

УДК 69.07

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ВАНТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А.С. Суббота, Ф.С. Школяр

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос верификации расчётной схемы вантовой системы, геометрия которой построена с помощью среды визуального программирования Grasshopper в программном комплексе Rhino 8 и экспортирована в расчётные программные комплексы, в данном случае, Лира САПР. В работе исследуются ванты, геометрические параметры которых дают возможность рассчитывать их как пологую нить согласно теории расчёта гибких нитей. В ходе работы с помощью разработанного ранее алгоритма в среде визуального программирования Grasshopper были построены расчётные схемы для вант с различными геометрическими параметрами, проведён расчёт в программном комплексе Лира САПР и по актуальной методике расчёта гибких нитей, выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния вант в различных конфигурациях. На основе сопоставления результатов расчёта в Лира САПР и инженерного расчёта дана оценка метода моделирования расчётных схем вантовых систем и описаны границы применимости.

Ключевые слова: вантовые конструкции, гибкие нити, Grasshopper, экспорт расчётных схем, Лира САПР, Rhino 8, цепная линия, двоякая кривизна

Ссылка для цитирования: Суббота А.С., Школяр Ф.С. Методы расчёта вантовых систем на основе среды визуального программирования // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 23-33. EDN: OFNLOA

METHODS OF VISUAL PROGRAMMING BASED STEEL WIRE CABLE SYSTEM STRUCTURAL ANALYSIS

A.S. Subbota, F.S. Shkoliar

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article addresses the issue of steel wire ropes system design scheme verification. Design scheme was created using visual programming environment Grasshopper inside Rhino 8 app and exported to Lira SAPR. This work deals with steel wire cables that can be calculated as a flat string using flexible string calculation theory. Using earlier developed Grasshopper algorithm, a number of design schemes with different geometric parameters were created. VAT calculation for created design schemes was carried out using Lira SAPR and using relevant method of calculation. Applicability of used modelling method was evaluated based on the convergence of results between Lira SAPR VAT calculation results and manual calculation results, limits of applicability were set.

Keywords: cable-stayed constructions, flexible strings, Grasshopper, design scheme export, Lira SAPR, Rhino 8, catenary, double curvature

For citation: Subbota A.S., Shkoliar F.S. Methods of visual programming based steel wire cable system structural analysis // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 23-33. EDN: OFNLOA

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием программных комплексов, позволяющих моделировать математически сложные поверхности и линии и строить на их основе геометрию конструкций, в современной архитектуре возник тренд на нестандартные и сложные архитектурные формы в общественных и жилых зданиях. Ключевой тенденцией в проектировании таких зданий и сооружений является параметризация [1, 2].

Актуальность исследования: параметризация подразумевает динамическое изменение геометрии конструкций в зависимости от ее параметров, которые определены идеями проектировщика. В связи с этим нередко возникает необходимость полного перестроения геометрии несущих конструкций уже после анализа напряжённо-деформированного состояния (далее, НДС) и проведение повторного анализа, что в случае с конструкциями сложной формы является очень трудоёмким процессом. Следовательно, на сегодняшний день актуальным является вопрос верификации методов параметрического построения аналитических конструктивных схем сложной архитектурной формы [3, 4]. Одной из таких форм, например, покрытий большепролётных сооружений может являться двоякая гауссова кривизна, выполненная с помощью вантовой сети [5, 6]. Для параметрического построения и дальнейшего экспорта расчётных схем таких вантовых сетей был разработан алгоритм в среде визуального программирования Grasshopper программы Rhino 8 [7].

Цель исследования: верификация расчётной схемы вантовой сети, построенной с помощью среды визуального программирования Grasshopper, в программном комплексе Лира САПР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать методики ручного расчёта гибких нитей;
- построить с помощью разработанного алгоритма геометрию рассматриваемых вант;
- выполнить анализ НДС рассматриваемых вант после ручного расчёта и расчёта в ПК Лира САПР;
- сравнить результаты расчётов, дать оценку применимости выбранного метода моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для ручного расчёта отдельных стальных канатов, несущих поперечную нагрузку, используются методики расчёта гибких нитей, разработанные учёными В.К. Качуриным, Р.Н. Мецелинским, Н.С. Москалёвым и Г.С. Ведениковым [8, 9] и описанные в п. 6.3 и п. 6.4 СП 524.1325800.2023 «Висячие покрытия. Правила проектирования». Данные методики применимы для пологих нитей, то есть для нитей со стрелой провиса в диапазоне от $\frac{1}{25}$ пролёта до $\frac{1}{5}$ и не позволяют определить в точной мере НДС нитей со стрелами провиса $> \frac{1}{5}$ пролёта, поскольку для настолько больших стрел провиса действительная кривая провисания будет иметь значительные отличия от параболы, которая получена предположением о равномерном распределении нагрузки не по длине нити, а по её пролёту [10, 11]. Таким образом, для проведения эксперимента необходимо рассматривать такие формы покрытий, при которых соотношение стрелы провиса к ширине пролёта, т.е. f/l (рис. 1) находится внутри указанного выше диапазона.

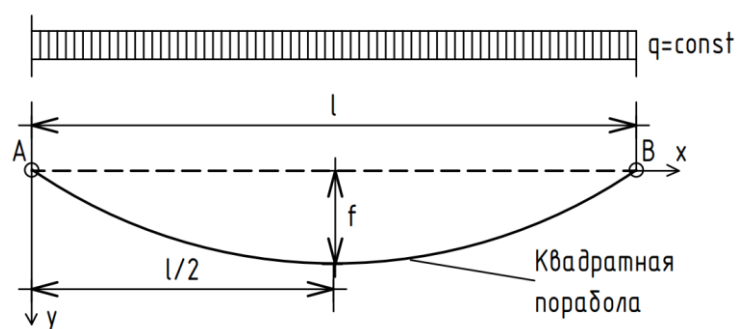


Рис. 1. Схема приложения нагрузки на нить
Fig. 1. Cable load application scheme

Гибкая нить – это геометрически изменяемая система с бесконечно большим числом степеней свободы, которая работает только на растяжение, но может воспринимать нагрузку при надлежащем закреплении концов [12, 13]. Пологая нить является частным случаем гибкой нити. Для нахождения НДС нити в случае, когда она нагружена вертикальной равномерно-распределённой нагрузкой (рис. 1) и опоры её концов

находятся на одной высоте, необходимо вычислить величину распора с учётом упругих деформаций. Величина распора определяется кубическим уравнением:

$$H^3 + \frac{8 \cdot \omega}{3 \cdot n^2 \cdot m^3} H^2 = \frac{D \cdot \omega}{2 \cdot l \cdot m^3}, \quad (1)$$

где:

H – величина распора, кН;

$\omega = E \cdot A$ – жёсткость поперечного сечения, кН;

l – величина пролёта, м;

D – характеристика нагрузки, кН²*м, определяются интегрированием:

$$D = \int_0^l M \cdot p dx = \int_0^l Q dx. \quad (2)$$

В случае с равномерно-распределённой нагрузкой по всей длине нити:

$$D = \frac{q^2 \cdot l^3}{12}, \quad (3)$$

где:

q – суммарная равномерно распределённая нагрузка, кН/м.

$$n = \frac{l}{f}, \quad (4)$$

$$m = \frac{s}{l}, \quad (5)$$

где:

s – длина заготовки, м, вычисляется по формуле 6.

$$s = \sqrt{l^2 + \frac{16}{3} \cdot f^2}, \quad (6)$$

При этом величины n и m вычисляются в исходном состоянии, без учёта упругих деформаций.

Усилие в нити, кН, определяется с учётом распора H (формула 7).

$$N = \sqrt{H^2 \cdot Q^2}, \quad (7)$$

где:

Q – поперечная сила от вертикальной нагрузки, вычисленная для эквивалентной балки, кН. В данном случае:

$$Q = \frac{q \cdot l}{2}. \quad (8)$$

Вертикальная координата середины пролёта нити, м, после приложения нагрузки вычисляется по формуле:

$$y_c = \frac{M_{cб}}{H}, \quad (9)$$

где:

$M_{cб}$ – изгибающий момент, вычисленный в эквивалентной балке, кН*м. В данном случае:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8}. \quad (10)$$

Таким образом, дополнительное провисание каната (прогиб), м, будет равно:

$$\Delta f = y_c - f. \quad (11)$$

Разработанный алгоритм [6] позволяет изменять параметры покрытия и динамически перестраивать вантовую сеть. Для проведения эксперимента необходимо построить и экспортировать несколько схем, изменяя величину пролёта, провиса несущих вант, а также отношение f/l .

Из каждой экспортируемой схемы выбирается канат с самым большим значением пролёта и провиса, остальные элементы вантовой сети не участвуют в расчёте, таким образом в ПК Лира САПР проводится расчёт плоской задачи. Помимо экспортированной из ПК Rhino 8 в Лира САПР выполняются построение

полностью идентичной по геометрическим характеристикам ванты с помощью инструмента «Цепная линия» с целью сравнения характера работы импортированной геометрии.

В качестве поперечного сечения вант выбран канат ЛК-РО конструкции 6х36 диаметром 30 мм по ГОСТ 7669-80. Характеристики выбранного сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики выбранного сечения каната

Table 1. Chosen cable cross-section properties

№	Характеристика, единицы измерения	Значение
1	Диаметр, мм	30
2	Площадь поперечного сечения, А, см ²	4,268
3	Модуль упругости, Е, МПа	147000
4	Жёсткость поперечного сечения, ω, кН	62733,63
5	Погонная нагрузка от собственного веса, q _{св} , кН/м	0,03812

В качестве равномерно-распределённой нагрузки выступает нагрузка от собственного веса стального каната, а также условная нагрузка, равная 4,903 кН/м (0,5 т/м), тогда:

$$q = q_{св} + q_{усл}, \quad (12)$$

$$q = 0,03812 + 4,903 = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Для проведения расчёта были построены и экспортированы 9 расчётных схем с различными параметрами (табл. 2). Экспортированная геометрия вант представляет собой набор стержней (конечный элемент 10), разбитых на отрезки определённой длины. С помощью инструмента «Смена типа конечного элемента (далее, КЭ)» стержни преобразуются в КЭ 310 «геометрически нелинейный пространственный стержневой КЭ (нить)». Концы нити закрепляются в соответствии с методикой расчёта. Расчёт ведётся с учётом нелинейности шаговым методом с автоматическим выбором шага для геометрически и физически нелинейных задач.

Таблица 2. Параметры принятых для расчёта вант

Table 2. Properties of calculated cables

№ схемы	Величина провиса, м	Величина пролёта, м	f/l
1	2,83	30	1/10,6
2	2,83	51	1/18
3	2,83	71	1/25
4	4,2	30	1/7,1
5	4,2	51	1/12,1
6	4,2	71	1/16,9
7	5,65	30	1/5,3
8	5,65	51	1/9
9	5,65	71	1/12,6

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех экспортированных схем был проведён расчёт согласно инженерной методике, изложенной выше, а также расчёт в ПК Лира САПР.

В ходе расчёта получены следующие результаты (табл. 3-4, рис. 4-9):

1. Расхождение результатов вычисления продольного усилия N в канате для экспортированной геометрии не превышает 6% для всех расчётных схем, используемых для расчёта, и не превышает 2,25% для значений $f/l < 0,11$ ($\frac{1}{9}$)

2. Расхождение результатов вычисления максимального провисания каната Δf колеблется в диапазоне от 0,2% до 10,4% при $f/l < 0,11$ ($\frac{1}{9}$), в то время, как при $f/l > 0,11$ значение расхождения существенно растёт с увеличением f/l .

3. Значения расхождений результатов вычисления как продольного усилия N , так и провисания каната Δf геометрии, полученной экспортом из ПК Rhino 8 для $f/l < 0,11$, схожи со значениями, полученными для цепной нити, построенной с нуля в ПК Лира САПР.

4. Характер деформаций вант для геометрии, экспортированной из ПК Rhino 8, для значений $f/l > 0,08$ носит некорректный характер (рис. 6): канат прогибается неравномерно, точки максимального прогиба не соответствуют точке максимального момента (середине равномерно-нагруженной ванты). Для $f/l < 0,08$ деформированная схема выглядит корректно (рис. 7), однако расхождение результатов достигает 9,64%.

Ниже приведён расчёт продольных усилий и дополнительного провисания каната для расчётных схем № 4 и № 9.

Расчётная схема №4 ($q = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; $l = 30 \text{ м}$; $f = 4,2 \text{ м}$.)

По формуле 3:

$$D = \frac{4,94112^2 \cdot 30^3}{12} = 54944,77 \text{ кН}^2 \cdot \text{м}.$$

По формуле 6:

$$s = \sqrt{30^2 + \frac{16}{3} \cdot 4,2^2} = 31,529 \text{ м}.$$

Согласно формулам 4 и 5:

$$n = \frac{30}{4,2} = 7,14,$$
$$m = \frac{31,529}{30} = 1,051.$$

Имея найденные выше данные, находится величина распора (формула 1):

$$H^3 + \frac{8 \cdot 62733,63}{3 \cdot 7,14^2 \cdot 1,051^3} \cdot H^2 = \frac{54944,77 \cdot 62733,63}{2 \cdot 30 \cdot 1,051^3},$$
$$H = 129,433 \text{ кН}.$$

Согласно формулам 8 и 10:

$$Q = \frac{4,94112 \cdot 30}{2} = 74,125 \text{ кН},$$
$$M_{\max} = \frac{4,94112 \cdot 30^2}{8} = 555,935 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда усилие в нити будет равно, согласно формуле 7:

$$N = \sqrt{129,433^2 \cdot 74,125^2} = 149,156 \text{ кН}.$$

Вертикальная координата середины нити и величина дополнительного провисания нити, согласно формулам 9 и 11:

$$y_c = \frac{555,936}{129,433} = 4,295 \text{ м},$$
$$\Delta f = 4,295 - 4,2 = 0,095 \text{ м}.$$

Расчётная схема №9 ($q = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; $l = 71 \text{ м}$; $f = 5,65 \text{ м}$.)

По формуле 3:

$$D = \frac{4,94112^2 \cdot 71^3}{12} = 728345,8 \text{ кН}^2 \cdot \text{м}.$$

По формуле 6:

$$s = \sqrt{71^2 + \frac{16}{3} \cdot 5,65^2} = 72,189 \text{ м.}$$

Согласно формулам 4 и 5:

$$n = \frac{71}{5,65} = 12,566,$$

$$m = \frac{72,189}{71} = 1,017.$$

Имея найденные выше данные, находится величина распора (формула 1):

$$H^3 + \frac{8 \cdot 62733,63}{3 \cdot 12,566^2 \cdot 1,017^3} \cdot H^2 = \frac{728345,8 \cdot 62733,63}{2 \cdot 30 \cdot 1,017^3},$$

$$H = 457,127 \text{ кН.}$$

Согласно формулам 8 и 10:

$$Q = \frac{4,94112 \cdot 71}{2} = 175,429 \text{ кН},$$

$$M_{\max} = \frac{4,94112 \cdot 71^2}{8} = 3113,857 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда усилие в нити будет равно, согласно формуле 7:

$$N = \sqrt{457,128^2 \cdot 175,429^2} = 489,633 \text{ кН}.$$

Вертикальная координата середины нити и величина дополнительного провисания нити, согласно формулам 9 и 11:

$$y_c = \frac{3113,857}{457,128} = 6,812 \text{ м},$$

$$\Delta f = 6,812 - 5,65 = 1,162 \text{ м}.$$

Результаты расчёта в ПК Лира САПР приведены в таблице 3, значение расхождений результатов для всех расчётных схем представлено в таблице 4.

Таблица 3. Результаты расчёта
Table 3. Calculation results

№ схемы	N, кН – ручной расчёт	N, кН – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	N, кН – построение в Лира САПР	Δf , м – ручной расчёт	Δf , м – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Δf , м – построение в Лира САПР
1	198,886	202,024	196,140	0,182	0,196	0,197
2	426,997	437,392	419,740	0,948	0,950	0,957
3	630,100	616,860	610,976	2,315	2,270	2,310
4	149,156	156,912	153,969	0,095	0,194	0,099
5	357,073	363,840	357,956	0,608	0,545	0,621
6	560,960	558,999	552,134	1,644	1,550	1,650
7	121,607	129,452	126,510	0,059	0,219	0,069
8	294,406	301,075	292,249	0,389	0,419	0,416
9	489,633	496,234	482,504	1,162	1,05	1,19

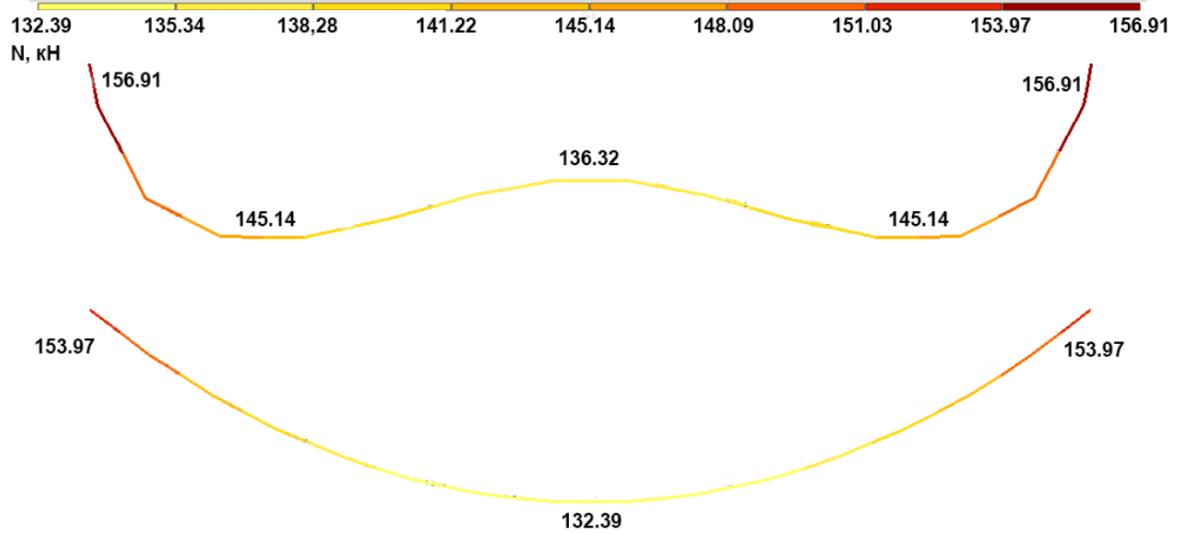


Рис. 4. Продольные усилия в вантах – схема 4 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)
Fig. 4. Axial force in cables – scheme #4 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

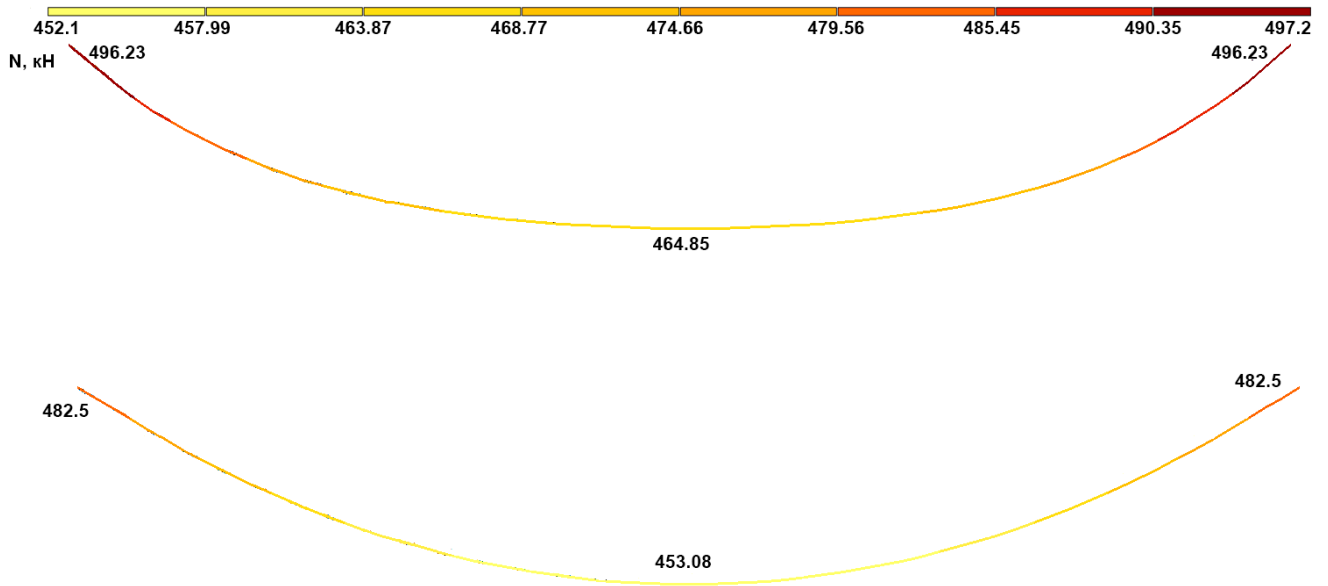


Рис. 5. Продольные усилия в вантах – схема 9 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)
Fig. 5. Axial force in cables – scheme #9 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

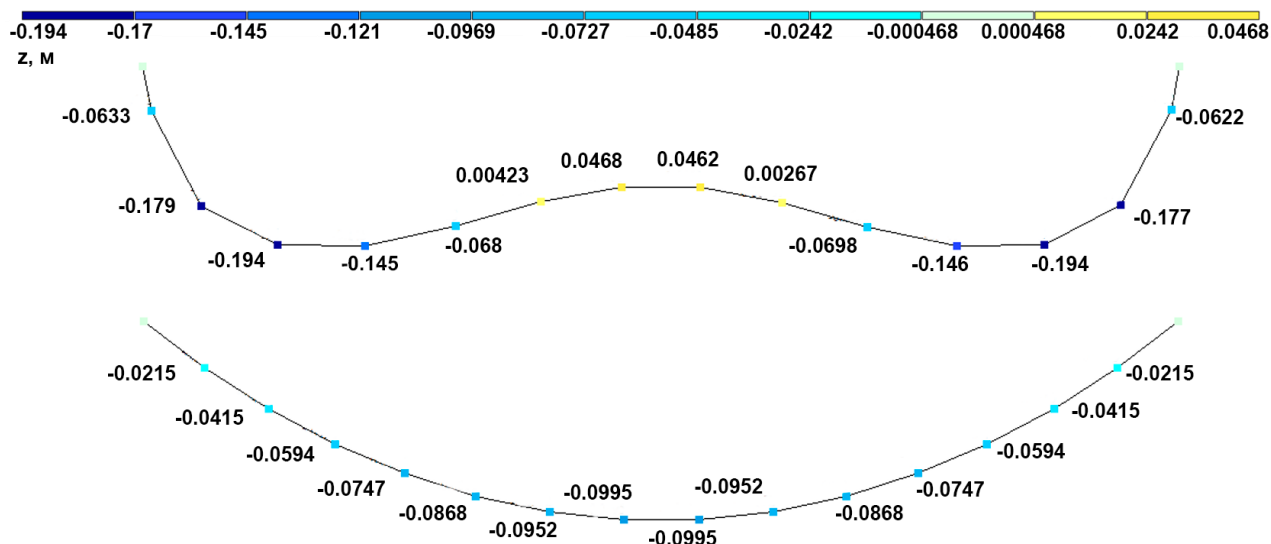


Рис. 6. Деформирование состояние ванты – схемы 4 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)

Fig. 6. Cable deformed state – scheme #4 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

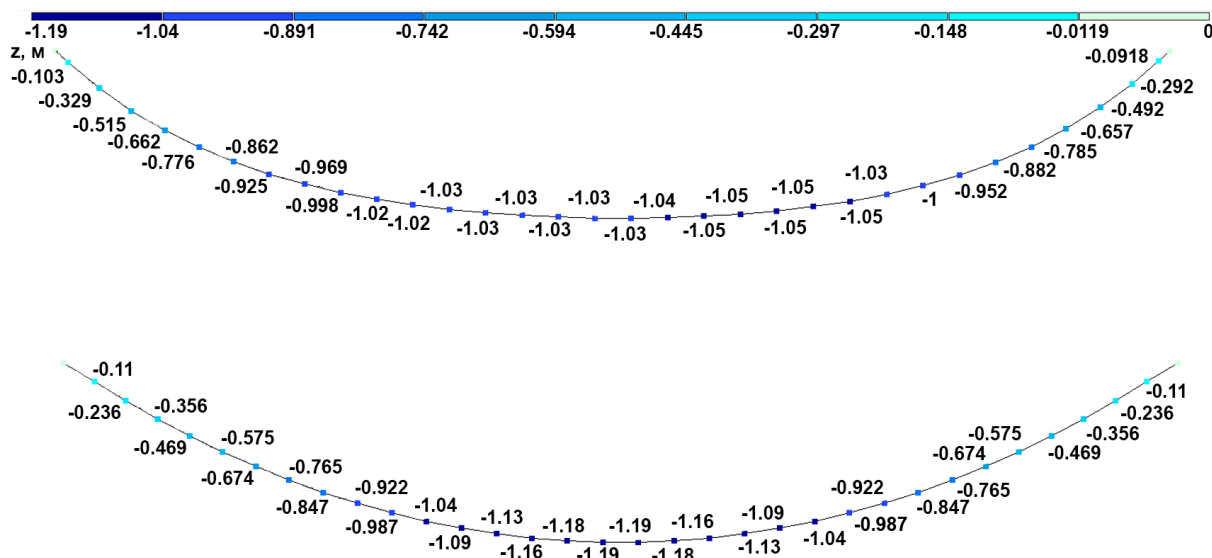


Рис. 7. Деформирование состояние ванты – схема 9 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)

Fig. 7. Cable deformed state – scheme #9 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

Таблица 4. Сводная таблица расхождения результатов расчёта

Table 4. The divergence between the results

№ схемы	f/l	Расхождение результатов по N – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Расхождение результатов по N – построение в Лира САПР	Расхождение результатов по Δf – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Расхождение результатов по Δf – построение в Лира САПР
1	1/10,6	1,58%	1,38%	7,58%	8,13%
2	1/18	2,43%	1,70%	0,20%	0,94%
3	1/25	2,10%	3,03%	1,96%	0,24%
4	1/7,1	5,20%	3,23%	103,89%	4,05%
5	1/12,1	1,88%	0,24%	10,40%	2,09%
6	1/16,9	0,36%	1,58%	5,7%	0,39%
7	1/5,3	5,79%	3,38%	266,26%	15,39%
8	1/9	2,25%	0,73%	7,71%	6,94%
9	1/12,6	1,34%	1,46%	9,64%	2,41%

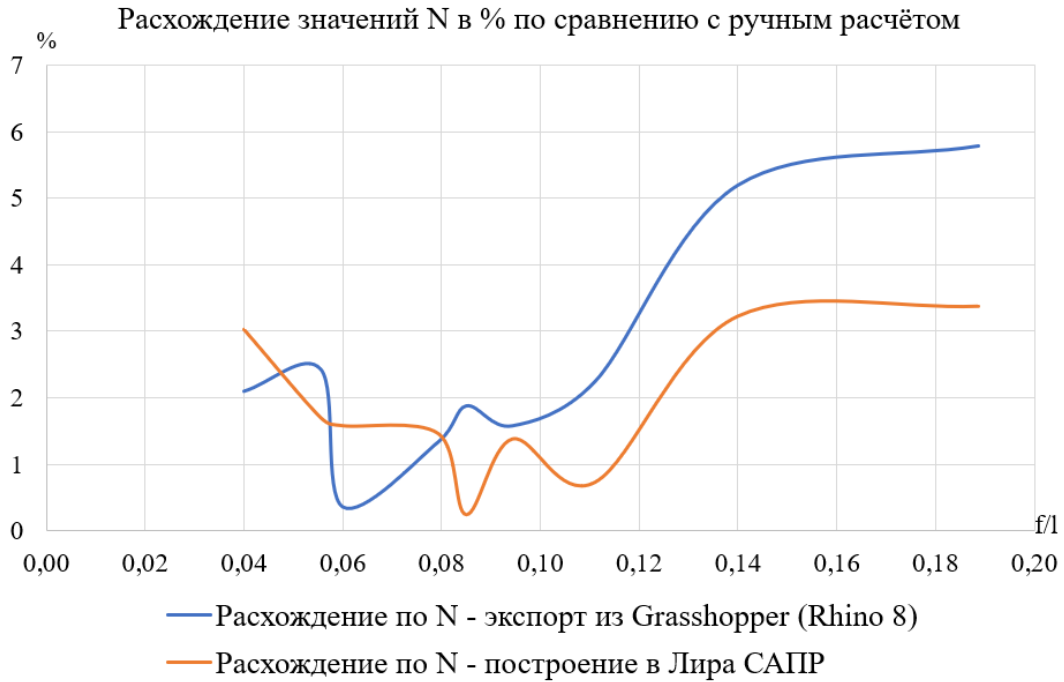


Рис. 8. График расхождения результатов расчёта N в зависимости от f/l
Fig. 8. Discrepancy in results (N) according to f/l

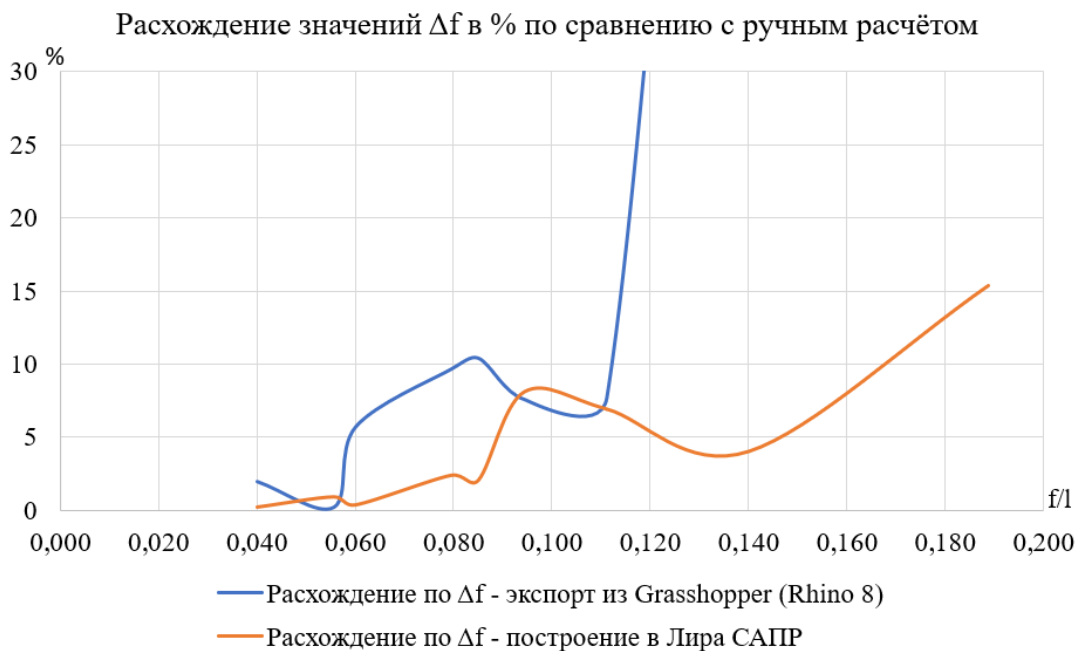


Рис. 9. График расхождения результатов расчёта Δf в зависимости от f/l
Fig. 9. Discrepancy in results (Δf) according to f/l

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был выполнен ручной расчёт выбранных конфигураций вант по актуальным методикам, проведен конечно-элементный расчёт в ПК ЛиРА САПР для вант, построенных с помощью экспорта геометрии из ПК Rhino 8 (с использованием Grasshopper), и для построенных в программе цепных линий. Согласно полученным значениям расхождения результатов КЭ расчёта с расчётом, выполненным по утверждённой методике, можно сделать следующие выводы:

1. Сопоставление результатов инженерных расчётов и различных аналитических схем вантовой системы, построенных с помощью экспорта геометрии из ПК Rhino 8 позволило оценить точность расчета аналитических моделей в различных диапазонах f/l :

• $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{10} \dots \frac{1}{25}$ при оценке значения продольного усилия N в канате;

• $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{13} \dots \frac{1}{25}$ при оценке значения провисания нити Δf ;

2. Расхождение результатов продольного усилия N при $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{10} \dots \frac{1}{25}$ не превышает 2,25%, что позволяет использовать данный метод построения и экспорта геометрии при расчёте вантовых систем, геометрические параметры вант которых вписываются в указанный диапазон.

3. Расхождение результатов Δf при $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{13} \dots \frac{1}{25}$ нестабильно и колеблется от 0,2% до 9,64%, что позволяет использовать данный метод построения геометрии лишь для первичной оценки перемещений. Более точные расчёты необходимо проводить по утверждённым методикам.

4. Характер деформированной схемы вант при $\frac{f}{l} > \frac{1}{13}$ показал слишком большие расхождения результатов по сравнению с эталонной схемой, что говорит об ошибке при переносе геометрии и восприятии её программным комплексом. Использование данного метода построения геометрии и расчёта вантовых систем, геометрические параметры вант которых соответствуют неравенству $\frac{f}{l} > \frac{1}{13}$ не рекомендуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stavric M., Marina O. Parametric modeling for advanced architecture // International Journal of Applied Mathematics and Informatics. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 9-16.
2. Дагаев В.А. Построение конечно-элементной схемы вантового покрытия двойкой кривизны с помощью Grasshopper / В.А. Дагаев, Ф.С. Школяр // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции. Часть 2. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 322–325.
3. Дагаев В.А., Пурвин Г.М., Школяр Ф.С. Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двойкой кривизны. Вестник МГСУ. 2023;18(11):1713-1730.
4. Lai M., Eugster S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 173. P. 109019.
5. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 07008.
6. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswoah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 9. Issue 5.
7. Суббота, А. С. Построение вантовой сети покрытия двойкой кривизны в среде визуального программирования grasshopper / А. С. Суббота, Ф. С. Школяр // Неделя науки ИСИ : Сборник материалов всероссийской конференции, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 01–04 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – С. 40-43.
8. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elasto-plastic analysis of slack and taut cable structures // Engineering with Computers. 2016. Vol. 32. Issue 4. Pp. 615-627.
9. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95-110.
10. Кужахметова Э. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 252-266.
11. Джамбулатов Р. Г. Напряженно-деформированное состояние двухпоясной висячей системы покрытия (на примере дворца спорта «Юбилейный») – Диссертаций магистра техники и технологии строительства, Санкт-Петербург: ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2015 – С. 82
12. Тарасов Д. А., Коновалов В. В., Зайцев В. Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния стальных канатов – Вестник СГТУ № 4 (73), 2013. – С. 215-221
13. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.— 240 с.

ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич Суббота (ORCID: 0009-0005-0670-4468) – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: aleksandr.subbota.02@mail.ru

Филипп Сергеевич Школяр (ORCID: 0000-0003-2872-0723; SPIN: 6980-8774) – доцент ВШПГидС, к.т.н. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: shkolyar.fs@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Subbota - graduate student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: aleksandr.subbota.02@mail.ru

Filipp S. Shkolyar – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: shkolyar.fs@gmail.com