

## Определение параметров режима плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи

ЗАСЫПКИН А.С., САЦУК Е.И., ЩУРОВ А.Н.

*Рассматривается состав и способы использования разработанного авторами учебно-методического пособия. Приведённые в пособии расчётные таблицы для определения параметров режима плавки гололёда могут использоваться как при проектировании схем плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи, так и при их эксплуатации в осенне-зимний период. В качестве аргументов в таблицах используются дискретные значения температуры воздуха, скорости ветра при гололёде, направление ветра (вдоль или поперёк провода), толщина стенки гололёда плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup>. Использование таблиц основано на линейной интерполяции (как в Правилах устройства электроустановок) и без ЭВМ позволяет получить приемлемые по точности результаты: максимально допустимый ток, ток профилактического подогрева, ток 40-минутной плавки, время плавки гололёда, расход электроэнергии. Предложен интегральный показатель эффективности схем плавки гололёда, который позволяет объективно анализировать различные схемы и выбирать лучшие технические решения.*

*Ключевые слова: плавка гололёда, параметры режима плавки, расчётные таблицы, линейная интерполяция*

Опубликованное учебно-методическое пособие [1], предназначено для студентов магистерской подготовки по направлению 140400 Электроэнергетика и электротехника (магистратура), изучающих дисциплину: «Предотвращение гололёдных аварий в электрических сетях ЭЭС» (по выбору). Может быть использовано при выполнении выпускных квалификационных работ (магистерских диссертаций) по проблеме повышения надёжности электрических сетей в чрезвычайных погодных условиях, а также рекомендовано инженерам, разрабатывающим программы плавки гололёда (ППГ) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ). Электронная версия доработанного варианта пособия представлена на сайте [2].

Существует много способов расчёта параметров режима плавки гололёда:

аналитический – по алгебраическим уравнениям баланса тепловой энергии, выделяемой в проводнике, отводимой в окружающую среду и расходуемой на нагрев провода и плавление гололёда [3–5];

графоаналитический – с использованием графиков и номограмм, построенных для проводов различных марок и выборочных значений климатических параметров [6–9];

компьютерный – по программе «ГОЛОЛЕД» [10], основанный на решении нелинейных дифференциальных уравнений процесса нагрева провода и плавления гололёда, и другим программам, в том числе разработанным за рубежом [11–14];

аналитический – по обобщённым формулам, полученным с использованием теории подобия и

многовариантных расчетов на ЭВМ по программе «ГОЛОЛЕД» [5, 15].

В учебном пособии предлагается табличный способ определения параметров с линейной интерполяцией, аналогичный используемому в «Правилах устройства электроустановок» [16], отличающийся простотой и приемлемой точностью. Таблицы построены с использованием программы «ГОЛОЛЕД» [10] и позволяют получать достоверные результаты без использования ЭВМ.

Пособие состоит из введения и трёх частей:

1. Назначение расчётных таблиц.
2. Руководство по использованию таблиц.
3. Таблицы для проводов марки АС (от АС-35 до АС-500) и тросов С-35, С-50, С-70:

$A$  – Максимально допустимый ток  $I_{м.д}$ , А;

$B$  – Критическая толщина стенки гололёда  $b_{г.кр}$ , мм;

$V$  – Ток профилактического подогрева  $I_{п.п}$ , А;

$I$  – Ток 40-минутной плавки  $I_{(40)}$ , А.

В качестве аргументов в таблицах используются дискретные значения скорости ветра при гололёде  $v_{г} = 2, 5, 10, 15$  м/с, направление ветра  $\gamma = 0, 90^\circ$ , температура воздуха  $t_{в} = 0, -5, -10, -15, -20$  °С, толщина стенки гололёда  $b_{г} = 5, 10, 15, 20, 30, 40$  мм плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Максимально возможное значение скорости ветра при гололёде  $v_{г.макс}$  (м/с) с повторяемостью 1 раз в 10, 15 или в 25 лет определяется по региональной карте районирования с учётом высоты расположения приведённого центра тяжести проводов и типа местности.

При гололёде максимальную скорость ветра принимают равной половине  $v_{\max}: v_{\Gamma \max} \approx 0,5v_{\max}$  [16]; минимальная скорость ветра при гололёде  $v_{\Gamma \min} = 2$  м/с.

Климатическое условие по температуре воздуха при гололёде при проектировании ВЛ обычно принимается равным минус 5 °С [16]. Учитывая, что плавка гололёда может проводиться при понижении температуры, низшую температуру воздуха для региона Юга РФ можно принять  $|q_{\max}| = 15$  °С; высшая температура 0 °С.

Максимальное значение  $b_{\Gamma \max}$  определяется по региональной карте районирования с учётом высоты расположения приведённого центра тяжести проводов и диаметра провода.

Рассмотрим назначение и методику расчёта параметров режима плавки гололёда.

**Максимально допустимый ток  $I_{\text{м.д}}$ .** Для выбора и анализа схем плавки гололёда (СПГ) на воздушных линиях электропередачи необходимо использовать расчётное условие:

$$I_{\text{пл}} \leq I_{\text{м.д}},$$

где  $I_{\text{пл}}$  — действующее значение тока, переменного или постоянного, создаваемого источником питания в проводе воздушной линии электропередачи для удаления гололёда;  $I_{\text{м.д}}$  — максимально допустимый ток на участках ВЛ, свободных от гололёда.

Выполнение условия  $q_{\text{пр}} \leq q_{\text{м.д}}$  обеспечивает сохранение механической прочности проводов на участках, свободных от гололёда — отсутствие перегрева провода. В качестве максимально допустимой температуры сталеалюминиевого провода при плавке гололёда обычно принимают 90 или 100 °С. В таблицах принято  $q_{\text{м.д}} = 90$  °С. В повторно-кратковременном режиме плавки допустима температура провода  $q_{\text{м.д}} \leq 130$  °С.

Следует иметь в виду, что увеличение тока плавки уменьшает время плавки и, зачастую, расход электроэнергии [17]. Если допустимый ток по условию сохранения нормативных габаритов ВЛ  $I_{\text{доп}}$  меньше  $I_{\text{м.д}}$ , то его используют вместо  $I_{\text{м.д}}$  в расчётном условии. Расчёт  $I_{\text{доп}}$  в пособии не рассматривается. Этот вопрос изложен в [5] и более подробно в [18].

Расчёт максимально допустимого тока  $I_{\text{м.д}}$  выполняется по табл. А для каждой марки провода или троса при направлении ветра вдоль провода ( $y=0$ ) методом линейной интерполяции.

При составлении программ плавки гололёда следует определять значения максимально допустимого тока на участке ВЛ без гололёда для провода с меньшим сечением, входящим в схему плавки

гололёда. При плавке заданным током следует учитывать наихудшие условия охлаждения провода — минимальная скорость ветра при гололёде  $v_{\Gamma} = 2$  м/с вдоль провода, температура воздуха  $q_{\text{в}} = 0$ . При использовании управляемых установок плавки гололёда (УПГ) следует принимать  $v_{\Gamma} = 2$  м/с вдоль провода и дискретные значения температуры воздуха  $q_{\text{в}} = 0, 5, 10, 15$  °С. В обоих случаях интерполяция не требуется.

**Установившаяся температура провода на участке ВЛ без гололёда.** Эта температура провода  $q_{\text{пр.уст}}$  определяет механическую прочность проводов и расстояние до земли (габариты ВЛ). Обоснование предлагаемой методики расчёта  $q_{\text{пр.уст}}$  с использованием расчётных таблиц приведено в [19].

Первым шагом расчёта является определение максимально допустимого тока  $I_{\text{м.д}}$  по табл. А для заданной марки провода типа АС при известных погодных условиях  $q_{\text{в}}$ , °С и  $v_{\Gamma}$ , м/с.

В зависимости от соотношения тока провода  $I_{\text{пр}}$  и  $I_{\text{м.д}}$  принимается один из двух вариантов расчёта, обеспечивающий меньшую погрешность:

при  $I_{\text{пр}} < 0,4I_{\text{м.д}}$  используется формула

$$q_{\text{пр}} = K_q I_{\text{пр}}^2 + q_{\text{в}},$$

где  $K_q = 70$  °С;  $I_{\text{пр}}^* = I_{\text{пр}} / I_{\text{м.д}}$ ;  $q_{\text{в}}$  — температура воздуха, °С (при плавке гололёда отрицательная);

при  $I_{\text{пр}} \geq 0,4I_{\text{м.д}}$  расчёт выполняется в следующем порядке:

расчётное значение температуры (решение «порождающей задачи»)

$$q_{\text{рс}} = (q_{\text{м.д}} - q_{\text{в}}) I_{\text{пр}}^2 + q_{\text{в}},$$

где  $q_{\text{м.д}} = 90$  °С;

поправка к расчётной температуре

$$Dq = K_{\text{ср.д}} \frac{\partial q_{\text{рс}}}{\partial q_{\text{м.д}}} - \frac{\partial q_{\text{рс}}}{\partial q_{\text{в}}},$$

где  $K_{\text{ср.д}} = 0,3$  при  $0,4 \leq I_{\text{пр}}^* < 1,0$ ;  $K_{\text{ср.д}} = 0,4$  при  $I_{\text{пр}}^* > 1,0$ ;

при  $I_{\text{пр}}^* = 1,0$  поправка  $Dq = 0$ ;

действительная температура провода

$$q_{\text{пр.уст}} = q_{\text{рс}} + Dq.$$

Наибольшая абсолютная погрешность определения  $q_{\text{пр.уст}}$  по сравнению с [10] не превышает 2 °С в диапазоне токов провода  $0 < I_{\text{пр}} \leq I_{\text{м.д}}$ . При больших токах погрешность возрастает.

**Ток профилактического подогрева  $I_{\text{п.п}}$ .** Для предотвращения отложения гололёда применяют профилактический подогрев проводов различными

способами [5, 20]. При этом необходимо обеспечить выполнение условия

$$I_{\text{пл}} \geq I_{\text{п.п}},$$

где  $I_{\text{п.п}}$  – ток профилактического подогрева, предотвращающего отложение гололёда на проводе, нагревая его до положительной температуры; обычно он существенно меньше, чем ток плавки гололёда традиционными способами.

Расчёт тока профилактического подогрева  $I_{\text{п.п}}$  выполняется по *табл. В* для провода с большим сечением, входящего в схему плавки гололёда (СПГ), при направлении ветра поперёк провода для различных погодных условий  $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$ . Таблицы построены с учётом изменения теплоотдачи при мороси и дожде [21].

Если погодные условия отличаются от приведённых в *табл. В*, применяется линейная интерполяция.

Следует отметить, что профилактический подогрев целесообразно применять при температуре воздуха от 0 до  $-5$  °С. При более низких температурах требуемое значение  $I_{\text{п.п}}$  существенно возрастает, а профилактический подогрев недостаточным током может способствовать налипанию отложений на провода.

**Ток 40-минутной плавки  $I_{(40)}$ .** При выборе тока плавки необходимо использовать расчётное условие:

$$I_{\text{пл}} \geq I_{(T)},$$

где  $I_{(T)}$  – ток плавки заданной длительности  $T$ .

Выполнение этого условия обеспечивает плавку гололёда за время  $t_{\text{пл}}$ , не превышающее заданную длительность  $T$ . В качестве максимально допустимого времени плавки в пособии принято  $T=40$  мин, т.е. рассчитывается  $I_{(40)}$ , но могут быть определены также время плавки  $t_{\text{пл}}$  при любом токе и ток плавки любой длительности  $T$ . Следует иметь в виду, что снижение тока плавки ниже  $I_{(60)}$  делает плавку не эффективной, а увеличение выше  $I_{\text{м.д}}$  опасно из-за возможности перегрева участка провода, свободного от гололёда, а также из-за повышения вероятности схлестывания проводов в результате «подскока» при быстрой плавке гололёда.

Расчёт тока 40-минутной плавки  $I_{(40)}$  выполняется по *табл. Г* для провода с большим сечением, входящего в СПГ при направлении ветра поперёк провода, для различных погодных условий  $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$  и толщины стенки цилиндрического гололёда плотностью  $0,9$  г/см<sup>3</sup>:  $b_{\text{г}} = 5, 40$  мм. Если значения  $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$ ,  $b_{\text{г}}$  отличаются от приведённых в *табл. Г*, применяется линейная интерполяция. Вначале по двум параметрам  $q_{\text{в}}$  и  $v_{\text{г}}$  определяются  $I_{(40)}$  для двух табличных значений  $b_{\text{г}1}$  и  $b_{\text{г}2} > b_{\text{г}1}$ , между которы-

ми находится заданное значение  $b_{\text{г}}$ , т.е. определяются  $I_{(40)1}$  и  $I_{(40)2} > I_{(40)1}$ . Затем линейной интерполяцией по третьему параметру  $b_{\text{г}}$  находится искомое значение:

$$\begin{aligned} I_{(40)} &= I_{(40)1} + (I_{(40)2} - I_{(40)1}) \frac{b_{\text{г}} - b_{\text{г}1}}{b_{\text{г}2} - b_{\text{г}1}} = \\ &= I_{(40)2} - (I_{(40)2} - I_{(40)1}) \frac{b_{\text{г}2} - b_{\text{г}1}}{b_{\text{г}2} - b_{\text{г}1}}. \end{aligned}$$

**Ток  $T$ -минутной плавки  $I_{(T)}$ .** Расчёт тока  $I_{(T)}$

выполняется для заданной марки провода или троса с использованием *табл. А, Б и Г* при заданных погодных условиях ( $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$ ) и толщине стенки цилиндрического гололёда  $b_{\text{г}}$  плотностью  $0,9$  г/см<sup>3</sup> в следующем порядке:

по *табл. А* для  $y = 90^\circ$  – максимально допустимый ток  $I_{\text{м.д}}$ , А;

по *табл. Б* –  $b_{\text{г.кр}}$ , мм – критическая толщина стенки гололёда, которая проплавляется за 40 мин током плавки, равным максимально допустимому току при тех же  $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$  и  $y = 90^\circ$ ;

по *табл. Г* – ток 40-минутной плавки  $I_{(40)}$ , А.

Эти значения подставляются в формулу, полученную методом линейной интерполяции (вывод формулы смотри ниже):

$$I_{(T)}^2 = I_{(40)}^2 + \frac{40 - T}{T} (I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2) \frac{b_{\text{г}}}{b_{\text{г.кр}} - b_{\text{г}}}.$$

Максимально допустимая длительность плавки  $T = 60$  мин. Ток 60-минутной плавки  $I_{(60)}$  меньше  $I_{(40)}$ :

$$I_{(60)}^2 = I_{(40)}^2 - \frac{1}{3} (I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2) \frac{b_{\text{г}}}{b_{\text{г.кр}} - b_{\text{г}}}.$$

Сравнение результатов расчёта  $I_{(60)}$  по таблицам и приведённой формуле, дающей наибольшую погрешность, с результатами непосредственного расчёта по программе «ГОЛОЛЁД» показывает, что отличие не превышает 3%.

Минимально возможная длительность плавки при  $I_{\text{пл}} = I_{\text{м.д}}$  (без перегрева провода на участке без гололёда):

$$T_{\text{min}} = \frac{b_{\text{г}}}{b_{\text{г.кр}}} 40.$$

**Вывод формулы для  $I_{(T)}$ .** При неизменяющихся токе  $I_{\text{пл}}$  и погодных условиях ( $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\text{г}}$ ,  $y$ ) толщина стенки гололёда уменьшается в процессе плавки по закону, близкому к линейному. Скорость уменьшения зависит от тока и погодных условий и аппроксимируется в соответствии с уравнением теплового баланса выражением

$$\frac{b_{\text{г}}}{t_{\text{пл}}} KI_{\text{пл}}^2 - C, \quad (1)$$

где  $b_{\Gamma}$  – начальная толщина стенки гололёда, мм;  $t_{\text{пл}}$  – время плавки мин;  $K, C$  – постоянные коэффициенты для заданных погодных условий.

При известных значениях  $b_{\Gamma}$ ,  $I_{(40)}$  и  $b_{\Gamma, \text{кр}}$ ,  $I_{\text{м.д}}$  можно записать систему уравнений:

$$\frac{b_{\Gamma}}{40} = KI_{(40)}^2 - C;$$

$$\frac{b_{\Gamma, \text{кр}}}{40} = KI_{\text{м.д}}^2 - C,$$

откуда

$$K = \frac{b_{\Gamma, \text{кр}} - b_{\Gamma}}{40(I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2)};$$

$$C = -\frac{b_{\Gamma, \text{кр}}}{40} + \frac{b_{\Gamma, \text{кр}} - b_{\Gamma}}{40} \frac{I_{\text{м.д}}^2}{I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2} =$$

$$= -\frac{b_{\Gamma}}{40} + \frac{b_{\Gamma, \text{кр}} - b_{\Gamma}}{40} \frac{I_{(40)}^2}{I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2}.$$

Подставив эти выражения в формулу (1), найдём  $I_{\text{пл}}^2 = I_{(T)}^2$  при  $t_{\text{пл}} = T$ .

**Расчёт толщины стенки гололёда, проплавляемой заданным током за 40 мин.** Расчёт  $b_{\Gamma(40)}$ , проплавляемой заданным током  $I_{\text{пл}}$  за 40 мин, выполняется по табл. Г для заданной марки провода или троса и заданных погодных условий ( $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\Gamma}$ ) в следующем порядке:

для заданных погодных условий определяем  $I_{(40)1}$  при  $b_{\Gamma1}$  и  $I_{(40)2}$  при  $b_{\Gamma2}$ , причем  $b_{\Gamma1}$  и  $b_{\Gamma2}$  принимаются такими, чтобы  $I_{(40)1} \leq I_{\text{пл}} \leq I_{(40)2}$ ;

для заданного тока плавки  $I_{\text{пл}}$  определяем линейной интерполяцией по квадратам тока искомое значение:

$$b_{\Gamma(40)} = b_{\Gamma1} + \frac{b_{\Gamma2} - b_{\Gamma1}}{I_{(40)2}^2 - I_{(40)1}^2} (I_{\text{пл}}^2 - I_{(40)1}^2) =$$

$$= b_{\Gamma2} - \frac{b_{\Gamma2} - b_{\Gamma1}}{I_{(40)2}^2 - I_{(40)1}^2} (I_{(40)2}^2 - I_{\text{пл}}^2).$$

**Время плавки гололёда.** 1. *Расчёт времени плавки гололёда с толщиной стенки  $b_{\Gamma}$  заданным током  $I_{\text{пл}}$ .* Расчёт времени  $t_{\text{пл}}$  заданным током выполняется для заданной марки провода или троса с использованием табл. А, Б и Г при заданных погодных условиях ( $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\Gamma}$ ) и толщине стенки цилиндрического гололёда  $b_{\Gamma}$  плотностью  $0,9 \text{ г/см}^3$ .

**Пример расчёта** времени плавки гололёда  $t_{\text{пл}}$ . Заданы: марка провода АС 240/39, ток плавки  $I_{\text{пл}} = 1100 \text{ А}$ , погодные условия:  $v_{\Gamma} = 5 \text{ м/с}$ ,  $q_{\text{в}} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; толщина стенки гололёда  $b_{\Gamma} = 18 \text{ мм}$ .

**Решение.** 1. По табл. А для провода АС 240/39 при заданных погодных условиях и направлении ветра  $u = 0$  определяем максимально допустимый ток:  $I_{\text{м.д}} = 1163 \text{ А}$ .

Для промежуточных значений  $v_{\Gamma}$  (м/с) и  $q_{\text{в}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) значение  $I_{\text{м.д}}$  определяется линейной интерполяцией.

2. По табл. Б для заданных погодных условий определяем критическую толщину стенки гололёда:  $b_{\Gamma, \text{кр}} = 26 \text{ мм}$ .

Для промежуточных значений (см. п. 1)  $b_{\Gamma, \text{кр}}$  определяется линейной интерполяцией.

3. По табл. Г при заданных погодных условиях из табличных значений толщины стенки гололёда  $b_{\Gamma}$  (5, 40 мм) выберем значение  $b_{\Gamma, \text{рс}}$  с током 40-минутной плавки, меньшим тока плавки  $I_{\text{пл}} = 1100 \text{ А}$ :  $I_{(40)} = 1038 \text{ А}$ ;  $b_{\Gamma, \text{рс}} = 20 \text{ мм}$ .

4. Методом линейной интерполяции по  $I_{(40)}^2$  и  $I_{\text{м.д}}^2$  находим толщину стенки гололёда, проплавляемую заданным током плавки  $I_{\text{пл}}$  за 40 мин:

$$b_{\Gamma(40)} = b_{\Gamma, \text{рс}} + \frac{b_{\Gamma, \text{кр}} - b_{\Gamma, \text{рс}}}{I_{\text{м.д}}^2 - I_{(40)}^2} (I_{\text{пл}}^2 - I_{(40)}^2) =$$

$$= 20 + \frac{26 - 20}{1163^2 - 1038^2} (1100^2 - 1038^2) = 22,9 \text{ мм}.$$

5. Выполняем оценку времени плавки гололёда:

$$t_{\text{пл}} = 40 \frac{b_{\Gamma}}{b_{\Gamma(40)}} = 40 \frac{18}{22,9} = 31,4 \text{ мин}.$$

2. *Расчёт времени  $i$ -й плавки при нарастании  $b_{\Gamma}$ .* При централизованной плавке гололёда поочередно на нескольких ВЛ во время процесса гололёдообразования следует учитывать для промежуточной  $i$ -й плавки интенсивность процесса – скорость нарастания гололёда  $V_b = \frac{D b_{\Gamma}}{D t}$ , мм/мин.

Для заданных погодных условий ( $q_{\text{в}}$ ,  $v_{\Gamma}$ ), если эквивалентная толщина стенки гололёда плотностью  $0,9 \text{ г/см}^3$  в начале  $i$ -й плавки равна  $b_{\Gamma0i}$ , то к моменту окончания она увеличится до  $b_{\Gamma i} = b_{\Gamma0i} + V_b t_{\text{пл}i}$ . Поскольку при постоянных погодных условиях время плавки прямо пропорционально толщине стенки гололёда, то

$$t_{\text{пл}i} = 40 \frac{b_{\Gamma0i} + V_b t_{\text{пл}i}}{b_{\Gamma(40)}},$$

где  $b_{\Gamma(40)}$  – толщина стенки гололёда, проплавляемая заданным током за 40 мин.

Отсюда

$$t_{\text{пл}i} = b_{\Gamma0i} \frac{40}{b_{\Gamma(40)}} - V_b \frac{40}{b_{\Gamma(40)}}.$$

Методика определения интенсивности гололёдообразования  $V_b$  по опытным данным, в том числе при достижении нормативной толщины стенки гололёда по [16], приведена в [22].

**Расход электроэнергии на плавку гололёда.** Расход электроэнергии без учёта переходного теплового процесса нагрева провода и теплового спада тока при нагреве провода на участке без гололёдной муфты рассчитывается по формуле

$$W_{\text{пл}} = I_{\text{пл}}^2 R_0 [1 + (1 - I_{\Gamma, \text{м}^*}) b q_{\text{пр.уст}}] t_{\text{пл}} 10^{-3},$$

где  $I_{пл}$  – ток плавки гололёда, А;  $R_0$  – активное сопротивление проплавляемой ВЛ при 0 °С (т.е. при ВЛ, полностью покрытой гололёдом), Ом;  $b = 0,004$  1/град – температурный коэффициент сопротивления;  $l_{Г,М*} = l_{Г,М} / l_{Л}$  – относительная длина гололёдной муфты по отношению к длине проплавляемой ВЛ, отн. ед.;  $q_{пр,уст}$  – установившаяся температура провода на участке ВЛ без гололёда, °С (расчет см. ранее);  $t_{пл}$  – время плавки гололёда, ч (расчет см. ранее).

**Показатель эффективности схем плавки гололёда.**

Предложен новый интегральный показатель эффективности схем плавки гололёда  $K_{СПГ}$  вместо используемого значения времени плавки при заданных толщине стенки гололёда (диаметре гололёдной муфты), температуре воздуха и скорости ветра. В порядке возрастания этого показателя устанавливается очередность плавок гололёда на ВЛ сетевого предприятия, что обеспечивает максимальный охват проплавляемых ВЛ до появления первых повреждений [23].

При определении  $K_{СПГ}$  можно учитывать ответственность ВЛ, увеличивая нормативные нагрузки от гололёда и ветрового давления в соответствии с требуемой надёжностью ВЛ, определяемой периодом повторяемости. Можно рассчитывать показатель эффективности общих схем плавки гололёда для электрической сети или отдельного района и сравнивать эффективность общих схем.

1. *Определение интегрального показателя эффективности.* Интегральный показатель эффективности схемы плавки гололёда  $K_{СПГ}$  определяется для конкретной марки провода воздушной линии, входящей в схему плавки гололёда, которая создаёт ток  $I_{пл}$  в проводе.

Под интегральным показателем эффективности СПГ предложено понимать относительный объем погодных параметров, включая толщину стенки гололёда, при которых обеспечивается плавка гололёда за время, не превышающее 40 мин:

$$K_{СПГ} = \frac{W_{СПГ}}{W_{max}} = \frac{\int \int b_{Г(40)}(v_{Г}, q_{В}) dv_{Г} dq_{В}}{b_{Гmax} v_{Гmax} (-q_{Вmax})} \leq 1.$$

Для расчёта базисного объема  $W_{max}$  необходимо определить максимально возможное значение, принятое при проектировании ВЛ:  $b_{Гmax}$  – толщина стенки цилиндрического гололёда плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup>, мм;  $v_{Гmax}$  – скорость ветра при гололёде, м/с;  $-q_{Вmax}$  – низшая температура, возможная при плавке гололёда, °С.

Для более ответственных ВЛ эти показатели могут быть увеличены в соответствии с требуемой надёжностью (периодом повторяемости).

Расчёт  $W_{СПГ}$  выполняется приближённо с использованием ступенчатой аппроксимации поверхности  $b_{Г(40)}(v_{Г}, q_{В})$ . Для этого плоскость  $(v_{Г}, q_{В})$  в пределах  $v_{Гmax}$ ,  $-q_{Вmax}$  делится на прямоугольники, в которых расположены табличные значения  $v_{Г} \in v_{Гmax}$  и  $q_{В} \in q_{Вmax}$ . Для всех сочетаний используемых табличных значений  $q_{В}$  и  $v_{Г}$  определяется  $b_{Г(40)}$ , как показано ранее. При этом значения  $b_{Г(40)} > b_{Гmax}$  приравниваются  $b_{Гmax}$ , а  $b_{Г(40)} < 0$  приравниваются нулю.

Искомый объем находится суммированием частичных объемов:

$$W_{СПГ} = \sum_{i=1}^n b_{Г(40)i} Dv_{Гi} (-Dq_{Вi}),$$

где  $n$  – общее число прямоугольников со сторонами  $Dv_{Гi}$  и  $(-Dq_{Вi})$ , в которых находятся  $b_{Г(40)i}$ .

Таким образом, формула для определения интегрального показателя эффективности СПГ принимает вид:

$$K_{СПГ} = \frac{\sum_{i=1}^n b_{Г(40)i} Dv_{Гi} (-Dq_{Вi})}{b_{Гmax} v_{Гmax} (-q_{Вmax})}.$$

Чем ближе значения  $K_{СПГ}$  к 1,0, тем эффективнее схема плавки гололёда.

На рис. 1 показаны фигуры, иллюстрирующие результаты расчёта  $W_{СПГ}$  для СПГ1 ( $K_{СПГ1} = 0,11$ )

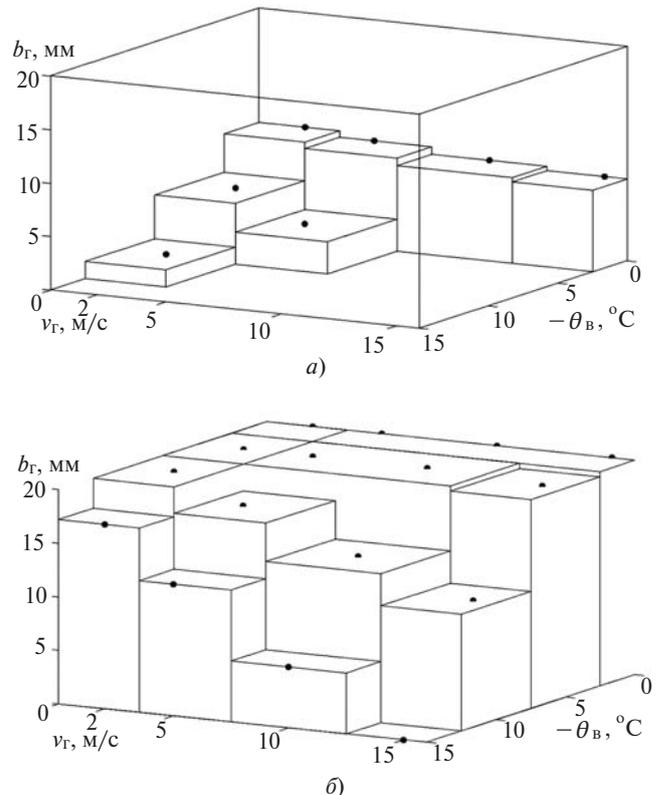


Рис. 1. Результаты расчёта  $W_{СПГ}$ : а – СПГ1; б – СПГ2

и СПГ2 ( $K_{СПГ2} = 0,83$ ). Точки на ступенчатой фигуре соответствуют табличным значениям ( $-q_B, v_\Gamma$ ).

2. Расчёт интегрального показателя эффективности для участка воздушной линии. Для конкретного климатического района целесообразно использовать предварительно построенные зависимости:

$$K_{СПГ} = F(I_{пл*}),$$

где  $I_{пл*}$  – относительное значение тока плавки гололёда:

$$I_{пл*} = \frac{I_{пл} - I_0}{I_{м.д} - I_0}.$$

Здесь  $I_0$  – наибольший ток плавки, при котором  $b_{\Gamma(40)} = 0$  мм ( $K_{СПГ} = 0$ ), А; значение тока  $I_0$  вычисляется для каждого провода по табл. 1 при  $v_\Gamma = 2$  м/с,  $q_B = 0$ :  $I_0 = 2I_{(40)5\text{мм}} - I_{(40)10\text{мм}}$  (если  $I_{пл} < I_0$ , то  $K_{СПГ} = 0$ );  $I_{м.д}$  – максимально допустимый ток провода при  $v_\Gamma = 2$  м/с,  $q_B = 0$  и направлении ветра  $u = 0$ , А.

Необходимо обеспечить ток плавки  $I_{пл} \leq I_{м.д}$ .

В таблице и на рис. 2 приведены зависимости  $K_{СПГ} = F(I_{пл*})$ , построенные для конкретного климатического района, характеризуемого значениями:  $b_{\Gamma\text{max}} = 20$  мм,  $v_{\Gamma\text{max}} = 16$  м/с,  $-q_{B\text{max}} = 15$  °С.

Марка провода	Значение $K_{СПГ}$ при разных значениях $I_{пл*}$ , отн. ед.				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
АС-35	0,03	0,10	0,26	0,52	0,80
АС-50	0,02	0,09	0,24	0,49	0,78
АС-70	0,02	0,09	0,23	0,46	0,75
АС-95	0,02	0,08	0,22	0,43	0,72
АЖ-120	0,02	0,08	0,22	0,43	0,71
АС-120	0,02	0,08	0,21	0,42	0,69
АС-150	0,02	0,08	0,21	0,40	0,67
АС-185	0,02	0,08	0,20	0,39	0,65
АС-240	0,02	0,07	0,19	0,37	0,62

Для рассматриваемого климатического района в качестве минимально допустимого принято значение  $K_{СПГС} = 0,2 (I_{пл*} \approx 0,55)$  – штриховая линия на рис. 2.

3. Расчёт интегрального показателя эффективности для ВЛ, состоящей из участков с разными марками проводов. Эквивалентное значение  $K_{СПГВЛ}$  для ВЛ, состоящей из нескольких участков с разными марками проводов, определяется как среднее взвешенное значение  $K_{СПГС}$  для всех участков:

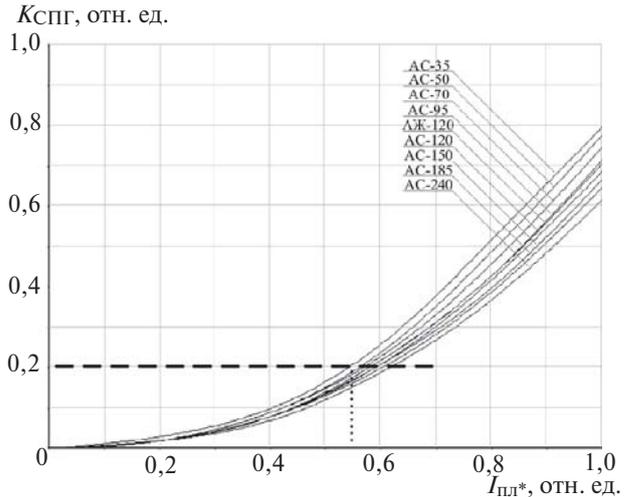


Рис. 2. Зависимости  $K_{СПГ} = F(I_{пл*})$  для разных марок проводов

$$K_{СПГВЛ} = \frac{\sum_{ВЛ} K_{СПГС} l_{прS}}{\sum_{ВЛ} l_{прS}} = \sum_{ВЛ} K_{СПГС} \frac{l_{прS}}{l_{прВЛ}},$$

где  $l_{прS}$  – приведённая к базисному сечению  $S_6$  длина участка ВЛ с проводом сечения  $S$ :

$$l_{прS} = l_S \frac{S}{S_6} = l_S S_*;$$

$l_{прВЛ}$  – приведённая длина ВЛ:

$$l_{прВЛ} = \sum_{ВЛ} l_{прS};$$

$S_*$  – коэффициент приведения к базисному сечению:

$$S_* = \frac{S}{S_6}.$$

Приведение длины участков ВЛ к базисному сечению позволяет суммировать их для определения значения  $l_{прВЛ}$ .

Для сети 35 кВ в качестве провода с базисным сечением принят АС-70. Значения коэффициента приведения для проводов разных марок приведены далее:

Марка провода	Коэффициент приведения
АС-35	0,50
АС-50	0,71
АС-70	1,00
АС-95	1,36
АЖ-120	1,71
АС-120	1,71
АС-150	2,14

Для сети 110 кВ в качестве провода с базисным сечением принят АС-120.

Если ВЛ входит в разные схемы плавки гололёда, то выбирается СПГ, обеспечивающая наибольшее значение  $K_{СПГ ВЛ}$ .

Как показывает анализ, плавка гололёда на всей ВЛ с проводами разных марок может быть эффективной, если используются две (реже — три) марки проводов с близкими сечениями и обеспечивается ток плавки, близкий к максимально допустимому значению для провода меньшего сечения.

4. *Расчёт интегрального показателя эффективности для электрической сети или отдельного района.* Эквивалентное значение интегрального показателя эффективности для электрической сети или отдельного района вычисляется как среднее взвешенное значение для всех участков или для всех ВЛ:

$$K_{СПГ ЭС} = \frac{\sum_{ЭСВЛ} K_{СПГ S} I_{прS}}{\sum_{ЭС} I_{прS}} = \frac{\sum_{ЭС} K_{СПГ ВЛ} I_{прВЛ}}{\sum_{ЭС} I_{прВЛ}}$$

По этому показателю можно сравнивать эффективность общих схем плавки гололёда, разрабатываемых для сетевых предприятий, у которых свыше 50% ВЛ проходит в гололёдоопасных районах [16].

**Выводы.** Приведённые в пособии расчётные таблицы для определения параметров режима плавки гололёда могут использоваться как при проектировании схем плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи, так и при их эксплуатации в осенне-зимний период.

Использование таблиц основано на линейной интерполяции (как в Правилах устройства электроустановок) и без ЭВМ позволяет получить приемлемые по точности результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Засыпкин А.С., Сацук Е.И., Щуров А.Н. Расчётные таблицы для выбора и анализа схем плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи. — Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2013, 102 с.
2. <http://monitoring-vl.tmc-center.ru/GololedBookDescription.aspx>
3. Никифоров Е.П. Повышение эффективности удаления гололёдообразования с проводов ВЛ. — Электрические станции, 2004, №4, с. 40–48.
4. Рудакова Р.М., Вавилова И.В., Голубков И.Е. Методы борьбы с гололедом в электрических сетях энергосистем. — Уфа: УГАТУ, 2005, 187 с.
5. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 448 с.
6. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г. Руководящие указания по плавке гололёда на воздушных линиях электропередачи. — М.: Специализированный центр научно-технической информации, 1969, 96 с.
7. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г., Холмский Д.В., Ланда М.Л. Руководящие указания по плавке гололёда на ВЛ напряжением до 20 кВ, проходящих в сельской местности. — М.: Специализированный центр научно-технической информации, 1974, 74 с.
8. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г., Никонен Л.А., Хрущ П.Р. Методические указания по плавке гололёда переменным током. Ч.1. — М.: Союзтехэнерго, 1983, 114 с.
9. Указания по проектированию схем и устройств плавки гололёда на проводах и тросах ВЛ 35 кВ и выше. Т. 2. Номограммы для определения времени и токов плавки. — М.: Энергосетьпроект, 1994, 102 с.
10. Левченко И.И., Сацук Е.И. Программа расчета режимов плавки гололёда постоянным током на проводах воздушных линий электропередачи («ГОЛОЛЕД»). — Свидет. об офиц. регистр. программ для ЭВМ №2008611091, 2008.
11. Тимашова Л.В., Мерзляков А.С., Назаров И.А. Допустимые токовые нагрузки для проводов воздушных линий. — Энергия единой сети, 2013, № 1 (6), с. 30–39.
12. Songhai Fan, Xingliang Jiang, Caixin Sun, Zhijin Zhang, Lichun Shu. Temperature characteristic of DC ice-melting conductor. — Cold Regions Science and Technology, 2011, No. 65, pp. 29–38.
13. ANSYS Fluent: [www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent](http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent)
14. F. Alvarez Gomez, J.M. Garcia De Maria, D. Garcia Puertas, A. Bañi, R. Granizo Arrabe. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines, 2011: [www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Meloneras/ACELAE/ACELAE-25.pdf](http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Meloneras/ACELAE/ACELAE-25.pdf)
15. Левченко И.И., Аллилуев А.А., Рябуха Е.В. Расчёт параметров плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002, 76 с.
16. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006, 522 с.
17. Засыпкин А.С., Щуров А.Н. Эффект от увеличения тока плавки гололёда на ВЛ до максимально допустимого значения. — Изв. вузов. Электромеханика, 2015, № 1, с. 45 – 48.
18. Сацук Е.И. Электротепловые и механические процессы в воздушных линиях электропередачи. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010, 106 с.
19. Засыпкин А.С., Щуров А.Н., Засыпкин А.С. (мл.), Тетерин А.Д. Расчёт установившейся температуры провода воздушной линии электропередачи. — Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2015, № 2,
20. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Электроустановки для профилактического антигололедного обогрева проводов воздушных линий электропередачи. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007, 26 с.
21. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е., Кууск А.Б. Уточнения к основам теории нагревания проводов воздушных линий электропередачи. — Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 1, с. 36 – 40.
22. Щуров А.Н., Титов Д.Е. Исследование интенсивности гололёдообразования на проводах ВЛ с использованием опытных данных. — Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2014, № 3, с. 25 – 29.
23. Засыпкин А.С., Щуров А.Н. Интегральная оценка эффективности схем плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи. — Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 4, с. 42–45.

[31.03.15]

*Авторы: Засыпкин Александр Сергеевич окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ) им. Серго Орджоникидзе (ныне — Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова — ЮРГПУ (НПИ)) в 1959 г. В 1985 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию «Повышение технического совершенства релейной защиты мощных трансформаторов энергосистем». Профессор кафедры «Электрические*

станции и электроэнергетические системы» ЮРГПУ (НПИ).

**Сацук Евгений Иванович** окончил энергетический факультет НПИ в 1992 г. В 2011 г. защитил докторскую диссертацию «Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных

погодных условиях». Доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ЮРГПУ (НПИ).

**Щуров Артем Николаевич** окончил энергетический факультет ЮРГПУ (НПИ) в 2011 г. Ассистент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ЮРГПУ (НПИ).

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 18–26.

## Determination the parameters of the regime of ice melting on overhead power lines

**ZASYPKIN Alexandr Sergeyevich** (*The Platov South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute)(SRSPU (NPI)), Novocherkassk, Russia*) – Professor, Dr. Sci.(Eng.)

**SATSUK Evgeny Ivanovich** (*SRSPU (NPI), Novocherkassk, Russia*) – Associate Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**SHCHUROV Artyom Nikolaevich** (*SRSPU (NPI), Novocherkassk, Russia*) – Assistant in the Department

*In article the structure and ways of use of the educational and methodical grant developed by authors is considered. The calculation tables provided in a grant for determination of parameters of the regime of ice melting can be used as at design of schemes of ice melting on overhead power lines, and at their operation during the autumn and winter period. As arguments in tables are used discrete values of air temperature, wind speed at ice, the direction of a wind (along or across a wire), thickness of a wall of ice with a density of 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Use of tables is based on linear interpolation (as in Electrical Installations Code) and without computer allows to receive the results acceptable on accuracy: the maximum admissible current, current of preventive heating, current of 40-minute melting, ice melting time, electric power expense. The integrated indicator of efficiency of schemes of ice melting which allows to analyze objectively various schemes and to choose the best technical solutions is offered.*

Key words: ice melting, ice melting regime parameters, calculation tables, linear interpolation

### REFERENCE

1. Zasytkin A.S., Satsuk E.I., Shchurov A.N. *Raschetnye tablitsy dlya vybora i analiza skhem plavki gololeda na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi* (Calculation tables for a choice and the analysis of schemes of ice melting on overhead power lines). Novocherkassk, Publ. «SRSPU(NPI)», 2013, 102 p.

2. <http://monitoring-vl.tmc-center.ru/GololedBookDescription.aspx>

3. Nikiforov E.P. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2004, No. 4, pp. 40–48.

4. Rudakova R.M., Vavilova I.V., Golubkov I.E. *Metody bor'by s gololedom v elektricheskikh setyakh energosistem* (Methods of struggle against icing in electric networks of power supply systems). Ufa, Publ. «UGATU», 2005, 187 p.

5. Levchenko I.I., Zasytkin A.S., Alliluyev A.A., Satsuk E.I. *Diagnostika, rekonstruktsiya i `ekspluatatsiya vozduzhnykh linii `elektroperedachi v gololednykh raionakh: ucheb. posobiye* (Diagnostics, reconstruction and operation of overhead power transmission lines in ice areas). Moscow, Publ. House «MPEI», 2007, 448 p.

6. Burgsdorf V.V., Nikitina L.G. *Rukovodyashchiye ukazaniya po plavke gololeda na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi* (Guidelines for the melting of ice on overhead power lines). Moscow, Publ. «Spetsializirovannyi tsentr nauchno-tehnicheskoi informatsii», 1969, 96 p.

7. Burgsdorf V.V., Nikitina L.G., Holmskii D.V., Landa M.L. *Rukovodyashchiye ukazaniya po plavke gololeda na VL napryazheniem do 20 kV, prokhodyashchikh v sel'skoi mestnosti* (Guidelines for the melting of ice on overhead lines with voltage up to 20 kV, taking place in the countryside). Moscow, Publ. «Spetsializirovannyi tsentr nauchno-tehnicheskoi informatsii», 1974, 74 p.

8. Burgsdorf V.V., Nikitina L.G., Nikonets L.A., Hrusch P.R. *Metodicheskiye ukazaniya po plavke gololeda peremennym tokom. Ch.I.* (Methodical instructions for melting of ice with alternating current. Part 1). Moscow, Publ. «Soyuz tekhnenergo», 1983, 114 p.

9. *Ukazaniya po proektirovaniyu skhem i ustroystv plavki gololeda na provodakh i trosakh VL 35 kV i vyshе. T. 2. Nomogrammy dlya opredeleniya vremeni i tokov plavki* (Instructions on design of schemes and devices for ice melting on wires and cables of overhead power lines of 35 kV and above. Vol. 2. Nomograms for definition of time and currents of melting). Moscow, Publ. «Energoset'proekt», 1994, 102 p.

10. Official registration certificate for computer programs No. 2008611091 Programma rascheta rezhimov plavki gololeda postoyannym tokom na provodakh vozduzhnykh linii elektroperedachi («GOLOLED») (The program of calculation of the regimes of ice melting a direct current on wires of overhead power lines («ICE»)/I. I. Levchenko, E. I. Satsuk, 2008.

11. Timashova L.V., Merzlyakov A.S., Nazarov I.A. *Energiya edinoi seti (Energy of a uniform network)*, 2013, No. 1 (6), pp. 30–39.

12. Songhai Fan, Xingliang Jiang, Caixin Sun, Zhijin Zhang, Lichun Shu. Temperature characteristic of DC ice-melting conductor. – Cold Regions Science and Technology, 2011, No. 65, pp. 29–38.

13. ANSYS Fluent: [www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent](http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent)

14. F. Alvarez Gomez, J. M. Garcia De Maria, D. Garcia Puertas, A. Bairi, R. Granizo Arrabe. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines, 2011: [www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Meloneras/ACELAE/ACELAE-25.pdf](http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Meloneras/ACELAE/ACELAE-25.pdf)

15. **Levchenko I.I., Alliluev A.A., Rjabuha E.V.** *Raschet parametrov plavki gololeda na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi* [Calculation of parameters of ice melting on overhead power lines]. Novocherkassk. Publ. «SRSTU», 2002, 76 p.

16. **Pravila ustrojstva elektroustanovok. 7-e izdaniye** [Electrical Installations Code. Seventh edition]. Moscow. Publ. «ENAS», 2006, 522 p.

17. **Zasyplin A.S., Shchurov A.N.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika [Russian Electromechanics]*, 2015, No. 1. pp. 45 – 48.

18. **Satsuk E.I.** *Elektroteplovye i mekhanicheskiye protsessy v vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi* (Electrothermal and mechanical processes in overhead power transmission lines). Novocherkassk, Publ. «SRSPU(NPI)», 2010, 106 p.

19. **Zasyplin A.S., Shchurov A.N., Zasyplin A.S. (jr.), Teterin A.D.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki* (News of Higher Education Institutions. Nord-Caucasus region. Technical sciences), 2015, No. 2.

20. **Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluev A.A., Satsuk E.I.** *Elektroustanovki dlya profilakticheskogo antigolednogo obogreva provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi* [Electroinstallations for preventive deicing heating of wires of overhead power lines]. Novocherkassk, Publ. «SRSPU», 2007, 26 p.

21. **Figurnov E.P., Zharkov Ju.I., Petrova T.E., Kuusk A.B.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika (News of Higher Education Institutions. Electromechanica)*, 2013, No. 1, pp. 36–40.

22. **Shchurov A.N., Titov D.E.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki (News of Higher Education Institutions. Nord-Caucasus region. Technical sciences)*, 2014, No. 3, pp. 25–29.

23. **Zasyplin A.S., Shchurov A.N.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2013, No. 4, pp. 42 – 45.