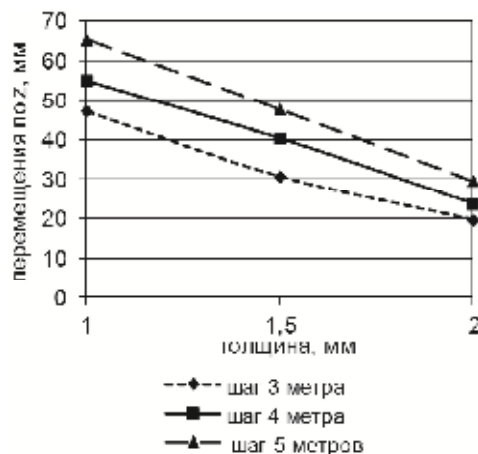


Рис. 4. Зависимость перемещения по оси z от шага опорных элементов и толщины тента

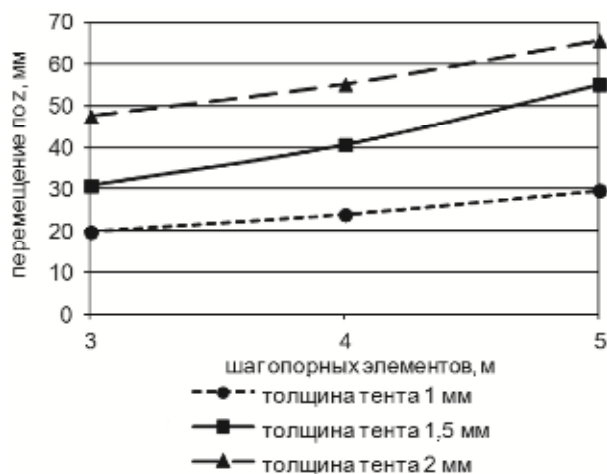


Рис. 5. Зависимость перемещения по z опорной конструкции – металлической фермы от шага и толщины тента 1 мм, 1,5 мм, 2 мм

На основе анализа численных экспериментов получена регрессионная функция для напряжений σ_y (рис. 3) в виде:

$$f_{regr} = (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2) + (b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2) \cdot x + (c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2) \cdot x^2, \quad (1)$$

где ξ – шаг опорных элементов ($3 \leq \xi \leq 5$); x – толщина тентового полотна ($1 \leq x \leq 2$). Для определения искомых коэффициентов a_i, b_i, c_i ($i = \overline{0,3}$) используется метод минимизации квадратичной невязки между значениями напряжений σ_y , полученными в численных экспериментах и значениями функции (1) для σ_y , полученными при величинах ξ и x , использованными в численных экспериментах. В рассмотренной задаче найдены следующие их значения:

$$\begin{aligned} a_0 &= -0,6851; & a_1 &= 0,56940; & a_2 &= -0,081182; \\ b_0 &= 0,70393; & b_1 &= -0,70219; & b_2 &= 0,10269; \\ c_0 &= -0,163503; & c_1 &= 0,23470; & c_2 &= -0,0343203; \end{aligned} \quad (2)$$

Отличие численных расчетов с помощью формулы (1) от численных экспериментов составило 7 %.

Далее, аналогично выше приведенному, построена регрессионная функция для перемещений тента вдоль оси z в зависимости от шага опорных элементов при разной толщине тента (рис. 5). Вид функции имеет вид (1), где за параметр ξ принята толщина тента, а за x – шаг опорных элементов. Минимизация квадратичной невязки привела к следующим искомым коэффициентам a_i, b_i, c_i ($i = \overline{0,3}$):

$$\begin{aligned} a_0 &= -19,6; & a_1 &= 42,5; & a_2 &= -6,2; \\ b_0 &= 42,35; & b_1 &= -65,45; & b_2 &= 21,7; \\ c_0 &= -10,35; & c_1 &= 16,45; & c_2 &= -5,3; \end{aligned} \quad (3)$$

Отличие численных расчетов с помощью формулы (1) от численных экспериментов составило 1 %.

Далее построена регрессионная функция для перемещений тента вдоль оси z в зависимости от толщины тента при разном шаге опорных элементов (рис. 4). Вид регрессионной функции аналогичен выражению (1). Искомые коэффициенты имеют вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= -402,5; & a_1 &= 163,1; & a_2 &= -20,5; \\ b_0 &= 530,9; & b_1 &= 241,85; & b_2 &= 28,45; \\ c_0 &= -169; & c_1 &= 80,5; & c_2 &= -9,3; \end{aligned} \quad (4)$$

Проведенная аппроксимация дает погрешность 1 %.

Заключение

1. Разработана модель поведения элементов тентовых конструкций в геометрически нелинейной постановке.
2. Разработаны методики расчета несущих элементов тентовой конструкции при действии статических и ветровых нагрузок.
3. Реализована расчетная модель поведения элементов тентовых конструкций в геометрически нелинейной постановке в программном комплексе «Лира-САПР».
4. Проведены численные эксперименты для проведения анализа НДС от варьирования геометрических параметров элементов тентовой конструкции.

Выводы

На основе полученных регрессионных зависимостей можно определить напряженно-деформированное состояние в тенте в зависимости от варьирования геометрических параметров тентовой конструкции. На основе анализа полученных численных результатов показано, что при шаге 5 метров наиболее выгодной толщиной тента будет 1 мм, так как это экономически целесообразно. При этом прочность конструкции обеспечивается с большим запасом. При увеличении толщины тента перемещения уменьшаются практически пропорционально толщине. При увеличении шага опорных конструкции (металлическая ферма) напряжения в полотне тента увеличиваются почти линейно.

Список библиографических ссылок

1. Городецкий Д. А., Барабаш М. С., Водопьянов Р. Ю., Титюк В. П., Артамонова А. Е. Программный комплекс ЛИРА-САПР. М. : Москва, 2013. 376 с.

2. Nagy-Györgya T., Sasb G., Dăescu A. C., Stoian V. Experimental and numerical assessment of the effectiveness of FRP-based strengthening configurations for dappedend RC beams // *Engineering Structures*. 2012. Т. 33, Т. 44. Р. 291–303.
3. Каюмов Р. А., Сулейманов А. М., Мухамедова И. З. Моделирование поведения пленочно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2005. т. 11. № 4. С. 519–530.
4. Каюмов Р. А., Куприянов В. Н., Мухамедова И. З., Сулейманов А. М., Шакирова А. М. Деформирование представительной ячейки пленочно-тканевого композита при конечных перемещениях // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2007. Т. 13. № 2. С. 165–173.
5. Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Пеньковцев С. А. Выбор рационального типа поперечного сечения опор // *Приволжский научный журнал*, 2014, № 4 (32). С. 90–94.
6. Hicks S. J., Lawson R. M., Lan D. Design considerations for composite beams using precast concrete slabs. In : *Composite Construction in Steel and Concrete V*. American Society of Civil Engineers. New York, 2006. P. 190–201.
7. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016 V. 158 010250.
8. Каюмов Р. А., Мангушева А. Р., Мухамедова И. З. Учет изменения температуры при оценке длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала / Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций : сб. ст. XXVI Международной конференции / Санкт-Петербург : Айсинг, 2015. С. 207–209.
9. Удлер Е. М., Толстов Е. В. Проектирование тентовых оболочек // *Строительство и Архитектура*. 2001. № 1. С. 43–47.
10. Городецкий А. С., Барабаш М. С., Сидоров В. Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. Проектирование конструкций. М. : Москва, 2015. 285 с.

Kayumov R.A. – doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: kayumov@rambler.ru

Muhamedova I.Z. – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

E-mail: muhamedova-inzilija@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Hanafiev A.G. – engineer

E-mail: hanafiev111@gmail.com

Kazan GiproNПaviaprom

The organization address: 420127, Russia, Kazan, Dementyeva st., 1

Tazyukov B.F. – candidate of physical and mathematical sciences

E-mail: bulat.tazioukov@kpfu.ru

Kazan Federal University

The organization address: 420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya st., 18

Method of calculating the tent coverings

Abstract

Problem statement. The purpose of this paper is to develop a numerical method for calculating the tent structure in a geometrically nonlinear setting.

Results. Development of a technique for calculating the load-bearing elements of the tent structure under the action of static and wind loads. Also, the calculated model of the behavior of the elements of the tent structures in a geometrically nonlinear setting in the program complex «Lira-SAPD» is realized. Numerical experiments have been performed to analyze the stress-strain state with varying geometric parameters of the elements of the tent structures.

Conclusions. The constructed regression dependences allow to define the stress-strain state in the tent with variation of the geometric parameters of the tent structure.

Keywords: methodology, model, tent, stress, truss, experiment, calculation, movement.

References

1. Gorodetsky D. A., Barabash M. S., Vodopyanov R. Yu., Tityuk V. P., Artamonova A. E. The program complex LIRA-SAPR. M. : Moskva, 2013. 376 p.
2. Nagy-Györgya T., Sasb G., Dăescua A. C., Stoian V. Experimental and numerical assessment of the effectiveness of FRP-based strengthening configurations for dapped RC beams // *Engineering Structures*. 2012. T. 33, V. 44. P. 291–303.
3. Kayumov R. A., Suleimanov A. M., Mukhamedova I. Z. Modeling of the behavior of film-fabric material under the influence of operational factors // *Mehanika kompozicionnih materialov i konstrukciy*. 2005. t. 11. № 4. P. 519–530.
4. Kayumov R. A., Kupriyanov V. N., Mukhamedova I. Z., Suleimanov A. M., Shakirova A. M. Deformation of a representative cell of a film-fabric composite at finite displacements // *Mehanika kompozicionnih materialov i konstrukciy*. 2007. T. 13. № 2. P. 165–173.
5. Sabitov L. S., Kuznetsov I. L., Penkovtsev S. A. Selection of the rational type of the cross-section of the supports // *Privolzhsky nauchnyy Journal*, 2014, № 4 (32). P. 90–94.
6. Hicks S. J., Lawson R. M., Lan D. Design considerations for composite beams using precast concrete slabs. In: *Composite Construction in Steel and Concrete V*. American Society of Civil Engineers. New York, 2006. P. 190–201.
7. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 158 010250.
8. Kayumov R. A., Mangusheva A. R., Mukhamedova I. Z. Accounting for temperature changes in the evaluation of the long-term strength of film-fabric composite material / *Mathematical and computer modeling in mechanics of deformable media and structures: coll. Art. XXVI International Conference / St. Petersburg : Aising, 2015. P. 207–209.*
9. Udler E. M., Tolstov E. V. Design of awning shells // *Stroitel'stvo i Arkhitektura*. 2001. № 1. P. 43–47.
10. Gorodetsky A. S., Barabash M. S., Sidorov V. N. Computer simulation in the problems of structural mechanics. *Design of structures*. M. : Moskva, 2015. 285 p.