

УДК 621.315.145:624.3.056

## ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 6–35 кВ

Латыпов Ирек Салихович<sup>1,4</sup>,  
Irek.tat.Latypov@gmail.com

Сушков Валерий Валентинович<sup>2</sup>,  
Sushkovvv@gray-nv.ru

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>3</sup>,  
timoshkinvv@tpu.ru

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625027, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

<sup>2</sup> Нижневартковский государственный университет,  
Россия, 628605, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,  
Россия, 425048, г. Тюмень, ул. Максима Горького, 42.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности функционирования воздушных линий электропередачи с использованием неизолированного витого провода в распределительной сети класса напряжения 6–35 кВ при стихийных воздействиях. Развитие данного направления позволит снизить аварийные ситуации в распределительной сети, в частности, в нефтегазовой отрасли, где длины воздушных линий класса напряжения 6–35 кВ достигают нескольких десятков километров.

**Цель исследования:** обоснование влияния формы поперечного сечения витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ в зависимости от выбираемых коэффициентов заполнения полного сечения провода материалом и гладкости провода на величины вероятных механических нагрузок, действующих на провод, с учетом погодных условий.

**Объекты исследования:** витой неизолированный провод воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ.

**Методы.** При определении допустимых расчетных нагрузок использован метод предельных состояний.

**Результаты.** Получены формулы, позволяющие определять диаметр провода в зависимости от выбираемых коэффициентов заполнения полного сечения провода материалом и гладкости провода. На основе полученных выражений построены зависимости вероятных механических нагрузок, действующих на провода, от погодных условий и выбираемой формы поперечного сечения. По представленным зависимостям предложен алгоритм определения вероятных механических нагрузок, действующих на провод, который позволяет обоснованно выбрать провод воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ. Выполнена оценка критических пролетов на примере использования провода номинальным сечением 120 мм<sup>2</sup>.

### Ключевые слова:

Воздушная линия электропередачи, неизолированный провод, гололедное образование, скорость ветра, механическая нагрузка, критический пролет.

### Введение

Воздушные и кабельные линии среднего класса напряжения 6–35 кВ образуют основу распределительных сетей Российской Федерации. Общая протяженность линий данного класса напряжения, по данным ОАО «ФСК ЕЭС», составляет более 1,3 млн км [1]. Неизолированные провода воздушной линии электропередачи составляют основополагающую часть от представленной длины, поэтому требуется обеспечение их надежного функционирования с минимальными отключениями электрических потребителей [2–4]. Особенно выжно обеспечить гарантированное электропитание для электроустановок, где используются наблюдатели [5].

Основными потребителями электрической энергии распределительной сети нефтегазового сектора являются объекты нефтегазодобычи (кустовые и до-

жимные насосные станции, центральные пункты сбора, товарные парки и т. д.) и кусты газовых, нефтяных и газоконденсатных скважин, которые удалены от энергетических центров и запитываются преимущественно воздушными линиями электропередачи (ВЛ), длина которых от источника электроэнергии до потребителя может достигать нескольких десятков километров. Схема электроснабжения в основном имеет «древовидную» структуру с множеством отпаек на конечные потребители.

Из-за такой разветвленной структуры в распределительной сети часто происходят аварийные отключения, связанные, прежде всего, с технологическими нарушениями, к которым относятся и аварийные отключения электрических сетей вследствие стихийных воздействий [6, 7]. По данным АО «Тюменьэнерго» [8], аварийные отключе-

ния из-за стихийных воздействий на ВЛ класса напряжения 6–35 кВ Тюменской области варьируются от 5 до 20 % в зависимости от времени года. Наибольшее количество приходится на IV и II кварталы года, когда велика вероятность гололедообразования и шквалистого ветра.

Наиболее тяжелыми последствиями обладают аварийные ситуации, связанные с гололедообразованием на поверхности проводов, так как они сопровождаются большим объемом разрушений и требуют значительного времени для восстановления функционирования ВЛ [9, 10]. Гололедно-изморозевые отложения на поверхности проводов могут вызвать сближение фазных проводов, «плюску» проводов в фазах, обрыв проводов, разрушение опор ВЛ и перекрытие изоляторов [11, 12].

В связи с вышесказанным, необходимо повышать надежность ВЛ как наиболее повреждаемого элемента электрической сети, для чего необходимо определить вероятные нагрузки, действующие на провод в зависимости от погодных условий географического района с учетом формы поперечного сечения провода ВЛ [13].

#### Определение вероятных механических нагрузок

Кратко рассмотрим силы и нагрузки, действующие на провода ВЛ. Провода ВЛ, подвешенные на опорах воздушной линии, находятся под постоянным действием равномерно распределенной по длине вертикальной статической нагрузки от собственного веса. Кроме того, на них могут действовать внешние силы, направленные вертикально (гололедно-изморозевые образования) и горизонтально (давление ветрового потока) [14, 15]. Вертикальная нагрузка от гололедно-изморозевых образований вызывает наибольшие усилия в проводах и действует не постоянно, а лишь при неблагоприятных сочетаниях атмосферных условий [16]. Такая нагрузка может существовать на поверхности проводов длительное время, поэтому ее считают основной при расчете механической прочности проводов. Нарастание гололедного образования при этом происходит постепенно и не сопровождается динамическим изменением приложенной силы, поэтому нагрузку от гололеда при расчетах принимают статической [17, 18]. Динамическим действием справедливо можно считать внезапный сброс гололеда при сильных порывах ветра или обрыва провода в смежных пролетах. Горизонтальная нагрузка от ветра, как и вертикальная нагрузка от гололеда, вызывает большие усилия в проводе. При расчетах горизонтальную нагрузку, как и вертикальную, принимают статической. Динамический эффект пульсации скоростного напора ветра не наблюдается по следующим причинам: из-за малой жесткости проводов; пульсации ветра на разных участках пролета не совпадают по амплитуде и фазе действующей силы [19].

Для количественной оценки вертикальной и горизонтальной нагрузок, действующих на провод, в статье уточнена методика определения действующих

на провода нагрузок с учетом формы поперечного сечения провода [20].

Известно, что полная вертикальная нагрузка при гололеде определяется арифметической суммой единичных нагрузок от собственного веса и веса гололеда [19, 20]:

$$P_{\text{рез. верт}} = P_{\text{пров}} + P_{\text{гол}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{пров}} = (\gamma_{\text{ст}} F_{\text{ст}} + \gamma_{\text{п}} F_{\text{п}}) \eta \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{ст}}$  – удельный вес стали;  $\gamma_{\text{п}}$  – удельный вес материала проводящей части;  $F_{\text{ст}}$  – площадь сечения стального сердечника;  $F_{\text{п}}$  – площадь сечения проволок проводящей части;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий приращение длины скрученных проволок.

$$P_{\text{гол}} = g_0 \pi c (d + c) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $g_0$  – объемный вес льда на поверхности провода;  $d$  – диаметр провода;  $c$  – толщина стенки гололеда.

Анализ формулы (2) показывает, что нагрузка от собственного веса провода определяется во многом удельным весом и сечением материала сердечника и проводящей частей, тогда как нагрузка от веса гололеда (3) зависит от диаметра провода, который определяется формой его поперечного сечения [13]:

Периметр боковой поверхности витого неизолированного провода  $P_{\text{пр}}$  определяется по выражению:

$$P_{\text{пр}} = \frac{2\sqrt{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})\pi}}{\chi_{\text{зап}} m_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $\chi_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения полного сечения провода материалом;  $m_{\text{пр}}$  – коэффициент гладкости провода, учитывающий шероховатость поверхности провода.

Выбор диаметра провода зависит от следующих условий:

- при увеличении коэффициента заполнения  $\chi_{\text{зап}}$  диаметр провода  $d_{\text{пр}}$  снижается;
- при уменьшении коэффициента гладкости  $m_{\text{пр}}$  диаметр провода  $d_{\text{пр}}$  увеличивается;
- отношение площади номинального сечения провода к площади окружности, построенной по эквивалентному радиусу  $r_{\text{экв}} = P_{\text{пр}}/2\pi$ , определяется коэффициентом площади  $k_s$ :

$$k_s = \frac{F_{\text{ст}} + F_{\text{п}}}{\pi r_{\text{экв}}^2}; \quad (5)$$

- максимальное значение периметра боковой поверхности провода, в зависимости от коэффициента площади, определяется коэффициентом формы провода:

$$k_F = e^{\log\left(\frac{1}{k_s^{0.65}}\right)}, \quad (6)$$

где  $e^{\log\left(\frac{1}{k_s^{0.65}}\right)}$  – приближение (итерация) площади фигуры полученной формы с выбранными коэффициентами заполнения полного сечения провода

материалом и гладкости провода к площади круга, полученной сложением площадей номинального сечения алюминиевой и стальной частей провода.

Тогда, учитывая выражения (4)–(6) и принятые условия, диаметр провода можно определить по выражению:

$$d_{\text{пр}} = 2k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}}, \quad (7)$$

Тогда выражение (3) с учетом (7) перепишем в виде:

$$P_{\text{гол}} = 4g_0\pi c \left( k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} + c \right) \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Определение ветровых нагрузок произведено при гололедном образовании на поверхности провода и его отсутствии.

При отсутствии гололеда ветровую нагрузку можно найти по выражению:

$$P_{\text{ветр. отс. гол}} = \alpha C_x \frac{v^2}{8} k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий неравномерность действия ветра по длине пролета;  $C_x$  – аэродинамический коэффициент (лобового столкновения).

При гололеде ветровая нагрузка составит:

$$P_{\text{ветр. гол}} = \alpha C_x \frac{v^2}{8} \left( k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} + c \right) \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Совместные действия вертикальных и горизонтальных нагрузок на провод определяются при [21, 22]:

- отсутствии гололеда

$$P_{\text{рез. отс. гол}} = \sqrt{P_{\text{пров}}^2 + P_{\text{ветр. отс. гол}}^2}; \quad (11)$$

- гололеде

$$P_{\text{рез. гол}} = \sqrt{P_{\text{рез. верт}}^2 + P_{\text{ветр. гол}}^2}. \quad (12)$$

Для упрощения расчетов по выражениям (1), (8)–(12) и построения кривых, действующих на провод нагрузок, в работе использованы удельные

или приведенные механические нагрузки, которые определяются по выражению:

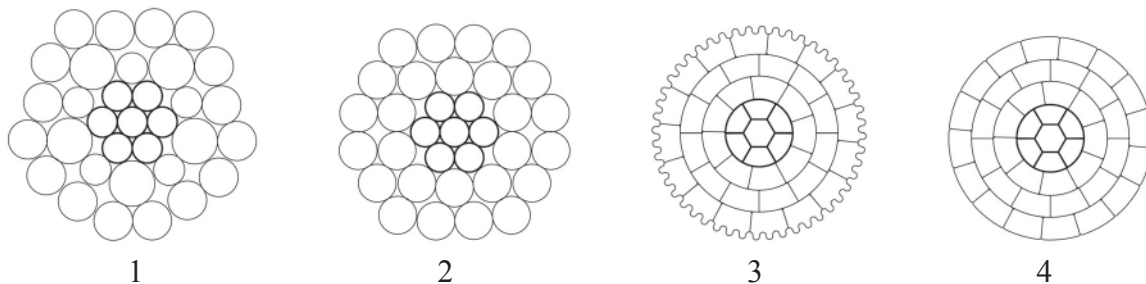
$$\gamma = \frac{P_i}{F}, \quad (13)$$

где  $P_i$  – принимаемая нагрузка;  $F$  – номинальное сечение проводящей и стальной частей провода.

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета механических нагрузок, действующих на провода различных форм сечения

**Table 1.** Basic data for calculation of mechanical loadings on wires of various section forms

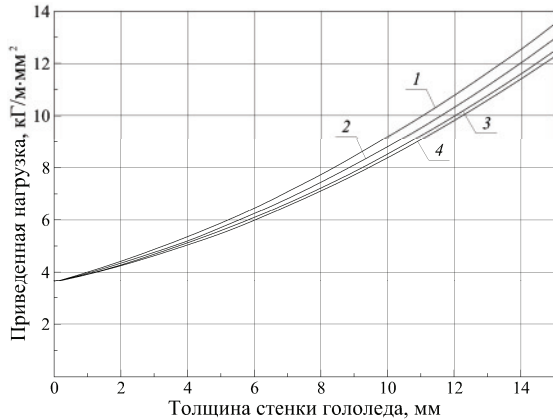
Параметр Characteristic	Обозначение Symbol	Принятая величина Accepted value
Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> /Nominal cross-section area, mm <sup>2</sup>		
проводящей части провода conducting part of a wire	$F_{\text{п}}$	118
стальной части провода steel part of a wire	$F_{\text{ст}}$	18,83
Аэродинамический коэффициент Aerodynamic coefficient		
при гололеде at glaze	$C_x$	1,1
при отсутствии гололеда without glaze		1,2
Коэффициент неравномерности скорости ветра по пролету Coefficient of wind speed unevenness on overhead span		
при гололеде at glaze	$\alpha$	1
при отсутствии гололеда without glaze		0,85
Коэффициент гладкости провода Coefficient of a wire smoothness		
1	$m_{\text{пр}}$ $m_{\text{wire}}$	0,8
2		0,82
3		0,61
4		1,0
Коэффициент заполнения полного сечения материалом Coefficient of filling a wire full section with material		
1	$\chi_{\text{зап}}$ $\chi_{\text{filling}}$	0,8
2		0,89
3		0,99
4		1,0



**Рис. 1.** Варианты форм поперечного сечения провода воздушной линии электропередачи сечением 120 мм<sup>2</sup>: 1 – провод типа АС  $\chi_{\text{зап}}=0,8$  и  $d_{\text{пр}}=16,89$  мм; 2 – провод типа АС  $\chi_{\text{зап}}=0,89$  и  $d_{\text{пр}}=15,14$  мм; 3 – провод с развитой боковой поверхностью (энергосэффективный)  $\chi_{\text{зап}}=0,99$  и  $d_{\text{пр}}=13,77$  мм [23]; 4 – гладкий провод, диаметр провода равен  $d_{\text{пр}}=13,12$  мм

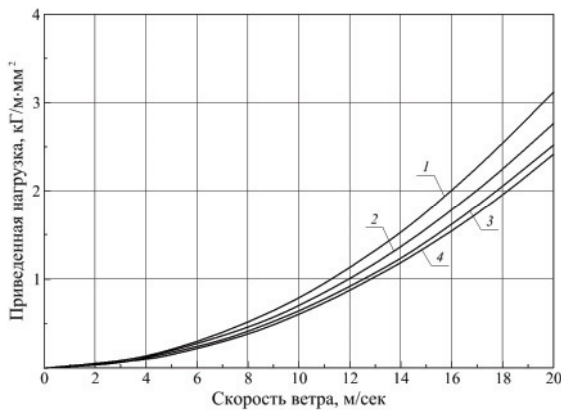
**Fig. 1.** Options of forms of wire cross section in the overhead power transmission line with a section of 120 mm<sup>2</sup>: 1 is the wire of AC type  $\chi_{\text{filling}}=0,8$  and  $d_{\text{wire}}=16,89$  mm; 2 is the wire of AC type  $\chi_{\text{filling}}=0,89$  and  $d_{\text{wire}}=15,14$  mm; 3 is the wire with the developed side surface (energy efficient)  $\chi_{\text{filling}}=0,99$  and  $d_{\text{wire}}=13,77$  mm; 4 is the smooth wire with the diameter  $d_{\text{wire}}=13,12$  mm

Результаты расчета приведенных механических нагрузок (13) выражений (8)–(10), (12) для исходных данных, представленных в табл. 1, при различной толщине стенки гололеда, скорости ветра, и форм провода (рис. 1) представлены на рис. 2–5.



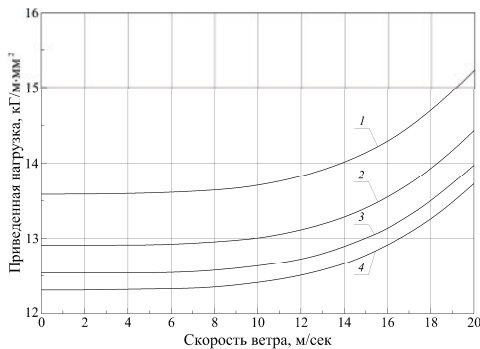
**Рис. 2.** Приведенная полная вертикальная нагрузка, действующая на провод при отсутствии ветра, при изменении толщины стенки гололеда (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 2.** Given vertical loading on a wire depending on ice wall thickness without wind (1–4 are according to Fig. 1)



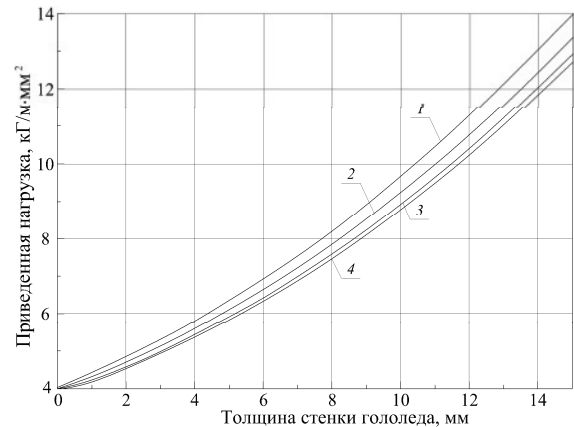
**Рис. 3.** Приведенная нагрузка, действующая на свободный от гололеда провод, при изменении скорости ветра (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 3.** Given loading on a wire, free from ice, at change of wind speed (1–4 are according to Fig. 1)



**Рис. 4.** Приведенная нагрузка, действующая на провод с гололедом ( $c=15$  мм), при изменении скорости ветра (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 4.** Given loading on a wire with the ice ( $c=15$  mm) at change of wind speed (1–4 are according to Fig. 1)



**Рис. 5.** Приведенная полная вертикальная нагрузка, действующая на провод, при ветре ( $v=20$  м/с), в зависимости от толщины стенки гололеда на поверхности провода (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 5.** Given full vertical loadings on a wire at wind ( $v=20$  m/s) depending on ice wall thickness (1–4 are according to Fig. 1)

На рис. 1. представлены варианты форм поперечного сечения проводов.

Анализ рисунков показывает, что форма поперечного сечения провода влияет на величину гололедного образования на его поверхности и действие ветрового потока, следовательно, на вертикальную и горизонтальную нагрузки. Изменение коэффициентов гладкости провода и заполнения допустимую величину нагрузки, необходимо для выбора рационального сечения и формы провода.

#### Разработка алгоритма выбора неизолированного провода воздушной линии

На основе полученных зависимостей изменения механических нагрузок разработан алгоритм выбора неизолированного провода воздушной линии для питающей сети (рис. 6).

Алгоритм выбора провода в зависимости от вероятных механических нагрузок происходит в следующем порядке:

- задаются нормируемые значения нагрузок, действующих на провод, подбираются провода-аналоги;
- задаются исходные данные для расчета (погодные условия, аэродинамический коэффициент, коэффициент неравномерности ветрового потока, толщина стенки гололеда);
- определяется сечение провода по условиям, рекомендуемым при выборе неизолированного провода воздушной линии электропередачи (допустимый ток, падение напряжения), – данные условия требуют привязки к реальной схеме электроснабжения и могут опускаться при расчете механических нагрузок;
- задаются коэффициенты, определяющие форму поперечного сечения неизолированного провода воздушной линии электропередачи, – выполняется построение необходимой формы и вычисление диаметра провода;

- выполняются построения характеристик вероятных механических нагрузок, действующих на провода, при различных погодных условиях;
- выполняется сравнение механических нагрузок аналога и выбранного провода – при снижении действующих нагрузок на выбранную форму провода и выполнении ряда условий, представленных в работе [12], провод считается энергоэффективным и удовлетворяет условиям поиска.

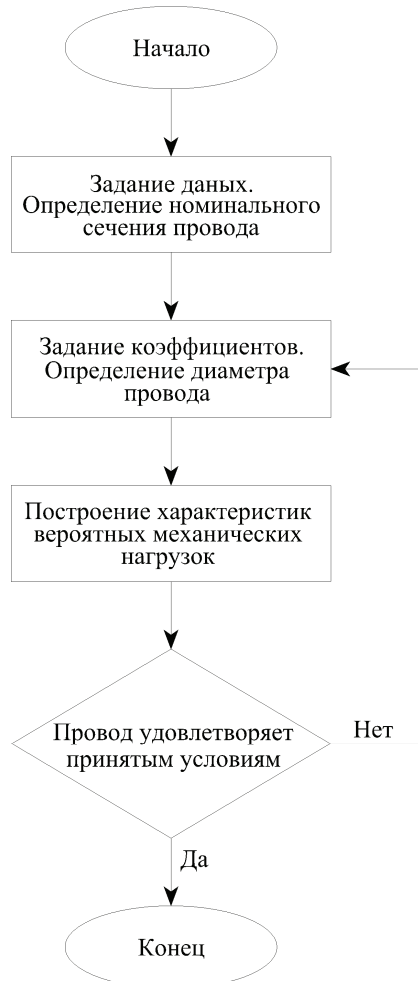


Рис. 6. Алгоритм выбора неизолированного провода воздушной линии

Fig. 6. Algorithm of selecting uninsulated wire of the overhead power transmission line

### Расчет критической длины пролета

Произведен расчет критической длины пролетов для оценки действия механических нагрузок на воздушную линию электропередачи.

Критическим длинам пролетов соответствуют расстояния, определяемые по нормальному тяжению провода, в которых напряжения достигают граничных значений, как при наибольшей нагрузке, так и при минимальной температуре окружающей среды [20].

Для определения критической длины пролетов необходимо рассчитать допустимые (фиктивные) напряжения в проводах [19].

- при длине пролета меньше или равной критической:

$$\sigma_M = \sigma_a \frac{E}{E_a} - (\alpha - \alpha_a)(t_M - t')E, \quad (14)$$

где  $\sigma_a$  – нормальное тяжение провода;  $E$  – модуль упругости провода в целом;  $E_a$  – модуль упругости алюминиевой части провода;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения провода;  $\alpha_a$  – температурный коэффициент линейного расширения алюминиевой части провода;  $t_M$  – расчетная максимальная температура окружающей среды;  $t'$  – температура при изготовлении провода.

- при длине пролета больше критической:

$$\sigma_H = \sigma_a \frac{E}{E_a} - (\alpha - \alpha_a)(t_H - t')E, \quad (15)$$

где  $t_H$  – расчетная температура окружающей среды при увеличении ледяного покрова на поверхности провода.

Критическая длина пролета для каждого из вариантов проводов (рис. 1), с учетом (14) и (15) определяется по выражению:

$$l_K = \frac{\sigma_H}{P_{\text{пров}}} \sqrt{\frac{24\alpha_a(t_H - t_M)}{q^2 - \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_M}\right)^2}}, \quad (16)$$

где  $q = \frac{P_{\text{ветр. гол}}}{P_{\text{пров}}}$  – критическая нагрузка.

Для расчета критической длины пролетов (16) были приняты следующие условия и допущения:

- тяжение провода нормальное  $\alpha_a = 8 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- модуль упругости провода в целом  $E = 8500 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- модуль упругости алюминиевой части провода  $E_a = 6300 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- расчетная минимальная температура окружающей среды  $t_M = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура при изготовлении провода  $t' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температурный коэффициент линейного расширения провода в целом  $\alpha = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;
- температурный коэффициент линейного расширения алюминиевой части провода  $\alpha_a = 23 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;
- максимальная толщина стенки гололеда  $c = 15 \text{ мм}$ ;
- максимальная скорость ветра  $v = 20 \text{ м/с}$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет критической длины пролетов

Table 2. Calculation of critical spans

Вариант Version	Параметры формы провода Wire form parameters		Критический пролет линии, м Critical overhead span, m	Снижение критического пролета, % Reducing the critical span, %
	коэффициент гладкости smoothness coefficient	коэффициент заполнения filling coefficient		
4	1,0	1,0	94	–
3	0,61	0,99	92	2,1
2	0,82	0,89	89	5,3
1	0,8	0,8	85	9,6

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что критическая длина пролета зависит от коэффициентов, определяющих форму поперечного сечения провода, позволяет подобрать необходимый критический пролет. Так, при использовании провода типа АС критический пролет составляет 89 м, что на 5,3 % меньше, чем при использовании провода с абсолютно гладкой поверхностью, проволоки у которого вплотную сопряжены друг с другом. Следует отметить, что провода с развитой поверхностью [12, 23] позволяют увеличить длину критического пролета до 92 м. Величина критической длины пролета значительно снижается при уменьшении коэффициента заполнения и достигает 85 м для варианта конструктивного исполнения провода под номером 1 (рис. 1).

#### Заключение

Получены зависимости приведенной механической нагрузки от погодных условий для различных вариантов форм поперечного сечения провода. Установлено, что на величину приведенной меха-

нической нагрузки, действующей на провод, а также на критическую длину пролета оказывают влияние коэффициенты гладкости поверхности и заполнения полного сечения материалом. Так, полная вертикальная нагрузка, действующая на провод с наибольшим диаметром (вариант 1), на 10 % больше, чем та, что действует на провод с гладкой поверхностью, проволоки которого более плотно сопряжены друг с другом (вариант 4), а разница критической длины пролета составляет 9,6 %.

Хотя наименьшей приведенной нагрузке подвержен провод с гладкой поверхностью, проволоки которого более плотно сопряжены друг с другом, существуют варианты форм поперечного сечения, обладающие аналогичными коэффициентами заполнения полного сечения материалом, но при этом с развитой боковой поверхностью [11, 22]. Развита боковая поверхность позволяет пропускать больший ток, в сравнении с проводами с гладкой поверхностью, за счет меньшей температуры нагрева провода [11, 22].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворова И.А. Выбор сечений проводников и рациональных напряжений распределительных электрических сетей в современных условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2015. – 15 с.
2. Самарин А., Масалов В. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // *Control Engineering Россия*. – 2013. – № 3. – С. 88–94.
3. Shakirov R.G., Ismagilov F.R., Babikova N.L. Organization of the melting of ice by an alternating current on the wires of overhead electric power lines // *Power Technology and Engineering*. – 2012. – V. 46. – № 2. – P. 163–167.
4. Teegala S.K., Singal S.K. Optimal costing of overhead power transmission lines using genetic algorithms // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – V. 83. – P. 298–308.
5. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular Velocity's Neural Network Observer of the Electric Drive of TVR // *Type Implemented in Software Environment LabVIEW. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 132. – P. 1–6.
6. СТО 56947007–29.240.50.002–2008 Методические указания по количественной оценке механической надежности действующих воздушных линий напряжением 0,38...10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках: стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Введен 03.02.2005. – М., 2009. – 43 с.
7. Титов Д.Е. Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи // *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2014. – № 1. – С. 31–34.
8. Сводный отчет по аварийным отключениям // Официальный сайт АО «Тюменьэнерго». URL: [http://www.te.ru/clients/sistema\\_obslyuzhivaniya\\_potrebitelej/informaciya\\_ob\\_otklyucheniya/avarijnye/svodnyj\\_otchet/](http://www.te.ru/clients/sistema_obslyuzhivaniya_potrebitelej/informaciya_ob_otklyucheniya/avarijnye/svodnyj_otchet/) (дата обращения 15.05.2017).
9. Панасенко М.В. Оперативные и перспективные мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электросетях // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12. – С. 463–463.
10. Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G. Monitoring the intensity of ice formation on overhead electric power lines and contact networks // *Power Technology and Engineering*. – 2015. – V. 49. – № 1. – P. 78–82.
11. Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables / B. Wieceka, G. de Meyb, V. Chatziathanasiouc, A. Papagiannakisc, I. Theodosoglouc // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – V. 58. – P. 199–205.
12. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Условия успешной плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий // *Электричество*. – 2013. – № 8. – С. 21–27.
13. Латыпов И.С., Хмара Г.А., Сушков В.В. Подход к обоснованию выбора энергоэффективной формы витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ // *Промышленная энергетика*. – 2017. – № 4. – С. 8–12.
14. Shaohua Wang, Xingliang Jiang. Progress in research on ice accretions on overhead transmission lines and its influence on mechanical and insulating performance // *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*. – 2012. – V. 7. – № 3. – P. 326–336.
15. Кириченко Н.В., Петрова Е.В. Анализ результатов моделирования температуры неизолированных проводов воздушных линий электроэнергетических систем с учетом влияния солнечной радиации // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 1. – С. 164–168.
16. Keyhana H., McClurea G., Habashib W. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction // *Computers & Structures*. – 2013. – V. 122. – P. 135–144.
17. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on heating uninsulated wires of overhead transmission lines // *Power Technology and Engineering*. – 2017. – V. 51. – № 1. – P. 119–125.
18. Limiting sensitivity of location probing of power transmission lines while detecting ice coatings / R.G. Minullin, E.Yu. Abdullazyanov, V.A. Kasimov, T.K. Filimonova, M.R. Yarullin // *Russian electrical engineering*. – 2016. – V. 87. – № 6. – P. 304–311.
19. Петров В.С., Дубровская Т.И. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий как основа расчета надежности конструкций // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. – 2015. – Т. 7. – № 6. – С. 1–13.
20. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
21. Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций //

- Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. – 2012. – Т. 12. – № 4. – С. 147–154.
22. Panteli M., Mancarella P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies // Electric Power Systems Research. – 2015. – V. 127. – P. 259–270.
23. Провод для воздушных линий электропередачи: пат. 2631421 Рос. Федерация: заявл. 13.04.16; опубл. 22.09.17, Бюл. № 27. – 10 с.

*Поступила 28.11.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Латыпов И.С.**, аспирант кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета; инженер электротехнического отдела Управления по обустройству месторождений ООО «Тюменский нефтяной научный центр».

**Сушков В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики Нижневартовского государственного университета.

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.315.145:624.3.056

## ASSESSMENT OF MECHANICAL LOADS ON THE OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES OF 6–35 kV VOLTAGE CLASS

Irek S. Latypov<sup>1,4</sup>,  
Irek.tat.Latypov@gmail.com

Valery V. Sushkov<sup>2</sup>,  
Sushkovvv@gray-nv.ru

Vadim V. Timoshkin<sup>3</sup>,  
Timvv@sibmail.com

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
70, Melnikayte Street, Tyumen, 625027, Russia.

<sup>2</sup> Nizhnevartovsk State University,  
56, Lenin Street, Nizhnevartovsk, 628605, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>4</sup> Tyumen Petroleum Research Center,  
42, Maksim Gorky street, Tyumen, 625048, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to increase energy efficiency and reliability of operation of overhead power transmission lines using an uninsulated stranded wire in distribution network of 6–35 kV voltage class at external effects. Development of this direction will allow lowering emergencies in distributive network, in particular, in oil and gas branch where lengths of air-lines of 6–35 kV voltage class reach several tens of kilometers.

**The main aim** of the research is to justify the influence of a cross section form of a stranded uninsulated wire of overhead power transmission line of 6–35 kV voltage class, depending on the accepted coefficients of filling the wire full section with material and wire smoothness on values of possible mechanical loadings on wires taking into account weather conditions.

**Objects:** stranded uninsulated wire of overhead power transmission lines of 6–35 kV voltage class.

**Methods.** The method of limit states when determining permissible settlement load was used.

**Results.** The authors have obtained the formulas which allow determining the diameter of a wire depending on the accepted coefficients of filling the wire full section with material and wire smoothness. Based on the formulas obtained the authors showed the dependences of possible mechanical loadings on wires on weather conditions and the taken form of the wire cross section. On the basis of the introduced dependences the authors proposed the algorithm for determining possible mechanical loadings on a wire. This algorithm allows selecting the wire of overhead power transmission lines of 6–35 kV voltage class. The authors assessed the critical spans on the example of using a wire with a nominal section of 120 mm<sup>2</sup>.

### Key words:

Overhead power transmission line, uninsulated wire, ice loading, speed of wind, mechanical loading, critical span.

### REFERENCES

1. Suvorova I.A. *Vybor secheniy provodnikov i ratsionalnykh napryazheniy raspredelitelnykh elektricheskikh setey v sovremennykh usloviyakh*. Avtoreferat Dis.... kand. nauk [The choice of sections of conductors and rational tension of distributive electrical networks in modern conditions. Cand. Diss. Abstract]. Novocherkassk, 2015. 15 p.
2. Samarin A., Masalov V. Modern technologies of monitoring of air power supply networks of the power line. *Control Engineering Russia*, 2013, no. 8, pp. 88–94. In Rus.
3. Shakirov R.G., Ismagilov F.R., Babikova N.L. Organization of the melting of ice by an alternating current on the wires of overhead electric power line. *Power Technology and Engineering*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 163–167.
4. Teegala S.K., Singal S.K. Optimal costing of overhead power transmission lines using genetic algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 83, pp. 298–308.
5. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular Velocity's Neural Network Observer of the Electric Drive of TVR. *Type Implemented in Software Environment LabVIEW. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 132, pp. 1–6.
6. STO 56947007–29.240.50.002–2008 *Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennoy otsenke mekhanicheskoy nadezhnosti deystvuyushchikh vozdukhnykh liniy napryazheniyem 0,38...10 kV pri golodno-vetrovykh nagruzkakh* [Company Standard 56947007–29.240.50.002–2008 Methodical instructions by quantitative assessment of mechanical reliability of the operating air-lines of 0,38...10 kV at ice and wind loadings]. Moscow, 2009. 43 p.
7. Titov D.E. Physical processes of formation of ice deposits on wires of air-lines of an electricity transmission. *Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 31–34. In Rus.
8. Svodnyy otchet po avariynym otklyucheniyam [Summary report on emergency shutdowns]. *Tyumenenergo*. Available at: [http://www.te.ru/clients/sistema\\_obslyuzhivaniya\\_potrebitelej/informaciya\\_ob\\_otklyucheniyah/avariynye/svodnyj\\_otchet/](http://www.te.ru/clients/sistema_obslyuzhivaniya_potrebitelej/informaciya_ob_otklyucheniyah/avariynye/svodnyj_otchet/) (accessed 15 May 2017).
9. Panasenko M.V. Operational and perspective actions for lowering of ice and wind accidents in power supply networks. *Mezhduna-*



- rodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2016, no. 12, pp. 463–463. In Rus.
10. Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G. Monitoring the intensity of ice formation on overhead electric power lines and contact networks. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 78–82.
  11. Wieceka B., De Meyb G., Chatziathanasiouc V., Papagiannakisc A., Theodosoglouc I. Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, vol. 58, pp. 199–205.
  12. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of air-lines. *Electricity*, 2013, no. 8, pp. 21–27. In Rus.
  13. Latypov I.S., Chmara G.A., Sushkov V.V. Approach to justification of the choice of energy efficient form of a twisted uninsulated wire of an air-line of electricity transmission of 6–35 kV voltage class. *Promyshlennaya energetika*, 2017, no. 4, pp. 8–12. In Rus.
  14. Shaohua Wang, Xingliang Jiang. Progress in research on ice accretions on overhead transmission lines and its influence on mechanical and insulating performance. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 326–336.
  15. Kirichenko N.V., Petrova E.V. The analysis of results of modeling the temperature of uninsulated wires of air-lines of electrical power systems taking into account influence of solar radiation. *Omskiy nauchny vestnik*, 2013, no. 1, pp. 164–168. In Rus.
  16. Keyhana H., McClurea G., Habashib W. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction. *Computers & Structures*, 2013, vol. 122, pp. 135–144.
  17. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on heating uninsulated wires of overhead transmission lines. *Power Technology and Engineering*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 119–125.
  18. Minullin R.G., Abdullazyanov E.Yu., Kasimov V.A., Filimonova T.K., Yarullin M.R. Limiting sensitivity of location probing of power transmission lines while detecting ice coatings. *Russian electrical engineering*, 2016, vol. 87, no. 6, pp. 304–311.
  19. Petrov V.S., Dubrovskaya V.S. Mechanical calculation of wires and cables of air-lines as basis of calculation of reliability of designs. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 1–13. In Rus.
  20. Keselman L.M. *Osnovy mekhaniki vozdukhnykh liniy elektropere-dachi* [Fundamentals of mechanics of electricity transmission air-lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 352 p.
  21. Goldstein R.W., Epifanov V.P. Adhesive durability of ice deposits on elements of metal designs. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Mathematics, mechanics, informatics*, 2012, vol. 12, no. 4, pp. 147–154. In Rus.
  22. Panteli M., Mancarella P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol. 127, pp. 259–270.
  23. Latypov I.S., Bogachkov I.M. *Provod dlya vozdukhnykh liniy elektropere-dachi* [Wire for overhead power lines]. Patent RF, no. 2631421, 2017.

Received: 28 November 2017.

#### Information about the authors

**Irek S. Latypov**, postgraduate, Tyumen Industrial University; engineer, Tumen Petroleum Center.

**Valery V. Sushkov**, Dr. Sc., professor, Nizhnevartovsk State University.

**Vadim V. Timoshkin**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.