

Уточненная методика вычисления длительно допустимых токов неизолированных проводов воздушных линий электропередачи и контактных сетей

ФИГУРНОВ Е.П., ЖАРКОВ Ю.И., ХАРЧЕВНИКОВ В.И

РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

Предложенная методика обобщает опубликованные и оригинальные отечественные и зарубежные теоретические и экспериментальные материалы по вопросам нагрева и охлаждения витых и фасонных проводов воздушных линий электропередачи и электрических сетей и использует те из них, которые в наибольшей мере отвечают фундаментальным законам теплопередачи. Приведены формулы для вычисления площади поверхности для витых и фасонных проводов. Дана обобщенная формула для конвективного коэффициента теплоотдачи с учетом направления и скорости ветра, в том числе для противогололедного режима. Параметры этой формулы не совпадают с существующими, поскольку основаны на экспериментальных данных для витых и фасонных проводов, а не для круглых труб. Приведена формула для вычисления мощности теплообмена при солнечной радиации. Дана обобщенная формула для вычисления длительно допустимого тока, все составляющие которой имеют подробное описание в статье.

К л ю ч е в ы е с л о в а: линия электропередачи, электрические сети, контактные сети, длительно допустимый ток, коэффициент теплоотдачи, площадь поверхности, солнечная радиация

Длительная токовая нагрузка неизолированных проводов линий электропередачи, воздушных электрических сетей, контактных сетей электрифицированного железнодорожного и городского транспорта не должна превышать предельных значений, обусловленных допустимым нагревом этих проводов. Их температура ограничивается требованиями сохранения механической прочности проводов или сохранения допустимых габаритов, т.е. нормированных минимальных расстояний от проводов до земли, препятствий, пересечений и других объектов при расчетных метеорологических условиях. Из температур, ограниченных этими условиями, принимают ту, которая является наименьшей.

Уравнение теплового баланса основано на фундаментальных законах теплопередачи [1]. Для единицы длины неизолированного провода в длительно (установившемся) режиме оно представляется в виде известного равенства (Вт/м):

$$P_r + P_{л.с} = P_k + P_{л.о}, \quad (1)$$

где P_r – мощность, выделяемая в единице длины провода за счет активных потерь, Вт/м; P_k – мощность (тепловой поток) конвективной теплоотдачи с поверхности провода в окружающую среду; $P_{л.о}$ – мощность (результатирующий поток) теплообмена излучением (лучеиспусканием) между проводом и окружающей средой; $P_{л.с}$ – мощность (те-

пловой поток) солнечной радиации, поглощаемая проводом.

Мощность P_r вычисляют по [2]:

$$P_r = I^2 k_{\Pi} k_M r_{20} \cdot 10^{-3} [1 + \beta_r (t - 20)], \quad (2)$$

где I – ток провода, А; r_{20} – сопротивление единицы длины провода при температуре 20 °С и постоянном токе, Ом/км; t – температура провода, °С; β_r – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С; k_{Π} – коэффициент, учитывающий при переменном токе для проводов со стальным сердечником возрастание активных потерь за счет поверхностного эффекта; k_M – коэффициент, учитывающий при переменном токе для витых проводов со стальным сердечником возрастание активных потерь от гистерезиса и вихревых токов за счет продольного магнитного потока.

Значение β_r можно принимать округленно равным для алюминиевых и медных проводов 0,004, 1/°С, для стальных – 0,005, 1/°С. При постоянном токе для всех проводов и при переменном токе промышленной частоты для проводов без стального сердечника $k_{\Pi} = k_M = 1$. При переменном токе для проводов со стальным сердечником $k_{\Pi} = 1,00 \div 1,05$, а значение k_M принимают в зависимости от числа повивов алюминиевых проводников поверх стального сердечника: при одном повиве

1,15, при двух повивах 1,01–1,04, при трех повивах 1,05–1,10.

Полагая, что длительно допустимое значение тока $I = I_{\text{доп}}$ соответствует длительно допустимой температуре провода $t = t_{\text{доп}}$, из (1) и (2) получаем:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{P_{\text{к}} + P_{\text{л.о}} - P_{\text{л.с}}}{k_{\text{п}} k_{\text{м}} r_{20} \cdot 10^{-3} [1 + \beta_r (t_{\text{доп}} - 20)]}}. \quad (3)$$

При этом имеется в виду, что все составляющие числителя этого выражения так же определены при $t = t_{\text{доп}}$.

Если линия в каждой фазе содержит несколько различных проводов, соединенных параллельно, то для каждого i -го провода вычисляют по формуле (3) значение $I_{\text{доп}i}$ допустимого для него тока. Затем для каждого i -го провода находят отношение $I_{\text{доп}i} / k_i$, где k_i – коэффициент распределения тока фазы для i -го провода. В качестве длительно допустимого тока линии $I_{\text{доп}}$ принимают то из указанных отношений, которое оказывается наименьшим.

Расчетные температуры. Предельное значение длительно допустимой температуры проводов $t_{\text{доп}}$ по требованию сохранения допустимых габаритов вычисляют по специальной методике [2].

Длительно допустимую температуру проводов $t_{\text{доп}}$ по механической прочности принимают по [3] равной 70 °С или по стандартам (ГОСТ) на соответствующие виды проводов.

В качестве температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$ в нормальных условиях работы следует принимать наибольшее значение температуры для данной местности, ее абсолютный максимум для данного климатического района или верхнее рабочее значение по стандарту [4]. В противогололедном режиме в качестве такого максимума принимают наименьшую температуру окружающей среды $t_{\text{окр}}$, при которой гололед уже не образуется: с запасом – это плюс 1...2 °С.

Площадь поверхности провода. Расчеты, учитывающие законы теплопередачи [1], предполагают, что в них должно использоваться истинное значение площади поверхности F тела, участвующей в теплообмене. Между тем, в большинстве случаев до сих пор значение F , м²/м, вычисляют как для круглых труб в виде произведения $\pi D \cdot 10^{-3}$ где D – справочное значение диаметра описанной окружности провода, мм. Вычисленное таким образом значение площади охлаждения поверхности витого провода оказывается недопустимо преуменьшенным, например для провода А 50 в 1,33 раза, а для проводов АС 300 – в 1,42 раза.

Площадь поверхности единицы длины провода F , м²/м, численно равна его периметру Π , м. Периметр витых [5], а также витых и фасонных [6] проводов следует вычислять по формуле:

$$F = \Pi = \pi p_{\text{ф}} D \cdot 10^{-3} = \pi D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где $p_{\text{ф}}$ – коэффициент формы провода, определяемый по таблице; D – справочный диаметр описанной окружности провода, мм; $D_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр круглого провода, периметр которого равен действительному периметру некруглого провода ($D_{\text{э}} = \Pi / \pi = p_{\text{ф}} D$) мм.

Вид провода	Значение коэффициента формы провода $p_{\text{ф}}$
Витой	$\frac{d}{D} \left(\frac{n_{\text{н}} + 2}{2} \right)$
Контактные: фасонный фасонный овальный	1,045 1,1

Примечание: d , $n_{\text{н}}$ – справочные значения соответственно диаметра, мм, и числа проволок в наружном повиве витого провода

Если для витого провода число $n_{\text{н}}$ проволок наружного повива неизвестно, то его следует вычислять по формуле:

$$n_{\text{н}} = \pi \left(\frac{D}{d} - 1 \right), \quad (5)$$

с округлением полученного результата в меньшую сторону до ближайшего целого числа.

Например, для витого провода АС-120/19 имеем справочные значения $D = 15,2$ мм и $d = 2,4$ мм. По формуле (5) находим число проволок в наружном повиве. Округляем до целого числа в меньшую сторону и принимаем $n_{\text{н}} = 16$. По формуле, приведенной в таблице, находим коэффициент формы провода $p_{\text{ф}} = d(n_{\text{н}} + 2) / 2D = 2,4(16 + 2) / (2 \cdot 15,2) = 1,42$. Эквивалентный диаметр провода $D_{\text{э}} = p_{\text{ф}} D = 1,42 \cdot 15,2 = 21,6$ мм.

В качестве диаметра D контактного провода принимают полусумму горизонтального A и вертикального H его справочных размеров, мм.

Для проводов другой конфигурации, которые смогут использоваться в воздушных линиях электропередачи или контактной сети электрического транспорта, значение Π можно определить с помощью планиметра или, используя методику, сходную с [6], путем вывода соответствующих формул, а значения эквивалентного диаметра – как $D_{\text{э}} = \Pi / \pi$.

Конвективная теплоотдача. Значение $P_{\text{к}}$ вычисляют, используя закон Ньютона–Рихмана [1] с

учетом направления ветра и атмосферных условий (Вт/м):

$$P_K = k_V k_D \alpha_K F(t - t_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном по отношению к проводу направлении ветра, Вт/(м²·К); k_V – коэффициент, учитывающий направление ветра, принимаемый при его поперечном направлении равным 1, а при продольном 0,66 [7]; k_D – коэффициент, учитывающий атмосферные условия, при которых возможно образование гололеда, принимаемый при положительных температурах окружающей среды равным 1, а при возможных условиях образования гололеда вычисляемый по формуле:

$$k_D = 1,6 + 0,65e^{0,31t_{\text{окр}}}. \quad (7)$$

Среднее по поверхности провода значение bc определяют на основе теории подобия с помощью безразмерных чисел (чисел подобия). Для проводов, обтекаемых воздухом со скоростью 0,6 м/с и более, в качестве таковых используют числа Нуссельта Nu и Рейнольдса Re [1]:

$$Nu = \frac{\alpha_K l}{\lambda}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu}, \quad (8)$$

где l – характерный (определяющий) размер тела, обтекаемого воздухом, м; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); V – скорость потока воздуха, м/с; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с.

В диапазоне температур окружающего воздуха $t_{\text{окр}}$ от минус 20 °С до плюс 50 °С значения λ и ν хорошо аппроксимируются выражениями:

$$\begin{aligned} \lambda &= 2,44 \cdot 10^{-2} (1 + 0,0069t_{\text{окр}})^{0,5}; \\ \nu &= 13,75 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0069t_{\text{окр}}). \end{aligned} \quad (9)$$

В рассматриваемых расчетах, как правило, можно использовать их средние значения: $\lambda = 2,55 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К и $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В качестве характерного размера l принимают какой-либо из линейных размеров тела. Коэффициент теплоотдачи находят, используя выражения (8), на основании зависимости $Nu = f(Re)$, которую обычно представляют как $Nu = cRe^a$. Значения параметров a и c определяют экспериментально.

В этом случае получим, Вт/(м²·К):

$$\alpha_K = \frac{\lambda}{l} c Re^a. \quad (10)$$

Для витых и фасонных проводов принято, как правило, использовать те же самые значения коэф-

фициентов a и c , что и для круглых труб, хотя формально так делать нельзя, поскольку согласно теории подобия, на основе которой формируется зависимость $Nu = f(Re)$, между круглой трубой и витым или фасонным проводом отсутствует геометрическое подобие [1]. Отличия геометрического подобия вносят свои особенности в процесс конвекции, потому результаты расчетов с коэффициентами a и c , экспериментально найденными для круглых труб ($l = D$), не могут признаваться для тел другой конфигурации, строго говоря, ни правомерными, ни достоверными. Этот же вывод относится и к методу [8], в котором для всего диапазона реальных чисел Рейнольдса от 100 до 10⁵ применяется одно и то же значение параметров a и c .

В то же время известен прием, позволяющий использовать одинаковую функциональную зависимость $Nu = f(Re)$ для одиночных тел различной геометрической формы, таких как цилиндры, сферы, круглые и квадратные, а также другие различные профили труб и проволоки. Он заключается в том, что в выражениях (8) в качестве характерного размера l используется не диаметр D , как для круглых труб, а так называемая длина обтекания тела, которая определяется как отношение общей площади поверхности тела к максимальному периметру в плоскости, перпендикулярной потоку. Использование этого положения со ссылкой на первоисточники выполнено в [9, 10]. Для длинного провода любой формы при этом имеем (м):

$$l = 0,5\Pi = 0,5\pi D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

При таком характерном размере числа Nu и Re приобретают вид:

$$Nu = \frac{\alpha_K \pi D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}}{2\lambda}; \quad Re = \frac{\pi V D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}}{2\nu}. \quad (12)$$

Опытные точки зависимости $Nu = f(Re)$ для этого случая представлены на рис. 1 для круглых стержней, приведенные в [10] на основании международных данных, полученных в 11 исследованиях в разных странах в разные годы и обозначенные (○), а также для витых и фасонных проводов, полученные в наших опытах и обозначенные (▲) [Харчевников В.И.] и (■) [Петрова Т.Е.].

С тем чтобы число точек в каждом из массивов не оказывало влияния на конечный результат, их обработка осуществлялась отдельно. Для каждого из трех массивов опытных точек (○, ▲, ■) методом наименьших квадратов были аппроксимированы зависимости $Nu = f(Re)$ в виде функций $Nu = cRe^a$ для двух поддиапазонов числа Re . В качестве конечного обобщенного результата реко-

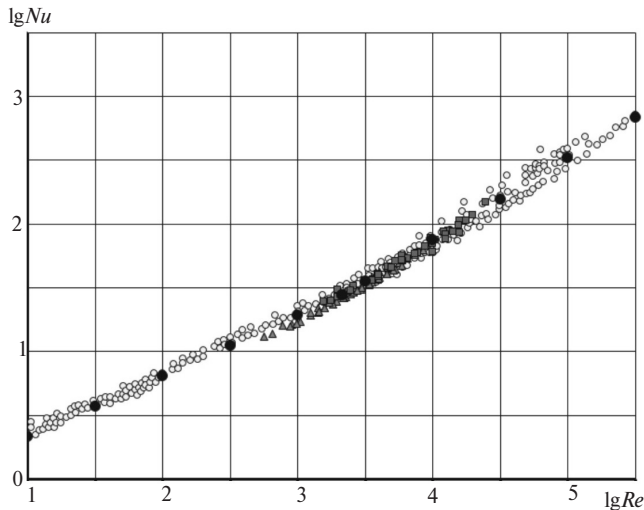


Рис. 1. Опытные (○, ▲, ■) и расчетные (●) значения зависимости $lgNu$ от $lgRe$

мендуются среднегеометрические значения коэффициентов a и c :

$$\begin{aligned} a=0,477, c=0,702 \text{ при } 10 \leq Re \leq 2,2 \cdot 10^3; \\ a=0,642, c=0,197 \text{ при } Re \leq 2,2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3,2 \cdot 10^5. \end{aligned} \quad (13)$$

Отличие коэффициентов a и c , а также поддиапазонов числа Re от приведенных в [7, 10] обусловлено дополнительным учетом данных (○, ■) и их обобщением с полученными в [7] путем определения среднегеометрических значений. Этим значениям a и c соответствует зависимость $Nu=f(Re)$, обозначенная на рис. 1 черными кружками (●).

Используя выражения (6), (10), (11) и (12), получаем:

$$\alpha_k = \frac{2\lambda}{\pi D_3 \cdot 10^{-3}} c Re^a; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_k &= k_V k_d \alpha_k \pi D_3 \cdot 10^{-3} (t - t_{окр}) = \\ &= 2\lambda k_V k_d c Re^a (t - t_{окр}). \end{aligned} \quad (15)$$

Поскольку отношение λ/v^a мало зависит от температуры, то вычисление выражений (14) и (15) допустимо выполнять при средних значениях λ и v . В этом случае:

$$\alpha_k = \frac{16,2c}{D_3} Re^a, \text{ Вт/м}^2\text{К}; Re = 105VD_3; \quad (16)$$

$$P_k = 0,051k_V k_d c Re^a (t - t_{окр}), \text{ Вт/м}. \quad (17)$$

Например, для провода АС-120/19 с расчетным диаметром $D=15,2$ мм, эквивалентным диаметром $D_3=21,6$ мм и допустимой температурой

$t = t_{доп} = 90$ °С при скорости ветра $V=0,6$ м/с и его продольном направлении ($k_V=0,66$), температуре окружающей среды $t_{окр}=40$ °С ($k_d=1$) по формулам (16) и (17) находим:

$$Re = 105 \cdot 0,6 \cdot 21,6 = 1361;$$

$$Re^{0,477} = 31,25;$$

$$\alpha_k = \frac{16,2 \cdot 0,702}{21,6} 31,25 = 16,5 \text{ Вт/(м}^2\text{К)};$$

$$P_k = 0,051 \cdot 0,66 \cdot 1 \cdot 0,702 \cdot 31,25 \cdot (90 - 40) = 36,9 \text{ Вт/м}.$$

Следует отметить, что при использовании в расчетах (вместо эквивалентного диаметра D_3) диаметра описанной окружности D (без множителя ρ_ϕ), т.е. принять $l=D$, то вместо формул (16) и (17) следует применять формулы (6), (8), (10).

Для сравнения укажем, что по формулам, приведенным в [2], имеем $Re = 618$, $\alpha_k = 18,2$ Вт/(м²К), $P_k = 31,8$ Вт/м. Снижение расчетного значения P_k по сравнению с полученным по формуле (17) ведет к снижению значения допустимого тока.

Теплообмен излучением между проводом и окружающей средой. Как известно, лучистый теплообмен между телами определяется потоком *результатирующего* излучения. Результирующее излучение представляет собой разность между лучистым потоком, падающим на данное тело, и лучистым потоком, который оно излучает [1]. Результирующий поток излучения $P_{л,1-2}$ для системы, состоящей из двух тел, и направленный от первого тела ко второму, в общем случае определяется выражением [1, п. 17.5]:

$$P_{л,1-2} = \frac{5,67 \bar{\varphi}_{1-2} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1 + \bar{\varphi}_{1-2} \left(\frac{1}{A_1} - 1 \right) + \bar{\varphi}_{2-1} \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right)}, \quad (18)$$

где F_1 – площадь поверхности единицы длины первого тела, м²/м; T_1, T_2 – абсолютные температуры поверхностей соответственно первого и второго тел ($T_1 > T_2$), К; $\bar{\varphi}_{1-2}, \bar{\varphi}_{2-1}$ – средние угловые коэффициенты излучения соответственно первого и второго тел; A_1, A_2 – коэффициенты поглощения соответственно первого и второго тел.

В свою очередь, средние угловые коэффициенты излучения равны:

$$\bar{\varphi}_{1-2} = \frac{P_{л.пад1}}{P_{л1}}; \bar{\varphi}_{2-1} = \frac{P_{л.пад2}}{P_{л2}}, \quad (19)$$

где $P_{л.пад1}$ – доля излучения тела 1 с площадью F_1 , которая попадает на тело 2, Вт/м; $P_{л.пад2}$ – доля излучения тела 2 с площадью F_2 , которая попадает

на тело 1, Вт/м; $P_{л1}$, $P_{л2}$ – полные потоки собственного излучения соответственно первого и второго тел, Вт/м.

Полагаем, что в системе теплообмена излучением «провод – окружающая среда» провод является первым телом, окружающая среда – вторым. Поскольку провод находится внутри окружающей среды, то все его собственное излучение полностью поглощается этой средой ($P_{л.пад1} = P_{л1}$), откуда $\bar{\varphi}_{1-2} = 1$. Поскольку размеры окружающей среды несоизмеримо больше размеров провода, то доля $P_{л.пад2}$, которая попадает на провод, исчезающе мала по сравнению $P_{л2}$. Это позволяет принять $\bar{\varphi}_{2-1} = 0$. Заменяя, как обычно, коэффициент A на коэффициент излучения ε и общее обозначение $P_{л1-2}$ на $P_{л0}$, получаем вместо (18) для допустимой температуры:

$$P_{л0} = 5,67\varepsilon\pi D_{\varnothing} \cdot 10^{-3} \left[\left(\frac{T_{доп}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] = \alpha_{л} \pi D_{\varnothing} \cdot 10^{-3} (T_{доп} - T_{окр}), \quad (20)$$

где $T_{доп}$, $T_{окр}$ – абсолютные значения соответственно допустимой температуры провода и расчетной температуры окружающей среды, К; $\alpha_{л}$ – коэффициент теплоотдачи за счет лучеиспускания, Вт/(м²·К):

$$\alpha_{л} = \frac{5,67\varepsilon}{T_{доп} - T_{окр}} \left[\left(\frac{T_{доп}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right]. \quad (21)$$

Значения коэффициентов ε для новых проводов и проводов, находящихся в эксплуатации более 1–2 лет, существенно отличаются из-за окисления и загрязнения. При вычислении допустимых токов обычно принимают значения ε : для медных проводов 0,8, для алюминиевых и сталеалюминиевых 0,6, для стальных оцинкованных 0,3.

Например, для провода АС 120/19 имеем: $D_{\varnothing} = 21,6$ мм; $\varepsilon = 0,6$; $T_{доп} = 90$ °С ($T_{доп} = 273 + 90 = 363$ К); $T_{окр} = 40$ °С ($T_{окр} = 273 + 40 = 313$ К). По формулам (20) и (21) находим $P_{л0} = 17,9$ Вт/м, $\alpha_{л} = 5,28$ Вт/(м²·К). Если неправомерно учитывать не эквивалентный диаметр D_{\varnothing} , а расчетный (описанный) диаметр $D = 15,2$ мм, то получим $P_{л0} = 12,6$ Вт/м. Снижение расчетного значения $P_{л0}$ ведет к занижению допустимого тока.

Теплообмен, обусловленный солнечной радиацией. Влияние солнечной радиации подробно рассмотрено в [2, 11, 12, 13]. В предлагаемой методике дополнительно учитываются действительная площадь поверхности облучаемого провода некруглого

сечения (вместо площади поверхности цилиндра) не только прямая, но и рассеянная солнечная радиация.

Как известно, лучистый поток (мощность) солнечной радиации $P_{пад}$, падающий на провод, состоит из прямой $P_{пад}^{(пр)}$, рассеянной $P_{пад}^{(рас)}$ и отраженной от земли $P_{пад}^{(отр)}$ составляющих [14]. Для круглого провода с периметром Π и эквивалентным диаметром D_{\varnothing} прямой поток солнечной радиации с учетом закона косинусов Ламберта [1] может быть представлен в виде [2, 12]:

$$P_{пад}^{(пр)} = k_H k_{мес} E^{(пр)} D_{\varnothing} \cdot 10^{-3} \sin \psi_c, \quad (22)$$

где k_H – коэффициент, учитывающий высоту прокладки линии над уровнем моря; $k_{мес}$ – коэффициент, учитывающий изменение солнечной радиации по месяцам года; $E^{(пр)}$ – интегральная поверхностная плотность потока энергии прямой солнечной радиации, Вт/м²; ψ_c – активный угол наклона солнечных лучей, зависящий от времени года, времени суток и географической широты местности.

Угол ψ_c зависит также от направления трассы линии относительно меридиана. Наибольшее влияние имеет место, если эта трасса направлена перпендикулярно меридиану. Однако и в этом случае изменение угла ψ_c при изменении широты местности от южных границ России до Северного полярного круга составляет не более $\pm 15\%$ от среднего значения. Вычисления показывают, что учет направления трассы линии приводит в результате к погрешности вычисления температуры провода или допустимых по нагреву токов, величина которой находится в пределах точности расчетов.

Рассеянная солнечная радиация падает на всю поверхность круглого провода, поэтому для нее мощность имеет очевидное выражение:

$$P_{пад}^{(рас)} = k_H k_{мес} E^{(рас)} D_{\varnothing} \cdot 10^{-3}, \quad (23)$$

где $E^{(рас)}$ – интегральная поверхностная плотность потока энергии рассеянной солнечной радиации, Вт/м².

Отраженный от земли поток солнечной радиации на нижней полуповерхности провода сложным образом складывается с потоком рассеянной солнечной радиации, а на верхней полуповерхности сложным образом складывается с потоком рассеянной солнечной радиации, а на верхней полуповерхности сложным образом вычитается из потоков прямой и рассеянной солнечной радиации. Поэто-

му в первом приближении отраженную от земли солнечную радиацию можно не учитывать.

Суммарный поток солнечной радиации $P_{\text{пад}}$, падающий на провод, представим в виде:

$$P_{\text{сум}} = k_H k_{\text{мес}} (E^{(\text{пр})} \sin \psi_c + \pi E^{(\text{рас})}) D_{\text{э}} \cdot 10^{-3} = E_{\text{сум}} D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}, \quad (24)$$

где $E_{\text{сум}}$ – суммарная поверхностная плотность потока энергии солнечной радиации, Вт/м².

Для вычисления допустимых токов принимаем $\psi_c = 90^\circ$, кроме того, нужны значения $E^{(\text{пр})}$ и $E^{(\text{рас})}$ для самого теплого месяца года в полуденные часы для соответствующих географических широт. Такие сведения получают по формулам, приведенным в [2, 12] или в готовом виде по справочникам, например [15]. При использовании этих данных $k_H = k_{\text{мес}} = 1$. Поглощаемая проводом мощность солнечной радиации $P_{\text{л.с}}$ с учетом закона Стефана–Больцмана [1] равна:

$$P_{\text{л.с}} = \varepsilon P_{\text{сум}} = \varepsilon E_{\text{сум}} D_{\text{э}} \cdot 10^{-3} = 5,67\varepsilon \left(\frac{273 + t_{\text{с.п}}}{100} \right) D_{\text{э}} \cdot 10^{-3}, \quad (25)$$

где $t_{\text{с.п}}$ – температура условного источника солнечной радиации, находящегося в пределах приземного слоя земной атмосферы, в наиболее жаркое время суток наиболее теплого месяца года, °С.

Значение $t_{\text{с.п}}$ на основании закона Стефана–Больцмана равно:

$$t_{\text{с.п}} = 64,84 \sqrt{E_{\text{сум}}} - 273. \quad (26)$$

Для местности, географическая широта φ которой находится в пределах от 40 до 70 градусов с.ш., значение $t_{\text{с.п}}$, на основании данных по $E^{(\text{пр})}$ и $E^{(\text{рас})}$, приведенных в [15], можно определять по формуле:

$$t_{\text{с.п}} = 114 - 1,2(\varphi - 40). \quad (27)$$

Следует отметить, что на Земле даже в самых жарких широтах значение $t_{\text{с.п}}$ не превышает 120 °С.

Дополнительное повышение температуры провода $\theta_{\text{с.п}}$ за счет солнечной радиации следует вычислять по формуле:

$$\theta_{\text{с.п}} = \frac{P_{\text{л.с}}}{[(\alpha_K + \alpha_{\text{л}}) \pi D_{\text{э}} - I_{\text{доп}}^2 r_{20} \beta_r] \cdot 10^{-3}}. \quad (28)$$

Допустимые токи. Значения допустимых токов вычисляют по формуле (3). Что касается сравнительных результатов, то при скорости ветра $V = 0,6$ м/с, допустимой температуре 90 °С и температуре окружающей среды 40 °С получены следующие данные. Для проводов АС-120/19 (АС-300/48) расчет, А, по формулам [2] дает 376/316 (687/654), по формулам [8] 336/290 (617/553), по формулам [5] (736/614), по предлагаемым формулам 401/367 (737/664) – в числителе при отсутствии солнечной радиации, в знаменателе при наличии солнечной радиации. Допустимый ток по предлагаемой методике выше, чем по используемым в настоящее время. Однако главное ее отличие заключается в более полном использовании законов теплопередачи, что позволяет получать обоснованные и достоверные результаты для проводов разных конструкций и разного профиля.

Выводы. 1. Во всех тепловых расчетах проводов, в частности при определении допустимого тока, для проводов разных профилей необходимо учитывать действительную площадь поверхности, вычисляемую, как правило, через их периметр. Например, для витых проводов обычное использование в качестве периметра длины описанной окружности с расчетным диаметром, вместо действительного периметра, приводит к ошибке в 30–40 процентов.

2. Для проводов разных профилей теплоотдачу в окружающую среду не следует рассчитывать так же, как для круглой трубы, если их геометрические формы не подобны. С точки зрения теории подобия такие расчеты не могут считаться ни правомерными, ни достоверными. Доказано, что при вычислении теплоотдачи проводов разных профилей в качестве характерного (определяющего) размера провода следует принимать не диаметр его описанной окружности, а длину обтекания, равную половине его действительного периметра.

3. Предложенные уточнения являются обобщенными, они основаны на фундаментальных законах теплопередачи, используют экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследований, позволяют получать более достоверные результаты для неизолированных проводов разных конструкций и профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учеб. для вузов, 4-е изд. М.: Энергоиздат, 1981, 416 с.
2. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допускаемых габаритов воздушных линий. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2013, 67 с.
3. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий. М.: КНОРУС, 2015, 488 с.

4. **ГОСТ 15150-69.** Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Изд-во стандартов, 2004, 71 с.
5. **Зарудский Г.К., Сыромятников С.Ю.** Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения. – Вестник МЭИ, 2008, №2, с. 37–42.
6. **Харчевников В.И.** Площадь поверхности проводов воздушных линий электропередачи и контактной сети. – Электрические станции, 2017, №1, с. 38–41.
7. **Фигурнов Е.П., Харчевников В.И.** Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий. – Электрические станции, 2016, №11, с. 41–47.
8. **Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г.** Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. – Электричество, 1989, №11, с. 1–8.
9. **CIGRE Technical Brochure 601** “Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines”. Working Group B2.43, December 2014, 95 p.
10. **Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е., Кууск А.Б.** Нагрев неизолированных проводов воздушных линий электропередачи. – Электричество, 2013, №6, с. 19–25.
11. **Alvarez Gomez F., Garcia De Maria J.M., Garcia Puertas D., Bairi A., Granizo Arrabe R.** Numerical study of the thermal behavior of bare overhead conductors in electrical power lines. – 10th WSEAS International Conference. Playa Meloneras, Gran Canaria, Canary Islands, Spain, March 24–26, 2011, pp. 143–153.
12. **Зарудский Г.К., Зиннер Л.Э., Сыромятников С.Ю.** Расчет температуры проводов воздушных линий электропередачи СВН

на основе метода критериального планирования эксперимента. – Вестник МЭИ, 1997, №1, с. 85–90.

13. **IEC TR 61597:** 1995 Overhead Electrical Conductors – Calculation Methods for Stranded Bare Conductors, 1995, 88 p.

14. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика: Учебное пос. для вузов /Под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008, 320 с.

15. **Богословский В.Н., Пирумов А.И., Посохин В.Н. и др.** Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн.1 / Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера, 4-е изд. М.: Стройиздат, 1992, 319 с.

[16.07.2020]



А в т о р ы : Фигурнов Евгений Петрович – доктор техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения».



Жарков Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения».



Харчевников Валерий Игоревич – аспирант кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения».

Modified methodology of computation of admissible continuous currents of plain conductors of overhead transmission lines and catenaries

FIGURNOV Evgeniy P. (*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*) – Professor of Automated Systems of Power Supply Dept., Dr. Sci. (Eng.)

ZHARKOV Yury I. (*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*) – Professor of Automated Systems of Power Supply Dept., Dr. Sci. (Eng.)

KHARCHEVNIKOV Valeriy I. (*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia*) – Postgraduate student of Automated Systems of Power Supply Dept.

Methodology provided summarizes published, original and foreign theoretic and experimental data on the subject of heating and cooling of standard and shaped conductors of overhead power transmission line and uses those of them which are most affected to fundamental heat-transfer laws. Computation surface area of standard and shaped wire formulas are given. The common formula of convection heat transfer coefficient is provided, based on wind speed and direction, concerning antiicing mode. Parameters of this formula do not coincide with those existing, as they are based on experimental data on standard and shaped conductors but not on round tubes. Formula of computation of heat transfer power under the influence of solar radiation is given. Summarized formula of admissible continuous current computation is given, all the components have detailed description in the article.

К e y w o r d s: power transmission line, electric power networks, catenaries, admissible continuous current, heat-transfer coefficient, surface area, solar radiation

REFERENCES

1. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** *Teploperedacha: ucheb. dlya vuzov, 4-e izd.* (Heat transfer: study. for universities, 4th ed.). M.: Energoizdat, 1981, 416 p.
2. **STO 56947007-29.240.55.143-2013.** *Metodika rascheta predel'nyh tokovyh nagruzok po usloviyam sohraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopuskaemyh gabaritov vozdukhnykh linij* (Method of calculation of current limit loads according to the conditions of preservation of mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines). M.: OAO «FSK EES», 2013, 67 c.
3. **Pravila ustrojstva elektroustanovok. Vse deystvuyushchie razdely shestogo i sed'mogo izdaniy** (Rules for the installation of electrical installations. All current sections of the sixth and seventh editions). M.: KNORUS, 2015, 488 c.
4. **GOST 15150-69.** *Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rajonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, hraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshnej sredy* (Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, conditions of operation, storage and transportation in terms of the impact of climatic factors of the external environment). M.: Izd-vo standartov, 2004, 71 p.
5. **Zarudskiy G.K., Syromyatnikov S.Yu.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2008, No. 2, pp. 37–42.
6. **Kharchevnikov V.I.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2017, No. 1, pp. 38–41.
7. **Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2016, No. 11, pp. 41–47.
8. **Burgsdorf V.V., Nikitina L.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1989, No. 11, pp. 1–8.
9. **CIGRE Technical Brochure 601** “Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines”. Working Group B2.43, December 2014, 95 p.
10. **Figurnov E.P., Zharkov Yu. I., Petrova T.E., Kuusk A.B.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 6, pp. 19–25.
11. **Alvarez Gomez F., Garcia De Maria J.M., Garcia Puertas D., Bairi A., Granizo Arrabe R.** Numerical study of the thermal behavior of bare overhead conductors in electrical power lines. – 10th WSEAS International Conference. Playa Meloneras, Gran Canaria, Canary Islands, Spain, March 24–26, 2011, pp. 143–153.
12. **Zarudskiy G.K., Zinner L.E., Syromyatnikov S.Yu.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 1997, No. 1, pp. 85–90.
13. **IEC TR 61597: 1995** Overhead Electrical Conductors – Calculation Methods for Stranded Bare Conductors, 1995, 88 p.
14. **Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K.** *Solnechnaya energetika: Uchebnoe posobie dlya vuzov, pod red. V.I. Vissarionova* (Solar energy: A Textbook for universities, edited by V. I. Vissarionov). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 320 p.
15. **Bogoslovsky V.N., Pirumov A.I., Posokhin V.N. and others.** *Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustrojstva. V 3-h ch. CH.3. Ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha. Kn.1, pod red. N.N. Pavlova i Yu.I. SHillera, 4-e izd.* (Internal sanitary-technical devices. 3. Ventilation and air conditioning. Book 1, edited by N. N. Pavlov and Yu. I. Shiller, 4th ed.). M.: Strojizdat, 1992, 319 p.

[16.07.2020]