

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>

УДК 621.315.176

## Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах

Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Климатические условия и нагрузки на провода и тросы воздушных линий рассчитываются согласно техническому кодексу установившейся практики ТКП 339–2011 и Правилам устройства электроустановок (седьмое издание). Авиационные заградительные шары-маркеры рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, действующие на провод. В статье представлен механический расчет гибких проводов пролета воздушных линий, в котором устанавливаются заградительные шары. Приведены формулы определения стрел провеса при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При этом учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Получены уравнения состояния, учитывающие весовые и ветровые нагрузки на провод, а также коэффициенты нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров. Выполнены расчеты стрел провеса и тяжений при различной нагрузке пролета. При действии ветровой и гололедной нагрузок тяжение и стрелы провеса возрастают, в гололедном режиме тяжение вышло за пределы допустимого значения. Рассмотрен случай появления дополнительной сосредоточенной нагрузки в пролете.

**Ключевые слова:** стрела провеса, тяжение, уравнение состояния, пролет, ветер, гололед, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>

## Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes

Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** Climatic conditions and loads on wires and cables of overhead lines are calculated in accordance with the Technical Code of the Established Practice of TCP 339–2011 and the seventh

---

### 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

### Address for correspondence

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

---

edition of Electrical Installation Rules. Aviation aerial barrage balls are considered as concentrated loads acting on the wire. The article deals with the mechanical calculation of flexible wires of overhead lines, in which barrage balls warning spheres are installed. The formulas for determining the sag are given for a different number of barrage balls as a function of their number and the coefficient of concentrated forces. This takes into account the difference in suspension heights, tension insulators strings, wind and ice loads. Equations of state are obtained that took into account the weight and wind loads on the wire, as well as the load factors in two planes, depending on the number of barrage balls. Calculations of sag and tension for different span loads have been performed. With the action of wind and ice loads, the tensions and sags increase, in the ice regime the tension has exceeded the permissible value. The case of the appearance of an additional concentrated load in the span is considered.

**Keywords:** sag, tension, equation of state, span, wind, ice, load factor

**For citation:** Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36> (in Russian)

## Введение

Согласно ТКП 339–2011 [1], введенному в Республике Беларусь с 1 декабря 2011 г., при расчете воздушных линий (ВЛ) и их элементов должны учитываться климатические условия – ветровое давление, толщина стенки гололеда, температура воздуха, степень агрессивного воздействия окружающей среды, интенсивность грозовой деятельности, пляска проводов и тросов, вибрация. Данный технический кодекс установившейся практики утвержден постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 23 августа 2011 г. № 44, внесен Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь в Реестр государственной регистрации от 16.09.2011 № 1087. Параграф 5.3 «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ» [1] введен взамен параграфа 2.5 «Воздушные линии электропередачи напряжением 1 кВ» Правил устройства электроустановок (ПУЭ, шестое издание) [2], действовавших до этого в Беларуси.

Параграф 5.3.5 «Климатические условия и нагрузки» [1] в части расчетов ветровых и гололедных нагрузок полностью совпадает с параграфом «Климатические условия и нагрузки» ПУЭ (седьмое издание) [3], утвержденных приказом Министерства энергетики России от 08.07.2002 № 204 и введенных в Российской Федерации с 01.01.2003.

Однако ни один из вышеперечисленных документов не учитывает ветровые и гололедные нагрузки на все конструктивные элементы ВЛ. Отсутствует расчет ветровой нагрузки на гирлянды изоляторов, покрытые гололедом. Не показано, как рассчитывать нагрузки от ветра и гололеда на распорки, авиационные заградительные шары-маркеры, шлейфы и другие сосредоточенные нагрузки. Цель статьи – описание методики механического расчета проводов и тросов воздушных линий с заградительными шарами в различных режимах климатических воздействий. Авиационные заградительные шары рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, которые нельзя заменять распределенными по длине пролета, так как это приводит к большим погрешностям в расчетах стрел провеса [4–6].

По условиям воздействия ветра на пролет ВЛ, согласно [1], различают три типа местности:

А – открытые побережья озер, водохранилищ и другие открытые местности (в России – еще открытые побережья морей, пустыни, степи, лесостепи, тундра [3]);

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой не менее  $2/3$  высоты опор;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м, просеки в лесных массивах с высотой деревьев более высоты опор, орографически защищенные извилистые и узкие склоновые долины и ущелья.

Рассмотрим определение климатических нагрузок, действующих на провода и тросы, при расчете по методу допускаемых напряжений, а также варианты расчета стрел провеса и решения уравнения состояния провода в различных конструкциях.

### Расчет ветровой нагрузки на провода и тросы

Нормативная погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу (тросу), для каждого рассчитываемого условия определяется по формуле [1]

$$q_w^H = \alpha_w K_l C_x [K_w W] F \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где  $\alpha_w$  – коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ;  $K_l$  – коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления;  $K_w$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления в зависимости от типа местности и высоты расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов;  $W$  – нормативное ветровое давление в рассматриваемом режиме, зависящее от ветрового района;  $[K_w W]$  – округление до целого;  $F$  – площадь продольного диаметрального сечения 1 м провода (при гололеде – с учетом условной толщины стенки гололеда  $b_y$ );  $\varphi$  – угол между направлением ветра и осью ВЛ (при расчете проводов и тросов ветер следует принимать направленным под углом  $90^\circ$  к оси ВЛ).

Высота расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов  $h_{пр}$  для габаритного пролета

$$h_{пр} = h_{ср} - \frac{2}{3} f,$$

где  $h_{ср}$  – среднеарифметическое значение высоты крепления проводов к изоляторам или среднеарифметическое значение высоты крепления тросов к опоре, отсчитываемое от отметок земли в местах установки опор;  $f$  – стрела провеса провода или троса в середине пролета при высшей температуре.

Ветровое давление определяется по формуле

$$W = 40 \left[ \frac{v^2}{64} \right],$$

где  $v$  – скорость ветра.

Площадь продольного диаметрального сечения 1 м провода (троса) с гололедом [1]

$$F = (d + 2[K_i K_d b_y]) \cdot 10^{-3},$$

где  $d$  – диаметр провода, мм;  $K_i$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте;  $K_d$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра провода;  $b_y$  – условная толщина стенки гололеда, мм (принимается по региональному районированию ветровых нагрузок при гололеде), при отсутствии региональных карт и данных наблюдений  $b_y = b_s$ ;  $b_s$  – нормативная толщина стенки гололеда, мм (следует принимать в соответствии с картой районирования территории по толщине стенки гололеда).

Расчетная ветровая нагрузка на провода (тросы) при механическом расчете проводов и тросов по методу допускаемых напряжений

$$q_z = q_W^H \gamma_{hw} \gamma_p \gamma_f,$$

где  $\gamma_{hw}$  – коэффициент надежности по ответственности;  $\gamma_p$  – региональный коэффициент по ветру;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по ветровой нагрузке.

### Расчет гололедных нагрузок на провода и тросы

Нормативная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода и трос определяется по формуле [1]

$$q_{гол}^H = \pi b(d + b) \rho g \cdot 10^{-6},$$

где  $b = [K_i K_d b_s]$  – толщина стенки гололеда с учетом поправок на высоту и диаметр провода, с округлением до целого;  $\rho$  – плотность льда, принимаемая в СНГ 900 кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения.

Расчетная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода (троса) при механическом расчете проводов и тросов по методу допускаемых напряжений [1]

$$q_{г.п} = q_{гол}^H \gamma_{hw} \gamma_p \gamma_f \gamma_d,$$

где  $\gamma_p$  – региональный коэффициент по гололеду;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по гололедной нагрузке;  $\gamma_d$  – коэффициент условий работы, равный 0,5.

### Расчет результирующей весовой нагрузки на провод

В общем случае результирующая погонная весовая нагрузка на провод, покрытый гололедом

$$q_y = N(q + q_{г.л.}) + q_p(1 + 0,01b),$$

где  $N$  – число расщепленных проводов в фазе (при отсутствии расщепления и для тросов  $N = 1$ );  $q$  – погонный вес одного провода (троса);  $q_p = P_p/l_p$  – распределенная весовая нагрузка от распорок (при отсутствии расщепления и для тросов  $q_p = 0$ );  $P_p$  – вес распорок в узле;  $l_p$  – расстояние между распорками.

Увеличение веса распорок, покрытых гололедом, на  $0,01bq_p$  принято согласно Указаниям по механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ 35–500 кВ.

### Расчет нагрузок на гирлянду изоляторов

Расчетная ветровая нагрузка на 1 м гирлянды изоляторов определяется по формуле [1]

$$q_{гз} = C_x [K_w W] F_n \gamma_{нв} \gamma_p \gamma_f,$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления цепи изоляторов,  $C_x = 1,2$ ;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по ветровой нагрузке,  $\gamma_f = 1,3$ ;  $F_n$  – площадь диаметрального сечения 1 м цепи гирлянды изоляторов

$$F_n = 0,7 D_n H_n n_n N_n \cdot 10^{-6} / l_g;$$

$D_n$  – диаметр тарелки изолятора, мм;  $H_n$  – строительная высота изолятора, мм;  $n_n$  – число изоляторов в цепи;  $N_n$  – число цепей изоляторов в гирлянде;  $l_g$  – длина гирлянды изоляторов.

Погонная весовая нагрузка на гирлянду изоляторов, покрытую гололедом

$$q_{гв} = P_g N_n (1 + K_{гг}) / l_g,$$

где  $P_g$  – вес одной цепи гирлянды изоляторов;  $K_{гг}$  – коэффициент увеличения веса гирлянды изоляторов, покрытой гололедом (согласно Указаниям по механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ 35–500 кВ  $K_{гг} = 0$  – при отсутствии гололеда,  $K_{гг} = 0,3$  – при наличии гололеда,  $K_{гг} = 0,5$  – при толщине стенки гололеда  $b > 10$  мм).

В ранних версиях программы механического расчета проводов MR2.20 учитывалось увеличение площади диаметрального сечения гирлянды изоляторов, покрытой гололедом [7]. Гирлянда представлялась цилиндром, а увеличение ее веса из-за гололеда давало равномерно распределенное по длине гирлянды увеличение диаметра цилиндра. В настоящее время это уточнение не применяется, так как расчетная нагрузка на гирлянду от ветрового действия возросла за счет использования коэффициента лобового сопротивления цепи изоляторов и коэффициента надежности по ветровой нагрузке, больших единицы.

### Расчет нагрузок на заградительные шары

При определении суммарной ветровой нагрузки на заградительные шары  $P_z$  предлагается использовать формулу (1) с подстановкой площади продольного диаметрального сечения шаров с равномерно распределенным по поверхности гололедом

$$F_{\text{ш}} = \pi n(D + 2b)^2 \cdot 10^{-6} / 4,$$

где  $D$  – диаметр заградительного шара, мм;  $n$  – число заградительных шаров в пролете.

Тогда ветровая нагрузка на заградительные шары

$$P_z = \alpha_w K_l C_x [K_w W] F_{\text{ш}}.$$

Вес заградительных шаров, равномерно покрытых гололедом:

$$P_y = P + \frac{\pi}{6} \cdot [(D + 2b)^3 - D^3] n \rho g \cdot 10^{-9} = P + \pi b [D^2 + 2Db + 4b^2 / 3] n \rho g \cdot 10^{-9},$$

где  $P$  – суммарный вес заградительных шаров в пролете.

### Расчет троса с заградительными шарами

Максимальная стрела провеса троса с заградительными шарами [4]

$$f_0 = y_0 = \frac{ql^2 K_f}{8H}, \quad (2)$$

где  $q$  – погонный вес провода;  $l$  – длина пролета;  $H$  – тяжесть в проводе (горизонтальная составляющая);  $K_f$  – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием заградительных шаров,

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

$K_p = \frac{P}{ql}$  – коэффициент сосредоточенных сил;  $P$  – суммарный вес заградительных шаров в пролете;  $n$  – число заградительных шаров, равномерно расположенных по длине пролета.

Уравнение состояния троса для перехода к другому режиму, один из которых исходный (с индексом 0), имеет вид

$$\alpha_y H - \frac{(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \alpha_y H_0 - \frac{(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0, \quad (3)$$

где  $\alpha_y = \frac{1}{EA}$  – коэффициент упругого удлинения провода;  $E$  – модуль упругости провода;  $A$  – сечение провода;  $\alpha$  – коэффициент температурного удлинения провода;  $t$  – температура провода;  $K$  – коэффициент нагрузки [4],

$$K^2 = 1 + 2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{n+1} \right) K_p + \left( 1 + \frac{2}{n} \right) K_p^2.$$

### Пролет с двумя натяжными гирляндами изоляторов

Вводим обозначения:

$K_B = \frac{q_r}{q}$  – кратность веса натяжной гирлянды изоляторов относительно

веса провода;

$K_r = \frac{l_r}{l}$  – кратность длины натяжной гирлянды изоляторов относительно

длины пролета.

Тогда коэффициент, учитывающий наличие натяжных гирлянд [5]:

$$\delta = \left( \frac{q_r}{q} - 1 \right) \cdot \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_B - 1) K_r^2.$$

Коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием двух натяжных гирлянд изоляторов и заградительных шаров [5]:

$$K_f = 1 + 4\delta + K_p \left( 1 + \frac{1}{n} \right).$$

Уравнение состояния провода имеет вид (3) с подстановкой коэффициента нагрузки

$$K^2 = (1 - 2K_r)(1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \left[ 12K_B K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_B K_r \right) + 2K_p \left( 1 + 6\delta + \frac{1}{n+1} \right) + K_p^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

### Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок

При  $n$  заградительных шарах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения в двух плоскостях определяются по формулам:

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H}; \quad z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H}, \quad (4)$$

где  $q_y, q_z$  – погонная нагрузка на провод по осям  $y, z$ ;  $K_{fy}, K_{fz}$  – коэффициент увеличения отклонений по осям  $y, z$ , обусловленный наличием сосредоточенных сил и гирлянд изоляторов:

$$K_{fy} = 1 + 4\delta_y + K_{py} \left( 1 + \frac{1}{n} \right); \quad K_{fz} = 1 + 4\delta_z + K_{pz} \left( 1 + \frac{1}{n} \right);$$

$$\delta_y = \left( \frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \cdot \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_{By} - 1) K_r^2; \quad \delta_z = \left( \frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \cdot \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 = (K_{Bz} - 1) K_r^2;$$

$$K_{Py} = \frac{P_y}{q_y l}; \quad K_{Pz} = \frac{P_z}{q_z l}; \quad K_{By} = \frac{q_{ry}}{q_y}; \quad K_{Bz} = \frac{q_{rz}}{q_z}; \quad K_r = \frac{l_r}{l};$$

$q_{ry}, q_{rz}$  – погонная нагрузка на натяжную гирлянду изоляторов от веса и ветра;  $P_y, P_z$  – суммарная нагрузка от заградительных шаров по осям  $y, z$ .

Максимальная стрела провеса может быть найдена по формуле

$$f_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}. \quad (5)$$

Уравнение состояния провода (троса) записывается в виде [6]

$$\alpha_y H - \frac{\Sigma(qK)^2 l^2}{24H^2} + \alpha t = \alpha_y H_0 - \frac{\Sigma(q_0 K_0)^2 l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0, \quad (6)$$

где  $\Sigma(qK)^2 = (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2$ ;

$$K_y^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[ 12K_{By} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{By} K_r \right) + 2K_{Py} \left( 1 + 6\delta_y + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Py}^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right];$$

$$K_z^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[ 12K_{Bz} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{Bz} K_r \right) + 2K_{Pz} \left( 1 + 6\delta_z + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Pz}^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

При наличии натяжных гирлянд изоляторов и учете ветровой нагрузки погрешность расчета возрастает из-за несовпадения формы системы «гирлянда изоляторов – провод» с параболой, отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [8] доказано увеличение погрешности с увеличением длины гирлянды изоляторов. Точное определение возможно при применении векторно-параметрического метода расчета статики [8, 9], который реализован в компьютерных программах механического расчета [10].

### Расположение точек подвеса провода на разных высотах

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 нагрузки могут быть приняты с учетом уклона. В формулы вместо длины гирлянды  $l_r$  подставляется  $l_0 = l_r \cos\theta$ , где  $\theta$  – угол наклона пролета,  $\operatorname{tg}\theta = h/l$ ;  $h$  – разность высот подвеса проводов.

Максимальная стрела провеса определяется по (2), в которой коэффициент увеличения стрелы провеса находится из выражения [5]

$$K_f = \frac{1 + 4\delta + K_p \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta},$$

$$\text{где } \delta = \left(\frac{q_r}{q} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_B - 1)K_r^2; \quad K_B = \frac{q_r}{q}; \quad K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos \theta}{l}; \quad K_p = \frac{P \cos \theta}{ql}.$$

Уравнение состояния провода для перехода к другому режиму, один из которых исходный (с индексом 0), имеет вид

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

где

$$K^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[ 12K_B K_r^2 \left(1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_B K_r\right) + 2K_p \left(1 + 6\delta + \frac{1}{n+1}\right) + K_p^2 \left(1 + \frac{2}{n}\right) \right].$$

### Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок при расположении точек подвеса провода на разных высотах

При совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок стрелы провеса и горизонтальные отклонения находят независимо в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [5]. При  $n$  заградительных шарах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения в двух плоскостях определяются по формулам (4), в которые подставляются коэффициенты увеличения стрелы провеса:

$$K_{fy} = \frac{1 + 4\delta_y + K_{py} \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta}; \quad K_{fz} = \frac{1 + 4\delta_z + K_{pz} \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta};$$

$$\delta_y = \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_{By} - 1)K_r^2; \quad \delta_z = \left(\frac{q_{rz}}{q_z} - 1\right) \cdot \left(\frac{l_0}{l}\right)^2 = (K_{Bz} - 1)K_r^2;$$

$$K_{By} = \frac{q_{ry}}{q_y}; \quad K_{Bz} = \frac{q_{rz}}{q_z}; \quad K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos \theta}{l}; \quad K_{py} = \frac{P_y \cos \theta}{q_y l}; \quad K_{pz} = \frac{P_z \cos \theta}{q_z l}.$$

Максимальная стрела провеса может быть найдена по формуле (5). Уравнение состояния провода (троса) записывается в виде [5]

$$\frac{\alpha_y H}{\cos \theta} - \frac{\left[ (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2 \right] l^2 k_\phi^2}{24 H^2} + \alpha t =$$

$$= \frac{\alpha_y H_0}{\cos \theta} - \frac{\left[ (q_{y0} K_{y0})^2 + (q_{z0} K_{z0})^2 \right] l^2 k_{\phi 0}^2}{24 H_0^2} + \alpha t_0,$$

где  $k_\phi = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \phi}$ ;  $\operatorname{tg} \phi = \frac{q_z K_z}{q_y K_y}$ ;

$$K_y^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) +$$

$$+ \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[ 12K_{By} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{By} K_r \right) + 2K_{Py} \left( 1 + 6\delta_y + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Py}^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right];$$

$$K_z^2 = (1 - 2K_r) \cdot (1 + 4K_r) +$$

$$+ \frac{1}{1 - 2K_r} \cdot \left[ 12K_{Bz} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{Bz} K_r \right) + 2K_{Pz} \left( 1 + 6\delta_z + \frac{1}{n+1} \right) + K_{Pz}^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

При углах  $\theta \leq 8^\circ$  для вычисления коэффициентов нагрузки и коэффициентов увеличения стрел провеса можно пользоваться формулами (4)–(6). При таких углах погрешность от неучета наклона не превышает 1 % ( $\cos 8^\circ = 0,99$ ).

Полученные формулы расчета стрел провеса и тяжений проводов с заградительными шарами могут быть распространены на другие конструкции с сосредоточенными нагрузками. Заменять их распределенной нагрузкой простым делением суммарных нагрузок на длину пролета можно в случае их большого количества и малого веса.

### Результаты механического расчета провода с заградительными шарами

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета  $l = 400$  м; разность высот подвеса  $h = 20$  м; провод 264/34 ACSR с погонным весом  $q = 0,98$  даН/м, площадью поперечного сечения  $A = 297,8$  мм<sup>2</sup>, модулем упругости  $E = 7400$  даН/мм<sup>2</sup>; исходное тяжение в пролете без шаров  $H = 1490$  даН при температуре  $t = 10$  °С, без ветра и гололеда; суммарный вес заградительных шаров в пролете  $P = 35$  даН ( $n = 7$  шаров по 5 даН диаметром  $D = 0,6$  м). Рассматривался пролет с разными высотами подвеса, ветром и гололедом, с изменением тяжения в разных режимах климатических нагрузок и при различном нагружении пролета. 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

## The results of mechanical calculation of a cable with aerial barrage balls

Конфигурация пролета	Климатические условия	Коэффициент		Тяжение, даН	Максимальная стрела провеса, м
		нагрузки	увеличения стрелы провеса		
Без шаров	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,000$	$K_{fy} = 1,001$	1490	13,19
Суммарный вес 7 шаров равномерно распределен по пролету		$K_y = 1,089$	$K_{fy} = 1,089$	1608	13,31
Шары в центре, суммарный вес 35 даН		$K_y = 1,136$	$K_{fy} = 1,180$	1670	13,87
7 шаров через 50 м, суммарный вес 35 даН	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,100$	$K_{fy} = 1,103$	1623	13,35
	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 75$ °С			1410	15,37
	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = -40$ °С			1860	11,64
	$v = 30$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,100$ ;	$K_{fy} = 1,103$ ;	2865	14,57
	$v = 15$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_z = 1,285$	$K_{fz} = 1,291$	1740	13,46
	$v = 15$ м/с; $b = 20$ мм; $t = -5$ °С	$K_y = 1,164$ ; $K_z = 1,106$	$K_{fy} = 1,167$ ; $K_{fz} = 1,109$	4884	15,92
7 шаров через 50 м, суммарный вес 35 даН, один человек весом 100 даН в центре	$v = 0$ м/с; $b = 0$ мм; $t = 10$ °С	$K_y = 1,499$	$K_{fy} = 1,612$	2130	14,87
Один человек весом 100 даН в центре, без шаров		$K_y = 1,400$	$K_{fy} = 1,510$	2006	14,79
Один человек весом 100 даН на расстоянии 100 м, без шаров		$K_y = 1,311$	$K_{fy} = 1,255$	1895	13,01

При числе шаров семь и более можно их вес равномерно распределять по пролету. При этом абсолютная погрешность в определении стрелы провеса составляет около 4 см при погрешности в тяжении примерно 1 %.

Перемещение шаров вдоль пролета приводит к изменению тяжения и стрел провеса. Смещение всех шаров к центру увеличивает тяжение на 3 %, а стрелу провеса – на 52 см (при неизменном тяжении – на 90 см).

При действии ветровой и гололедной нагрузок тяжение и стрелы провеса возрастают, в гололедном режиме тяжение вышло за пределы допустимого значения. При уменьшении температуры отмечаются рост тяжения и уменьшение стрелы провеса.

При увеличении веса сосредоточенной нагрузки тяжение и стрелы провеса возрастают. Для примера в табл. 1 включен расчет, когда в пролете появляется дополнительная нагрузка в виде человека весом 100 даН. Такая нагрузка при наличии заградительных шаров увеличит тяжение на 507 даН (на 31 %), а стрелу провеса – на 1,52 м (на 11 %). При отсутствии заградительных шаров появление нагрузки в виде человека весом 100 даН увеличит тяжение на 516 даН (на 35 %), а стрелу провеса – на 1,6 м (на 12 %).

### ВЫВОДЫ

1. Получены формулы для расчета климатических нагрузок от ветра и гололеда на провода (тросы), гирлянды изоляторов и заградительные шары.

2. В расчетах нагрузок от заградительных шаров нельзя их заменять распределенной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к большой погрешности. Такая замена допустима только при количестве шаров семь и более. При их меньшем числе нужно учитывать как сосредоточенные нагрузки, применяя полученные коэффициенты увеличения стрел провеса и коэффициенты нагрузки.

3. Получены формулы для определения стрел провеса и отклонений провода при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил  $K_p$ . При этом учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки.

4. Получены уравнения состояния провода с учетом весовых и ветровых нагрузок при разных высотах подвеса, а также коэффициентов нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловых и аккумуляторных, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Минск: филиал «Информационно-издательский центр» ОАО «Экономэнерго», 2011. 593 с.
2. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергосервис, 2009. 695 с.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
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 Междунар. семинара имени Ю. Н. Руденко. С. 308–310.

Поступила 05.02.2018 Подписана в печать 24.04.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

## REFERENCES

1. TCP 339–2011 (02230) (2011) *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Air Transmission Lines and Current Wires, Distribution and Transformer Substations, Electric and Battery Power Plants, Electrical Installations for Residential and Public Buildings. Rules of the Device and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Testing*. Minsk, IPC Economenergo Publ. 593 (in Russian).
2. *Electrical Installation Rules* (1986) 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 648 (in Russian).
3. *Electrical Installation Rules* (2009) 7<sup>th</sup> ed. Moscow, Energoservis Publ. 695 (in Russian).
4. 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 CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
5. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Loads are Replaced by Distributed Ones Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
6. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
7. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Plants of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (3–4), 21–29 (in Russian).
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars under Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (8), 8–14 (in Russian).
9. 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 CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
10. Sergei I. I., Ponomarenko E. G., Bladyko Yu. V., Klimkovich P. I (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamics 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, Iss. 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar named of Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 404–410 (in Russian).

Received: 5 February 2018

Accepted: 24 April 2018

Published online: 30 January 2019