

DOI 10.5862/JEST.254.9

УДК 621.3.017:621.315.14:[669.3+669.71+669.1]

М.И. Сухичев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

M.I. Sukhichev

PHYSICAL REQUIREMENTS OF A CROSS-SECTIONAL AREA OF OVERHEAD POWER LINES WIRES FOR STEADY-STATE CONDITIONS

Обоснована и рассмотрена простейшая модель теплового баланса провода, изготавливаемого по ГОСТ 839-80, с учётом конвективного теплообмена и теплообмена излучением. Установлено, что значения длительно допустимых токов для данного типа проводов в ПУЭ значительно завышены. Предложена формула определения длительно допустимых токов вне помещения, пригодная для инженерного использования. Проведён математический анализ формулы. Предложены таблицы для выбора провода по длительно допустимому току, пригодные для инженерного использования. В этой работе рассмотрены требования ПУЭ только для проводов вне помещения. Требования ПУЭ для проводов внутри помещений будут рассмотрены в следующей работе.

ПУЭ; ГОСТ 839-80; УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА; ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЙ ТОК; ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.

This paper contains analysis of a part of Russian Electrical Code called PUE. This paper describes a basic heat balance model for wires of GOST 839-80 (Russian equivalent of EN 50182). As a result, the current-carrying capacity of this model is much less than the current-carrying capacity of GOST 839-80. This means that the PUE requirements may be incorrect. A formula for determining the current-carrying capacity in this model, ready for use in engineering, is proposed. Tables of the current-carrying capacity for all wires of GOST 839-80 are given. This paper only analyzes the requirements of PUE for the current-carrying capacity of outdoor wire. The PUE requirements for the current-carrying capacity of indoor wires will be discussed in the next paper.

PUE; ELECTRICAL CODE; GOST 839-80; EN 50182; HEAT BALANCE EQUATION; CURRENT CARRYING CAPACITY; AMPACITY; OVERHEAD POWER LINES.

В вышедшей в 2003 году новой, седьмой, редакции ключевого нормативного документа для проектирования и эксплуатации электроустановок – «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) – раздел 1.3 «Выбор проводников по нагреву, экономической плотности тока и по условиям короны», в отличие от других разделов, не был изменён [1], хотя он неоднократно подвергался критике, в основном за использование метода экономической плотности тока [1, 2, 4].

Впрочем, предлагавшийся на замену метод экономических интервалов также не лишён недостатков, анализ которых ждёт своего исследователя.

Но за обсуждениями этих методов терялся анализ значительно более важной темы — физического, а не экономического обоснования выбора сечения проводника. Действительно, ошибка в экономическом обосновании приведёт только к потере денег, а ошибка в физическом — ещё и к

разрушению электроустановки, возможно, с человеческими жертвами. Поэтому серия статей автора будет посвящена физическому обоснованию выбора проводников.

Нормативные документы

В качестве физических обоснований выбора проводника в разделе 1.3 ПУЭ можно рассматривать нагрев проводника и, с некоторым допущением, условия возникновения коронного разряда, «короны», который не столько разрушает электроустановку (хотя при его наличии часть химических процессов ускоряется), сколько ведёт к потерям электроэнергии, то есть экономическим последствиям, а не физическим.

Впрочем, касательно коронного разряда раздел 1.3 ПУЭ весьма немногословен: выбору проводников по условиям короны и радиопомех посвящён всего один пункт – 1.3.33, сводящийся к необходимости не превышать 0,9 напряжения начала общей короны [5]. Для сравнения: посвящённый устройству воздушных линий электропередач (ВЛ) раздел 2.5 седьмой редакции

ПУЭ (ПУЭ-7) имеет не только пункт 2.5.81, ссылающийся на раздел 1.3 ПУЭ, но и табл. 2.5.6 минимальных допустимых диаметров проводов для ВЛ различных классов напряжений [6].

Таким образом, основным методом физического обоснования выбора проводника согласно разделу 1.3 ПУЭ является выбор его по нагреву, для чего в рассматриваемом разделе даются таблицы с максимальным допустимым длительным током (ДДТ). Например, для неизолированных проводов, выпускаемых по ГОСТ 839-80 [6], даётся табл. 1.3.29. Данная таблица интересна тем, что в ней приведены нормируемые данные для очень важного класса проводников – неизолированных проводов, используемых преимущественно при сооружении ВЛ. Этот тип проводников важен, потому что как метод экономической плотности тока, так и метод экономических интервалов опирается в расчётах на стоимость сооружения и эксплуатации ВЛ [4]. Хотя результаты работы можно легко обобщить на другие типы проводников, но для простоты изложения в нашей работе ограничимся рассмотрением только этих проводов.

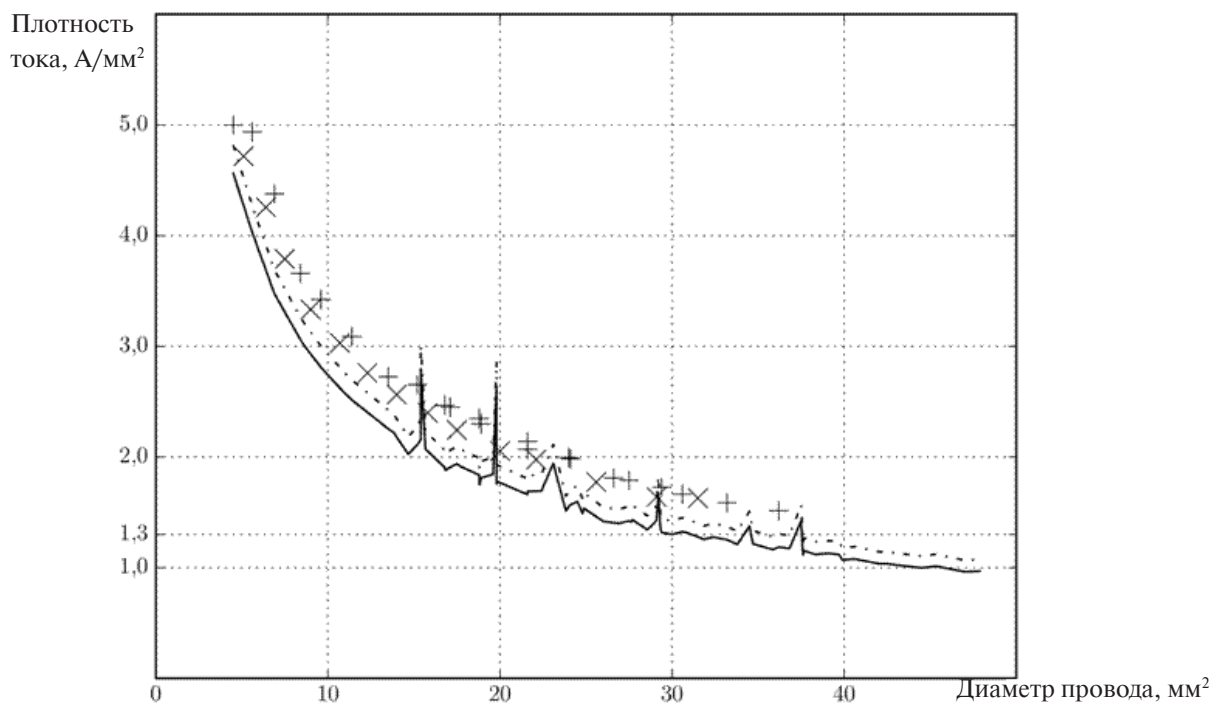


Рис. 1. Плотности длительно допустимых токов проводов марок А и АС: × × и + + – соответственно для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов марок А и АС согласно ПУЭ; - - - и — — расчётные по формуле соответственно с учётом только конвекции и с учётом конвекции и лучистого теплообмена

Сравнивая табл. 1.3.29 ПУЭ с ГОСТ 839-80, можно обнаружить, что в табл. 1.3.29 наименований проводов значительно меньше. Например ГОСТ 839-80 даёт сталеалюминиевые провода вплоть до марки АС 1250/101,8, тогда как табл. 1.3.29 заканчивается проводом марки АС 700/86. То же самое справедливо и для чисто алюминиевых проводов марки А, и для медных проводов марки М. Фактически в табл. 1.3.29 ПУЭ есть только провода, которые в ГОСТ 839-80 обрاملены скобками (так в ГОСТ 839-80 обозначены провода, унаследованные от ГОСТ 839-59 [8]). Единственным исключением является провод АС 330/27, который, наоборот, присутствует в табл. 1.3.29 ПУЭ, но отсутствует в ГОСТ 839-80.

Примечательно, что приведённые в табл. 1.3.29 ПУЭ ДДТ всегда превосходят значения получаемые по методу экономической плотности тока. Единственным исключением является провод марки М 400, для которого ДДТ внутри помещения меньше экономической плотности тока при числе часов использования максимума нагрузки от 1000 до 3000 ч, но выше той же величины для промежутка от 3000 до 5000 ч. Это нетрудно подтвердить, вычислив плотность ДДТ,

приведённых в табл. 1.3.29 ПУЭ. Результаты этих расчётов для ДДТ внутри помещения приведены на рис. 1 и 2 в зависимости от диаметра провода. Выбор в качестве аргумента диаметра, а не сечения вызван более равномерным распределением проводов на графике. Для тех же проводов вне помещения больше ДДТ, а следовательно, и их плотности, что позволяет сделать вывод о том, что плотности ДДТ вне помещения превышают экономическую плотность тока для всех проводов, приведённых в табл. 1.3.29 ПУЭ.

Таким образом при проектировании ВЛ согласно ПУЭ-7 основной метод выбора сечения провода — это метод экономической плотности тока, а проверку на допустимые длительные токи можно не проводить.

Однако обоснован ли выбор таких больших ДДТ? Ведь завышение ДДТ может привести к выходу электроустановки из строя, так как вполне вероятен такой длительный режим, при котором ток будет меньше ДДТ, но выше физически возможного для электроустановки. В то же время занижение ДДТ приводит лишь к экономическим потерям, и то лишь в случае, когда ДДТ ниже экономически обоснованного. Из-за

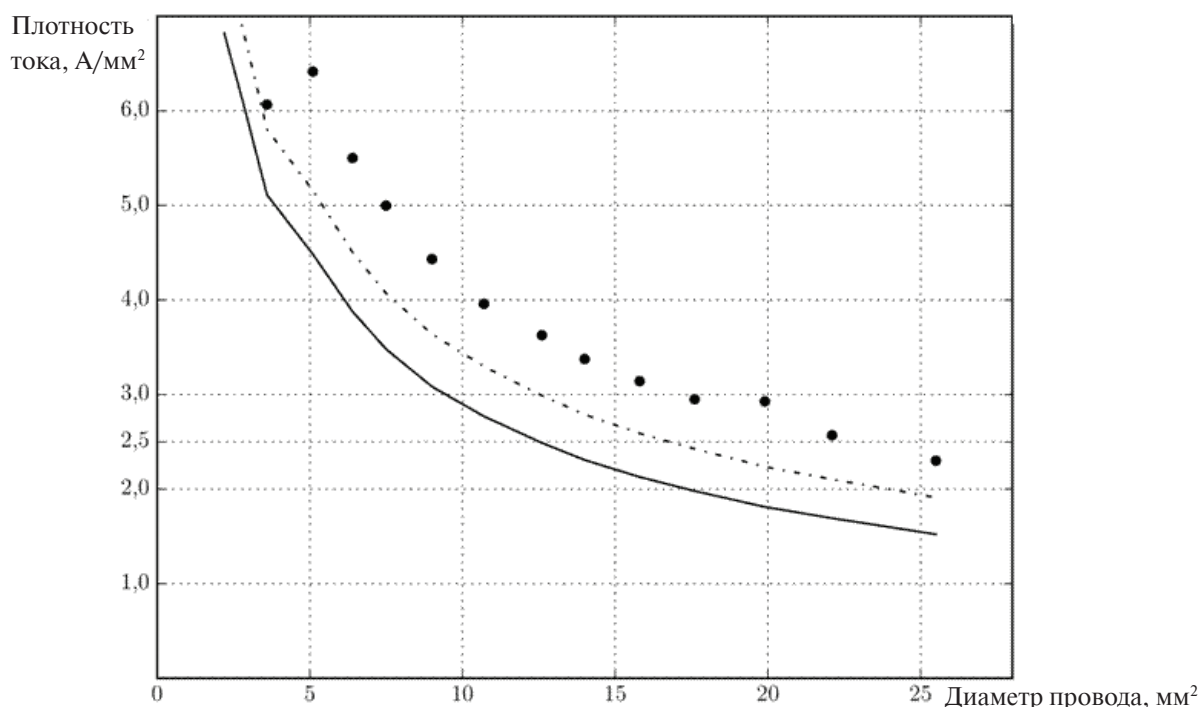


Рис. 2. Плотности длительно допустимых токов проводов марки М: • — для медных проводов марки М согласно ПУЭ; --- и — — расчётные по формуле соответственно с учётом только конвекции и с учётом конвекции и лучистого теплообмена

того, что завышение ДДТ опаснее, чем занижение, важно корректно физически обосновать выбор значения ДДТ. Чтобы пояснить этот вопрос, составим и рассчитаем модель тепловых процессов в проводе.

Модель тепловых процессов в проводе

Представим провод как бесконечный горизонтальный цилиндр, охлаждаемый в результате свободной гравитационной конвекции воздуха и теплообмена излучением с окружающей средой. Выбор свободной, а не вынужденной конвекции обусловлен тем, что, во-первых, для вынужденной конвекции требуется движение среды (для ВЛ – ветра, которого может и не быть), а во-вторых, свободная конвекция приводит к меньшей теплоотдаче по отношению к вынужденной. Провода, приведённые в ГОСТ 839-80, являются многопроволочными, т. е. свитыми из нескольких проволок [6, 8]. Конечно такая модель даёт некоторую погрешность для многопроволочных проводов, но вполне адекватна реальному проводу и является стандартной [3, 9].

Теплообмен такой модели, как конвективный, так и излучением, можно описать широко известной формулой Ньютона—Рихмана [10]:

$$Q = \alpha F(t_c - t_r), \quad (1)$$

где Q – тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности теплообмена; t_c и t_r – температуры соответственно стенки и газа. Пункт 1.3.22 ПУЭ задаёт такие температуры стенки и газа: $t_c = +70^\circ\text{C}$ и $t_r = +25^\circ\text{C}$. Несовсем ясно по какой причине были выбраны именно эти значения, но для целей сравнения результатов моделирования с ДДТ, приведёнными в ПУЭ, следует принять именно их.

Заметим, что формула (1) не подходит для нагрева Солнцем, который вообще не упоминается в [10]. Такая ситуация вообще характерна для публикаций по тепломассообмену, причём не только для учебных пособий [10–12]. Для учёта нагрева Солнцем формулу (1) представляют [13, 15] в виде

$$Q = \alpha F(t_c - t_r) + Q_s, \quad (2)$$

где Q_s – тепловой поток излучения от Солнца, формула для которого будет рассмотрена далее.

Для используемой модели поверхностью теплообмена будет цилиндрическая поверхность провода, площадь F которой может быть вычислена по формуле

$$F = \pi dl, \quad (3)$$

где d – диаметр провода, который можно получить из данных ГОСТ 839-80; l – длина провода.

Поскольку источником тепловыделения в проводе является нагрев от протекания тока согласно закону Джоуля—Ленца, то тепловой поток Q можно записать так [16]:

$$Q = I^2 R, \quad (4)$$

где I – протекающий в проводе ток; R – электрическое сопротивление провода, которое можно найти по формуле [17]

$$R = R_{\text{он}} (1 + a(t_c - t_{\text{он}})), \quad (5)$$

где $R_{\text{он}}$ – электрическое сопротивление провода при опорной температуре; $t_{\text{он}}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления; – опорная температура. В обязательном приложении 1 ГОСТ 839-80 даны электрические сопротивления на единицу длины провода при 20°C – $R'_{20} = \frac{R_{20}}{l}$ – для всех описанных проводов.

Отсюда следует, что опорная температура $t_{\text{он}} = 20^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент электрического сопротивления также можно получить из справочного приложения 3 ГОСТ 839-80.

Правая скобка выражения (5) постоянна для проводящего материала провода, а в ГОСТ 839-80 дано сопротивление на единицу длины. Поэтому выражение удобно переписать так:

$$R' = R'_{\text{он}} C_a, \quad (6)$$

где $C_a = (1 + a(t_c - t_{\text{он}}))$ – постоянная, характеризующая увеличение сопротивления с ростом температуры и равная для сталелюминиевых и алюминиевых проводов, а для медных – $C_a = 1,1965$.

Конвекционный теплообмен

Значение среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_d$ путём конвекции для горизонтального цилиндра можно найти исходя из формулы [10]

$$\overline{Nu}_d = 0,46 Gr_d^{0,25}, \quad (7)$$

где \overline{Nu}_d – среднее число Нуссельта; Gr_d – число Грасгофа.

Среднее число Нуссельта \overline{Nu}_d вычисляется для горизонтального цилиндра по формуле [10]

$$\overline{Nu}_d = \frac{\overline{\alpha}_d d}{\lambda}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа.

Число Грасгофа Gr_d для принятой модели может быть вычислено по формуле [10]

$$Gr_d = g\beta(t_c - t_r) \frac{d^3}{\nu^2}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения; β – температурный коэффициент объёмного расширения среды; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Все параметры газа, кроме коэффициента объёмного расширения β , можно взять из табл. П-3 [10]. Коэффициент же объёмного расширения примем $\beta = \frac{1}{273,15} \frac{1}{^\circ\text{C}}$, т.е. таким же, как для

идеального газа согласно закону Гей-Люссака, что даст погрешность менее 1%.

Подставляя выражения (8) и (9) в формулу (7) и выражая средний коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}_d$, получаем

$$\overline{\alpha}_d = 0,46\lambda \left(\frac{g\beta(t_c - t_r)}{d\nu^2} \right)^{0,25}. \quad (10)$$

Интересная особенность формулы (10): единственным входящим в неё параметром провода является диаметр провода d , что позволяет записать её в виде

$$\overline{\alpha}_d = \frac{C_d}{\sqrt[4]{d}}, \quad (11)$$

где $C_d \approx 3,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^{7/4} \cdot \text{К}}$ – постоянная для воздуха

и принятых температур стенки и газа.

Теплообмен излучением

Коэффициент теплообмена излучением $\alpha_{\text{л}}$ можно вычислить по формуле [10]

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon\sigma_0 \frac{t_c^4 - t_r^4}{t_c - t_r}, \quad (12)$$

где ε – приведённая степень черноты; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана.

Кроме того, провод дополнительно нагревается излучением Солнца. В общем случае расчёт нагрева из-за излучения Солнца сложен, так как должен включать в себя определение действия не только прямой составляющей излучения, но также диффузной и отражения от земли [18].

Также следует учесть, что Солнце может находиться на разной высоте над горизонтом. Эта высота зависит как от времени суток, так и от географического положения [14, 18]. Однако особенностью модели бесконечного цилиндра является то, что нагреваемая солнцем поверхность всегда одна и та же и равна половине поверхности провода.

Для целей данной работы будет использоваться простейшая формула, по которой тепловой поток излучения определяется следующим образом:

$$Q_s = -\varepsilon_s A_s S_s, \quad (13)$$

где знак «минус» означает нагрев, а не охлаждение объекта; ε – степень черноты по солнцу; A_s – интенсивность излучения Солнца на поверхности Земли; S_s – площадь освещаемой поверхности, которая для модели бесконечного цилиндра равна площади поперечного сечения провода и вычисляется по формуле

$$S_s = dl. \quad (14)$$

Существует понятие солнечной постоянной, т. е. средней плотности энергии солнечного излучения на среднем расстоянии между Землёй и Солнцем [13]. В разных источниках приводятся разные ее значения – в диапазоне от 1350 до 1370 Вт/м² [13, 14, 17]. Однако поверхность Земли солнечное излучение достигает ослабевшим, частично поглощаясь, а частично отражаясь атмосферой Земли. В [15] дана оценка интенсивности излучения $A_s = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ при оптимальных погодных условиях и значительной высоте Солнца над горизонтом. Именно эту оценку и будем использовать в расчётах.

И для алюминия, и для меди в табл. П-11 [9] дан довольно широкий разброс степеней черноты ϵ : от 0,039 до 0,19 для алюминия и от 0,018 до 0,87 для меди. Такой разброс обусловлен тем, что этот показатель связан с коэффициентом излучения, который меняется в зависимости от многих параметров, в первую очередь – от длины волны [18]. Неучёт данной зависимости, которым грешат некоторые работы (например, [19]), является серьёзной ошибкой, так как фактически лишает физической сущности описание процесса теплообмена излучением. Заметим, что коэффициент излучения зависит и от угла падения, но в принятой модели этот факт не учитывается, так как для металлов эта зависимость слаба [19].

На стр. 42 в [19] дан график зависимости спектрального коэффициента излучения от длины волны. Однако для использования этого графика требуется знать, для какой длины волны λ_b следует вести расчёт. Здесь можно воспользоваться тем, что согласно закону Планка излучение нагретого тела имеет характерную форму с максимумом при длине волны, определяемой законом смещения Вина [19]:

$$\lambda_b = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{t_b}, \quad (15)$$

где t_b — температура излучающей поверхности в К.

Для окружающей среды с температурой $t_r = +25$ °С максимум излучения приходится на длину волны $\lambda_b \approx 9,72$ мкм, а для Солнца с эффективной температурой поверхности $t_{сол} = 5762$ К [13] — $\lambda_b \approx 0,503$ мкм. Используя эти данные (из графика на стр. 42 в [19]), получаем, что для алюминия в случае теплообмена с окружающей средой следует взять степень черноты $\epsilon^{Al} \approx 0,1$, а в случае нагрева Солнцем — $\epsilon_{сол}^{Al} \approx 0,3$. Для меди аналогичные степени черноты $\epsilon^{Cu} \approx 0,05$ и $\epsilon_{сол}^{Cu} \approx 0,5$. Отметим, что, несмотря на относительно малую точность таких вычислений, ее вполне достаточно для адекватного физического описания процессов теплообмена излучением в принятой нами модели.

Теперь можно посчитать коэффициент теплообмена излучением α_l по формуле (12). Он будет постоянным и равным для алюминия

$$\alpha_l \approx 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \text{ а для меди — } \alpha_l \approx 0,38 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Формулу (13) с учётом (14) удобно переписать так:

$$Q_s = -C_s dl, \quad (16)$$

где $C_s = \epsilon_s A_s$ — постоянная, имеющая смысл эффективного теплового потока от излучения Солнца и равная для алюминия $C_s \approx 300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, а для меди — $C_s \approx 500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Формула длительно допустимого тока вне помещения

Приравнивая формулу (2) с учётом (3) к формуле (4) с учётом (6), принимая во внимание (13), а также учитывая упрощения (11) и (16) и делая левую и правую часть на длину провода l , получаем

$$\left(\frac{C_d}{4\sqrt{d}} + \alpha_l \right) \pi d (t_c - t_r) = I^2 R' + C_s d. \quad (17)$$

Выразим из уравнения (17) ток в проводе:

$$I = \sqrt{C_k \frac{d^{3/4}}{R'} + C_l \frac{d}{R'}}, \quad (18)$$

где $C_k = \pi C_d (t_c - t_r)$ и $C_l = \pi \alpha_l (t_c - t_r) - C_s$ — постоянные коэффициенты, определяющие соответственно конвекцию и теплообмен излучением. Отметим, что C_k зависит только от параметров охлаждающего газа и разности температур, но не от материала провода, в то время как C_l зависит только от материала провода и разности температур.

Тогда для воздуха и принятых температур стенки и газа получаем $C_k \approx 488 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^{7/4}}$, а также

$$C_l \approx -194 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ для алюминия и } C_l \approx -447 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ для}$$

меди. Отрицательные значения коэффициентов, определяющих теплообмен излучением, означают, что нагрев Солнцем превосходит охлаждение излучением в окружающую среду. Это вполне согласуется с данными наблюдений.

Результаты расчётов по формуле (18) для проводов по ГОСТ 839-80 в сравнении с данными табл. 1.3.29 ПУЭ представлены для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов на рис. 1, а для медных — на рис. 2.

В целом для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов результаты расчёта по формуле (18) ниже, хотя и близки к ДДТ внутри помещения

из табл. 1.3.29 ПУЭ без учёта теплообмена излучением, а в случае учёта как конвекции, так и теплообмена излучением — ещё ниже (см. рис. 1). Для медных проводов результаты расчёта по формуле (18) всегда ощутимо меньше ДДТ внутри помещения из табл. 1.3.29 ПУЭ.

«Выбросы данных» на рис. 1 объясняются наличием в ГОСТ 839-80 проводов с очень малым отношением площадей сечения алюминиевой части к стальной (далее А/С). Из-за этого при меньшем тепловыделении у них большая поверхность теплообмена. В основном такие провода применяются в качестве грозозащитных тросов, особенно если эти тросы используются также для передачи данных релейной защиты и автоматики [9]; это провода марок АС 70/72, АС 95/141, АС 150/34, АС 185/128, АС 300/204, АС 500/204 и АС 500/336, которые в дальнейшем будем называть провода-тросы.

Заметим, что формула (18) дана для случая неограниченного теплообмена, что соответствует случаю ДДТ вне помещения, которые выше чем ДДТ внутри помещения. Это позволяет сделать вывод, что в ПУЭ ДДТ значительно завышены. В результате для больших сечений проводов всех типов плотность ДДТ оказывается меньше экономической плотности, а значит учёт ДДТ при выборе сечений проводов необходим.

Интересная особенность формулы (18) — рост второго слагаемого по отношению к первому при росте диаметра провода, т. е. при увеличении роли в охлаждении провода теплообмена излучением по отношению к конвективному. Как следствие, можно дать рекомендацию для проводов большого сечения, а значит, и диаметра применять меры, увеличивающие охлаждение излучением. Поскольку нагрев излучением происходит в основном Солнцем, т. е. в видимом диапазоне, а охлаждение — путём теплообмена с окружающей средой, т. е. в инфракрасном диапазоне, то в качестве такой меры можно рекомендовать покрытие провода веществом, имеющим высокий коэффициент излучения в инфракрасном диапазоне и низкий в видимом, например белой масляной краской. Однако следует учесть, что такое покрытие может негативно сказаться на всей конструкции в целом как из-за удорожания и увеличения веса провода, так и из-за некоторого ухудшения теплопроводности.

Упрощение для инженерных расчётов

Таким образом, в инженерной практике возникает задача определения ДДТ и обратная ей задача определения параметров провода по заданному ДДТ. Для решения первой задачи можно использовать формулу (18), однако она неудобна как из-за необходимости вычисления дробной степени, так и из-за необходимости знать удельное сопротивление провода. Для решения второй задачи формула (18) вообще малоприменяема.

Формулу (18) можно упростить, представив электрическое сопротивление на единицу длины провода R' в виде

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{\rho'}{S} = \frac{\rho'}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{C_R}{d^2}, \quad (19)$$

где $C_R = \frac{4\rho'}{\pi}$ — постоянная, характеризующая проводимость провода.

Из табл. 2 приложения 1 ГОСТ 839-80 можно получить, что для алюминиевых проводов $C_R \approx 60,2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м, а из табл. 1 того же приложения для медных проводов (кроме марок М 4, М 6 и М 10) — $C_R \approx 37,4 \cdot 10^{-9}$ Ом · м. Согласно ГОСТ 839-80 провода марок М 4, М 6 и М 10 — однопроволочные, в отличие от остальных проводов, которые являются многопроволочными, а следовательно, их проводимость несколько выше из-за отсутствия пустот между проволоками. Для таких проводов согласно табл. 1 приложения 1 ГОСТ 839-80 следует принимать $C_R \approx 28,8 \cdot 10^{-9}$ Ом · м.

Со сталеалюминиевыми проводами ситуация сложнее из-за большого количества разнообразных А/С. Если отбросить провода-тросы, то согласно табл. 4 приложения 1 ГОСТ 839-80 основному количеству проводов соответствует промежуток $C_R \in [59,6 \cdot 10^{-9}; 72,3 \cdot 10^{-9}]$ Ом · м с математическим ожиданием $C_R \approx 65,7 \cdot 10^{-9}$ Ом · м. Для сталеалюминиевых проводов следует ориентироваться на верхнюю границу — $C_R \approx 72,3 \cdot 10^{-9}$ Ом · м — из-за того, что эта величина используется для определения ДДТ, который лучше занизить, чем завесить (см. обоснование выше), а увеличение этой величины приведёт к уменьшению ДДТ.

Подставляя (19) в (18), получаем

$$I = \sqrt{\left(\frac{C_{\kappa}}{C_R} d^{2\frac{3}{4}} + \frac{C_{\pi}}{C_R} d^3\right)} = C_{\pi}^R \sqrt{d^3 \left(\frac{C_{\kappa/\pi}}{\sqrt[4]{d}} - 1\right)}, \quad (20)$$

где $C_{\pi}^R = \sqrt{-\frac{C_{\pi}}{C_R}}$ — постоянная, характеризующая

теплообмен излучением; $C_{\kappa/\pi} = -\frac{C_{\kappa}}{C_{\pi}}$ — постоянная, характеризующая отношение теплообменов конвекцией и излучением провода. Знак выбран так, чтобы полученные переменные были положительными.

Для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов $C_{\kappa/\pi} \approx 2,52 \text{ м}^{1/4}$, а для медных — $C_{\kappa/\pi} \approx 1,09 \text{ м}^{1/4}$. Для алюминиевых проводов — $C_{\pi}^R = 5,67 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^{3/2}}$, для многопроволочных медных — $C_{\pi}^R = 10,9 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^{3/2}}$, для однопроволочных медных — $C_{\pi}^R = 12,46 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^{3/2}}$, для сталеалюминиевых — $C_{\pi}^R = 5,18 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}^{3/2}}$.

Математический анализ результатов моделирования

Правая часть формулы (20) имеет полюс в точке $d = 0$, который появляется исключительно из математических закономерностей и не имеет физического смысла. Однако этот полюс не представляет существенной проблемы, так как диаметр провода всегда должен быть больше нуля ($d > 0$) из чисто физических соображений.

Более важным математическое следствие — то, что функция (20) имеет нули при $d = 0$ и $d = C_{\kappa/\pi}^4$, а следовательно, в этом промежутке есть по крайней мере один максимум. Для его нахождения продифференцируем функцию (20):

$$\frac{dI}{dd} = C_{\pi}^R d^{3/8} \frac{11C_{\kappa/\pi} - 12d^{1/4}}{8\sqrt{C_{\kappa/\pi} - d^{1/4}}}. \quad (21)$$

Функция (21) имеет нули при $d = 0$, $d = \left(\frac{11}{12} C_{\kappa/\pi}\right)^4 \approx 0,7 C_{\kappa/\pi}^4$ и $d = C_{\kappa/\pi}^4$. Таким образом, увеличивать диаметр провода свыше $d = 0,7 C_{\kappa/\pi}^4$ нецелесообразно, а выше $d = C_{\kappa/\pi}^4$

— невозможно по условиям теплового баланса; Для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов это будут соответственно диаметры 28,45 м и 40,29 м, а для медных — 1,0 м и 1,42 м. Так как в полученных формулах учитывается только форма и материал поверхности, но не внутреннее строение провода, то данные выводы могут быть распространены на полые и расширенные провода, а также на трубчатые токоведущие шины.

Правая часть формулы (20) удобна для инженерных расчётов, так как позволяет проводить их на любом калькуляторе, поддерживающем четыре арифметических действия и взятие корня, в том числе два раза — взятие корня четвёртой степени.

Если отбросить относительно слабую зависимость от $\sqrt[4]{d}$, из формулы (20) следует, что зависимость ДДТ от диаметра провода пропорциональна кубу диаметра ($I \sim d^{3/2}$). Эту зависимость можно использовать для грубой оценки диаметра провода под требуемый ДДТ. Таким образом, в первом приближении можно записать

$$d \approx C_I I^{2/3}, \quad (22)$$

где $C_I = \left((C_{\pi}^R)^2 \left(\frac{C_{\kappa/\pi}}{\sqrt[4]{d}} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{3}}$ — постоянная, равная для алюминиевых проводов $C_I = 0,402 \frac{\text{мм}}{\text{А}^{2/3}}$, для сталеалюминиевых — $C_I = 0,44 \frac{\text{мм}}{\text{А}^{2/3}}$, для многопроволочных медных — $C_I = 0,364 \frac{\text{мм}}{\text{А}^{2/3}}$.

Здесь для расчёта коэффициента взят наибольший диаметр провода по ГОСТ 839-80, так как именно для больших диаметров провода значения ДДТ могут давать сечения ниже экономического сечения провода, а значит, актуально их вычисление. По той же причине не дано значение постоянной для однопроволочных медных проводов.

Впрочем, расчёты показывают, что для указанных в ГОСТ 839-80 диаметров проводов из-за неучтённой зависимости от $\sqrt[4]{d}$ коэффициент C_I падает до 0,75 от расчётного значения при уменьшении диаметра провода до минимального. Поэтому в инженерной практике целесообразнее использовать предварительно рассчитанные таблицы ДДТ.

Такие таблицы рассчитаны и представлены здесь (табл. 1–3). Для удобства поиска подходящего провода по известному ДДТ строки таблицы отсортированы по возрастанию ДДТ, а не сечения. Для медных и алюминиевых проводов марок М и А варианты сортировки идентичны, но для сталеалюминиевых проводов марки АС выбор сортировки оказывает определённое влияние. Например, из-за выбранного типа сортировки в табл. 3 провод марки АС 300/204 оказывается между проводами марок АС 330/30 и АС 330/43.

Таблица 1

Длительно допустимые токи для медных проводов марки М

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
	вне помещений	внутри помещений	вне помещений
М 4	27	-	-
М 6	36	-	-
М 10	51	60	95
М 16	71	102	133
М 25	97	137	183
М 35	120	173	223
М 50	152	219	275
М 70	188	268	337
М 95	234	341	422
М 120	270	395	485
М 150	315	465	570
М 185	362	540	650
М 240	424	685	760
М 300	487	740	880
М 350	549	-	-
М 400	592	895	1050

Таблица 2

Длительно допустимые токи для алюминиевых проводов марки А

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
	вне помещений	внутри помещений	вне помещений
А 10	45	-	-
А 16	62	75	105
А 25	84	106	136
А 35	105	130	170
А 40	116	-	-

Окончание таблицы 2

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
	вне помещений	внутри помещений	вне помещений
А 50	134	165	215
А 63	158	-	-
А 70	169	210	265
А 95	205	255	320
А 100	217	-	-
А 120	241	300	375
А 125	252	-	-
А 150	283	355	440
А 160	298	-	-
А 185	326	410	500
А 200	347	-	-
А 240	391	490	590
А 250	403	-	-
А 300	444	570	680
А 315	471	-	-
А 350	502	-	-
А 400	544	690	815
А 450	597	-	-
А 500	645	820	980
А 550	682	-	-
А 560	684	-	-
А 600	718	955	1100
А 630	753	-	-
А 650	761	-	-
А 700	802	-	-
А 710	816	-	-
А 750	845	-	-

Таблица 3

Длительно допустимые токи для сталеалюминиевых проводов марки АС

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
	вне помещений	внутри помещений	вне помещений
АС 10/1,8	48	53	84
АС 16/2,7	65	79	111
АС 25/4,2	86	109	142
АС 35/6,2	113	135	175
АС 40/6,7	119	-	-
АС 50/8	135	165	210
АС 63/10,5	162	-	-
АС 70/11	171	210	265

Продолжение таблицы 3

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
		вне помещений	внутри помещений
АС 70/72	191	-	-
АС 95/16	215	260	330
АС 100/16,7	222	-	-
АС 95/141	241	-	-
АС 120/27	246	-	375
АС 120/19	249	313	390
АС 125/6,9	253	-	-
АС 125/20,4	259	-	-
АС 150/19	282	365	450
АС 150/24	284	365	450
АС 150/34	285	-	450
АС 160/8,9	301	-	-
АС 160/26,1	306	-	-
АС 185/29	333	425	510
АС 185/24	339	430	520
АС 185/43	341	-	515
АС 200/11,1	350	-	-
АС 200/32,6	356	-	-
АС 205/27	360	-	-
АС 185/128	363	-	-
АС 240/39	399	505	610
АС 240/32	405	505	605
АС 240/56	408	-	610
АС 300/67	461	-	-
АС 300/66	461	-	680
АС 300/48	463	585	690
АС 300/39	467	600	710
АС 315/21,8	476	-	-
АС 315/51,3	484	-	-
АС 330/30	498	-	-
АС 300/204	498	-	-
АС 330/43	499	-	-
АС 500/27	634	830	960
АС 500/64	649	815	945
АС 500/26	652	-	-
АС 500/34,6	652	-	-
АС 500/64,8	657	-	-
АС 500/204	682	-	-
АС 500/336	697	-	-
АС 550/71	700	-	-
АС 560/38,7	704	-	-
АС 560/70,9	709	-	-
АС 600/72	726	920	1050
АС 630/43,6	762	-	-

Окончание таблицы 3

Марка провода	Длительно допустимый ток, А		
	Расчёт	По ПУЭ	
		вне помещений	внутри помещений
АС 630/79,8	768	-	-
АС 605/79	771	-	-
АС 700/86	815	1040	1180
АС 710/49,1	826	-	-
АС 710/89,9	833	-	-
АС 750/93	862	-	-
АС 800/34,6	891	-	-
АС 800/66,7	896	-	-
АС 800/101,3	903	-	-
АС 800/105	919	-	-
АС 900/38,9	964	-	-
АС 900/75	970	-	-
АС 1000/43,2	1035	-	-
АС 1000/56	1040	-	-
АС 1120/47,3	1117	-	-
АС 1120/91,2	1135	-	-
АС 1250/53,8	1203	-	-
АС 1250/101,8	1211	-	-

Выводы

В среде электроэнергетиков существует мнение, что «Правила устройства электроустановок» (ПУЭ) устаревают ещё в момент выхода. Однако некоторые части ПУЭ на удивление устойчивы, но, как показано в данной статье, даже они не застрахованы от ошибок. Рассмотренная здесь табл. 1.3.29 ПУЭ – яркая иллюстрация этого. Представленные в ней длительно допустимые токи значительно завышены, что может представлять опасность для электроустановок, особенно использующих провода с большим сечением. Даже в простейшей модели теплового баланса получаются значительно меньшие ДДТ. Учитывая важность полученного результата, вывод формулы рассмотрен максимально подробно. Были даны рекомендации по повышению теплообмена излучением как действенного метода повышения ДДТ.

Однако современная номенклатура проводов значительно больше представленной в ПУЭ. Поэтому в работе была предложена пригодная для инженерного использования формула, позволяющая вычислить ДДТ для любого

провода из ГОСТ 839-80 исходя только из его диаметра.

Попутно был определён обоснованный диапазон диаметров провода.

Для инженерных целей были рассчитаны таблицы ДДТ для всех проводов, представленных

в ГОСТ 839-80, и обосновано их использование.

К сожалению, объём статьи позволил рассмотреть только ДДТ для проводов вне помещений. Рассмотрению ДДТ внутри помещений будет посвящена следующая статья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства энергетики России от 8.07.02 № 204.
2. **Геркус А.А.** Анализ методик для выбора сечений проводов воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2014. № 3(202). С. 131–137.
3. **Зуев Э.Н.** К вопросу об экономической плотности тока в современных условиях // Электро. 2000. № 1. С. 44–47.
4. **Блок В.М.** Электрические сети и системы. М.: Высшая школа, 1986. 430 с.
5. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 645 с.
6. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2007. 701 с.
7. **ГОСТ 839-80.** Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями № 1, 2). М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 23 с.
8. **Реут М.А., Рокотян С.С.** Справочник по проектированию линий электропередачи. М.: Энергия, 1971. 288 с.
9. **Крюков К.П., Новгородцев Б.П.** Конструкция и механический расчёт линий электропередачи. Л.: Энергия, 1979. 312 с.
10. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
11. **Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. [и др].** Теория тепломассобмена. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
12. **Михеев М.А.** Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1949. 396 с.
13. **Юренин В.Н., Лебедев П.Д.** Теплотехнический справочник. Т. 2. М.: Энергия, 1976. 896 с.
14. **Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. [и др].** Теория тепломассобмена. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 683 с.
15. **Куашнинг Ф.** Системы возобновляемых источников энергии. Астана: Фолиант, 2013. 432 с.
16. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.: Наука, 1977. 687 с.
17. **Савельев И.В.** Курс общей физики. Т. 2: Электричество. М.: Наука, 1973. 430 с.
18. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 318 с.
19. **Госсорг Ж.** Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
20. **Горюнов В.Н., Гиришин С.С., Кузнецов Е.А., Петрова Е.В.** Анализ погрешностей расчета температуры и потерь мощности по базовому и приближенному уравнениям теплового баланса воздушных линий электропередач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Т. 1. С. 210.

REFERENCES

1. Prikaz Ministerstva energetiki Rossii ot 08.07.02. № 204.
2. **Gerkusov A.A.** Analiz metodik dlya vybora secheniy provodov vozdushnykh liniy elektroperedachi. *St.Peterssburg State Politechnical Universiti Journal. St.Petersburg: SPbGPU Publ.* 2014. № 3(202). S. 131–137. (rus.)
3. **Zuyev E.N.** K voprosu ob ekonomicheskoy plotnosti toka v sovremennykh usloviyakh. *Elektro.* 2000. № 1. S. 44–47. (rus.)
4. **Blok V.M.** Elektricheskiye seti i sistemy. M.: Vysshaya shkola, 1986. 430 s. (rus)
5. Pravila ustroystva elektroustanovok. 6-ye izd. M.: Energoatomizdat, 1986. 645 s. (rus)
6. Pravila ustroystva elektroustanovok. 7-ye izd. Sankt-Peterburg: DEAN, 2007. 701 s. (rus.)
7. **GOST 839-80.** Provoda neizolirovannyye dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi. *Tekhnicheskiye usloviya (s Izmeneniyami N 1, 2).* M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2002. 23 s. (rus.)
8. **Reut M.A., Rokotyans S.S.** Spravochnik po proyektirovaniyu liniy elektroperedachi. M.: Energiya, 1971. 288 s. (rus)
9. **Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P.** Konstruktsiya i mekhanicheskiy raschet liniy elektroperedachi. L.: Energiya, 1979. 312 s. (rus.)
10. **Mikheyev M.A., Mikheyeva I.M.** Osnovy teploperedachi. M.: Energiya, 1977. 344 s. (rus)
11. **Isayev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. [i dr].** Teoriya teplomassobmena. M.: Vysshaya shkola, 1979. 495 s. (rus.)
12. **Mikheyev M.A.** Osnovy teploperedachi. M.: Gosenergoizdat, 1949. 396 s. (rus.)

13. **Yurenev V.N., Lebedev P.D.** Teplotekhnicheskiy spravochnik. T. 2. M.: Energiya, 1976. 896 p. (rus.)
14. **Isayev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. [i dr].** Teoriya teplomassobmena. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1997. 683 s. (rus.)
15. **Kuashning F.** Sistemy vozobnovlyayemykh istochnikov energii. Astana: Foliant, 2013. 432 s. (rus.)
16. **Sivukhin D.V.** Obshchiy kurs fiziki. T. 3: Elek-trichestvo. M.: Nauka, 1977. 687 s. (rus)
17. **Savelyev I.V.** Kurs obshchey fiziki. T. 2: Elek-trichestvo. M.: Nauka, 1973. 430 s. (rus.)
18. **Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K.** Solnechnaya energetika. M.: Izdatelskiy dom MEI, 2008. 318 s. (rus.)
19. **Gossorg Zh.** Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primeneniye. M.: Mir, 1988. 416 s. (rus.)
20. **Goryunov V.N., Girshin S.S., Kuznetsov Ye.A., Petrova Ye.V.** Analiz pogreshnostey rascheta temperatury i poter moshchnosti po bazovomu i priblizhennomu uravneniyam teplovogo balansa vozdushnykh liniy elektroperedach. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. № 1. T. 1. S. 210. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

СУХИЧЕВ Михаил Иванович — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: sukhichev@yandex.ru

SUKHICHEV Mikhail I. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: sukhichev@yandex.ru