

# Условия успешной плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий<sup>1</sup>

ФИГУРНОВ Е.П., ЖАРКОВ Ю.И., ПЕТРОВА Т.Е.

*Приведена уточненная методика определения токов, времени плавки и метеорологических условий, при которых возможна успешная плавка гололеда.*

**Ключевые слова:** электрические сети, плавка гололеда, токи плавки, математическая модель

Обычно при расчете режимов плавки гололеда решается задача выбора такого значения тока плавки, при котором в заданных метеорологических условиях гололед будет удален за заданное время. Такая постановка вопроса пригодна для воздушных линий, оборудованных специальными установками плавки гололеда с регулируемым значением тока при условии, что ток плавки гололеда во всех погодных условиях не превышает допустимого значения. Для воздушных линий, не имеющих таких установок, для контактных сетей электрического транспорта ток плавки гололеда не регулируется, его значение приходится выбирать с учетом ряда ограничений (механической прочности проводов, мощности источников питания, схемы питания при плавке гололеда, длины зоны плавки гололеда и т.п.). Для конкретной схемы плавки гололеда такой ток остается практически неизменным для всех погодных условий, поэтому всегда имеется опасение, что реализуемое в данной схеме значение тока может оказаться недостаточным для успешной плавки гололеда при каком-то неблагоприятном, но возможном сочетании толщины стенки гололеда, скорости ветра и температуры окружающей среды. В статье на основе уточненной модели плавки гололеда рассмотрена методика определения действительной области метеорологических условий, при которых при заданном значении тока обеспечивается успешная плавка гололеда.

Расчеты, связанные с плавкой гололеда на проводах воздушных линий, основаны на фундаментальной работе [1]. В дальнейшем методика расчетов совершенствовалась [2–4] и в наиболее обобщенном виде ее современная трактовка вместе с большим кругом вопросов, посвященных предотвращению гололедных аварий, представлена в [5, 6]. Вместе с тем некоторые ее положения, например определение температуры гололедного осадка, расхода энергии на его нагрев и времени нагрева

*A refined procedure for determining the currents, melting time, and meteorological conditions under which successful melting of ice is possible is presented.*

**Key words:** electric networks, ice melting, melting currents, mathematical model

провода с гололедом, учет конвективного теплообмена гололеда с окружающей средой при наличии ветра, нуждаются в существенном уточнении и более строгом обосновании.

**Модель плавки гололеда.** В расчетах режимов плавки гололеда предполагается, что гололед на проводе оседает в виде цилиндрической муфты, при котором длительность плавки гололеда по сравнению с другими формами является наибольшей. Плавка гололеда осуществляется в два этапа. На первом этапе ток плавки гололеда подогревает провод, имеющий первоначально температуру окружающей среды, до температуры 0–2 °С, при которой гололедно-изморозевое образование на проводе начинает таять. Второй этап соответствует установившемуся режиму непосредственной плавки гололеда, при котором температура 0–2 °С до момента опадания гололеда остается неизменной [1–6].

В модели плавки гололеда, приведенной на рис. 1, предполагается, что тепловой поток от нагретого током провода 1 проходит через муфту гололеда 3 в окружающую среду. На втором этапе плавки гололеда вокруг провода образуется прослойка талой воды 2. Под действием собственной тяжести расплавляемый гололед 3 постепенно проседает через выплавляемую канавку 4. При перемещении провода 1 к верхней наружной поверхности гололедной муфты 3 нижняя часть канавки под проводом 1 (за пределами прослойки талой воды 2) снова замерзает. Корка гололеда в канавке 4 над проводом постепенно становится тоньше и, наконец, разрушается под действием собственного веса муфты 3. Гололедное образование при этом опадает.

**Параметры гололеда и проводов.** Необходимые для расчетов значения параметров при температуре, близкой к нулю, приведены в таблице.

Для цилиндрической формы гололеда имеет место соотношение  $D = d + 2b_{\Gamma}$ , где  $D$  – диаметр гололедной муфты, мм;  $d$  – диаметр провода, мм;  $b_{\Gamma}$  – толщина стенки гололеда, мм.

<sup>1</sup> В порядке обсуждения. Ред.

Таблица 1

Вид обледенения	Физические параметры гололедно-изморозевых отложений				
	Плотность $\rho_{\Gamma}$ , кг/м <sup>3</sup>		Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\Gamma}$ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость $C_{\Gamma}$ , Вт·с/кг·°С	Коэффициент теплового излучения $\chi$
	диапазон	средняя			
Гололед	600, 900	750	2,2, 2,27	2300	0,64
Зернистая изморозь	100, 600	350	0,265	2100	0,30
Кристаллическая изморозь	10, 90	50	0,042	2100	0,30
Мокрый снег	100, 600	200	0,122	2100	0,30
Смесь	250, 500	350	0,265	2100	0,30

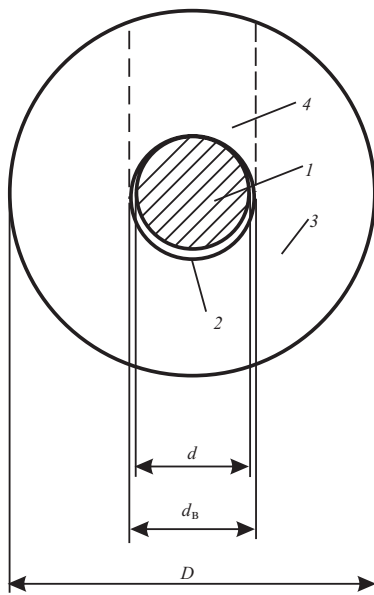


Рис. 1. Модель провода с гололедом при его плавке

Значение массы цилиндрической гололедной муфты на проводе

$$m_{\Gamma} = \frac{\rho(D^2 - d^2)10^{-6}}{4} g_{\Gamma} = \rho g_{\Gamma} b_{\Gamma} (d + b_{\Gamma}) 10^{-6}.$$

Диаметр провода, покрытого гололедом,  $d$  принимают в соответствии со стандартом. Для фасонных проводов в качестве диаметра рекомендуется принимать  $d = 0,5(H + A)$ , где  $H, A$  – наибольшие соответственно вертикальный и горизонтальный размеры поперечного сечения, мм.

Сопротивления проводов, покрытых гололедом,  $r_{\Pi}$  при плавке принимают соответствующими температуре, близкой к нулю. Удельные теплоемкости проводов  $C_{\Pi}$  при той же температуре равны: для меди – 384 Втж/кгжС, алюминия – 886, стали – 437. Для проводов, состоящих из нескольких металлов (сталеалюминовые АС, сталежелезные МСН и др.) с массой  $m_{\Pi}$ , произведение  $C_{\Pi} m_{\Pi}$  вычисляется по формуле:

$$C_{\Pi} m_{\Pi} = C_{\Pi 1} m_{\Pi 1} + C_{\Pi 2} m_{\Pi 2} \dots$$

$C_{\Pi 1}, C_{\Pi 2}, \dots, m_{\Pi 1}, m_{\Pi 2}, \dots$  – удельные теплоемкости и массы разных металлов, входящих в состав провода, соответственно.

**Теплоотдача.** Коэффициент теплоотдачи  $a$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), содержит две составляющие: коэффициент теплоотдачи конвекцией и коэффициент теплоотдачи излучением  $a = a_{\kappa} + a_{\lambda}$ . Численное значение составляющей  $a_{\lambda}$  меньше (при больших скоростях ветра – значительно меньше) составляющей  $a_{\kappa}$ . В общем случае  $a_{\lambda}$  вычисляют по [7]:

$$a_{\lambda} = \frac{5,67 \times \frac{\epsilon_{\text{окр}}}{\epsilon_{\text{окр}}} \frac{\epsilon_{\text{окр}}^{273+t_{\text{с2}}} - \epsilon_{\text{окр}}^{273+t_{\text{окр}}}}{t_{\text{с2}} - t_{\text{окр}}}}{100} \frac{\text{м}^4}{\text{с}} - \frac{\epsilon_{\text{окр}}^{273+t_{\text{окр}}} - \epsilon_{\text{окр}}^{273+t_{\text{окр}}}}{100} \frac{\text{м}^4}{\text{с}}$$

где  $t_{\text{с2}}$  – температура наружной стенки гололеда, °С;  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °С;  $\chi$  – коэффициент теплового излучения (степень черноты).

При реальной разности температур  $t_{\text{с2}} - t_{\text{окр}}$  (не превышающей, как правило, 2, 3 °С даже при  $t_{\text{окр}} = -15$  °С), учитывая также сравнительно небольшое влияние  $a_{\lambda}$  на результирующее значение коэффициента  $a$ , его можно принять  $\approx 4,45 \times$ .

В технической литературе [2, 4, 5 и др.], нормативных материалах и инструкциях по нагреву проводов вычисляют обычно произведение  $a_{\kappa} D \cdot 10^{-3}$  по формуле, приведенной в [8, 9]. Однако, как установлено в [6], эта формула неадекватно отражает действительные условия теплообмена при ветре. Как известно, для вычисления  $a_{\kappa}$  используют функциональную зависимость между безразмерными числами Нуссельта  $Nu$  и Рейнольдса  $Re$  [7]:

$$Nu = \frac{a_{\kappa} l}{\lambda}; Re = \frac{V l}{\nu} 10^{-3},$$

где  $l$  – определяющий (характерный) размер тела, мм;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С);  $V$  – скорость охлаждающего потока воздуха, м/с;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Для цилиндров и круглых труб принимают  $l = D$  [7]. В [8, 9] это же положение распространено на

витые провода, что в общем случае не правомерно, поскольку для круглых и витых проводов не соблюдается условие геометрического подобия [7]. В то же время в [10] показано, что если в указанных формулах для Nu и Re в качестве определяющего размера принять  $l = 0,5\rho D_3$ , где  $D_3$  – эквивалентный диаметр протяженного тела (мм), то одни и те же формулы будут справедливы не только для тел круглого сечения (цилиндров), но и для протяженных тел других форм. В свою очередь, эквивалентный диаметр равен  $\Pi \cdot 10^3 / \rho$ , где  $\Pi$  – периметр протяженного тела (м), численно равный площади его поверхности  $F$  (м<sup>2</sup>/м), приходящейся на единицу длины. Для этих условий в [10] приведены опытные данные зависимости  $Nu = f(Re)$  для цилиндров, полученные за многие годы большим числом авторов в разных странах. В результате выполненной статистической обработки этих данных определена с коэффициентом детерминации  $R^2$  не менее 0,96 аппроксимирующая функция вида  $Nu = bRe^a$ , причем  $a = 0,44$ ,  $b = 0,813$  при  $10 \leq Re \leq 10^3$  и  $a = 0,59, b = 0,288$  при  $10^3 \leq Re \leq 10^5$ .

Из приведенных соотношений с учетом рекомендаций [10] относительно определяющего размера  $l$  следует:

$$a_k = \frac{bl}{v^a(0,5\rho)^{1-a}D_3^{1-a}10^{-3}}(VD_3 \cdot 10^{-3})^a = \frac{c}{D_3}(VD_3)^a;$$

$$c = \frac{bll0^3}{(v10^3)^a(0,5\rho)^{1-a}}.$$

В диапазоне температур окружающей среды  $t_{окр}$  от  $-20$  до  $+50$  °C справочные значения  $l$  и  $v$  хорошо аппроксимируются зависимостями:

$$l = 2,44 \times 10^{-2} (1 + 0,003t_{окр});$$

$$v = 13,75 \times 10^{-6} (1 + 0,0032t_{окр})^2.$$

Отношение  $l/v^a$  для приведенных значений  $a$  от температуры  $t_{окр}$  практически не зависит, поэтому при вычислении параметра  $c$  можно считать  $t_{окр} = 0$ . Отсюда следует  $c = 102$  при  $10 \leq Re \leq 10^3$  и  $c = 73,3$  при  $10^3 \leq Re \leq 10^5$ . В диапазоне температур  $t_{окр}$  от 0 до  $-15$  °C значение  $10^{-3}/v$  изменяется не более чем на 5%, поэтому при  $l = 0,5\rho D_3$  можно принять некоторое усредненное значение  $Re = 114VD_3$ . Поскольку в расчетах противогололедных режимов гололед принят цилиндрической формы, то в дальнейшем принимаем  $D_3 = D$ , а произведение  $aD10^{-3}$  выразим в виде

$$aD10^{-3} = (a_k + a_l)D10^{-3} =$$

$$= c[V(d + 2b_r)]^a 10^{-3} + 4,45x(d + 2b_r)10^{-3}. \quad (1)$$

**Температура стенки гололеда.** В установившемся режиме плавки гололеда температуру прослойки талой воды и внутренней стенки гололедного осадка  $t_{c1}$  принимаем равной нулю [1–6]. Для определения температуры наружной стенки гололедного осадка  $t_{c2}$  в [4] использована формула, предполагающая, что в толще муфты гололеда между внутренней и наружной ее поверхностями равномерно распределены источники теплоты, отвод которой осуществляется через наружную поверхность без учета условий теплоотдачи и температуры окружающей среды. Такие допущения не являются обоснованными. Применительно к рассматриваемой модели адекватной является классическая теория теплопередачи [7], в соответствии с которой линейная плотность теплового потока, проходящего через наружную поверхность гололедной муфты,  $q_{1,c2}$  и плотность теплового потока от этой поверхности в окружающую среду  $q_{1,окр}$  определяются зависимостями:

$$q_{1,c2} = \frac{\rho(t_{c1} - t_{c2})}{R_{т.г}} = \frac{\rho(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2l_\Gamma} \ln \frac{D}{d_B}};$$

$$q_{1,окр} = \frac{\rho(t_{c2} - t_{окр})}{R_{т.окр}} = a\rho B(t_{c2} - t_{окр})10^{-3},$$

где  $R_{т.г}$ ,  $R_{т.окр}$  – линейные термические сопротивления соответственно теплопередачи муфты гололеда и теплоотдачи с ее поверхности в окружающую среду, м<sup>2</sup>С/Вт;  $d_B$  – наружный диаметр водяной прослойки, мм;  $l_\Gamma$  – коэффициент теплопроводности гололедного осадка, Вт/(м<sup>2</sup>С);  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>С);  $t_{окр}$  – температура окружающей среды, °C.

Из-за незначительной толщины водяной прослойки можно считать в дальнейшем  $\ln(D/d_B) \approx \ln(D/d)$ , где  $d$  – диаметр провода, мм.

Поскольку в установившемся режиме количество теплоты, проходящее через наружную поверхность гололеда и отдаваемое в окружающую среду, одно и то же ( $q_{1,c2} = q_{1,окр}$ ), то из совместного решения приведенных зависимостей при  $t_{c1} = 0$  получаем:

$$t_{c2} = \frac{t_{окр}R_{т.г}}{R_{т.г} + R_{т.окр}} = \frac{t_{окр} \ln \frac{D}{d} \frac{1}{2l_\Gamma} + \frac{2b_\Gamma \dot{\rho}}{d \dot{\rho}}}{\ln \frac{D}{d} \frac{1}{2l_\Gamma} + \frac{2l_\Gamma}{a(d+2b_\Gamma)10^{-3}}};$$

$$t_{c2} - t_{окр} = \frac{R_{т.окр}(-t_{окр})}{R_{т.г} + R_{т.окр}} \quad (2)$$

$$= - \frac{t_{окр}}{1 + \frac{a(d+2b_{\Gamma})10^{-3}}{2l_{\Gamma}} \ln \frac{D}{d} + \frac{2b_{\Gamma}}{d} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}}}$$

В реальных условиях при плавке гололеда происходит перемещение провода из центра гололедной муфты к ее периферии. В общем случае значение  $R_{\Gamma, \Gamma}$  при этом изменяется. В [2, 5, 6] приведена приближенная методика учета этого изменения, в которой, однако, принято допущение, что нагревается не вся муфта гололеда, а только тот объем льда, который выплавляется. В общем виде задача не решается и расчет ведется численным интегрированием соответствующих уравнений. Вместе с тем, в [1] на основе анализа утверждается, что разница в теплоотдаче сравнительно невелика до того момента, когда провод оказывается в непосредственной близости от поверхности гололедного цилиндра и когда наступает излом корки гололеда. Это дает основание вычислять далее (так же, как в [1, 4, 5]) нагрев муфты гололеда и условия теплоотдачи без учета меняющегося в процессе плавки эксцентриситета провода по отношению к гололедной муфте.

Температура слоев в толще стенки цилиндрического гололеда от  $t_{c1}$  до  $t_{c2}$  изменяется по закону [7]:

$$t_x = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{D_x}{d}}{\ln \frac{D}{d}}$$

где  $D_x$  – диаметр слоя с температурой  $t_x$ , находящегося на расстоянии  $x$  от центра.

Средняя температура по толщине стенки (с учетом  $t_{c1} = 0$ ) равна:

$$t_{cp} = \frac{1}{D-d} \int_d^D t_x dx = \frac{1}{D-d} \int_d^D \left( t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{D_x}{d}}{\ln \frac{D}{d}} \right) dx = t_{c2} K_1 \quad (3)$$

Значения коэффициента  $K_1$ :

Отношение $b_{\Gamma}/d$	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10
$K_1$	0,53	0,56	0,59	0,63	0,65	0,68	0,71	0,72

**Время плавки гололеда.** Полагаем, что провод и покрывающий его гололед к моменту начала плавки имеют температуру  $t_{окр}$ . При включении тока

плавки гололеда температура провода  $t_{\Pi}$  на первом этапе за время  $t_1$  переходного процесса повышается до значения  $0,2$  °С. Расплавление гололеда начинается на втором этапе после того, как температура  $t_{c1}$  достигнет нуля, и продолжается в течение времени установившегося процесса  $t_2$  до опадания гололеда с провода. Определение времени  $t_1$ , приведенное в [2], предполагает, что нагревом гололедной муфты можно пренебречь. Это допущение приводит к существенному занижению результата. В [4] принято допущение, что температура наружной поверхности гололедной муфты с самого начала переходного процесса равна установившемуся значению, что приводит к завышению результата. Кроме того, в обоих случаях использованы выражения для коэффициентов теплоотдачи конвекцией, которые в настоящее время не рекомендуются для применения [6].

Если рассматривать на первом этапе провод с гололедом как массивное тело с распределенными внутри источниками тепла, теплоемкость которого определяется уравнением массовой теплоемкости, то для него уравнение теплового баланса для единицы длины провода имеет вид

$$I^2 r_{\Pi} dt_1 = (C_{\Pi} m_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma}) dq + a F_{\Gamma} q dt,$$

где  $I$  – ток плавки гололеда, А;  $r_{\Pi}$  – сопротивление провода при температуре, близкой к нулю, Ом/м;  $C_{\Pi}, C_{\Gamma}$  – удельная теплоемкость провода и гололеда при той же температуре соответственно, Вт·с/(кг·°С);  $m_{\Pi}, m_{\Gamma}$  – масса провода и гололеда соответственно, кг/м;  $q$  – превышение температуры тела над температурой окружающей среды, °С;  $F_{\Gamma}$  – площадь поверхности гололеда ( $F_{\Gamma} = \rho D 10^{-3}$ ), м<sup>2</sup>/м.

Приведенное дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными имеет известное решение в виде экспоненциальной зависимости, из которой следует

$$t_1 = \frac{C_{\Pi} m_{\Pi} + C_{\Gamma} m_{\Gamma}}{a \rho (d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}} \ln \frac{1}{1 - \frac{a \rho (d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{I^2 r_{\Pi}} (t - t_{окр})}$$

где  $t$  – расчетная температура тела в конце первого этапа, °С.

Поскольку в действительности источники теплоты распределены не внутри гололедной муфты, а только внутри провода, то температура внутри стенки гололеда по ее толщине неодинакова. Для учета этого обстоятельства принимаем в (4)  $t = t_{cp}$ .

На втором этапе плавки гололеда уравнение баланса энергии для единицы длины провода имеет вид

$$I^2 r_{\Pi} t_2 = W_{\Gamma} + W_{\text{к}} + W_{\text{окр}},$$

где  $W_{\Gamma}$  – расход энергии на нагрев муфты гололеда;  $W_{\text{к}}$  – то же на выплавление канавки в муфте гололеда;  $W_{\text{окр}}$  – энергия, рассеиваемая в окружающую среду.

Для определения  $W_{\Gamma}$  выделим в гололедной муфте элементарный цилиндрический слой с внутренним диаметром  $D_x$  и наружным диаметром  $D_x + d_x$ . Толщина этого слоя равна  $d_x / 2$ , а масса единицы длины  $0,5g_{\Gamma} \rho D_x 10^{-3} dx$ , где  $g_{\Gamma}$  – плотность гололедно-изморозевого осадка, кг/м<sup>3</sup>. На изменение температуры этого слоя от  $t_{\text{окр}}$  до  $t_x$  расходуется энергия

$$dW_{\Gamma} = 0,5g_{\Gamma} \rho D_x 10^{-3} C_{\Gamma} (t_x - t_{\text{окр}}) dx.$$

Расход энергии на нагрев всей муфты гололеда при  $t_{c1} = 0$  равен

$$W_{\Gamma} = \int_0^D \frac{g_{\Gamma} \rho D_x 10^{-3}}{2} C_{\Gamma} (t_x - t_{\text{окр}}) dx =$$

$$= \frac{C_{\Gamma} m_{\Gamma} (1 + K)}{1 + \frac{a(d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{2l_{\Gamma}} \ln \left( 1 + \frac{2b_{\Gamma}}{d} \right)} t_{\text{окр}} = W_{\Gamma} t_{\text{окр}}, \text{ Втх/м}; \quad (5)$$

$$K = \frac{a(d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{4l_{\Gamma}} \ln \left( 1 + \frac{2b_{\Gamma}}{d} \right) = \frac{a(d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{4l_{\Gamma}} K_2. \quad (5\phi)$$

Значения коэффициента  $K_2$ :

Отношение $r/d$	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10
$K_2$	0,352	0,538	0,725	0,866	0,920	0,960	0,980	0,990

Расход энергии на выплавление канавки в муфте гололеда с учетом опытного соотношения  $d_B \gg 1,1d$  равен

$$W_{\text{к}} = q_{\text{пл}} m_{\text{к}} = q_{\text{пл}} d_B b_{\Gamma} g_{\Gamma} 10^{-6} = 1,1q_{\text{пл}} db_{\Gamma} g_{\Gamma} 10^{-6}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{пл}}$  – теплота плавления гололедно-изморозевого образования, принимаемая равной  $333 \cdot 10^3$

Вт·с/кг;  $m_{\text{к}}$  – масса гололедно-изморозевого образования в канавке, кг/м.

В (6) учтено, что уменьшение массы выплавляемого гололеда за счет излома его стенки в конце процесса плавки компенсируется массой выплавленного гололеда под проводом в начале этого процесса.

Тепловой поток с поверхности гололедной муфты в окружающую среду на основании [7] и с учетом выражений (2) равен

$$Q = \alpha \rho D 10^{-3} (t_{c2} - t_{\text{окр}}) =$$

$$= \frac{\alpha \rho (d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{1 + \frac{\alpha (d + 2b_{\Gamma}) 10^{-3}}{2l_{\Gamma}} \ln \left( 1 + \frac{2b_{\Gamma}}{d} \right)} t_{\text{окр}} = Q_{\text{окр}}. \quad (7)$$

Энергия, рассеиваемая в окружающую среду за время плавки  $t_2$ , соответственно равна  $W_{\text{окр}} = Q t_2$ .

На основании уравнения баланса энергии найдем время плавки гололеда  $t_2$  на втором этапе:

$$t_2 = \frac{W_{\Gamma} + W_{\text{к}}}{I^2 r_{\Pi} - Q}, \text{ с}. \quad (8)$$

Полное время процесса плавки гололеда:  $t = t_1 + t_2$ .

**Требуемый ток плавки гололеда.** При заданных значениях толщины стенки гололеда  $b_{\Gamma}$ , температуры окружающей среды  $t_{\text{окр}}$ , скорости ветра  $V$  и наибольшей допустимой длительности второго этапа плавки гололеда  $t_2 = t_{\text{max}}$  значение тока для успешной плавки должно быть не менее

$$I = \sqrt{\frac{W_{\Gamma} + W_{\text{к}} + Q t_{\text{max}}}{r_{\Pi} t_{\text{max}}}} = \sqrt{\frac{W_{\Gamma} \phi_{\text{окр}} + W_{\text{к}} + Q \phi_{\text{окр}} t_{\text{max}}}{r_{\Pi} t_{\text{max}}}}. \quad (9)$$

Ток плавки гололеда при регулируемых источниках не должен превышать допустимого значения по условиям механической прочности провода и наибольшей стреле провеса для температуры окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  и скорости ветра  $V$ , соответствующих метеорологической обстановке при плавке гололеда. Если ток плавки гололеда не регулируется, то его значение не должно превышать допустимого по тем же показателям, определяемым при  $t_{\text{окр}} = 0$  и скорости ветра  $V = 0,6$  м/с.

**Условия успешной плавки гололеда при заданном токе.** Если в конкретной схеме плавки гололеда значение тока, вычисленное по условию (9), реализовать нельзя, то приходится использовать меньшее его значение. При данном значении тока и за-

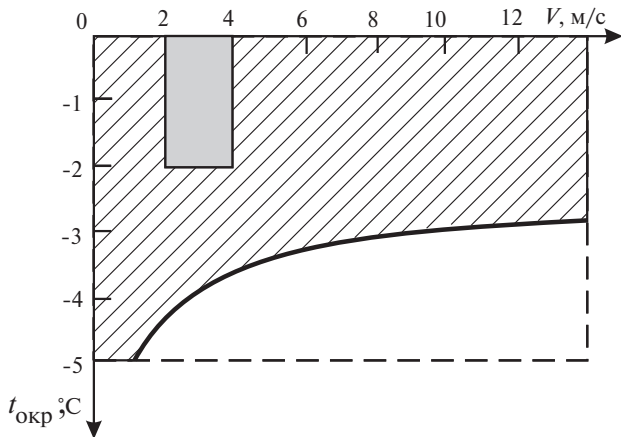
данных толщине стенки гололеда  $b_r$ , наибольшем допустимом времени плавки гололеда на втором этапе  $t_2 = t_{\max}$  и скорости ветра  $V$  из уравнения теплового баланса находим самое минимальное значение температуры окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), при которой еще возможно расплавление гололеда:

$$t_{\text{окр}} = \frac{I^2 r_{\text{п}} t_{\max} - W_{\text{к}}}{W_{\text{г}} \phi + Q \phi_{\max}}$$

где  $W_{\text{г}} \phi = W_{\text{г}} / t_{\text{окр}}$ ,  $Q \phi = Q / t_{\text{окр}}$  на основании (5) и (7).

Задаваясь различными значениями скорости ветра  $V$ , используя (1), можно по (10) построить граничную зависимость  $t_{\text{окр}} = f(V)$  для условий успешного плавления гололеда данного провода при заданных параметрах. Примерный вид такой зависимости показан на рис. 2.

Область значений  $t_{\text{окр}}$ ,  $V$  успешной плавки гололеда ограничена снизу минимальной температу-



**Рис. 2.** Граничная зависимость  $t_{\text{окр}} = f(V)$  для провода АС 120/19 при токе плавки гололеда  $I = 450$  А, толщине стенки гололеда  $b_r = 20$  мм и наибольшем допустимом времени плавки  $t_2 = t_{\max} = 60$  мин

рой окружающей среды при гололеде для данного района (в данном случае  $-5$   $^{\circ}\text{C}$ ), а справа – наибольшей скоростью ветра при гололеде для того же района (в данном случае 14 м/с). Внутри этой области в виде затемненного прямоугольника изображена область значений  $t_{\text{окр}}$  и  $V$  при наиболее вероятном образовании гололеда ( $t_{\text{окр}} = -2, 0$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 2, 4$  м/с). Штриховая линия ограничивает область возможного образования гололеда ( $t_{\text{окр}} = -5, 0$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 0, 14$  м/с). При налипании на проводах изморози, мокрого снега или снежных отложений области наиболее вероятного и возможного их образования будут другими.

**Пример.** Провод АС 120/19 покрыт гололедом плотностью  $\rho_{\text{г}} = 900$  кг/м<sup>3</sup> (0,9 г/см<sup>3</sup>) с толщиной стенки

$b_r = 20$  мм. Температура окружающей среды  $t_{\text{окр}} = -3$   $^{\circ}\text{C}$ , скорость ветра  $V = 5$  м/с. Требуется определить время плавки гололеда током  $I = 450$  А; вычислить значение тока, при котором в указанных условиях время плавки гололеда  $t_2$  не превысит значения  $t_2 = t_{\max} = 45$  мин ( $45 \cdot 60 = 2700$  с); установить граничные значения  $t_{\text{окр}}$ ,  $V$  при успешной плавке гололеда током  $I = 450$  А.

По справочным данным: диаметр провода  $d = 15,2$  мм, сопротивление провода при температуре 20  $^{\circ}\text{C}$   $r_{\text{п},20} = 0,249$  Ом/км; масса алюминиевой части провода  $m_{\text{п1}} = 324 \cdot 10^{-3}$  кг/м, масса стальной части провода  $m_{\text{п2}} = 147 \cdot 10^{-3}$  кг/м.

*Предварительные вычисления.* Сопротивление провода при температуре около нуля

$$r_{\text{п}} = r_{\text{п}20} [1 + b_r (t - 20)] = 0,249 [1 + 0,00403 (0 - 20)] = 0,229 \text{ Ом/км,}$$

где  $t$  – температура провода,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $b_r$  – температурный коэффициент сопротивления,  $1/^{\circ}\text{C}$ .

Произведение результирующей массовой теплоемкости на суммарную массу провода

$$C_{\text{п}} m_{\text{п}} = C_{\text{п1}} m_{\text{п1}} + C_{\text{п2}} m_{\text{п2}} = 886 \times 324 \times 10^{-3} + 437 \times 147 \times 10^{-3} = 351 \text{ Втж/(м}^{\circ}\text{C).}$$

Масса 1 м длины гололедной муфты

$$m_{\text{г}} = \rho_{\text{г}} b_r (d + 2b_r) \times 10^{-6} = 900 \times 20 (15,2 + 2 \times 20) \times 10^{-6} = 1,99 \text{ кг/м.}$$

По таблице находим для гололеда  $C_{\text{г}} = 2300$  Вт·с/(кг· $^{\circ}\text{C}$ ).

Произведение теплоемкости на массу гололеда

$$C_{\text{г}} m_{\text{г}} = 2300 \times 1,99 = 4578 \text{ Втж/(м}^{\circ}\text{C).}$$

Находим число Рейнольдса при наименьшей скорости ветра 1 м/с:

$$Re = 114 (d + 2b_r) V = 114 (15,2 + 2 \times 20) \times 1 = 5951.$$

Поскольку при скорости ветра 1 м/с и более  $Re > 1000$ , то в (1) принимаем  $a = 0,59$ ,  $c = 73,3$ . По таблице находим  $x = 0,64$  и по (1) вычисляем при скорости ветра  $V = 5$  м/с

$$a (d + 2b_r) \times 10^{-3} = 2,18 \text{ Втж/(м}^{\circ}\text{C).}$$

По таблице принимаем  $l_{\text{г}} = 2,26$  Вт/(м<sup>2</sup>· $^{\circ}\text{C}$ ) и по (2) находим температуру наружной стенки гололеда  $t_{\text{с2}}$  при  $t_{\text{с1}} = 0$ :

$$t_{\text{с2}} = \frac{-3 \ln \left( 1 + \frac{2 \times 20}{15,2} \right) - \frac{2 \times 20}{15,2}}{\ln \left( 1 + \frac{2 \times 20}{15,2} \right) + \frac{2 \times 2,26}{2,18}} = -1,15^{\circ}\text{C.}$$

При  $b_r / d = 20 / 15,2 = 1,32$  методом интерполяции находим значение  $K_1 = 0,62$ . По (3) находим

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{с2}} K_1 = (-1,15) \times 0,62 = -0,713^{\circ}\text{C.}$$

*Длительность плавки гололеда.* По формуле (4) при  $t = t_{\text{ср}}$  для первого этапа находим

$$t_1 = \frac{351 + 4578}{60 \times 2,18} \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{2,18}} - [0,713 - (-3)] = 4,9 \text{ мин.}$$

При скорости ветра 5 м/с по (5) определяем

$$K = \frac{2,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}}{4 \times 2,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}} \left( 1 + \frac{2 \times 20 \frac{\text{мм}}{\text{с}}}{15,2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}} \right) = 0,241 \times 0,788 = 0,190.$$

По (5) находим

$$W_{\Gamma} = W_{\Gamma\phi} / t_{\text{окр}} = \frac{4578(1+0,190)}{1 + \frac{2,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}}{2 \times 2,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}} \left( 1 + \frac{2 \times 20 \frac{\text{мм}}{\text{с}}}{15,2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}} \right)} (-3) =$$

$$= [-3358](-3) = 10075 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{м},$$

где  $W_{\Gamma\phi} = -3358 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

По (6) определяем

$$W_{\text{к}} = 1,1 \times 333 \times 10^3 \times 5,2 \times 20 \times 0,00 \times 10^6 = 100220 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{м}.$$

По (7) находим

$$Q = Q\phi / t_{\text{окр}} = \frac{4,22 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}}{1 + \frac{2,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}}{2 \times 2,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}} \left( 1 + \frac{2 \times 20 \frac{\text{мм}}{\text{с}}}{15,2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}} \right)} (-3) =$$

$$= [-4,22](-3) = 12,7 \text{ Вт}/\text{м}.$$

где  $Q\phi = -4,22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

По (8) находим длительность второго этапа плавки гололеда

$$t_2 = \frac{10075 + 100220}{60(450^2 \times 0,229 \times 10^{-3} - 12,7)} = 54,6 \text{ мин.}$$

Полное время плавки гололеда

$$t = t_1 + t_2 = 4,9 + 54,6 = 59,5 \text{ мин.}$$

Требуемое значение тока плавки гололеда при  $t_2 = 45 \text{ мин}$ . Значение тока для заданного времени плавки гололеда вычисляются по (9). Входящие в формулу величины:  $W_{\Gamma} = 10075 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{м}$ ;  $W_{\text{к}} = 100220 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{м}$ ;  $Q = 12,7 \text{ Вт}/\text{м}$  для заданных условий ( $t_{\text{окр}} = -3 \text{ °C}$ ,  $b_{\Gamma} = 20 \text{ мм}$ ,  $V = 5 \text{ м}/\text{с}$ ) вычислены ранее. По (9) находим

$$I = \sqrt{\frac{10075 + 100220 + 12,7 \times 45 \times 60}{0,229 \times 10^{-3} \times 45 \times 60}} = 484 \text{ А.}$$

Граничные значения  $V$ ,  $t_{\text{окр}}$  при токе 450 А. Задаемся наибольшим допустимым временем  $t_2 = t_{\text{max}}$  плавки гололеда, например 60 мин (3600 с). Вычисляем по (6) значение  $W_{\text{к}}$ . Например, для заданных значений  $d = 15,2 \text{ мм}$  и  $b_{\Gamma} = 20 \text{ мм}$  было найдено  $W_{\text{к}} = 100220 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{м}$ .

Задаем значения скорости ветра  $V$ , например: 1; 2; 3; 5; 7,5; 10; 15 м/с. Для каждого значения  $V$  по (1) находим соответствующее значение  $a(d + 2b_{\Gamma})10^{-3}$ , по (5) и (5φ) – значения  $K$  и  $W_{\Gamma\phi}$ . Например, для  $V = 5 \text{ м}/\text{с}$  ранее были рассчитаны:  $a(d + 2b_{\Gamma})10^{-3} = 2,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ,  $K = 0,190$ ,  $W_{\Gamma\phi} = -3358 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

Для тех же значений  $V$  по формуле (7) вычисляем значения  $Q\phi$ . Например, для  $V = 5 \text{ м}/\text{с}$  было найдено  $Q\phi = -4,22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ . Для каждого из значений  $V$  по (10) вычисляем граничное значение  $t_{\text{окр}}$ . Например, для  $V = 5 \text{ м}/\text{с}$  и  $t_{\text{max}} = 3600 \text{ с}$   $t_{\text{окр}} = -3,6 \text{ °C}$ .

Аналогично выполняются расчеты и для других заданных значений скорости ветра  $V$ .

1. Бургсдорф В.В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1947, 198 с.

2. Левченко И.И. Плавка гололеда на проводах и тросах воздушных линий высокого напряжения: Учебное пос. – М.: Изд-во МЭИ, 1998, 104 с.

3. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. – Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000, 284 с.

4. Никифоров Е.П. Повышение эффективности удаления гололедообразования с проводов ВЛ. – Электрические станции, 2004, № 4, с. 40–48.

5. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: Учебное пос. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 106 с.

6. Сацук Е.И. Электротепловые и механические процессы в воздушных линиях электропередачи: Монография. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010, 106 с.

7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981, 416 с.

8. РД 34.20.547 (МТ 34-70-0,37-87) Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. – Министерство энергетики и электрификации СССР. СПО Союзтехэнерго. Введена 01.01.88 г.

9. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. – Электричество, 1989, № 11, с. 1–8.

10. Справочник по теплообменникам. Т. 1/ Перевод с англ. под ред. Б.С. Петухова и В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 242–247.

[11.04.13]

*Авторы: Фигурнов Евгений Петрович окончил в 1949 г. факультет «Электрический транспорт» Московского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта. В 1969 г. защитил докторскую диссертацию «Теория, методы расчета и оптимизация полупроводниковых функциональных устройств релейной защиты электротяговых сетей» в Московском институте инженеров железнодорожного транспорта. Профессор кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС).*

*Жарков Юрий Иванович окончил энергетический факультет Ростовского института железнодорожного транспорта (РИИЖТ) в 1965 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Повышение технико-экономических показателей функционирования систем автоматического управления устройствами тягового электроснабжения» во ВНИИЖТ. Заведующий кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения» РГУПС.*

*Петрова Татьяна Евгеньевна окончила энергетический факультет РИИЖТ в 1972 г. В 1989 г. защитила кандидатскую диссертацию «Условия работы и защита проводов контактной сети от токовых перегрузок при интенсивной технологии перевозок» во ВНИИЖТ. Доцент кафедры «Информатика» РГУПС.*