

Определение длительно допустимых токов проводов систем электроснабжения железных дорог

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика вычисления длительно допустимых токов, основанная на более строгом учете законов теплопередачи и экспериментальных исследованиях условий нагрева и охлаждения фасонных (контактных) и витых проводов. Приведены формулы вычисления площади фасонных и витых проводов. Даны уточнения по определению коэффициента теплоотдачи при продольном и поперечном направлении ветра, а также при условиях образования гололеда. Предложен способ учета влияния солнечной радиации на дополнительный нагрев проводов с более строгим соблюдением законов теплопередачи

Ключевые слова: контактная сеть; линии электропередачи; нагрев проводов; допустимые токи; периметр провода; коэффициент теплоотдачи; солнечная радиация

Введение. Предельные значения длительно допустимых токов устанавливаются в зависимости от допустимой температуры провода в установившемся режиме. В 2013 г. вышел стандарт для контактных проводов из меди и ее сплавов [1], в котором длительно допустимые температуры $t_{\text{доп}}$ по сравнению с ранее действовавшими значениями [2] весьма существенно снижены (для медных — до 80 °С вместо 95 °С, для низколегированных — до 90 °С вместо 110 °С). Данное обстоятельство требует пересчета значений допустимых токов, что может в отдельных случаях повлечь за собой необходимость увеличения сечения проводов контактной сети. Следует учесть, что в последние годы произошло существенное уточнение теории нагрева неизолированных проводов и повышение ее достоверности не только при малых скоростях ветра, но и при гололедообразовании [3], в том числе благодаря наличию богатого арсенала экспериментальных данных, приведенных в публикациях отечественных и зарубежных авторов [4]. Это позволяет более обоснованно вычислять значения допустимых токов не только для нормальных условий эксплуатации, но и для противогололедных режимов.

С учетом вышеизложенных позиций авторами статьи подробно рассматривается методика вычисления допустимых токов для проводов контактной сети и линий электропередачи с обоснованием включаемых в эту методику величин.

Допустимые токи проводов контактной сети и линий электропередачи. Температура провода t определяется условиями теплового баланса [3] при заданных значениях тока и температуры окружающей среды. Для установившегося режима эту температуру вычисляют по формуле

$$t = \frac{I^2 r 10^{-3} [1 + \beta_r (t_{\text{окр}} - 20)] + P_p}{\alpha F - I^2 r \beta_r 10^{-3}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где I — ток провода, А; r — сопротивление единицы длины провода при температуре 20 °С, Ом/км; β_r — температурный коэффициент сопротивления, 1/°С; $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, °С; P_p — результирующий поток (мощность) солнечной радиации, поглощаемый единицей длины провода, Вт/м; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); F — площадь поверхности единицы длины провода, численно равная его периметру Π , м²/м.

Полагая, что температура провода равна длительно допустимому значению ($t = t_{\text{доп}}$), а α и P_p соответствуют значению этой температуры, получаем из выражения (1) формулу для вычисления длительно допустимого тока провода:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{(t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) \alpha F - P_p}{r [1 + \beta_r (t_{\text{доп}} - 20)] 10^{-3}}}, \text{ А.} \quad (2)$$

Для определения допустимого тока присоединения контактной сети $I_{\text{кс. доп}}$, состоящей из нескольких проводов, необходимо по формуле (2) вычислить допустимые токи $I_{\text{доп}}^{(n)}$, $I_{\text{доп}}^{(r)}$, $I_{\text{доп}}^{(y)}$ для каждого из контактных проводов (индекс «п»), несущего троса (индекс «т»), усиливающих проводов (индекс «у») и найти отношения

$$I_{\text{кс. доп}}^{(n)} = \frac{I_{\text{доп}}^{(n)}}{k_{\text{рас. п}}}; \quad I_{\text{кс. доп}}^{(r)} = \frac{I_{\text{доп}}^{(r)}}{k_{\text{рас. т}}}; \quad I_{\text{кс. доп}}^{(y)} = \frac{I_{\text{доп}}^{(y)}}{k_{\text{рас. у}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{рас. п}}$, $k_{\text{рас. т}}$, $k_{\text{рас. у}}$ — коэффициенты распределения тока контактной сети для одного контактного про-

вода, одного несущего троса, одного усиливающего провода соответственно.

Наименьшее значение из вычисленных по выражениям (3) величин $I_{\text{кс. доп}}^{(n)}$, $I_{\text{кс. доп}}^{(r)}$, $I_{\text{кс. доп}}^{(y)}$ и является допустимым током $I_{\text{кс. доп}}$ присоединения контактной сети, а тот провод, для которого результат расчета по выражению (3) оказался наименьшим, является лимитирующим по нагреву. Значения коэффициентов распределения (доли тока контактной сети в данном проводе), например, для контактной сети переменного тока с проводами М-120+МФ-100 равны $k_{\text{рас. п}} = 0,511$, $k_{\text{рас. т}} = 0,489$. Для других распространенных контактных сетей постоянного и переменного тока эти значения приведены в [5].

Расчетные температуры. Значения наибольших температур, длительно допустимых по условиям механической прочности проводов, приведены в [1, 6, 7, 8]. Наибольшую рабочую температуру окружающей среды $t_{\text{окр}}$ для макроклиматических районов У и УХЛ в соответствии с [9] принимают $+40^\circ\text{C}$. Для противогололедных режимов значение $t_{\text{окр}}$ следует принимать равным от 0 до $+2^\circ\text{C}$.

Сопротивление провода. Сопротивление провода постоянному току $r = r_{20}$ принимают как указано в соответствующих стандартах [1, 6, 7, 8]. При относительном износе контактного провода ΔS , %, его сопротивление постоянному току $r_{20 \text{ из}}$ вычисляют по формуле

$$r = r_{20 \text{ из}} = \frac{r_{20}}{1 - 0,01\Delta S}, \text{ Ом / км.} \quad (4)$$

Активное сопротивление провода переменному току следует рассчитывать по [10] с учетом поверхностного эффекта и потерь от продольного магнитного потока.

С приемлемым для практических расчетов приближением для всех видов проводов, указанных в [1, 6, 7, 8], значение температурного коэффициента электрического сопротивления можно принять равным $\beta_r = 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Периметр провода. Периметр контактного провода Π , численно равный площади поверхности F единицы длины провода, следует вычислять по формулам [11]:

- для контактного фасонного:

$$\Pi = F \approx 1,64(A + H)10^{-3}, \text{ м;} \quad (5)$$

- для контактного фасонного овального:

$$\Pi = F \approx 1,73(A + H)10^{-3}, \text{ м,} \quad (6)$$

где A , H — справочные размеры контактного провода [1], мм.

Для контактного фасонного провода со средним износом в пролете ΔS , %, периметр $\Pi_{\text{из}}$ можно определить как

$$\Pi_{\text{из}} = \Pi(1 - 2,33\Delta S10^{-3}), \text{ м.} \quad (7)$$

Периметр контактного фасонного овального провода при допустимом износе практически не изменяется.

Периметр витых проводов следует вычислять по формулам

$$\Pi = 0,5\pi d(n_n + 2)10^{-3}, \text{ м; } n_n = \pi\left(\frac{D}{d} - 1\right), \text{ м,} \quad (8)$$

где d — диаметр проволок наружного повива, мм; D — справочный диаметр провода, мм; n_n — число проволок в наружном повиве провода (троса).

Параметры D и d приведены в [6, 7, 8]. При вычислении n_n полученный результат округляется до целого числа в меньшую сторону. В дальнейшем вместо периметра Π удобно пользоваться *эквивалентным диаметром* провода D_3 , значение которого принимают из соотношения

$$D_3 = \frac{\Pi 10^{-3}}{\pi}, \text{ мм.} \quad (9)$$

Необходимо предостеречь от распространенной ошибки вычисления периметра Π как произведения $\pi D 10^{-3}$, где D не эквивалентное, а справочное по [6, 7, 8] значение диаметра, или использования формул, в которые входит такое произведение. Замена в этом произведении значения D_3 на D приводит к ошибкам, достигающим 40 % [11].

Коэффициент теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи следует вычислять по формуле

$$\alpha = k_v k_d \alpha_k + \alpha_n, \text{ Вт / (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (10)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°C); α_n — коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°C); k_v — коэффициент, учитывающий направление ветра по отношению к оси провода; k_d — коэффициент, учитывающий метеорологическую обстановку.

До недавнего времени значение α_k вычисляли как для круглых труб с гладкой поверхностью. Однако такой метод расчета здесь даже теоретически неприменим из-за отсутствия геометрического подобия круглых труб и фасонных, а тем более витых проводов [12]. Ошибка при этом, особенно для противогололедных режимов, может достигать 40 % и более. На основании обобщения обширных отечественных и зарубежных экспериментальных исследований значение α_k в общем случае следует вычислять по формуле [4]:

$$\alpha_k = b V^a D_3^{a-1}, \text{ Вт / (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}. \quad (11)$$

В таблице представлены значения параметров a и b для витых и фасонных проводов.

Значение коэффициента k_v (10) при направлении ветра поперек провода принимают равным единице.

Параметры a и b для витых и фасонных проводов
 a and b parameters for stranded and shaped wires

Параметр	Значение параметров a и b для витых и фасонных проводов в зависимости от произведения $114VD_3$	
	$10 \leq 114VD_3 < 2,2 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3 \leq 114VD_3 \leq 3,2 \cdot 10^5$
a	0,477	0,642
b	105,7	64,3

При продольном направлении ветра обычно рекомендуют принимать коэффициент $k_v = 0,5$ (как для круглых труб с гладкой поверхностью) [12]. Однако эксперименты с витыми и фасонными проводами [4] такой рекомендации не подтверждают. На основании опытов [4] принимается $k_v = 0,66$.

При вычислении допустимых токов проводов учитываем скорость ветра в продольном направлении $V = 1$ м/с.

Значение коэффициента k_d для условий нормальной работы следует принимать равным единице. Для противогололедных режимов рекомендуется использовать табличные значения [3] или расчет по формуле ($t_{\text{окр}} \leq +2^\circ\text{C}$):

$$k_d = 1,6 + 0,65e^{0,31t_{\text{окр}}}. \quad (12)$$

Значение α_n вычисляют по формуле

$$\alpha_n = \frac{5,67\varepsilon}{t - t_{\text{окр}}} \left[\left(\frac{273 + t}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] \approx$$

$$\approx 4,61\varepsilon \left[1 + \frac{t + t_{\text{окр}}}{546} \right]^3, \text{ Вт / (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (13)$$

где t — температура провода, принимаемая при вычислении допустимых токов $t = t_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$; ε — коэффициент поглощения (степень черноты провода), принимаемый для проводов, находящихся в эксплуатации более одного года, равным: для медных, из сплавов меди и марки ПБСМ $\varepsilon = 0,8$, для алюминиевых и сталалюминиевых $\varepsilon = 0,6$.

Солнечная радиация. Солнечная радиация учитывается только для нормальных режимов работы. При противогололедных режимах из-за сплошной облачности ее воздействие не рассматривают. В соответствии с [9] для контактной сети и линий электропередачи как устройств, предназначенных для эксплуатации на открытом воздухе, в нормальном режиме необходимо учитывать дополнительное увеличение температуры за счет нагрева солнечными лучами. Такой нагрев, помимо прочих факторов, зависит от угла наклона солнечных лучей, т. е. от широты местности, ориентации провода по отношению к меридиану и времени суток. Вычислять допусти-

мые токи проводов для каждой конкретной линии на каждом конкретном участке с учетом этих факторов было бы крайне неудобным. Поэтому принято оценивать солнечную радиацию для условий, когда ее влияние является наибольшим, т. е. при солнце, находящемся в зените. Такое предположение несколько преувеличивает влияние солнечной радиации, однако при вычислении допустимых токов этим преувеличением можно пренебречь, поскольку значение P_p существенно меньше первого слагаемого в числителе выражения (2).

Согласно [12] лучистый поток (мощность), падающий на единицу длины поверхности серого тела F_p , определяется как

$$P_{\text{пад}} = \varepsilon \int_F E dF_p, \text{ Вт/м}, \quad (14)$$

где E — интегральная поверхностная плотность потока энергии излучения, Вт/м².

Представим себе, что провод имеет круглое сечение с диаметром D_3 . Если солнце находится в зените, то лучистый поток солнечной радиации с интегральной поверхностной плотностью E_n падает на верхнюю полуповерхность провода вертикально. Для каждой элементарной площадки верхней полуповерхности dF_p согласно закону косинусов Ламберта [12] имеет место соотношение

$$E_\psi = E_n \cos \psi, \text{ Вт/м}^2, \quad (15)$$

где ψ — угол между вертикалью и нормалью к поверхности данной элементарной площадки dF_p .

Площадь единицы длины элементарной площадки численно равна длине дуги окружности, ограниченной углом $d\psi$, радиан:

$$dF_p = 0,5D_3 10^{-3} d\psi. \quad (16)$$

Подставив (15) и (16) в (14), получаем

$$P_{\text{пад}} = 0,5\varepsilon E_n D_3 10^{-3} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \psi d\psi =$$

$$= \varepsilon E_n D_3 10^{-3}, \text{ Вт / м}. \quad (17)$$

До сих пор принято считать, что это значение $P_{\text{пад}}$ при наибольшем значении E_n и является той мощностью солнечной радиации, которая расходуется на повышение температуры провода [3]. Такое допущение неоправданно увеличивает влияние солнечной радиации. На самом деле согласно основам теплопередачи лучистый теплообмен между телами определяется потоком результирующего излучения, под которым понимают разность между лучистым потоком, падающим на тело, и лучистым потоком, излучаемым им [12].

Из формулы (17) следует, что при учете влияния солнечной радиации, когда солнце находится в зените, круглый провод может быть представлен в виде эквивалентного плоского тела, нормаль к поверхности которого совпадает с направлением потока солнечной радиации, имеющим интегральную поверхностную плотность E_n , причем площадь F_p единицы длины этого плоского тела равна πD_3 . Представим далее, что над эквивалентным телом, имитирующим провод, расположено некое другое тело неограниченных размеров с коэффициентом поглощения A и температурой $t_{\text{рад}}$, °С, тепловое излучение которого имеет интегральную поверхностную плотность E_n . Такое тело имитирует источник солнечной радиации.

Температуру тела, имитирующего источник солнечной радиации $t_{\text{рад}}$, можно найти, используя закон Стефана — Больцмана [12], который для данного случая имеет вид

$$E_n = 5,67A \left(\frac{t_{\text{рад}} + 273}{100} \right)^4, \text{ Вт / м}^2. \quad (18)$$

Значение коэффициента поглощения для земной атмосферы обычно принимают равным 0,85. Наибольшее значение $t_{\text{рад}}$ достигается при наибольшей величине E_n . В соответствии с требованиями [9] интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения (верхнее рабочее значение) для высот до 15 км включительно составляет 1125 Вт/м². Подставив эти значения в (18), получаем $t_{\text{рад}} = 118$ °С. Результирующий поток (мощность) излучения в системе, состоящей из двух тел с плоскопараллельными поверхностями при указанных выше условиях, равный разности собственных потоков излучения тел, имитирующих источник солнечной радиации и провод, может быть вычислен по формуле [12]:

$$P_p = 5,67\varepsilon D_3 \left[\left(\frac{t_{\text{рад}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t + 273}{100} \right)^4 \right] 10^{-3}, \text{ Вт / м}. \quad (19)$$

При определении длительно допустимых токов следует принимать $t = t_{\text{доп}}$. Если $t_{\text{доп}} \geq t_{\text{рад}}$, то солнечная радиация не оказывает влияния на повышение температуры провода, и в этом случае следует принимать $P_p = 0$.

Допустимые токи проводов (результатирующая формула). Формула (2) для вычисления допустимых токов проводов приобретает вид

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\pi(t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}})[k_V k_d b (VD_3)^a + \alpha_L D_3] - P_p}{k_n k_m r_{20} [1 + \beta_r (t_{\text{доп}} - 20)]}}, \text{ А}, \quad (20)$$

в которой значения α_L и P_p вычисляются по формулам (13) и (19), а параметры a и b принимают по таблице.

Вычисленные по формулам (20) и (3) длительно допустимые токи для контактной сети с проводами М-120+МФ-100, М-120+2МФ-100 и М-120+2МФ-100+А-185 составили 830, 1245 и 1805 А соответственно. Для контактной сети с теми же проводами в [2] указаны токи 1230, 1800 и 2280 А. Столь значительное снижение длительно допустимых токов обусловлено тем, что в [1] теперь утверждены значительно меньшие значения длительно допустимых температур проводов.

Снижение допустимых токов для ряда проводов контактной сети может потребовать увеличения их сечения или применения усиливающего провода на ряде грузонапряженных участков сети, на участках с большими подъемами, а также на линиях с высокими скоростями движения. При переводе на электрическую тягу новых направлений может стать вопрос о сокращении на некоторых участках расстояний между тяговыми подстанциями. Однако такие решения требуют детальных расчетов системы тягового электрообеспечения конкретно для каждой межподстанционной зоны с большими токами нагрузки.

Отдельные расчеты потребуется выполнить для противогололедных режимов контактной сети (режимы профилактического подогрева и режим плавки на них гололеда) [13]. На тех участках, где величина тока противогололедного режима окажется больше значения допустимого тока, придется принимать меры по снижению тока этого режима, что связано с сужением тех метеорологических условий, при которых такие режимы обеспечат желаемый эффект. Подобные противоречия потребуют решений конкретно для каждой из межподстанционных зон, где необходимо применение противогололедных режимов.

Заключение. 1. Предложена формула для вычисления длительно допустимых токов проводов контактной сети электрифицированных железных дорог и линий электропередачи, в основе которой лежат уточненные сведения о коэффициенте теплоотдачи, полученные в результате опытных данных по нагреву и охлаждению фасонных (контактных) и витых проводов.

2. Приведены сведения и уточненная методика по определению таких исходных величин, как действительная площадь поверхности провода, направление ветра, метеорологические условия, зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости ветра и охлаждаемой поверхности и др., от которых в конечном итоге зависит величина длительно допустимого тока, как для наиболее жаркого периода, так и для противогололедных режимов.

3. Показано, что существующие методы учета солнечной радиации многократно преувеличивают ее влияние на дополнительный нагрев проводов.

Приведен способ более точного расчета влияния солнечной радиации с соблюдением законов теплопередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55647–2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.10.2018 г. № 757-ст., взамен ГОСТ 55647–2013. М.: Стандартинформ, 2018. 18 с.
2. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации: утв. МПС РФ № ЦЭ-462 от 4 июня 1997 г. М.: Интекст, 1997. 80 с.
3. Нагрев неизолированных проводов воздушных линий электропередачи / Е. П. Фигурнов [и др.] // Электричество. 2013. № 6. С. 19–25.
4. Фигурнов Е. П., Харчевников В. И. Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий электропередачи и контактной сети // Электрические станции. 2016. № 11. С. 41–47.
5. Фигурнов Е. П. Релейная защита. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. 604 с.
6. ГОСТ 32697–2014. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия: введен 1 июня 2015 г. М.: Стандартинформ, 2015. 6 с.
7. ГОСТ 4775–91. Провода неизолированные биметаллические сталемедные. Технические условия: введен 1 января 1992 г. взамен ГОСТ 4775–75. М.: Издательство стандартов, 1992. 14 с.
8. ГОСТ 839–80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с изм. № 1, 2): введен 1 января 1981 г. взамен ГОСТ 839–74. М.: Изд-во стандартов, 2002. 13 с.

9. 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: введен 1 января 1971 г. (с изм. № 1, 2, 3, 4, 5, с поправкой ИУС 3-2004). М.: Изд-во стандартов, 1999. 71 с.

10. ГОСТ Р 57670–2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров: введен 1 мая 2018. М.: Стандартинформ, 2017. 49 с.

11. Харчевников В. И. Площадь поверхности проводов воздушных линий электропередачи и контактной сети // Электрические станции. 2017. № 1. С. 38–41.

12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

13. Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П., Петрова Т. Е. Противогололедные режимы контактной сети // Вестник РГУПС. 2013. № 2. С. 27–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИГУРНОВ Евгений Петрович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ЖАРКОВ Юрий Иванович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ХАРЧЕВНИКОВ Валерий Игоревич,

аспирант, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 25.12.2018 г., принята к публикации 21.03.2019 г.

Determination of long-term permissible currents in wires of power supply systems of railways

E. P. FIGURNOV, Yu. I. ZHARKOV, V. I. KHARCHEVNIKOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State Transport University" (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

Abstract. In the standard for contact wires made from copper and its alloys, the values of long-term permissible temperatures have significantly decreased. This requires recalculation of previously valid values of long-term permissible currents. Authors considered revised method for calculating the long-term permissible currents, based on a more rigorous consideration of the laws of heat transfer and experimental studies of the conditions of heating and cooling of shaped (contact) and stranded wires. Technique is based on heat balance conditions, using which the sources of greatest inaccuracies become such quantities as cooled surface area, influence of wind direction, meteorological conditions, laws of change in heat transfer coefficient, effect on additional heating of solar radiation. Deviations when these indicators are taken into account by existing methods can cause errors of 40 % or more. Formulas for calculating the actual outer surface of stranded and shaped wires are given. The inadmissibility of calculating the surface area of the wires by their reference diameter is noted. Updated law of the change in heat transfer coefficient for stranded and shaped wires, as well as the degree of its dependence on wind speed and cooled surface, is given based on a summary of extensive domestic and foreign research. It is shown that with the longitudinal direction of the wind, the reduction of this coefficient occurs to a lesser

extent than has been assumed so far. Authors propose method for taking into account an increase in the heat transfer coefficient under meteorological conditions characteristic of ice formation. The heat transfer coefficient of shaped and stranded wires in no case can not be taken as for round pipes with smooth surface. Existing method of accounting for solar radiation, which influences the additional heating of wires, leads to an unjustified and repeated exaggeration of this effect, since previously only the radiation incident on the wire was taken into account in the calculations. According to the laws of heat transfer, the temperature of the irradiated body does not depend on the incident, but on the resulting radiation, defined as the difference between the radiations incident on the body and emitted by it in accordance with its temperature. A formula for accounting for such heat transfer is proposed. The above methodology and calculation formulas allow performing reasonable calculations to determine the long-term permissible currents of individual stranded and shaped wires, as well as the contact network as a whole.

Keywords: contact network; power lines; heating wires; permissible currents; wire perimeter; heat transfer coefficient; solar radiation

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-90-95>

REFERENCES

1. GOST R 55647–2018. *Contact wires from copper and its alloys for electrified railways. Specifications*. Approved by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology no. 757-st. on October 12, 2018, instead of GOST 55647–2013. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 18 p. (in Russ.).
2. *Formation rules for the system for traction power supply of railways of the Russian Federation*. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation no. TsE-462 on June 4, 1997. Moscow, Intext Publ., 1997, 80 p. (in Russ.).
3. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Petrova T. E., Kuusk A. B. *Nagrev neizolirovannykh provodov vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [Heating uninsulated wires of overhead power lines]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 6, pp. 19–25.
4. Figurnov E. P., Kharchevnikov V. I. *Opyty po nagrevu neizolirovannykh provodov vozdukhnykh liniy elektroperedachi i kontaktной seti* [Experiments on the heating of uninsulated wires of overhead power lines and contact network]. *Electric stations*, 2016, no. 11, pp. 41–47.
5. Figurnov E. P. *Releynaya zashchita* [Relay protection]. Moscow, GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [GOU "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport"] Publ., 2009, 604 p.
6. GOST 32697–2014. *Bearing railway contact cables. Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 6 p. (in Russ.).
7. GOST 4775–91. *Uninsulated bimetallic steel-copper wires. Specifications*. Moscow, Standards Publishing House, 1992, 14 p. (in Russ.).
8. GOST 839–80. *Uninsulated wires for overhead power lines. Specifications*. Moscow, Standards Publishing House, 2002, 13 p. (in Russ.).

■ E-mail: valery_40let@mail.ru (V. I. Kharchevnikov)

9. GOST 15150–69. *Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation in terms of the impact of environmental climatic factors*. Moscow, Standards Publishing House, 1999, 71 p. (in Russ.).

10. GOST R 57670–2017. *Railway traction power supply systems. Methods of choosing the main parameters*. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 49 p. (in Russ.).

11. Kharchevnikov V. I. *Ploshchad' poverkhnosti provodov vozdukhnykh liniy elektroperedachi i kontaktной seti* [Surface area of the wires of overhead power lines and contact network]. *Electric stations*, 2017, no. 1, pp. 38–41.

12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 416 p.

13. Zharkov Yu. I., Figurnov E. P., Petrova T. E. *Protivogolodnye rezhimy kontaktной seti* [Deicing modes of contact network]. *Vestnik RGUPS*, 2013, no. 2, pp. 27–37.

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy P. FIGURNOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Yuriy I. ZHARKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Valeriy I. KHARCHEVNIKOV,

Post-graduate, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Received 25.12.2018

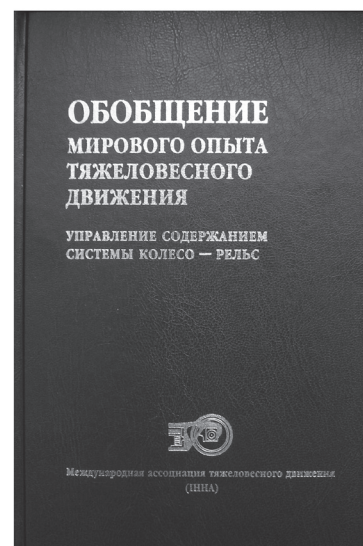
Accepted 21.03.2019

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс: пер. с англ. / под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2017. 420 с.

Вопросы содержания системы колесо — рельс, являющейся основной для железнодорожного транспорта, приобретают все большее значение по мере роста грузонапряженности, массы и длины поездов, осевых нагрузок и необходимости обеспечивать экономически оправданную эксплуатацию железнодорожных систем. Для лучшего понимания происходящих процессов в данной системе рассмотрены фундаментальные вопросы взаимодействия железнодорожного экипажа и пути, механика контактного взаимодействия колеса и рельса, виды и причины возникновения дефектов в элементах системы, применяемые материалы и перспективы их совершенствования. Описаны современные системы автоматизированного мониторинга состояния подвижного состава и пути. Большое внимание уделено используемым в разных странах подходам и технологиям текущего содержания подвижного состава и пути, обеспечивающим снижение стоимости жизненного цикла. Отдельная глава посвящена вопросам безопасности, анализу причин и способам предотвращения сходов подвижного состава. Изложен опыт железных дорог разных стран с тяжеловесным движением по выявлению проблем, способам реализации решений и достигнутым результатам. В конце книги приведен словарь используемых терминов, их эквивалентов на английском языке, определений, расшифровывающих термины.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами железнодорожного транспорта, и студентов, изучающих данные проблемы.



По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.