

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>

УДК 621.315.176

## Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами

И. И. Сергей<sup>1)</sup>, Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Авиационные заградительные шары-маркеры служат для маркировки высоковольтных проводов с целью визуального предупреждения пилотов гражданской и военной авиации о наличии воздушных линий. В статье предлагается механический расчет гибких проводов пролета воздушных линий, в котором устанавливаются заградительные шары. Провод рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы и цепной линии. Нагрузку от заградительных шаров нельзя заменять распределенной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к неверным результатам. Приведены формулы определения стрел провеса при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. Показана приемлемая точность механического расчета при использовании принятой в проектной практике модели провода в виде параболы, если будут правильно определены составляющие сосредоточенных сил. Записано уравнение состояния, учитывающее весовые и ветровые нагрузки на провод, а также коэффициенты нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров. Выполненные расчеты показывают приемлемую точность определения тяжений при различной загрузке пролета. Для более точного расчета механических напряжений и стрел провеса предложен векторно-параметрический метод расчета гибких проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов. Получены результаты механического расчета по разработанной программе и по существующим методикам для различного числа заградительных шаров, перемещаемых вдоль пролета.

**Ключевые слова:** стрела провеса, тяжение, гибкая нить, цепная линия, парабола, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4. С. 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>

---

### Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел. +375 17 292-71-93  
[eie@bntu.by](mailto:eie@bntu.by)

### Address for correspondence

Bladyko Yuri V.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Тел. +375 17 292-71-93  
[eie@bntu.by](mailto:eie@bntu.by)

---

## Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls

I. I. Sergey<sup>1)</sup>, Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Aerial barrage balls serve for marking high-voltage wires in order to visually warn pilots of civil and military aviation about the presence of overhead lines. The present article deals with the mechanical calculation of flexible overhead wires of overhead lines, in which aerial warning barrage balls are installed. The wire is considered as a homogeneous flexible thread having the outline of a parabola and a chain line. The load from the aerial barrage balls must not be substituted with a distributed one by simple division of the total load into the span length, since it can cause incorrect results. The formulas for determining the sag are given for a different number of aerial barrage balls as a function of their number and the coefficient of concentrated forces. The acceptable accuracy of mechanical calculation is demonstrated when using the model of wire in the form of a parabola adopted in the design practice, provided that the components of concentrated forces are correctly determined. The equation of state is recorded, taking into account the weight and wind loads on the wire, as well as load coefficients in two planes, depending on the number of barrage balls. The performed calculations demonstrate an acceptable accuracy of the determination of the stress at various loadings of the span. For more accurate calculation of mechanical stresses and sag arrows, a vector-parametric method for calculating the flexible wires of overhead lines is suggested, where the calculated model of wires in the form of a flexible elastic thread is put taking into account of the spatial arrangement of all structural elements. The results of mechanical calculation according to the program that had been developed and to the existing methods for a different number of aerial barrier balls moved along the span are presented.

**Keywords:** sag, stress, flexible thread, chain line, parabola, equation of state, span, equivalent wire, load factor

**For citation:** Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (4) 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309> (in Russian)

### Введение

Авиационные заградительные шары-маркеры служат для маркировки высоковольтных проводов с целью визуального предупреждения пилотов гражданской и военной авиации о наличии воздушных линий (ВЛ) электропередачи, в особенности проходящих через водные препятствия и ущелья. Авиационные заградительные шары для ВЛ отчетливо видны на фоне любой местности.

Цель механического расчета – определение возникающих в проводах и опорных конструкциях напряжений и обеспечение в любой точке пролета требующихся по ПУЭ минимальных расстояний до различных объектов при всех возможных видах нагрузок, принятых при проектировании (гололед, ветер и др.). В настоящее время в проектной практике отсутствуют методики и указания по расчету положения проводов и тросов с заградительными шарами. Нагрузку от них нельзя заменять распределенной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может

привести к неверным результатам. В статье излагается механический расчет гибких проводов пролета ВЛ, в котором устанавливаются заградительные шары.

### Механический расчет гибких проводов

Расчетная модель пролета показана на рис. 1а.

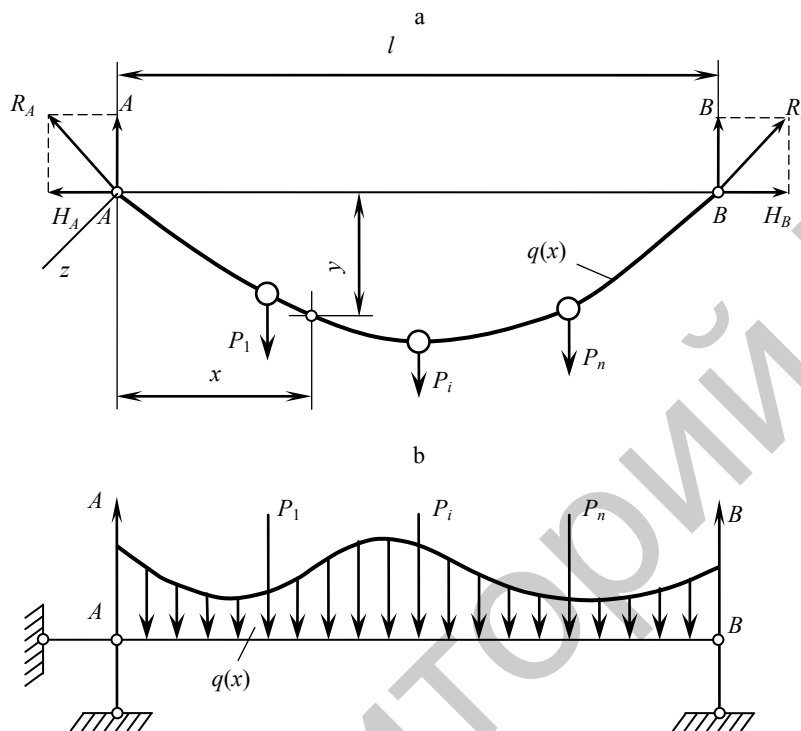


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – провод с вертикальными нагрузками, распределенными  $q(x)$  и сосредоточенными  $P_i$ ; б – провод в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же, как и провод

Fig. 1. Estimated span scheme: a – wire with vertical distributed loads  $q(x)$  and with concentrated loads  $P_i$ ; b – wire in the form of a simple split beam with hinged pillars, loaded in the same way as the wire

Основанная на ряде допущений и упрощений методика механического расчета проводов и тросов с сосредоточенными нагрузками [1] сводит вычисление напряжений в проводе к решению известного уравнения состояния, выведенного для проводов ВЛ и дополненного поправочным коэффициентом, учитывающим конструктивные элементы. Поправочный коэффициент определяется при замене провода с сосредоточенными нагрузками различной величины, приложенными в разных местах пролета, эквивалентным проводом с равномерно распределенной по пролету нагрузкой (рис. 1б).

Гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить с закрепленными концами в однородном гравитационном поле принимает форму цепной линии [2].

По уравнению цепной линии стрела провеса в любой точке пролета

$$f(x) = y = a \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{l}{2a} \right) - \operatorname{ch} \left( \frac{l-2x}{2a} \right) \right],$$

где  $a = H/q$ ;  $l$  – длина пролета;  $x$  – расстояние от начала пролета;  $H$  – тяжение в проводе (горизонтальная составляющая);  $q$  – погонный вес провода.

Практически тот же результат дает сумма разложения гиперболической функции в степенной ряд (ряд Маклорена)

$$f(x) = \frac{x(l-x)}{2!a} + \frac{x^2(l-x)^2}{4!a^3} + \dots = \frac{qx(l-x)}{2H} + \frac{q^3x^2(l-x)^2}{24H^3} + \dots$$

При длинах пролета до 500–700 м уравнение цепной линии заменяют параболой, т. е. пользуются только первым членом ряда, при больших длинах рекомендуется использовать два слагаемых в формуле разложения для определения стрел провеса [2].

Для частного случая, когда в середине пролета действует одна сосредоточенная сила  $P$ , стрела провеса в любой точке пролета

$$f(x) = \frac{x[q(l-x) + P]}{2H},$$

где  $P$  – вес сосредоточенных нагрузок.

При трех сосредоточенных нагрузках, равномерно расположенных по длине пролета, стрелы провеса определяются по формулам:

$$f(x) = \frac{qx(l-x) + Px}{2H}, \quad \text{при } 0 \leq x \leq l/4;$$

$$f(x) = \frac{qx(l-x) + P(x+l/2)/3}{2H}, \quad \text{при } l/4 \leq x \leq l/2.$$

При семи сосредоточенных нагрузках, равномерно расположенных по длине пролета, стрелы провеса в местах приложения сил определяются по выражениям:

$$f(l/8) = \frac{ql^2}{8H} \left( \frac{7}{16} + \frac{1}{2} K_p \right); \quad f(l/4) = \frac{ql^2}{8H} \left( \frac{3}{4} + \frac{6}{7} K_p \right);$$

$$f(3l/8) = \frac{ql^2}{8H} \left( \frac{15}{16} + \frac{15}{14} K_p \right); \quad f_0 = f(l/2) = \frac{ql^2}{8H} \left( 1 + \frac{8}{7} K_p \right),$$

где  $K_p = P/(ql)$  – коэффициент сосредоточенных сил.

В общем случае максимальная стрела провеса для  $n$  сосредоточенных сил [3]

$$f_0 = \frac{ql^2}{8H} K_f,$$

где  $K_f = 1 + K_p \left( 1 + \frac{1}{n} \right)$ .

При замене сосредоточенных сил на распределенную по пролету нагрузку максимальная стрела провеса снижается до величины

$$f_0 = \frac{ql^2}{8H} K = \frac{ql^2}{8H} (1 + K_p),$$

что приводит к значительным погрешностям [3].

При разных высотах точек подвеса провода стрелы провеса определяются тем же путем, что и при одинаковой высоте точек подвеса, так как формула балочных реакций в обоих случаях имеет одинаковую структуру, причем вес провода может быть принят с учетом уклона. При совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок стрелы провеса и горизонтальные отклонения находят независимо в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [4].

При наличии натяжных гирлянд изоляторов, а также при учете ветровой нагрузки погрешность возрастает из-за искажения формы системы «гирлянда изоляторов – провод», отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [5, 6] доказано увеличение погрешности с увеличением длины гирлянды изоляторов.

Методика [1] может быть распространена на пролеты с заградительными шарами с учетом ветрового и гололедного воздействий. После определения для всех режимов эквивалентных погонных нагрузок составляется уравнение состояния провода. При этом следует учитывать упругое и температурное удлинение провода на длине  $l_1$ . Тогда из условия равенства длин провода в двух режимах, из которых один исходный (с индексом 0), получим следующее уравнение состояния провода:

$$\alpha_y H - \frac{\Sigma(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \alpha_y H_0 - \frac{\Sigma(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0,$$

где  $\Sigma(qK)^2 = (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2$ ;  $q_y K_y$ ,  $q_z K_z$  – эквивалентная погонная весовая и ветровая нагрузки на провод;  $q_y$ ,  $q_z$  – погонная нагрузка на провод от веса (провода и гололеда) и ветра;  $K_y$ ,  $K_z$  – коэффициент нагрузки в двух плоскостях;  $\alpha_y = \frac{1}{EF}$  – то же упругого удлинения провода;  $E$  – модуль упругости провода;  $F$  – сечение провода;  $\alpha$  – коэффициент температурного удлинения провода;  $t$  – температура провода.

Коэффициенты нагрузки при  $n$  заградительных шарах, равномерно расположенных в пролете ВЛ [3], равны:

$$K_y^2 = 1 + 2 \frac{n+2}{n+1} K_{py} + \frac{n+2}{n} K_{py}^2;$$

$$K_z^2 = 1 + 2 \frac{n+2}{n+1} K_{P_z} + \frac{n+2}{n} K_{P_z}^2,$$

где  $K_{P_y} = P_y / (q_y l)$ ,  $K_{P_z} = P_z / (q_z l)$  – коэффициент сосредоточенных сил;  $P_y$ ,  $P_z$  – суммарная сосредоточенная сила по осям  $y$  и  $z$ .

При выводе формул в методике [1] для расчета поправочного коэффициента и стрел провеса принимается, что провод и гирлянда имеют очертания параболы, нагрузки действуют нормально к горизонтальному пролету, кривая провисания провода и гирлянд является плоской линией, а длина гирлянды приравнивается к ее горизонтальной проекции. При определении напряжений в проводе не учитывается изменение тяжения по его длине. Указанные допущения ограничивают использование приближенной методики частными случаями расположения шин и отпаяк. Она не пригодна для расчета гибких проводов при действии ветра под углом к пролету и различном взаимном расположении проводов шин и отпаяк в распределительных устройствах (РУ). Данная методика не применима также для расчета сил, действующих на электрические аппараты и обусловленных влиянием отпаяк в различных режимах климатических воздействий.

Примерами труднорешаемых или вовсе нерешаемых существующей методикой задач служат расчет отклонений гибких шин под действием ветра при наличии отпаяк и разности высот подвеса, определение составляющих тяжения в трех взаимно перпендикулярных направлениях в любой точке провода, расчет стрел провеса гибких шин с длинными гирляндами изоляторов и т. д. Более удобным в таких случаях становится использование векторного метода расчета. Однако существующие методы расчета проводов ВЛ, основанные на расчетной модели провода в виде нерастяжимой нити, несмотря на строгий подход к решению поставленной задачи расчета пространственного положения проводов, определяют механические напряжения по уравнению состояния.

Более точный расчет механических напряжений возможен при представлении проводов гибкой упругой нитью, что позволяет кардинальным образом решить задачу учета упругих и температурных удлинений провода в различных режимах климатических воздействий. Поэтому в основу разработанного в БНТУ векторно-параметрического метода механического расчета гибкой ошиновки РУ и проводов ВЛ положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити [5–7].

### **Векторно-параметрический метод механического расчета гибкой ошиновки РУ и проводов ВЛ**

Задача механического расчета проводов сводится к решению уравнений статики гибкой нити, составленных в векторно-параметрической форме  $\bar{R}(s_0)$ , где  $\bar{R}$  – радиус-вектор в декартовой системе координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $s_0$  – дуговая координата, представляющая собой длину участка провода до растяжения и при нулевой температуре  $t = 0$ . Они вытекают из векторно-параметрических уравнений динамики гибкой нити, в которых производные по времени принимаются равными нулю [7], и записываются в матричной форме

$$\|W\| \cdot \left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} \right\| = -\|\bar{p}\|, \quad (1)$$

где

$$\|W\| = \begin{vmatrix} \lambda^2 + b^2 \left( \frac{dx}{ds_0} \right)^2 & b^2 \frac{dx}{ds_0} \cdot \frac{dy}{ds_0} & b^2 \frac{dx}{ds_0} \cdot \frac{dz}{ds_0} \\ b^2 \frac{dy}{ds_0} \cdot \frac{dx}{ds_0} & \lambda^2 + b^2 \left( \frac{dy}{ds_0} \right)^2 & b^2 \frac{dy}{ds_0} \cdot \frac{dz}{ds_0} \\ b^2 \frac{dz}{ds_0} \cdot \frac{dx}{ds_0} & b^2 \frac{dz}{ds_0} \cdot \frac{dy}{ds_0} & \lambda^2 + b^2 \left( \frac{dz}{ds_0} \right)^2 \end{vmatrix}; \quad \left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} \right\| = \begin{vmatrix} \frac{d^2 x}{ds_0^2} \\ \frac{d^2 y}{ds_0^2} \\ \frac{d^2 z}{ds_0^2} \end{vmatrix};$$

$$\|\bar{p}\| = \begin{vmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{vmatrix}; \quad p_x, p_y, p_z - \text{проекция вектора суммарной внешней распределен-}$$

ной нагрузки на оси координат на единицу длины провода;  $\lambda^2 = \frac{T}{1+e}$ ;

$b^2 = \frac{d^2 - \lambda^2}{(1+e)^2}$ ;  $d^2 = \frac{1}{\alpha_y (1+\alpha t)}$ ;  $T$  – модуль тяжения;  $e$  – относительное

удлинение элемента провода.

Величина  $s$  выражается через длину дуги  $s_0$  до растяжения и нагрева, которая остается неизменной в различных режимах. При этом считается, что растяжение провода и его температурное удлинение происходят по линейному закону

$$ds(T, t) = ds_0 (1 + \alpha t) (1 + \alpha_y T), \quad (2)$$

где  $ds(T, t)$  – длина элемента провода после растяжения и нагрева;  $ds_0$  – то же, до растяжения и нагрева при тяжении  $T = 0$  и температуре  $t = 0$ .

Относительное удлинение элемента провода вследствие растяжения и нагрева определяется по следующему выражению:

$$e = \frac{ds - ds_0}{ds_0} = \frac{ds}{ds_0} - 1. \quad (3)$$

Из него находится отношение

$$\frac{ds}{ds_0} = 1 + e,$$

которое подставляется в (2). После этого (2) преобразуется к виду  $T = f(e)$

$$T = \frac{e - \alpha t}{\alpha_y (1 + \alpha t)}.$$

Относительное удлинение зависит от координат провода. Длина элемента  $ds$  выражается через проекции вектора  $\bar{R}$  на оси координат

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$

и подставляется в (3)

$$e = \sqrt{\left(\frac{dx}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds_0}\right)^2} - 1.$$

В местах соединения гирлянд изоляторов, проводов, отпаяк, заградительных шаров и распорок действуют сосредоточенные нагрузки. Уравнения статики элементов проводов, на которые действуют совместно распределенные и сосредоточенные нагрузки, находятся из выражения

$$T \frac{d^2 \bar{R}}{ds^2} + \frac{dT}{ds} \frac{d\bar{R}}{ds} + \bar{q} + \frac{\bar{T}_o}{ds} + \frac{\bar{P}_c}{ds} = 0,$$

где  $T$  – тяжение проводов;  $\bar{T}_o$  – вектор тяжения отпаяк в точках их крепления к проводам;  $\bar{q}$  – суммарная распределенная нагрузка на провода;  $\bar{P}_c$  – вес зажимов, коромысел, распорок, шаров и шлейфов.

Входящие в (1) проекции  $p_x, p_y, p_z$  представляют собой суммарную распределенную и сосредоточенную нагрузки

$$\bar{p} = \bar{q} + \frac{\bar{T}_o + \bar{P}_c}{ds}.$$

Решение матричного уравнения (1) относительно матрицы старших производных имеет следующий вид:

$$\left\| \frac{d^2 \bar{R}}{ds^2} \right\| = \|W\|^{-1} \cdot \|\bar{p}\|.$$

Более простой вид имеют уравнения статики гибкой нити с малой стрелкой

$$\frac{H}{(1+e)^2} \cdot \frac{d^2 \bar{R}}{ds_0^2} + \bar{p} = 0.$$

Дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие статику гибкой упругой нити [5], являются нелинейными. Их численное решение производится разностным методом [8–10]. Система конечно-разностных уравнений решается на основе вложенных друг в друга итераций: относительно координат, тяжения или длины провода. При наличии ответвлений к электрическим аппаратам добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам РУ. Эти координаты являются функцией тяжения в отпайке, а оно в свою очередь зависит от положения провода.

### Результаты расчета

Численный метод механического расчета гибких проводов, реализованный в последней версии пакета компьютерных программ MR2.20, излагается в [9]. При его разработке учтены многочисленные предложения и замечания проектных организаций России и Беларуси, эксплуатирующих ранние версии пакета программ [10].

Расчеты [11] выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета ВЛ  $l = 400$  м, провод 264/34 АCSR с погонным весом  $q = 0,98$  даН/м,



площадь поперечного сечения  $F = 297,8 \text{ мм}^2$ , модулем упругости  $E = 7400 \text{ даН/мм}^2$ , тяжение в пролете без сфер  $H = 1490 \text{ даН}$ , суммарный вес шаров в пролете  $P = 35 \text{ даН}$ . В исходном режиме без шаров задавалось тяжение провода (троса), затем в пролете крепились шары. Пример расчета приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты механического расчета троса с заградительными шарами по различным методикам**  
**The results of mechanical calculation of a cable with aerial barrage balls according to various methods**

Пролет 400 м	Тяжение, даН	Методика	Стрела провеса на расстоянии от опоры, м			
			50	100	150	200 (макс.)
Без шаров ( $K = 1, K_f = 1$ )	1490	MR2.20	5,76	9,87	12,34	13,16
		Цепная линия	5,77	9,88	12,35	13,17
		Два слагаемых	5,76	9,88	12,35	13,17
		Парабола	5,76	9,87	12,33	13,15
Семь шаров через 50 м, суммарный вес 35 даН равномерно распределен по пролету ( $K = 1,089, K_f = 1,089$ )	1608	MR2.20	5,84	9,96	12,45	13,28
		Цепная линия	5,82	9,98	12,47	13,30
		Два слагаемых	5,81	9,97	12,47	13,30
		Парабола	5,81	9,96	12,45	13,28
Семь шаров через 50 м ( $K = 1,101, K_f = 1,102$ )	1623	Два слагаемых	5,82	9,99	12,50	13,33
		Парабола	5,82	9,98	12,48	13,31
Три шара через 100 м, суммарный вес 35 даН ( $K = 1,112, K_f = 1,119$ )	1640	MR2.20	5,79	10,08	12,48	13,38
		Парабола	5,76	10,03	12,45	13,37
Шары в центре, суммарный вес 35 даН ( $K = 1,137, K_f = 1,179$ )	1671	MR2.20	5,66	9,85	12,58	13,83
		Два слагаемых	5,66	9,85	12,59	13,85
		Парабола	5,66	9,84	12,57	13,82

Как видно из табл. 1, расчеты по всем методикам дают схожие результаты. Наиболее близкие – в случае представления провода цепной линией и использования двух слагаемых разложения в ряд при расчете стрел провеса. Представление провода параболой дает абсолютную погрешность в расчетах всего пару сантиметров. Тяжение провода при подвешивании заградительных шаров рассчитывалось по уравнению состояния и совпадает с результатами расчета по программе MR2.20. При известных значениях составляющих сосредоточенных сил можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Перемещение шаров вдоль пролета приводит к изменению тяжения и стрел провеса. При числе шаров семь и более можно их вес равномерно распределять по пролету. При этом абсолютная погрешность составляет около 3 см. Смещение всех шаров к центру увеличивает стрелу провеса на 67 см (на 5,1 %). При действии ветровой и гололедной нагрузок, при уменьшении температуры и увеличении веса сосредоточенной нагрузки погрешность в расчете стрел провеса будет расти, тяжение может выйти за пределы допустимого значения. В этом случае более правильный результат дает компьютерная программа MR2.20, которая позволяет точно определить составляющие сосредоточенных сил по всем направлениям.

### ВЫВОДЫ

1. В общем случае в расчетах нагрузок от заградительных шаров нельзя их заменять распределенной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к неверным результатам. Такая замена допустима только при большом числе и малой массе нагрузок.

2. Выведены формулы для определения стрел провеса при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил  $K_p$ . Получена приемлемая точность механического расчета при использовании принятой в проектной практике модели провода в виде параболы при правильном определении составляющих сосредоточенных сил.

3. Получено уравнение состояния провода с учетом весовых и ветровых нагрузок, а также коэффициентов нагрузки в двух плоскостях, зависящее от числа заградительных шаров. Выполненные расчеты обеспечивают приемлемую точность определения тяжений при различной загрузке пролета.

4. Разработан более точный векторно-параметрический метод расчета гибких проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов. Разработанная компьютерная программа позволяет точно определить составляющие сосредоточенных сил по всем направлениям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
4. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
5. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
6. Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпозиум. Польшая Академия наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988 г. № 3–19. С. 173–181.
7. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
8. Streluik, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streluik, I. I. Sergey, Y. V. Bladyko // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. P. 15–19.
9. Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1995. № 3–4. С. 21–29.
10. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И. И. Сергей [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66:

Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Международного семинара имени Ю. Н. Руденко. С. 404–410.

11. Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко, М. В. Абраменко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2017. Т. 1. С. 23.

Поступила 24.01.2018 Подписана в печать 20.03.2018 Опубликована онлайн 27.07.2018

#### REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energia Publ. 248 (in Russian).
2. Idel'chik V. I. (1989) *Electrical Systems and Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 592 (in Russian).
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107> (in Russian).
4. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian).
5. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions*, (8), 8–14 (in Russian).
6. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the 1<sup>st</sup> International Symposium. Zakopane, 10–12 November 1988. Zakopane*, (3–19), 173–181 (in Russian).
7. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Action Analysis for Ice, Wind and Electro Dynamic Loads in Spans with Arbitrary Wire Layout. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
8. Streliuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf, Lublin (Poland), 7–8 Sept. Lublin: Lublin Technical University*, 15–19.
9. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Units of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).
10. Sergei I. I., Ponomarenko E. G., Bladyko Yu. V., Klimkovich P. I. (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamical Calculation of Flexible Current-Carrying Structures. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue 66. Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar. Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 404–410 (in Russian).
11. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Abramenko M. V. (2017) Mechanical Calculation of Flexible Wires with Aerial Warning Spheres. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, and Economics. Materials of the 15<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 23 (in Russian).

Received: 24 January 2018

Accepted: 20 March 2018

Published online: 27 July 2018