

*Д. Сердюк К. Роценс Л. Пакрастиньш*

*Рижский технический университет, LV -1047 Латвия*

## **ПОТЕРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВАНТАХ КОМПОЗИТНОГО СЕДЛОВИДНОГО ВАНТОВОГО ПОКРЫТИЯ**

*D.Serdjuks, K.Rocens, and L.Pakrastinsh*

### **PRESTRESSING LOSSES IN THE STRESSING CABLES OF COMPOSITE SADDLE SHAPED CABLE ROOF**

**Keywords:** hybrid composite cable, prestressing losses, saddle shaped cable roof

The paper deals with square in plan composite saddle shaped cable roof, which is formed by two orthogonal cable groups joined with tension cables, with size in plan 30x30 m. From the point of view of materials expenditure the cable roof has rational initial geometrical characteristics. Kinematical invariability of the roof is obtained by the prestressing of the cable net.

Hybrid composite cable on the base of carbon fiber reinforced plastic, steel and glass fiber reinforced plastic is considered as a cable net material in combination with the steel.

Prestressing losses in the stressing cables for three variants of cable net prestressing are determined. Opportunity to decrease cable net materials expenditure is stated by the prestressing of each cable of the net by individual forces.

**Ключевые слова:** гибридная композитная ванта, потери предварительного напряжения, седловидное вантовое покрытие

Рассмотрено квадратное в плане седловидное вантовое покрытие, размером в плане 30x30 м, образованное двумя ортогональными группами вант, соединенными с податливым опорным контуром, кинематическая неизменяемость которого достигается путем предварительного напряжения вантовой сети. Вантовое покрытие имеет рациональные с точки зрения расхода материалов геометрические характеристики.

Гибридная композитная ванта на базе углепластика, стали и стеклопластика рассмотрена в качестве материала контурных вант. Несущие и стабилизирующие ванты выполнены из стали. Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах определены для трех вариантов предварительного напряжения вантовой сети. Выявлена возможность уменьшить расход материалов вантовой сети путем напряжения каждой ванты индивидуальным усилием.

## Введение

Предварительное напряжение одной или нескольких групп вант вантовой сети (рис.1), является одним из возможных методов стабилизации вантового покрытия. Все ванты сети следует напрягать равным усилием в соответствии с рекомендациями существующих литературных источников [1,2]. Данные рекомендации справедливы для вантовых покрытий с жестким опорным контуром, в которых все ванты имеют опоры с малыми перемещениями (рис. 1а). Считается, что благодаря постоянству отношения начального выгиба к квадрату пролета для всех вант одной группы обеспечивается равенство усилий в этих вантах при воздействии на покрытие любых нагрузок. Величины усилий предварительного напряжения должны определяться исходя из необходимости сохранения в стабилизирующих вантах растягивающего усилия в 20% от его начальной величины при загрузке покрытия расчетной вертикальной нагрузкой [1,2].

В седловидных вантовых покрытиях с податливым опорным контуром только контурные и главные (диагональные) ванты имеют опоры с малыми перемещениями. Опоры остальных вант имеют значительно большие перемещения при загрузке покрытия расчетной вертикальной нагрузкой, так как крепятся к контурным вантам (рис. 1б). Чем ближе опоры ванты расположены к центру контурных вант, тем большие перемещения они имеют, тем большая часть начального усилия предварительного напряжения теряется при загрузке покрытия расчетной вертикальной нагрузкой.

Таким образом, характер распределения усилий в вантах седловидных вантовых покрытий с жестким и податливым опорными контурами будет различным [1,2,3]. Существенные потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети, вызванные горизонтальными и вертикальными перемещениями опор стабилизирующих вант при загрузке покрытия расчетной вертикальной нагрузкой, являются одной из особенностей седловидных вантовых покрытий с податливым опорным контуром. Потери предварительного напряжения различны для всех вант сети. Поэтому, экономия материалов вантовой сети может быть достигнута путем уменьшения площади поперечного сечения вант, для которых имеют место большие потери предварительного напряжения и увеличения площади поперечного сечения вант, в которых предварительное напряжение падает незначительно.

Экономия материалов вантовой сети может быть достигнута так же использованием сочетания таких высокопрочных конструкционных материалов, как углепластик и сталь [4,5].

Комбинация углепластика и стали позволяет получить гибридную композитную ванту с повышенной по сравнению с углепластиком относительной деформацией в аварийной ситуации и относительно низкой по сравнению со стальными вантами ползучестью при воздействии расчетных нагрузок. Принцип, позволяющий получить гибридную композитную ванту на базе углепластика и стали, указан в работах [6,7].

Целью данной работы является оценка потерь предварительного напряжения в стабилизирующих вантах вантовой сети седловидного покрытия, контурные ванты которого выполнены из углепластика, стали и стеклопластика, а стабилизирующие и несущие из стали.

## Гибридная композитная ванта на базе углепластика, стали и стеклопластика

Комбинация стеклопластика и стали открывает возможность изготовления гибридных композитных вант для предварительно напряженных вантовых сетей с повышенной относительной деформацией в аварийной ситуации и относительно низкой ползучестью при воздействии расчетных нагрузок [6]. Гибридная композитная ванта состоит из трех слоев: углепластиковое ядро, стеклопластиковый распределительный слой и стальная проволока (рис.2). Все слои гибридной композитной ванты воспринимают растягивающие напряжения, действующие в ванте во время эксплуатации. Распределительный слой стеклопластика выполняет так же дополнительную функцию — передает поперечное давление стальной проволоки на углепластиковое ядро. Объемные фракции компонентов установлены на основании предпосылки, что в аварийной ситуации, когда деформация превысила предельное значение для угольных волокон и они разрушены, стальная проволока должна полностью воспринять растягивающие напряжения, существенно уменьшенные вследствие удлинения ванты [7]. Исходя из этой предпосылки в качестве материалов гибридной композитной ванты рассмотрены: стеклопластик (Е — стекло, эпоксидная матрица, объем волокон 60%), углепластик (графитовые волокна AS4/3501— 6, эпоксидная матрица, объем волокон 60%), невытянутые пучки стальной проволоки. Предельные значения относительных деформаций составили 1,6 % для углепластика, 2,64 % для стеклопластика и 10 % для невытянутых пучков стальной проволоки [1,5,8]. Модули упругости для углепластика, стеклопластика и стальной проволоки составили  $1,37 \cdot 10^5$ ,  $0,75 \cdot 10^5$  и  $1,3 \cdot 10^5$  МПа соответственно. Пределы прочности для углепластика, стеклопластика и стальной проволоки составили 1765, 1000 и 1568 МПа [1,5,8]. Объемные фракции углепластика, стеклопластика и стали в гибридной композитной ванте составили 0,6; 0,2; 0,6 [7].

### Математическая модель

Наличие двух плоскостей симметрии дает возможность рассмотреть в качестве расчетной схемы четверть вантовой сети седловидного вантового покрытия с податливым опорным контуром, загруженной предварительным напряжением и расчетной вертикальной нагрузкой. Отброшенная часть покрытия заменена наложенными на его четверть связями (рис. 3). Рассмотрено квадратное в плане седловидное вантовое покрытие размером 30x30 м. Гибридные композитные ванты на базе углепластика, стеклопластика и стали с модулем упругости в  $1,32 \cdot 10^5$  МПа рассмотрены в качестве материала контурных вант, являющихся наиболее нагруженной группой вант. Стальные ванты с модулем упругости в  $1,3 \cdot 10^5$  МПа рассмотрены в качестве материала несущих и стабилизирующих вант.

Рассмотренное седловидное вантовое покрытие имеет рациональные с точки зрения расхода материалов геометрические характеристики: начальный выгиб контурных вант—5,7 м, начальный выгиб несущих и стабилизирующих вант—12 м, шаг в плане несущих и стабилизирующих вант—1,414 м [9].

Расчет конструкции произведен на воздействие основной комбинации нагрузок от собственного веса и снега [10], равномерно распределенной по горизонтальной проекции покрытия. Расчетная нагрузка от собственного веса 0,27 кПа; расчетная снеговая нагрузка 1,12 кПа. Расчетная нагрузка в виде сосредоточенных сил приложена к узлам вантовой сети. Кровля имеет следующие слои: стеклянная сеть,

покрытая полимерной смолой (2 мм), пенопласт, армированный стеклянной сетью (120 мм), седловидные фанерные листы (6 мм) [11].

Предварительное напряжение вантовой сети осуществлялось приложением к стабилизирующим и соответственно несущим вантам растягивающих усилий, при которых в стабилизирующих вантах сохраняется растягивающие усилия в 20% от их начальных значений при загрузке расчетной вертикальной нагрузкой. Опорные точки вантовой сети имеют перемещения, ограниченные деформациями оттяжек.

Площади поперечных сечений вант, находящихся в плоскости симметрии (главные диагональные ванты), а так же величины приложенных к узлам этих вант сосредоточенных сил, делятся на два. Величина сосредоточенной силы, приложенной к узлу пересечения главных диагональных вант, делится на четыре.

Рассмотрено три варианта предварительного напряжения вантовой сети седловидного покрытия с податливым опорным контуром:

- стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями;
- стабилизирующие и несущие ванты разделены на четыре группы, напряженные индивидуальными усилиями;
- каждая ванта сети напряжена индивидуальным усилием.

Величины усилий предварительного напряжения определялись методом подбора исходя из необходимости сохранения в стабилизирующих вантах растягивающих усилий при приложении к покрытию расчетной вертикальной нагрузки [2].

Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети при загрузке покрытия расчетной вертикальной нагрузкой а так же расход материалов вантовой сети рассмотрены в качестве критериев оценки эффективности вариантов предварительного напряжения.

Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети, а так же объем материалов вантовой сети, отнесенный к горизонтальной проекции покрытия (относительный объем), определены при помощи численного эксперимента, связанного с нахождением усилий в вантах сети.

Численный эксперимент проводился для двух вариантов загрузки вантовой сети:

- вантовая сеть загружена только предварительным напряжением;
- вантовая сеть загружена предварительным напряжением и расчетной вертикальной нагрузкой. Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети определялись как уменьшение значений растягивающих усилий в стабилизирующих вантах при загрузке предварительно напряженной вантовой сети расчетной вертикальной нагрузкой. Относительный объем материалов вантовой сети определен по значениям максимальных растягивающих усилий, действующих в вантах сети, необходимых для определения площадей поперечных сечений вант.

Площади поперечных сечений вант определены в соответствии с рекомендациями [1], по формуле:

$$F \geq \frac{1,6N}{kR}, \quad (1)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения ванты,  $N$  — расчетное усилие в ванте,  $k$  — коэффициент, учитывающий понижение разрывного усилия ванты вследствие неоднородности распределения напряжений,  $R$  — предел прочности материала ванты, 1,6 — коэффициент надежности по материалу.

Площадь, перекрываемая покрытием, определена с учетом начальных выгибов контурных вант.

### Метод расчета

Численный эксперимент проведен при помощи программы "ANSYS/ED 5,3" для WINDOWS. При расчете вантовой сети данная программа базируется на итерационном методе Ньютона—Рапсона, заключающийся в разделении приложенной расчетной вертикальной нагрузки на серию небольших частей в порядке возрастания. Вантовая сеть моделируется при помощи конечных элементов. Тип конечного элемента LINK 10, имеющий три степени свободы в каждом узле. Данный тип конечного элемента позволяет моделировать предварительно напряженные элементы конструкций, работающие только на растяжение. К данному типу относятся предварительно напряженные ванты, являющиеся элементами сети. Каждый конечный элемент делится на две части одинаковой длины.

Распоры вант а так же перемещения узлов вантовой сети определены при помощи уравнений 2) —5), которые составляются для каждого узла и каждой ванты :

$$\nabla_k \left[ dH \frac{\Delta x}{L} \right]_i = -dP_x \quad (2)$$

$$\nabla_k \left[ dH \frac{\Delta y}{L} \right]_i = -dP_y \quad (3)$$

$$\nabla_k \left[ H \frac{\Delta w}{L} + dH \frac{\Delta(z_0 + z_1)}{L} \right]_i = -dP_z \quad (4)$$

$$dH = H_0 + \frac{EF_i}{S_i} \left[ \Delta^* du \frac{\Delta^* x}{S} + \Delta^* dv \frac{\Delta^* y}{S} + \sum_1^m \frac{\Delta(z_0 + z_1) \Delta dw}{L} \right]_i \quad (5)$$

где  $x, y, z$  – координаты узлов вантовой сети ( $z$  – вертикальная ось);  $P_x, P_y, P_z$  – внешние нагрузки, приложенные к узлам вантовой сети в направлениях  $x, y, z$ , соответственно;  $u, v, w$  – перемещения узлов вантовой сети в направлениях  $x, y, z$ , соответственно;  $\nabla_k$  – разностный оператор для  $k$ -ого узла;  $\Delta^*$  – разница между начальным и конечным значением величины;  $H$  – распор ванты;  $H_0$  – величина предварительного напряжения ванты;  $S_i$  – длина  $i$ -ой ванты;  $L$  – расстояния между соседними узлами вантовой сети;  $F_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -ой ванты ;  $m$  – количество элементов в  $i$ -ой ванте.

### Исследование потерь предварительного напряжения вантовой сети

Потери предварительного напряжения определены для трех вариантов предварительного напряжения вантовой сети седловидного покрытия как разница

растягивающих усилий в стабилизирующих вантах при загрузке предварительно напряженной вантовой сети расчетной вертикальной нагрузкой. Полученные потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети показаны на рис. 4 в % от начального усилия. Полученная зависимость показывает, что наибольшие потери предварительного напряжения имеют место для варианта, когда стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями.

Зависимость относительного объема материалов вантовой сети от количества групп вант, напряженных различными усилиями, показана на рис. 5. Для варианта, когда несущие и стабилизирующие ванты сети напряжены равным усилием, имеются две группы вант; восемь групп вант имеется для варианта, когда несущие и соответственно стабилизирующие ванты разделены на четыре группы, каждая из которых напряжена равным, но отличным от другой группы усилием; двадцать шесть групп вант имеется для случая, когда все несущие и стабилизирующие ванты напряжены различными усилиями.

Зависимость, приведенная на рис. 5 показывает, что предварительное напряжение стабилизирующих и соответственно несущих вант равным усилием приводит к повышению относительного объема материалов вантовой сети на 46 % по сравнению с вариантом, когда каждая ванта сети напряжена индивидуальным усилием. Увеличение количества групп вант, напряженных равными усилиями, приводит к снижению относительного объема материалов вантовой сети.

Использование гибридной композитной ванты на базе углепластика, стали и стеклопластика в качестве материала контурных вант вместо стали позволяет снизить относительный объем материалов вантовой сети на 4,24 %, а так же уменьшить потери предварительного напряжения, вызванные ползучестью материала [6]. Использование в качестве материала контурных вант композитных углепластиковых позволяет снизить относительный объем материалов вантовой сети по сравнению с конструкциями с гибридными композитными и стальными контурными вантами на 8,42 % и 4,01 % соответственно. Потери предварительного напряжения, вызванные ползучестью материала так же будут уменьшены. Однако, малые относительные деформации при разрушении композитных углепластиковых вант уменьшают безопасность конструкции. Поэтому использование гибридной композитной ванты на базе углепластика, стали и стеклопластика, обладающей повышенной относительной деформацией в аварийной ситуации, в качестве материала контурных вант является предпочтительным.

## **Заключение**

Произведена оценка потерь предварительного напряжения в стабилизирующих вантах квадратного в плане седловидного вантового покрытия с податливым опорным контуром, несущие и стабилизирующие ванты которого выполнены из стали, а контурные из углепластика, стеклопластика и стали. Рассмотрены три варианта предварительного напряжения вантовой сети покрытия:

- стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями;
- стабилизирующие и несущие ванты разделены на четыре группы, каждая из которых напряжена индивидуальным усилием;
- каждая ванта сети напряжена индивидуальным усилием.

Установлено, что для конструкции размером в плане 30x30 м предварительное напряжение каждой ванты сети индивидуальным усилием дает возможность на 46% уменьшить объем материалов вантовой сети, отнесенный к горизонтальной проекции

покрытия, по сравнению с вариантом, когда стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трущев А.Г.* Пространственные металлические конструкции.–М.:Стройиздат, 1983. –215 с.
2. *Ермолов В.В.* Инженерные конструкции. –М.:Стройиздат,1991. – 406 с.
3. *Koldack J., Pal F.* Static of suspension cable roofs. – Rotterdam, Holland. – 1995. –P.3–12.
4. *Tepfers R.* Fiber Composites FRP as Reinforcement in Concrete. – Göteborg, Sweden. –1998. – P. 2–11.
5. *Bengtson A.* Fatigue Tests with Carbon-Fiber-Reinforced Composite Cable as Nonmetallic Reinforcement in Concrete. – Göteborg, Sweden. –1994. –P.1–14.
6. *Serdjuks D., Rocens K., and Pakrastinsh L.* Utilization of Composite Materials in Saddle-Shaped Cable Roof //Mechanics of Composite Materials, Vol.36, № 5., ISSN 0191 – 5665. – 2000. – P.385–388.
7. *Serdjuks D., Rocens K.* Hybrid Composite Cable Based on Steel and Carbon // Materials Science, Vol.9, №1., ISSN 1392–1320.–2003. – P.27–30.
8. *Peters S.T.* Handbook of composites. – London, Great Britain. –1998. – P.758–777.
9. *Serdjuks D., Rocens K.* Rational Form of Saddle Shaped Cable Roof with Complained Anchors // Architecture and Constructional Science, Scientific Proceedings of Riga Technical University, ISSN1407-7329. –2001– P. 165–170.
10. *Отто Ф., Шлейфер К.* Тентовые и вантовые строительные конструкции. –М.: Стройиздат, 1970. –172 с.
11. *Rocens K., Verdinh G., Serdjuks D., and Pakrastinsh L.* Structure of Composite Roof. – Patent № 12191 of the republic of Latvia, published in 20.03.1999.

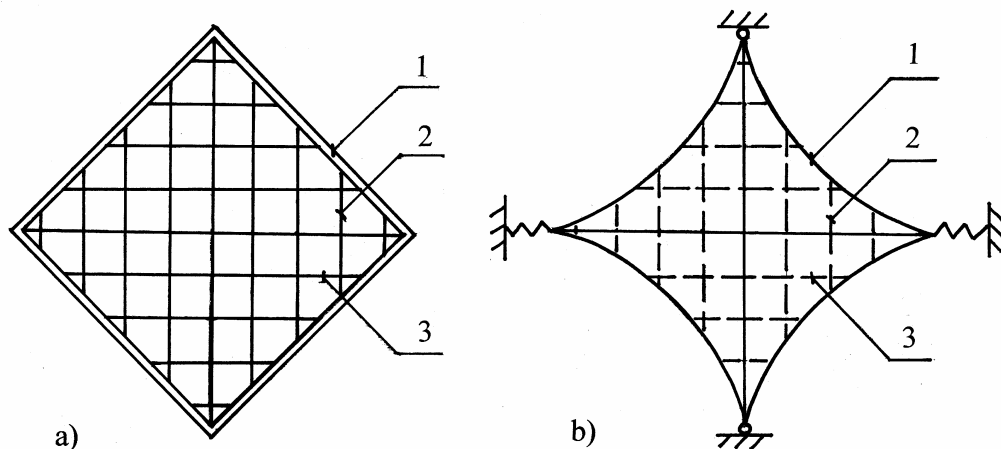


Рис.1 Схема вантовых сетей покрытий с жестким и податливым опорными контурами: а) -покрытие с податливым опорным контуром; б)-покрытие с жестким опорным контуром; 1-опорный контур; 2-несущие ванты; 3-стабилизирующие ванты; (——) -ванты с малыми перемещениями опор; (-----) -ванты с большими перемещениями опор.

Fig.1. Schemes of cables nets for roofs with rigid and compliant supporting contours: a) - roof with rigid supporting contour; b) - roof with compliant supporting contour; 1 - supporting contour; 2 - suspension cables; 3 - stressing cables; (——) - cables with small displacements of supports; (-----) - cables with big displacements of supports.

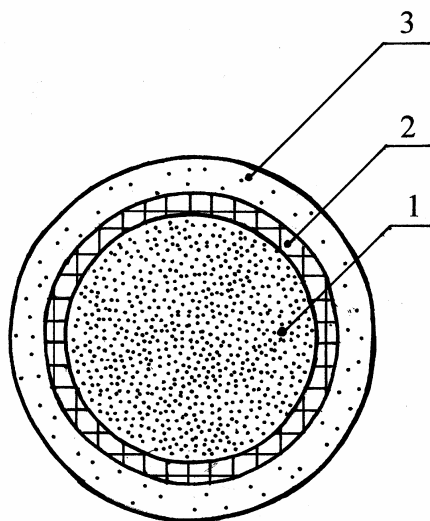


Рис.2. Схема гибридной композитной ванты, выполненной из углепластика, стеклопластика и стали: 1- углепластиковое ядро; 2- стеклопластиковый распределительный слой; 3- стальная проволока.

Fig.2. Scheme of hybrid composite cable made of CFRP, GFRP and steel: 1 - CFRP core; 2 - GFRP distributor layer; 3 - steel wire.



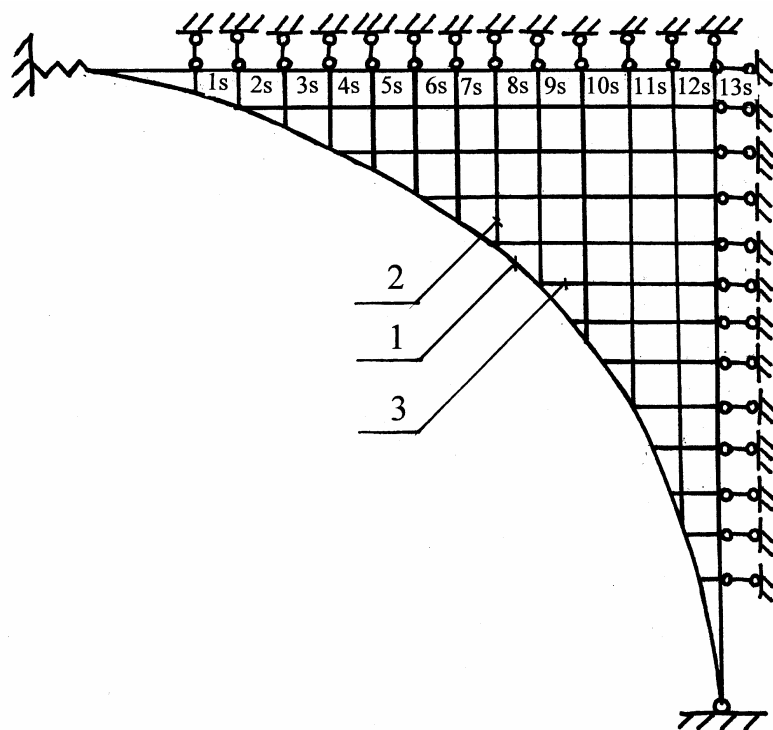


Рис.3. Схема четверти вантовой сети: 1s - 13s - нумерация стабилизирующих вант. Остальные обозначения те же, что на рис.3.

Fig.3. Scheme of cable net quarter: 1s - 13s - numbering of stressing cables. Other designations as in Fig.1.

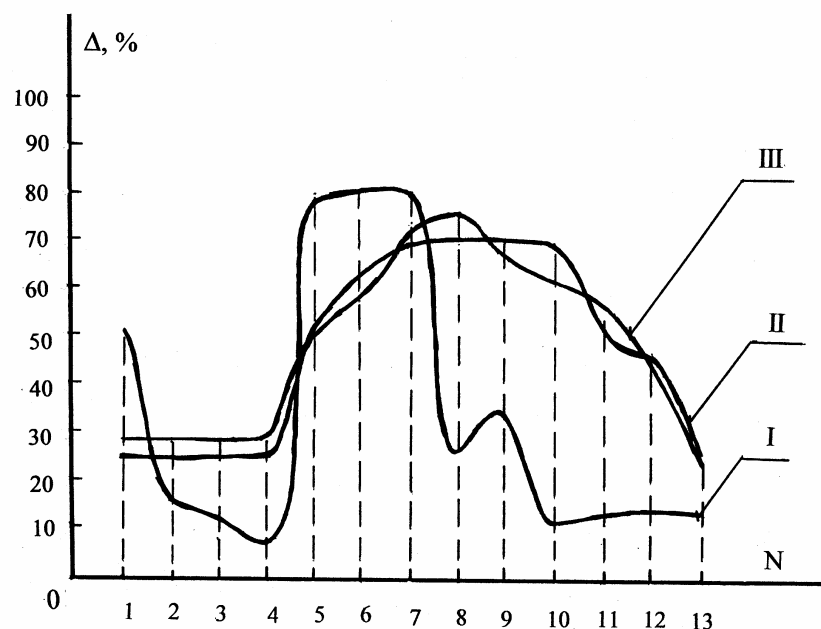


Рис.4. Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети:  $\Delta$  - потери предварительного напряжения в % от начального усилия; N - нумерация стабилизирующих вант; I - потери предварительного напряжения для варианта, когда стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями; II - потери предварительного напряжения для варианта, когда стабилизирующие и несущие ванты разделены на четыре группы, каждая из которых напряжена индивидуальным усилием; III - потери предварительного напряжения для варианта, когда каждая ванта сети напряжена индивидуальным усилием.

Fig.4. Prestressing losses in the stressing cables of the net:  $\Delta$  - prestressing losses in the stressing cables of the net in % from the initial force; N - numbering of stressing cables; I - prestressing losses for the variant, when stressing and accordingly suspension cables are prestressed by equal forces; II - prestressing losses for the variant, when stressing and suspension cables are divided into four groups, which are prestressed by individual forces; III - prestressing losses for the variant, when each cable of the net is prestressed by individual force.

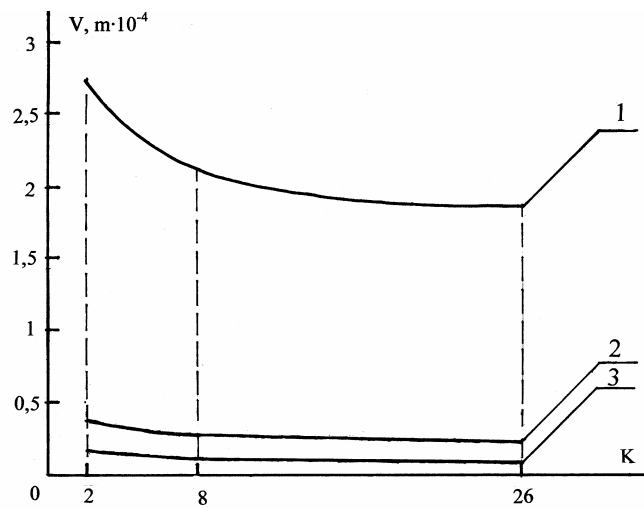


Рис.5. Зависимость относительного объема материалов вантовой сети  $V$  от количества групп вант  $K$ : 1- объем гибридных композитных контурных вант; 2- объем стальных несущих вант; 3 - объем стальных стабилизирующих вант.

Fig.5. Relative volume of cable net materials  $V$  as a function of cable groups number  $K$ : 1 - volume of hybrid composite tension cables; 2 - volume of steel suspension cables; 3 - volume of steel stressing cables.

### **List of figures:**

*Fig.1. Schemes of cables nets for roofs with rigid and compliant supporting contours: a) - roof with rigid supporting contour; b) - roof with compliant supporting contour; 1 - supporting contour; 2 - suspension cables; 3 - stressing cables; (\_\_\_\_\_) - cables with small displacements of supports; (-----) - cables with big displacements of supports.*

*Fig.2. Scheme of hybrid composite cable made of CFRP, GFRP and steel: 1 – CFRP core; 2 - GFRP distributional layer; 3 - steel wire.*

*Fig.3. Scheme of cable net quarter: 1s - 13s - numbering of stressing cables; other designations as in Fig.1.*

*Fig.4. Prestressing losses in the stressing cables of the net:  $\Delta$  - prestressing losses in the stressing cables of the net in % from the initial force; N - numbers of stressing cables; I - prestressing losses for the variant, when stressing and correspondingly suspension cables are prestressed by equal forces; II - prestressing losses for the variant, when stressing and suspension cables are divided into four groups, which are prestressed by individual forces; III- prestressing losses for the variant, when each cable of the net is prestressed by individual force.*

*Fig.5. Relative volume of cable net materials V as a function of cable groups number K: 1 - volume of hybrid composite cables; 2 - volume of steel suspension cables ; 3 – volume of steel stressing cables.*

### Список рисунков:

Рис.1 Схема вантовых сетей покрытий с жестким и податливым опорными контурами: а) -покрытие с податливым опорным контуром; б-покрытие с податливым опорным контуром; 1-опорный контур; 2-несущие ванты; 3-стабилизирующие ванты; (\_\_\_\_\_) -ванты с малыми перемещениями опор; (-----) -ванты с большими перемещениями опор.

Рис.2. Схема гибридной композитной ванты, выполненной из углепластика, стеклопластика и стали: 1- углепластиковое ядро; 2- стеклопластиковый распределительный слой; 3- стальная проволока.

Рис.3. Схема четверти вантовой сети: 1s - 13s - нумерация стабилизирующих вант. Остальные обозначения те же, что на рис.3.

Рис.4. Потери предварительного напряжения в стабилизирующих вантах сети: Δ -потери предварительного напряжения в % от начального усилия; N - нумерация стабилизирующих вант; I - потери предварительного напряжения для варианта, когда стабилизирующие и соответственно несущие ванты напряжены равными усилиями; II - потери предварительного напряжения для варианта, когда стабилизирующие и несущие ванты разделены на четыре группы, каждая из которых напряжена индивидуальным усилием; III - потери предварительного напряжения для варианта, когда каждая ванта сети напряжена индивидуальным усилием.

Рис.5. Зависимость относительного объема материалов вантовой сети V от количества групп вант K: 1- объем гибридных композитных контурных вант; 2- объем стальных несущих вант; 3 - объем стальных стабилизирующих вант.