

DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360

^{1,*}Кужахметова Э.Р.

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, 236016, Калининградская область, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14
*Email: elja_09@bk.ru

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВАНТ И ВАНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Статья посвящена методам расчета вант и вантовым конструкциям, которые используют вант, как несущий растянутый элемент с шарнирным зацеплением на опорах. Вант является гибкой нитью с криволинейным очертанием. Форма нити напоминает «изогнутую линию», подвешенную на шарнирах. Альтернативным вариантом ванта можно условно назвать модель «ломаной линии», которая представляет собой балочную конструкцию с низкой изгибной жесткостью. Использование данной модели существенно упрощает расчет. Он сводится к расчету обычной балки с шарнирными связями и равными пролетами, максимально повторяющее изогнутое очертание гибкой нити. Сечение ванта назначают согласно ГОСТ таким, какое имеет реальный стальной канат. Программный комплекс ПК Femap/NX NASTRAN позволяет представить вант двумя расчетно-геометрическими моделями: изогнутой и ломанной линиями, что является преимуществом перед другими специализированными программами. Указанный комплекс позволяет выбирать любую схему для задач разной сложности. В статье приводится сопоставительный анализ результатов машинного и ручного расчета реальной вантовой системы в соответствии с указанными моделями. Результаты расчетов подтверждают возможность использования упрощенной модели «ломаная линия» для расчета вант как поддерживающих крепежных элементов вантовых покрытий зданий и сооружений, висячих мостов, корабельных мачт, линий электропередач.

Ключевые слова: вант, гибкая нить, изогнутая линия, ломаная линия, шарнирно-балочная схема ванта, вантовая система, стержневая схема ванта

Введение. Висячие, они же вантовые конструкции используются для покрытий большепролетных зданий (сооружений) разного типа [1–2], например, спортивных, зрелищных, торговых, т. е. где они наиболее экономически эффективны и эстетически привлекательны. Несущим элементом в висячих покрытиях является вант - гибкая стальная нить.

Материалом для вант являются пучки высокопрочной проволоки и канатов сортамента согласно ГОСТ 3062-80, 3063-80*, 3064-80 (Стальные канаты одинарной свивки), а также ГОСТ 2688-80, 7668-80*, 14954-80 (Стальные канаты двойной свивки).

В конструктивных решениях с небольшими пролетами в качестве вант можно использовать стержневую арматуру периодического профиля класса А-III (А400), А-IV (А600). По сортаменту горячекатаной арматуры по ГОСТ 5781-82 – для арматуры класса А-III (А400) максимальный диаметр – 40 мм, а для арматуры класса А-IV (А600) максимальный диаметр – 32 мм.

Характерная особенность ванта – это изменение начальных очертаний при воздействиях внешних нагрузок: постоянных, ветровых, температурных, снеговых и гололедных, рассчитанных по СП 20.13330.2011 [3].

Основная часть. Вант с изогнутой осью (трос) можно рассчитать в геометрически нели-

нейной постановке с использованием специализированных программных комплексов ЛИРА, STARK и др.

Пусть на вант по всей длине действует равномерно – распределенная постоянная нагрузка q и временная нагрузка p . (рис. 1). Далее равномерно-распределенная нагрузка q (Н/м).

Пролет ванта между неподатливыми крайними шарнирными опорами составляет $L = 30,0$ (м), диаметр $\varnothing 0,017$ (м). Вант изготовлен из стали и представляет собой канат одинарной свивки типа ТК согласно ГОСТ 3064 с провисанием (стрелой провеса) $f = 3,5$ (м). Интенсивность равномерно – распределенной нагрузки по всей длине ванта с учетом собственного веса самого ванта составляет $q = 10000$ (Н/м). Изгибная жесткость ванта $EA = 28628200$ (Н), собственный вес ванта – $m = 131,96$ (Н/м), начальный модуль продольной упругости $E = 1,70293 \cdot 10^{11}$ (Н/м²) (табл. Г.10 [4]). Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ (табл. Г.10 [4]).

Выполним упрощенный статический расчет ванта, приведенный на рис. 1. С учетом симметрии достаточно рассмотреть его половину (рис. 2).

По методам строительной механики определим силу натяжения T , которая раскладывается на составляющие: вертикальную V и горизонтальную H .

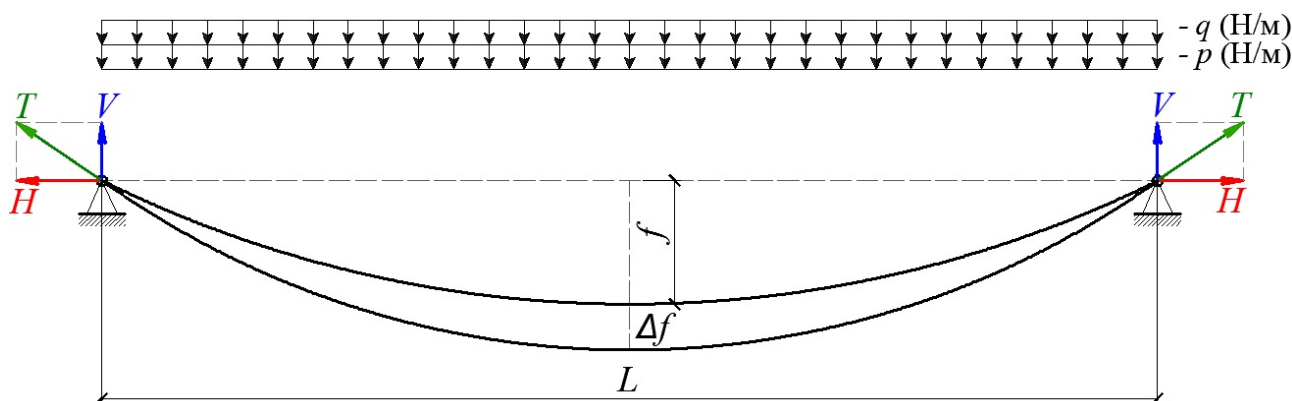


Рис. 2. Расчетная схема ванта – модель «изогнутая линия»

L – пролет, м; f – провисание (стрела провеса), м; Δf – прогиб (перемещение) ванта, м; q – равномерно-распределенная нагрузка, Н/м; V – вертикальная составляющая опорной реакции, Н; T – сила натяжения (опорная сила), Н; H – горизонтальная составляющая опорной реакции, Н

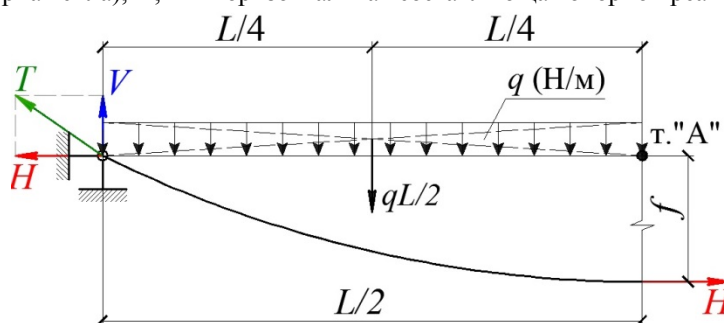


Рис. 3. Расчетная модель половины ванта

Определим максимальный прогиб Δf в точке «А», с этой целью выполним следующие операции:

1. Определяем вертикальную составляющую опорной реакции ванта V , (Н) при шарнирно-неподвижных опорах по формуле:

$$V = qL/2, \tag{1}$$

где q – равномерно распределенная нагрузка, Н/м, $q=10000$ (Н/м); L – пролет ванта, м, следовательно, принимаем $L = 30,0$ (м). Вертикальная опорная реакция составит $V = qL/2 = 1,5 \cdot 10^5$ (Н).

$$H = \left[\frac{qL}{2} \times \frac{L}{2} - q \times \frac{L}{2} \times \frac{L}{4} \right] \times \frac{1}{f} = \left[\frac{qL^2}{4} - \frac{qL^2}{8} \right] \times \frac{1}{f} = \frac{qL^2}{8f},$$

Горизонтальная составляющая опоры (распор) составит:

$$H = \frac{qL^2}{8f} = \frac{10000(H/м) \times 30^2(м)}{8 \times 3,5(м)} = 321428(H)$$

Данная формула позволяет в любой точке n определить распор ванта H_n в том случае, если известно значение стрелы провисания f_n точки n . Но бывают случаи, когда необходимо узнать стрелу провеса f_n в какой-то определенной точке n по длине ванта. Тогда необходимо вычислить изгибающий момент M_n в точке n . В этом случае определяем расстояние L_n от вертикальных сил до

2. Определяем распор ванта без учета деформации от растяжения по формуле:

$$\sum M_{ca} - H \times f = 0 \tag{2}$$

выполняя преобразование формулы (2) получим: $H = \frac{\sum M_{ca}}{f}$; где $\sum M_{ca}$ – сумма моментов вертикальных сил q (включая опорную реакцию V , (Н)), расположенных слева от точки «А»;

f – провисание ванта (стрела провеса), м, принимаем, $f = 3,5$ (м) – начальная геометрическая характеристика ванта

точки n при уже известном значении распора. Далее воспользуемся преобразованной формулой

$$(2) \text{ и вычислим стрелу провеса } f_n = \frac{\sum M_n}{H}.$$

3. Определяем опорное усилие – силу натяжения T , (Н) по формуле: $T = \sqrt{H^2 + V^2}$ (3)

$$T = \sqrt{321428(H)^2 + 15000(H)^2} = 354705(H)$$

Далее определяем прогиб (деформацию) Δf , м по формуле [5, 6]:

$$\Delta f = \frac{3}{128} \times \frac{\mu^2}{f^2} \times \frac{qL^4}{EA}, \quad (4) \quad \text{где } \mu = 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 = 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{3,5(м)}{30,0(м)} \right)^2 = 1,0363 -$$

отношение длины ванта L к пролету [5];

$$\Delta f = \frac{3}{128} \times \frac{\mu^2}{f^2} \times \frac{qL^4}{EA} = \frac{3}{128} \times \frac{1,0363^2}{3,5(м)^2} \times \frac{9100(Н/м) \times 30(м)^4}{28628200(Н)} = 0,529(м)$$

Результаты расчета ванта с применением ПК ЛИРА по расчетной схеме (модели) «изогнутая линия» (см. рис. 1), представлены на рис. 3, 4.

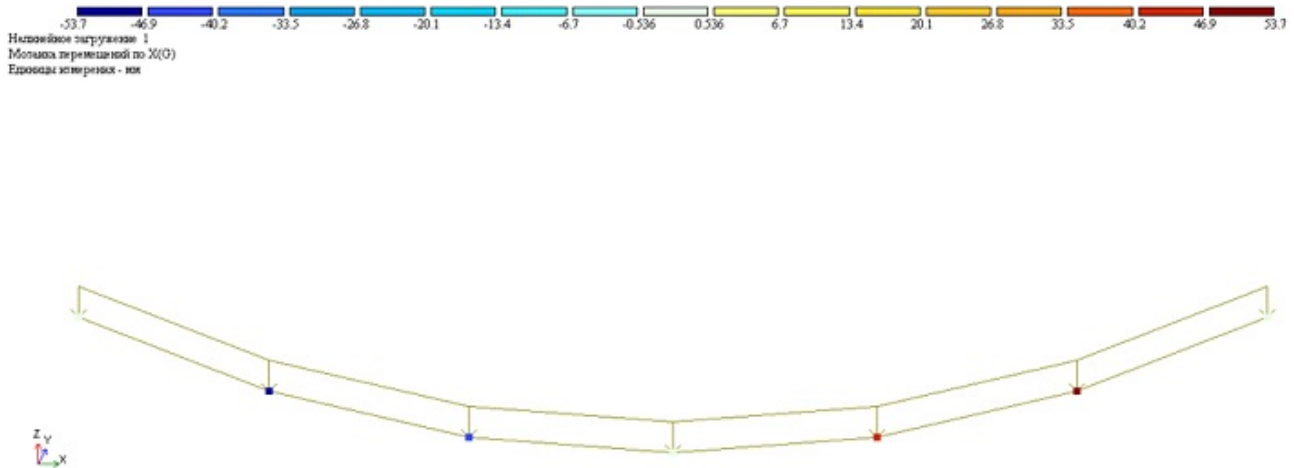


Рис. 3. Перемещение ванта по оси X составило 0,0537 (м)

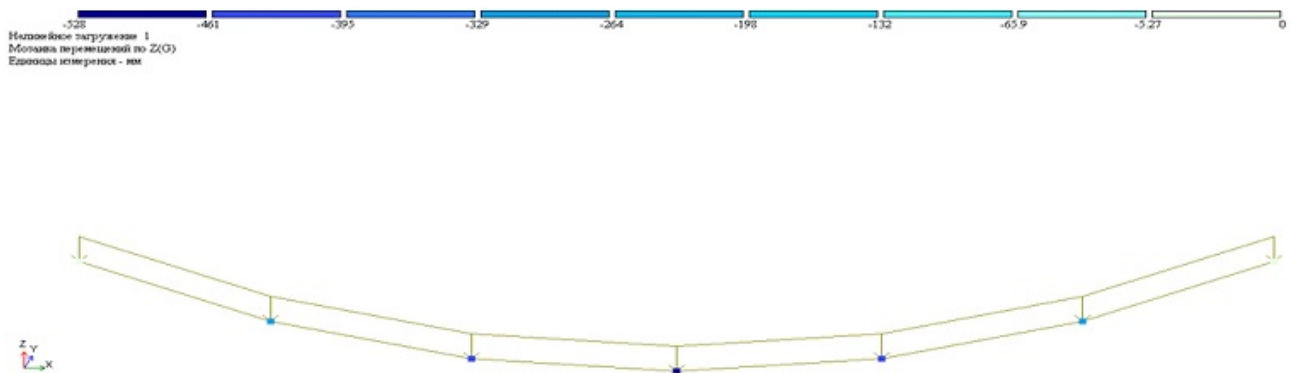


Рис. 4. Перемещение ванта по оси Z составила в центре 0,528 (м)

Представим вант в виде стержня, жесткость которого на изгиб (EJ) и кручение пренебрежимо мала по сравнению с жесткостью при растяжении (EA). На примере большепролетного здания [1–2] рассмотрим вантовое покрытие с параллельным расположением вант.

Железобетонные плиты покрытия, изготавливаемые в сборном или монолитном виде из легкого или тяжелого бетонов, укладываются на

ванты и закрепляются на них с помощью фиксаторов – зажимов.

При этом они передают вантам свой вес как сосредоточенную нагрузку, в силу чего изогнутая линия вант становится ломаной. Фиксаторы – зажимы представляют собой выпуски рабочей арматуры (рис. 5) из железобетонных плит покрытия. Класс бетона по прочности на сжатие должен быть не ниже класса В15 [7].

Если линия вантового покрытия зафиксирована, например, устройством жесткого утеплителя с заполнением швов между плитами, то расчет гибкой нити может быть выполнен с использованием компьютерных программ как для наклонных стержней, например, с применением ПК FEMAP with NX NASTRAN. Стержни, ориентированные под разными углами, образуют ломаную линию, подобную изогнутой оси.

Таким образом, расчетная схема (см. рис. 6) представляет собой стержневую систему, состоящую из равных наклонных участков (стержней), соединенных с помощью шарниров [8]. В местах шарнирного соединения соседних участков (стержней) приложены сосредоточенные силы P_i .

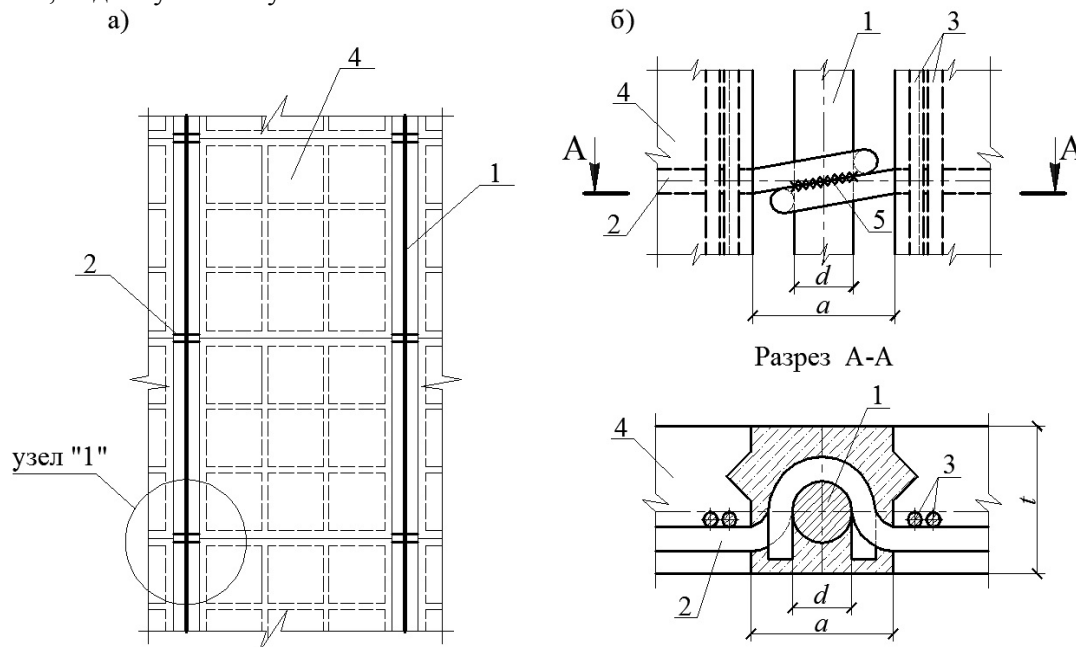


Рис. 5. Фрагмент вантового покрытия с параллельным расположением вант

- а) План раскладки железобетонных плит покрытия с вантами;
 - б) Узел «1» – соединение ванты с железобетонными плитами покрытия
- 1 – вант; 2 – выпуски арматуры ж/б плиты покрытия; 3 – армирование ж/б плиты покрытия; 4 – ж/б плита покрытия; 5 – сварка

Примем для машинного расчета модели вант «ломаная линия» исходные данные из предыдущего примера. Только вместо равномерно – распределенной нагрузки $q=10000$ (Н/м), приложим

к системе сосредоточенные силы в пяти точках $P = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = q \cdot L / 6 = 10000 \cdot 30 / 6 = 50000$ (Н) и две сосредоточенные силы на опорах $P_1 / 2 = P_7 / 2 = 50000 / 2 = 25000$ (Н).

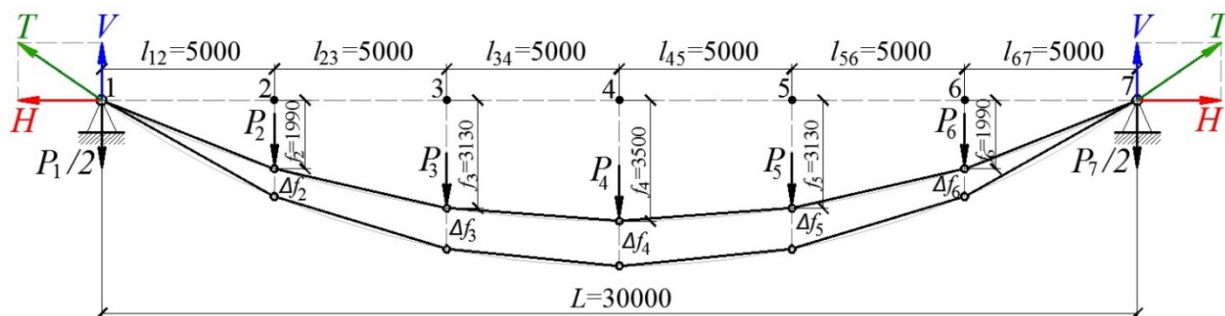


Рис. 6. Расчетно-геометрическая схема ванты – модель «ломаная линия»

L – пролет между опорами, м; P – сосредоточенная сила, Н; Δf_n – прогиб (перемещение) ванты в n точке, м

Геометрическая схема ванты предусматривает разбиение пролета $L = 30$ м семью точками с соответствующим разделением на шесть равных

участков длиной $l_{12} = l_{23} = l_{34} = l_{45} = l_{56} = l_{67} = 5$ м (индексами обозначены номера участков).

Общая стрела провисания в точке «4» составит $f = 3,5$ (м). Провесы в точках имеют разные значения:

- на опорах, т.е. в точках «1» и «7» провес отсутствует, $f_1 = f_7 = 0$ м;
- в пролете, а именно, на приопорных участках, т.е. в точках «2» и «6», стрела провеса составит $f_2 = f_6 = 1,99$ м;
- в середине пролета в точках «3» и «5» провисание составит $f_3 = f_5 = 3,13$ м.

Поперечные деформации ванта под нагрузкой трансформируются в его продольные деформации, требующие геометрического нелинейного анализа [9]. Физическая нелинейность подразумевает пластическое деформирование материала.

В программном комплексе FEMAP with NX NASTRAN нелинейный статический анализ (Nonlinear Static Analysis) представляет собой решение нелинейного матричного уравнения (5) итерационным методом Ньютона – Рафсона [10].

$$[C]\{\Delta\} = \{P\}, \quad (5)$$

где $[C]$ – матрица жесткости ванта (Н/м); $\{\Delta\}$ – вектор перемещений (м); $\{P\}$ – вектор нагрузки (Н).

Материал ванта – сталь, рассматривается в расчете как идеально упруго-пластический материал с пределом текучести $\sigma_T = 240 \cdot 10^6$ Н/м² и модулем продольной упругости $E = 1,70293 \cdot 10^{11}$ (Н/м²).

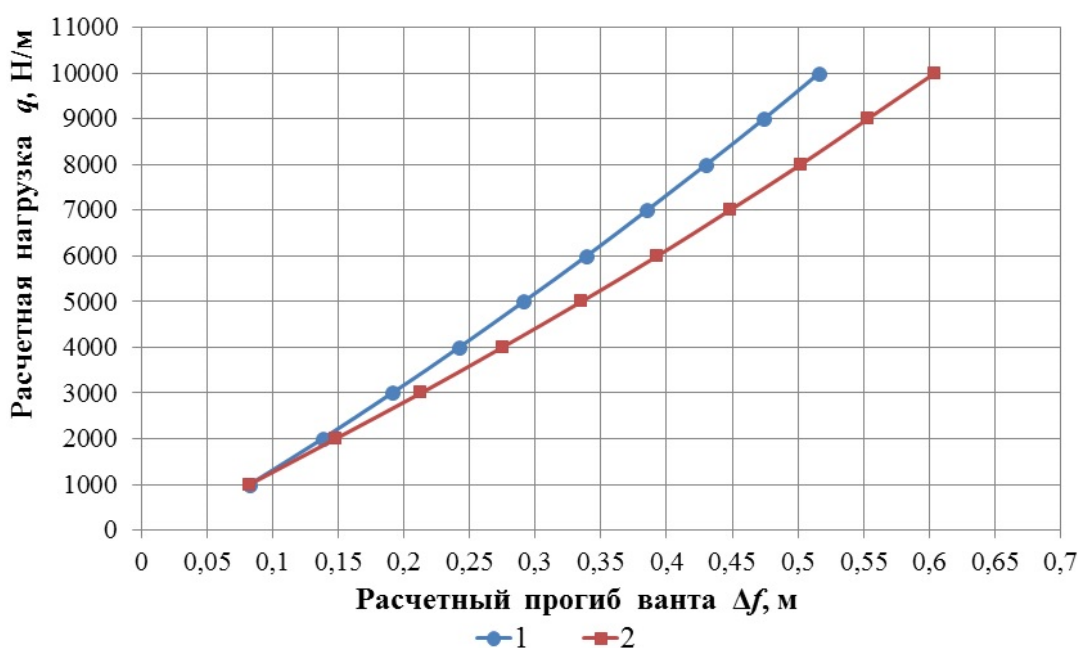


Рис. 7. График изменения расчетного прогиба ванта Δf , (м) от равномерно-распределенной нагрузки q (Н/м)

1 – геометрическая нелинейность ванта; 2 – геометрическая+физическая нелинейность ванта

На рисунке 7 и в таблице 1 приводятся силовые характеристики ванта, рассчитанные с учетом геометрической (1), а также геометрической + физической (2) нелинейности. Степень относительного влияния физической нелинейности деформирования материала иллюстрируется на рисунке 8. Результаты анализа демонстрируют су-

щественное влияние геометрической и физической нелинейности на силовые характеристики ванта как удерживающего конструктивного элемента.

Результаты расчета реакций опор R (H , V , T) и прогиба Δf модели «ломаная линия», выполненные в ПК FEMAP/NX NASTRAN приведены на рисунках 9–13.

Таблица 1

Прогиб ванта с учетом геометрической и физической нелинейности

Нелинейность ванта	Равномерно распределенная нагрузка q (Н/м):									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
1	0,0825	0,138	0,191	0,242	0,291	0,339	0,385	0,430	0,474	0,516
2	0,0825	0,148	0,213	0,275	0,335	0,393	0,448	0,501	0,554	0,604
разница	0 %	6,75 %	10,33 %	12,00 %	13,13 %	13,74 %	14,06 %	14,17 %	14,44 %	14,57 %

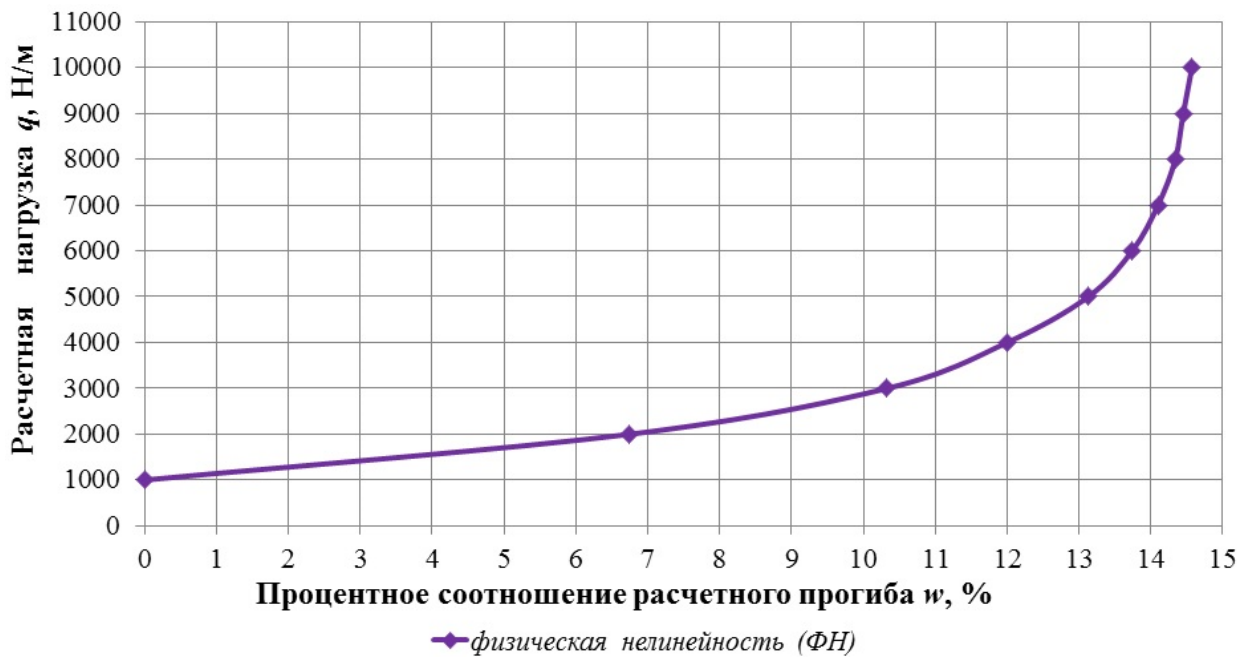


Рис. 8. График влияния физической нелинейности (ФН) на расчетный прогиб

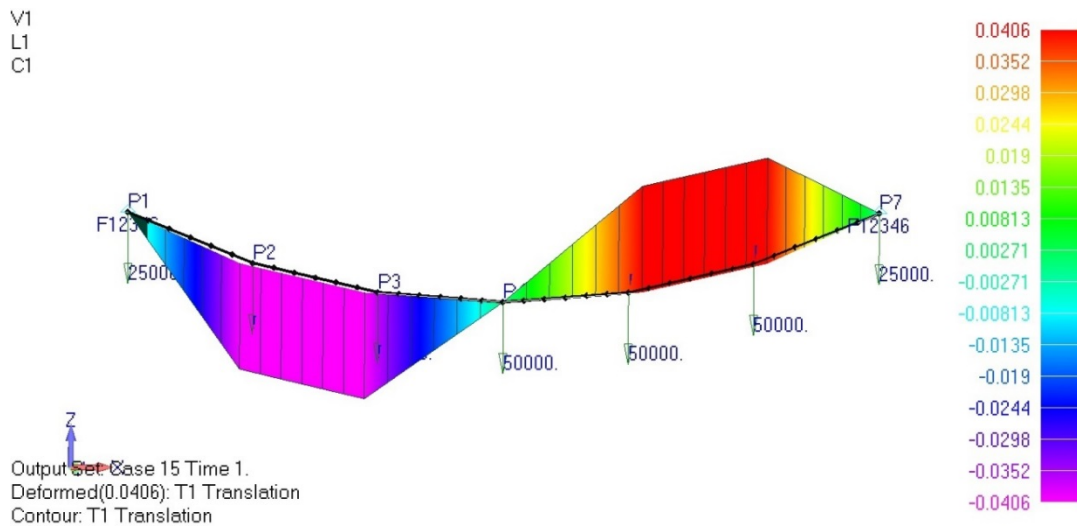


Рис. 9. Перемещение ванты по оси X равно 0,0406 (м)

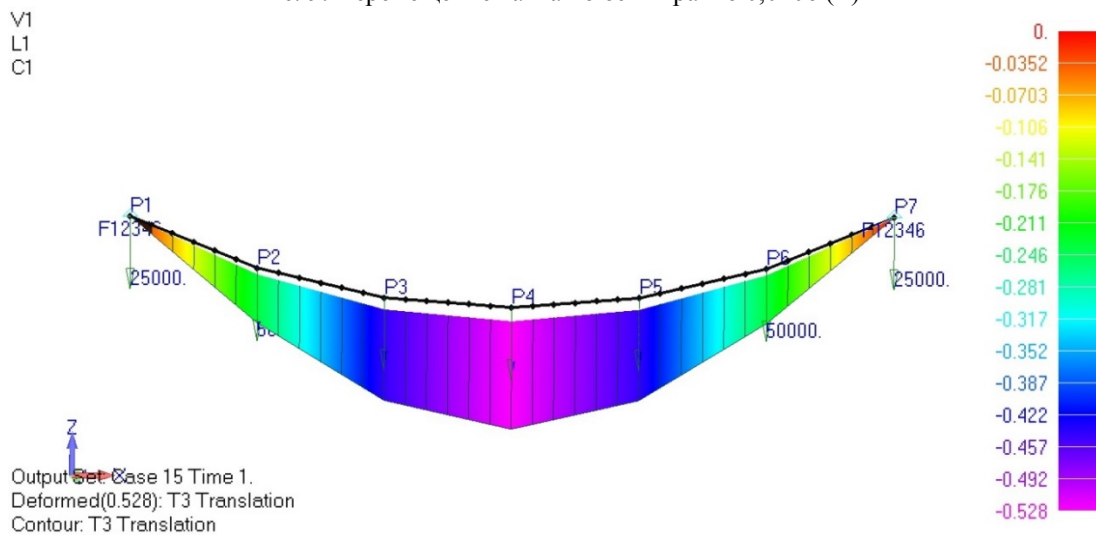


Рис. 10. Перемещение ванты в центре по оси Z равно 0,528 (м)

В данном расчете при окончательном шаге 15 (Case 15 Time 1) нагрузки $P = P_{max} = 50000$ (Н) перемещение в точке «4» составило 0,528 (м), т.

е. при действующей расчетной нагрузке (рис. 10). Аналогично выполнены реакции опор R (H , V , T) в точках «1» и «2» (см. рис. 11, 12, 13).

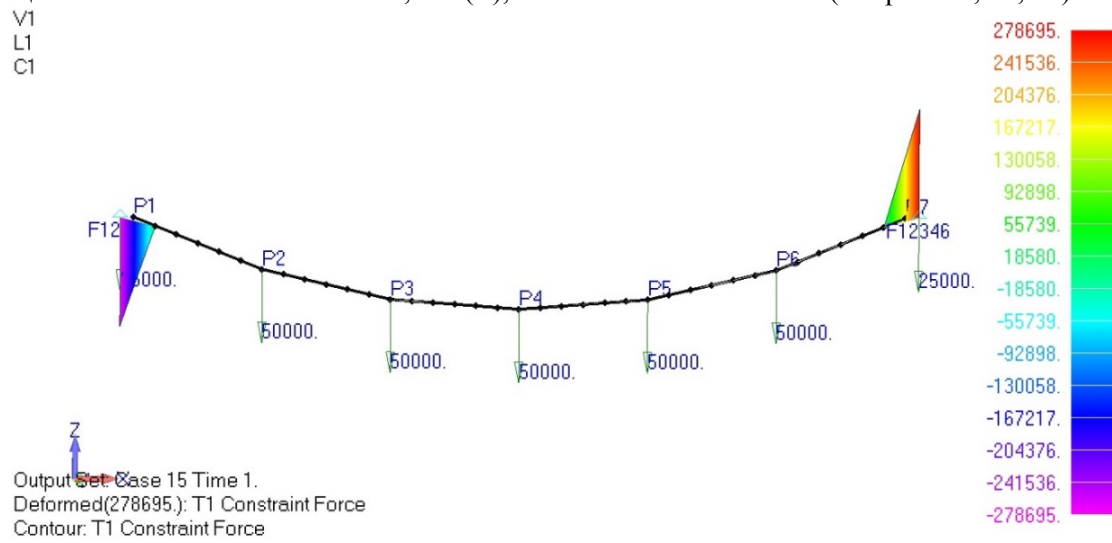


Рис. 11. Горизонтальная составляющая опорной реакции $H = 278355$ (Н)

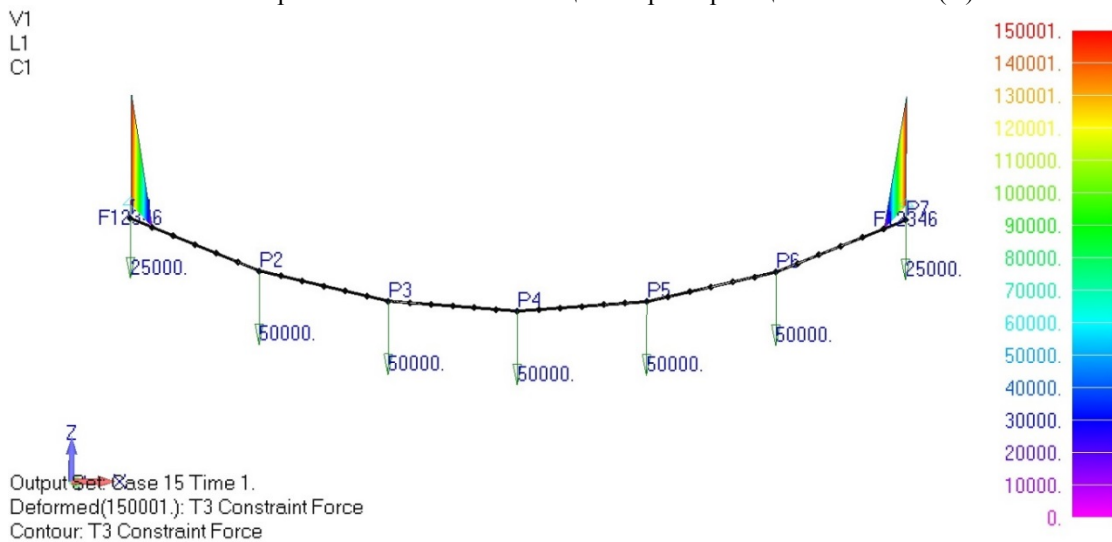


Рис. 12. Вертикальная составляющая опорной реакции $V = 150001$ (Н)

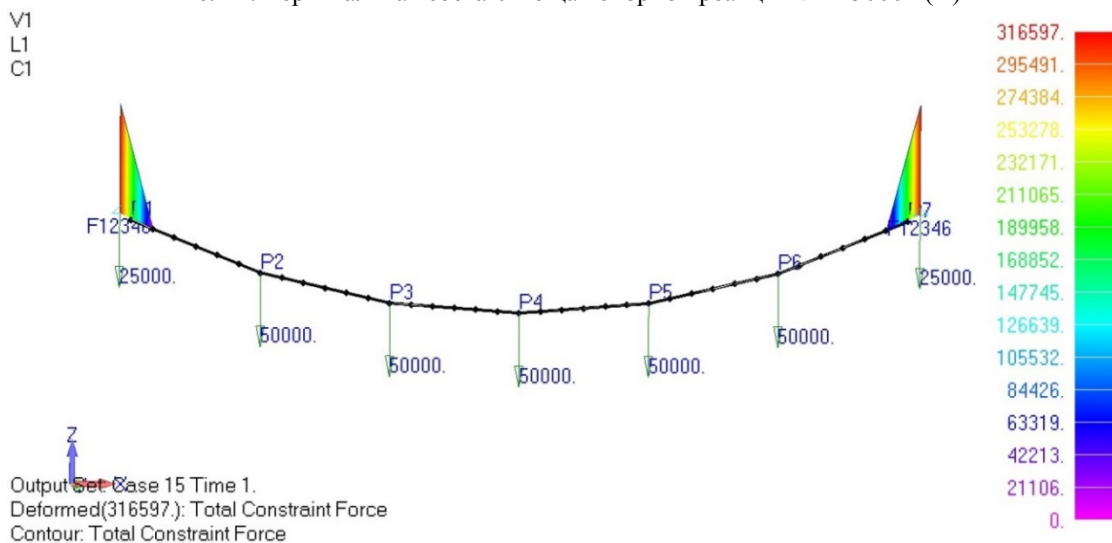


Рис. 13. Сила натяжения $T = 316597$ (Н)

Результаты расчетов вант (рис. 1, 2 и 6) по трем разным моделям приведены в таблице 1. Проанализировав реакции опор R_i (H_i , V_i , T_i) в

точках «1» и «2» можно определить погрешность между упрощенной схемой и моделями «изогнутая линия» и «ломаная линия».

Таблица 2

Результаты расчетов

№ п/п	Расчетные модели вант	Реакции опор R_i , (Н) в вантах:			Расчетный прогиб Δf , (м)	
		Вертикальная сила V_i , (Н)	Горизонтальная сила H_i , (Н)	Сила натяжения T_i , (Н)	По оси Z, (м)	По оси X, (м)
1.	Упрощенная схема	150000	321428	354705	0,529	-
2.	«Изогнутая линия»	150000	278355	316199	0,528	0,0537
3.	«Ломаная линия»	150001	278695	316597	0,528	0,0406
Сравнительный анализ расчетных моделей вант						
1.	Упрощенная схема / «Изогнутая линия»	0 %	Число уменьшилось на 13,40 %	Число уменьшилось на 10,85 %	Число уменьшилось на 0,18 %	-
2.	Упрощенная схема / «Ломаная линия»	0 %	Число уменьшилось на 13,29 %	Число уменьшилось на 10,74 %	Число уменьшилось на 0,18 %	-
3.	«Изогнутая линия» / «Ломаная линия»	0 %	Число увеличилось на 0,12 %	Число увеличилось на 0,12 %	0 %	Число уменьшилось на 24,39 %

Выводы:

1. Вантовые системы нашли широкое применение в строительстве и технике [11–13].

2. При расчетах вантовых систем применяются различные модельные представления, используются сложные программные комплексы ЛИРА, STARK, FEMAP with NX NASTRAN.

3. В статье выполнено сравнение результатов расчетов с применением моделей «ломаная линия» и «изогнутая линия». Для сравнения использован программный комплекс ЛИРА и ПК FEMAP with NX NASTRAN.

4. Модель «ломаная линия» представляет особый интерес в связи с возможностью упрощенного (инженерного) расчета вант, основанного на балочном его представлении.

5. На основе результатов сопоставительных расчетов вант можно сделать вывод, что, несмотря на разные расчетные схемы значения сил на приопорных участках R_i (H_i , V_i , T_i) и перемещений по осям X и Z изменились незначительно (таблица 2).

6. Расчетный анализ показал, что упрощенную модель «ломаная линия» можно использовать для инженерных поверочных расчетов вантовых систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №11 (166). С. 42–45.

2. Сапожников А.И. Жизнь зданий в земной стихии. Германия: LAP LAMBER Academic Publishing, 2014. 60 с.

3. Кужахметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // Балтийский морской форум: материалы VI Международного Балтийского морского форума 2018 года: «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве»: IV Международная конференция, (Калининград, 3-6 сентября 2018). Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ». 2018. Т. 6. С. 129–140.

4. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*.

5. Грущев А.Г. Пространственные металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.

6. Кирсанов Н.М. Вантовые конструкции. Под общей редакцией д-ра техн. наук проф. Н.С. Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1968. 25 с.

7. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры.

8. Сапожников А.И., Горелов С.Ф. Численный метод расчета проводов линий электропередачи // Изв. вузов. Энергетика. 1981. №3. С. 90–92.

9. Кужахметова Э.Р. Сравнительный анализ работы вант с разной геометрической характеристикой при вертикальном нагружении // Известия Калининградского государственного технического университета. 2017. №45. С. 235–244.

10. Сутырин В.И. Метод приведения в практике расчетов корпусных конструкций // Судостроение. 2008. №4. С. 17–21.

11. Сутырин В.И. Возможности повышения эффективности метода конечных элементов при проектировании судовых конструкций // Судостроение. 2005. №3. С. 9–13.

12. Wai-Fah Chen, Lian Duan. Bridge engineering handbook. Superstructure desing. 2nd ed. Boca Ration London New York, Taylor Francis Group, 2010. 736 p.

13. Podolny W.Jr., Scalzi J.B. Construction and design of cable-stayed bridges. 2nd ed. Wiley, New York, 1986. 227p.

Информация об авторах

Кужахметова Эльвира Рафаэлевна, аспирант кафедры машиноведения и технических систем. Email: elja_09@bk.ru. Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта. Россия, 236016, Калининградская область, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14.

Поступила в ноябре 2018 г.

© Кужахметова Э.Р., 2019

^{1,*}**Kuzhakhmetova E.R.**

¹Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, 236016, Kaliningrad, st. A. Nevskogo, 14
E-mail: elja_09@bk.ru

METHODS OF CALCULATING CABLES AND CABLE STRUCTURES

Abstract. The article is devoted to the methods of calculation cables and cable-stayed structures, which use cables as a supporting element with hinged clamping. The cable is a flexible thread with a curvilinear outline. The form of the thread resembles a “curved line” suspended on hinges. An alternative version of the cable is called the model of a “broken line”, which is a beam construction with low flexural rigidity. The use of this model simplifies the calculation greatly. It comes down to the calculation of a conventional beam with hinged connections and equal spans, which maximally repeats the curved outline of a flexible line. The section of the cable is prescribed according to GOST. The software package PC Femap / NX NASTRAN allows to present the cables with two design-geometric models: curved and broken lines, which is an advantage over other specialized programs. This complex allows to choose any scheme for tasks of varying complexity. The article provides a comparative analysis of machine and manual calculation results of the real cable system in accordance with specified models. The results confirm the possibility of using the simplified “broken line” model for calculating cables as supporting fasteners for cable-stayed coatings of buildings and structures, suspension bridges, ship masts, power lines.

Keywords: cable, flexible thread, curved line, broken line, articulated beam cable, cable system, rod cable scheme.

REFERENCES

1. Kuzhakhmetova E.R., Sapozhnikov A.I. Architectural expressiveness and physiological expediency of buildings with curvilinear surfaces. Building materials, equipment, technologies of the 21st century, 2012, no. 11 (166), pp. 42–45.

2. Sapozhnikov A.I. The life of buildings in the earth element. Germany: LAP LAMBER Academic Publishing. 2014, 60 p.

3. Kuzhakhmetova E.R. Deformation of guys under different loading conditions. Baltic Sea Fo-

rum: materials of the VI International Baltic Sea Forum 2018: “Advanced technologies, machines and mechanisms in mechanical engineering and construction”: IV International Conference, (Kaliningrad, 3- September 6, 2018), Kaliningrad: Publishing House BFFSA FSBEI HE “KSTU”, 2018, vol. 6, pp. 129–140.

4. SP 16.13330.2011. Steel construction. Updated edition of SNiP II-23-81*.

5. Trushchev A.G. Spatial metal structures: Proc. manual for universities. M.: Stroyizdat. 1983, 215 p.

6. Kirsanov N.M. Guy constructions. Under the general editorship of Dr. Tech. Sciences prof. N.S. Streletsky. M.: Stroyizdat. 1968, 25 p.

7. SP 52-101-2003 Concrete and reinforced concrete structures without prestressing the reinforcement.

8. Sapozhnikov A.I., Gorelov S.F. Numerical method for calculating power lines. Izv. Universities. Energy, 1981, no. 3, pp. 90–92.

9. Kuzhakhmetova E.R. Comparative analysis of the work of the guys with different geometric characteristics under vertical loading. News of Kaliningrad State Technical University, 2017, no. 45, pp. 235–244.

10. Sutyurin V.I. The method of reduction in the practice of calculations of hull structures. Shipbuilding, 2008, no. 4, pp.17–21.

11. Sutyurin V.I. Opportunities to improve the efficiency of the finite element method in the design of ship structures. Shipbuilding, 2005, no.3, pp.9-13.

12. Wai-Fah Chen, Lian Duan. Bridge engineering handbook. Superstructure desing. 2nd ed. Boca Ration London New York, Taylor Francis Group, 2010, 736 p.

13. Podolny W.Jr., Scalzi J.B. Construction and design of cable-stayed bridges. 2nd ed. Wiley, New York, 1986, 227 p.

Information about the authors

Kuzhakhmetova, Elvira R. Postgraduate student. E-mail: elja_09@bk.ru. Immanuel Kant Baltic Federal University. Russia, 236016, Kaliningrad, st. A. Nevskogo, 14.

Received in November 2018

Для цитирования:

Кужахметова Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №2. С. 39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360

For citation:

Kuzhakhmetova E.R. Methods of calculating cables and cable structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 2, pp. 39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360