

УДК 539.3

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-2-24-29

## ДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ПРИ РАСТАПЛИВАНИИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ НАГРЕВОМ

© Р.Ш. Гимадиев, Н.Д. Якимов, Ф.Г. Халитов

Анализ разрушения высоковольтных линий (ВЛ) в России от воздействия гололедно-изморозевых отложений потребовал уточнить метод расчета динамики нагружения линии электропередачи. Особенно это касается растапливания обледенения нагревом электрическим током. Предложен механизм растапливания области льда, окружающей провод, определяется время покидания обледенения с провода. При этом нагрев провода приводит к растяжению провода с обледенением, а при покидании обледенения реализуется эффект «стрельбы из лука», что влечет дополнительные динамические нагрузки. В работе дано дальнейшее уточнение существующего алгоритма расчета динамики нагружения ВЛ.

Ключевые слова: моделирование, динамика нагружения линии электропередачи, нагрев, растапливание обледенения, эксперимент.

**Введение.** Провода ВЛ подвергаются значительным механическим нагрузкам. Задача относится к классу взаимодействия деформируемых линейных элементов с потоком [1, 2]. ВЛ постоянно нагружены собственным весом. Среди причин дополнительных механических нагрузок можно выделить гололедно-изморозевые отложения и возникающие динамические нагрузки при резком уменьшении веса обледенения при растапливании нагревом. На рис. 1 приводится фрагмент разрушения ВЛ.



Рис. 1. Разрушение ВЛ от обледенения

На рис. 2 приводится фрагмент обледенения по фото Леванова, масса обледенения может значительно превысить массу провода.



Рис. 2. Фото Леванова, Татарстан, Нурлаты

**Постановка задачи.** Векторное уравнение, описывающее движение упругой весомой абсолютно гибкой системы с учетом масс провода и обледенения под действием нормальных и касательных нагрузок на провода  $\mathbf{F}_n$ ,  $\mathbf{F}_\tau$ , растягивающих и сжимающих усилий  $\mathbf{T}$ , в поле силы тяжести с ускорением свободного падения  $\mathbf{g}$  имеет вид

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial s_0} + \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_\tau + \mathbf{g} \rho_0. \quad (1)$$

ГИМАДИЕВ Равиль Шамсутдинович – д.т.н., Казанский государственный энергетический университет, e-mail: gimadiev.r@mail.ru

ЯКИМОВ Николай Дмитриевич – д.ф.-м.н., Казанский государственный энергетический университет, e-mail: gimadiev.r@mail.ru

ХАЛИТОВ Фарит Гусманович – д.х.н., Казанский государственный энергетический университет, e-mail: gimadiev.r@mail.ru

Уравнения движения в вертикальной плоскости  $Ox_1x_2$  имеет вид

$$\rho_l \frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{T}{1+e} \frac{\partial x_k}{\partial s} \right) + (-1)^k F_n \frac{\partial x_{3-k}}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_k}{\partial s} - \rho_l g(k-1), \quad (2)$$

где  $k = 1, 2$ ;  $v_k$  – составляющие скорости элемента провода;  $\rho_l$  – линейная плотность;  $T$  – натяжение;  $e$  – относительное удлинение;  $S$  – лагранжева координата;  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_n$  – нормальная распределенная нагрузка;  $F_\tau$  – касательная распределенная нагрузка. При движении провода в плоскости  $Ox_1x_2$  на элемент провода действует сопротивление среды за счет движения самого провода.

Составляющие аэродинамических сил определяются по формулам [2]

$$F_n = \frac{V_n^2}{2} d (c_n \sin^2 \alpha + c_\tau \sin \alpha), \quad F_\tau = \frac{V_n^2}{2} d c_\tau \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

где  $V_n$  – нормальная составляющая скорости элемента гибкой системы;  $\rho$  – плотность среды;  $\alpha$  – угол атаки элемента гибкой системы;  $d$  – условный диаметр;  $c_n = 1.8446$ ,  $c_\tau = 0.0554$  – аэродинамические коэффициенты обтекания, как для тросов.

Для уравнений (2) вводятся безразмерные параметры:

$$\bar{v}_k = v_k / U_\infty, \quad \bar{f}_n = 2F_n / (U_\infty^2 L_0), \quad \bar{f}_\tau = 2F_\tau / (U_\infty^2 L_0), \quad \bar{\rho}_l = \rho_l L_0 / M_0, \quad \bar{T} = T / T_0, \quad \bar{E} = E / T_0, \quad \bar{t} = t U_\infty / L_0, \quad \bar{g} = g L_0 / U_\infty^2,$$

где  $v_k$  – скорость элемента провода;  $L_0$  – длина пролета провода;  $M_0 = \rho_l L_0$  – масса пролета провода;  $E$  – приведенный модуль упругости материала провода;  $T_0 = U_\infty^2 L_0^2 / 2$  – характерное натяжение провода;  $t$  – время;  $A_N = L_0^3 / (2M_0)$  – параметр Ньютона. Ниже в обозначениях черточки над параметрами опускаются.

Используя для аппроксимации производных центральные разности и явную конечно-разностную схему, уравнения (2) примут вид [3]

$$v_{k,i}^{m+1/2} = v_{k,i}^{m-1/2} + \frac{\Delta \tau A_N}{\rho_0 \Delta s} \left\{ \left[ T_{i+1/2}^m \frac{x_{k,i+1}^m - x_{k,i}^m}{\Delta s \lambda_{i+1/2}^m} - T_{i-1/2}^m \frac{x_{k,i}^m - x_{k,i-1}^m}{\Delta s \lambda_{i-1/2}^m} \right] + \frac{(-1)^k}{2} \left[ f_{n,i+1/2}^{m-1/2} (x_{3-k,i+1}^m - x_{3-k,i}^m) + f_{n,i-1/2}^{m-1/2} (x_{3-k,i}^m - x_{3-k,i-1}^m) \right] + \left[ f_{\tau,i+1/2}^{m-1/2} (x_{k,i+1}^m - x_{k,i}^m) + f_{\tau,i-1/2}^{m-1/2} (x_{k,i}^m - x_{k,i-1}^m) \right] \right\} - \Delta \tau g(k-1). \quad (4)$$

Результаты решения задачи на шаге интегрирования  $m$  служат в качестве начальных и граничных условий для следующего шага интегрирования. При расчетах применяется метод «сглаживания» решения за счет непосредственной корректировки скоростей в соответствии с выражением  $\bar{v}_k = v_k + \beta \partial^2 v_k / \partial s^2$ . Такой подход можно интерпретировать как введение в систему уравнений диссипативных членов (искусственной вязкости).

Примем следующую корректировку скоростей:

$$\bar{v}_{k,i}^{m+1/2} = v_{k,i}^{m+1/2} + \beta (v_{k,i+1}^{m+1/2} - 2v_{k,i}^{m+1/2} + v_{k,i-1}^{m+1/2}) / \Delta s^2. \quad (5)$$

Координаты узловых точек разностной сетки или кинематические соотношения в разностном представлении записываются в виде

$$x_{k,i}^{m+1} = x_{k,i}^m + \Delta \tau \bar{v}_{k,i}^{m+1/2}. \quad (6)$$

Уравнения дополняются физическими соотношениями  $T = T(e)$ ,  $e \geq 0$  при растяжении и  $e < 0$  при сжатии (в частности при линейном законе  $T = E e$ ), кинематическими соотношениями

$$\partial x_k / \partial \tau = v_k \quad (7)$$

и геометрическим соотношением

$$(\partial x_1 / \partial s)^2 + (\partial x_2 / \partial s)^2 + (\partial x_3 / \partial s)^2 = \lambda^2, \quad \lambda = 1 + e. \quad (8)$$

Начальные и граничные условия для провода запишутся в виде

$$x_k(0, s) = f_k(s), \quad v_k(0, s) = \phi_k(s), \quad x_k(\tau, 0) = f_k^\circ(\tau), \quad v_k(\tau, 0) = \phi_k^0(\tau), \quad x_k(\tau, s_1) = f_k^s(\tau), \quad v_k(\tau, s_1) = \phi_k^s(\tau), \quad k = 1, 2. \quad (9)$$

Необходимым условием сходимости численного решения метода конечных разностей по явной схеме является условие Куранта–

Фридрихса–Леви. Для материала с линейной характеристикой упругости  $E$  это условие запишется в виде

$$\Delta\tau = \alpha_k \Delta s \sqrt{\rho_0 / E}, \quad (10)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент Куранта.

Проверка алгоритма динамической задачи (3–10) проводится сравнением формы установившегося состояния провода от воздействия нормального давления с постоянным значением и сравнением с приближенным аналитическим решением [4].

При решении динамической задачи учитывается переходный процесс, связанный с покиданием гололеда при нагреве провода.

При образовании гололеда масса провода увеличивается, и система переходит в новое равновесное деформированное состояние. При включении нагрева провод еще больше провисает за счет температурного удлинения. После прогрева обледенение сбрасывается, температура падает до температуры окружающей среды, и форма провода переходит снова в равновесное состояние, которое соответствует нагружению только весом самого провода.

Возникают вопросы, какова должна быть мощность нагрева провода и какова геометрия профиля растапливания обледенения.

**Эксперимент и расчет растапливания обледенения ВЛ нагревом.** При растапливании обледенения до  $90^\circ\text{C}$  реализуется двухфазная среда – лед и вода, которые, взаимодействуя с нагретым проводом, освобождают провод от обледенения. Подходы и установки плавки гололеда разработаны в [5, 6]. При таянии между льдом и нагретым проводом образуется прослойка воды, вытесняемой по щели вниз под действием веса льда (стремящегося опуститься). Поэтому эта прослойка наиболее тонкая сверху провода. Теплопроводность льда и особенно воды низкая, поэтому сверху провода и происходит основная передача теплоты от провода ко льду, и практически только там лед тает, опускаясь в целом вниз, и оставляя протаявший канал (он оказывается под проводом), с шириной, близкой к диаметру  $d$  провода. Выделившаяся в проводе теплота оказывается потраченной в основном на плавление льда в этом канале. По сравнению с ней затраты теплоты на подогрев этого льда перед плавлением (при начальных температурах, близких к  $0^\circ\text{C}$ ) будут пренебрежимо малыми, как и теплота на нагрев

льда, остающегося нерастаявшим. Более заметную величину может иметь теплота, затрачиваемая на разогрев самого провода до «рабочей» температуры.

Процесс плавления льда заканчивается, когда канал таяния доходит до верхнего края льда, и лед слетает с провода. Следовательно, общее время процесса определяется временем, за которое в проводе за счет электронагрева выделится сумма указанных выше теплот. Пусть диаметр провода (ширина канала)  $d = 6.8$  мм, толщина льда  $h = 51.6$  мм, нагрев  $Q = 25$  Вт при длине  $l = 0.4$  м, то есть в проводе выделяется теплота  $q_l = Q / l = 62.5$  Вт/м. Здесь нагрев слабый, температура провода явно лишь немного выше  $0^\circ\text{C}$ , тогда на протаивание надо  $W = \sim 110$  кДж/м. Время процесса составит порядка  $\tau = W / q_l \approx 1760$  с (примерно 29 мин). Это практически совпало с данными проведенного эксперимента [7], результат которого показан на фотографии (рис. 3).

*Расчеты с более интенсивным нагревом.* Диаметр провода  $d = 5$  мм, толщина льда  $h = 4$  мм, нагрев  $q_l = 1300$  Вт/м. Тогда  $W = \sim 6200$  Дж/м. Без учета разогрева провода  $\tau_n = W / q_l \approx 4.8$  с. Для учета теплоты, затрачиваемой на разогрев самого провода, нужно определить его «рабочую» температуру. При этом рассчитываются параметры слоя талой воды, протекающей между проводом и льдом, и его термическое сопротивление. В данном примере температура провода получается около  $45^\circ\text{C}$ . Тогда общее время процесса протаивания льда составит порядка 6.5 с.

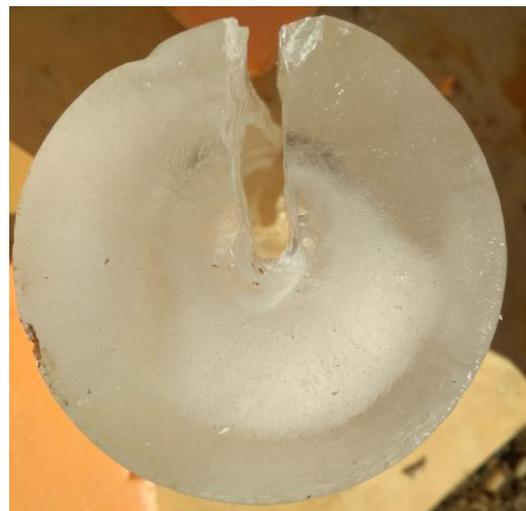


Рис. 3. Плавка обледенения нагревом

**Численный алгоритм задачи теплопроводности.** Ставится задача совместного решения системы (3–10) с задачей теплопроводности. Безразмерное уравнение теплопроводности для линейного элемента имеет вид

$$u_t = u_{ss} + f, \quad (11)$$

где  $0 < s < 1$ ,  $0 < t < t_k$ ,  $f$  – плотность тепловых источников.

Из данных эксперимента следует, что при нагреве лед начинает плавиться в верхней части провода на ширине провода. Обледенение провода постепенно опускается вниз относительно провода, нагрев идет на протаивание достаточно малого объема относительно объема обледенения, который не нагревается. Нагретый провод как бы срезает слой льда вдоль диаметра провода. Таким образом для данной задачи можно принять для (11) плотность тепловых источников  $f$  примерно равным нулю.

Уравнение теплопроводности в разностном представлении по явной схеме имеет вид

$$\frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau} = \frac{u_{i+1}^j - 2u_i^j + u_{i-1}^j}{h^2},$$

где  $s_i = i \cdot h$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ ,  $h = 1/N$  – шаг разбиения по лагранжевой координате,  $t_j = j \cdot \tau$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, L$ , где  $\tau = t_k/L$  – шаг интегрирования по времени,  $N$  – число разбиений пролета,  $L$  – число разбиений временного интервала. Отсюда

$$u_i^{j+1} = \left(1 - 2\frac{\tau}{h^2}\right)u_i^j + \frac{\tau}{h^2}(u_i^j + u_{i-1}^j). \quad (12)$$

Устойчивость схемы в сеточной норме для шага интегрирования требует выполнения условия  $h^2/\tau < 2$ . Из расчетов следует, что при совместном решении упругой и теплопроводной частей задач определяющей для шага интегрирования по времени является формула (10).

**Аппроксимация граничных условий.** Аппроксимацию можно проводить двумя способами. **Вариант 1.** Для аппроксимации граничных условий можно пользоваться квадратичным полиномом Лагранжа по трем точкам отрезка. Для первых производных по времени на концах отрезка имеем

$$u_{0\tau}^{(1)} = \frac{1}{2}(-3u_0^j + 4u_1^j - u_2^j),$$

$$u_{N\tau}^{(1)} = \frac{1}{2}(3u_N^j - 4u_{N-1}^j + u_{N-2}^j).$$

Первые производные на границе аппроксимируются со вторым порядком точности.

Тогда для границ на шаге интегрирования  $(j + 1)$  имеем

$$\begin{aligned} u_0^{j+1} &= -\frac{2}{3}\frac{\tau}{h^2}u_0^j + \frac{4}{3}\left(1 - \frac{\tau}{h^2}\right)u_1^j - \frac{1}{3}\left(1 + 2\frac{\tau}{h^2}\right)u_2^j, \\ u_N^{j+1} &= \frac{2}{3}\frac{\tau}{h^2}u_N^j + \frac{4}{3}\left(1 - \frac{\tau}{h^2}\right)u_{N-1}^j - \\ &\quad - \frac{1}{3}\left(1 + 2\frac{\tau}{h^2}\right)u_{N-2}^j. \end{aligned} \quad (13)$$

**Вариант 2.** Для границ воспользуемся линейной аппроксимацией

$$\begin{aligned} \frac{u_0^{j+1} - u_0^j}{\tau} &= \frac{u_0^j - 2u_1^j + u_2^j}{h^2}, \\ \frac{u_N^{j+1} - u_N^j}{\tau} &= \frac{u_N^j - 2u_{N-1}^j + u_{N-2}^j}{h^2}. \end{aligned}$$

Тогда имеем

$$\begin{aligned} u_0^{j+1} &= \left(1 + 2\frac{\tau}{h^2}\right)u_0^j + \frac{\tau}{h^2}(u_2^j - 2u_1^j), \\ u_N^{j+1} &= \left(1 + 2\frac{\tau}{h^2}\right)u_N^j + \frac{\tau}{h^2}(u_{N-2}^j - 2u_{N-1}^j). \end{aligned} \quad (14)$$

Варианты граничных условий влияют на результаты расчетов, для выбора варианта проведем тестовые исследования.

*Тестовые расчеты теплопроводности по двум вариантам.* Для расчетов примем следующие исходные данные: начальная длина провода  $l = 160$  [м]; коэффициент линейного расширения алюминиевого провода составляет  $\alpha = 23.8 \cdot 10^{-6}$  [1/К°]; модуль упругости  $E = 6.25 \cdot 10^{10}$  [Н/м²] [8]; диаметр провода  $d = 0.0147$  [м]; плотность материала провода  $\rho = 2700$  [кг/м³]; теплоемкость единицы массы  $c = 0.9$  [кДж/(кг·К°)]; коэффициент теплопроводности  $k = 209$  [Вт/(м·К°)]; К° – температура Кельвина. Количество элементов  $N = 50$ .

Теплоизолированный провод разделен на две части. Мгновенно левый пролет нагрет до 200°С (473.15 К°), а правый имеет температуру окружающей среды минус 5°С. В безразмерном виде эти температуры составят 1.7322 и 0.9817. Перераспределение температуры по длине и по

времени происходит без потери тепла и процесс продолжается до температуры выравнивания до величины  $(1.7322 + 0.9817) \cdot 0.5 = 1.35695$ , что соответствует  $370.65089 \text{ K}^\circ$ .

Расчеты теплопроводности проводим по (12) при аппроксимации граничных условий по **варианту 1** – (13) и **варианту 2** – (14) и сравниваем с точным значением 1.35695.

По **варианту 1** (аппроксимация граничных условий квадратичным полиномом Лагранжа) численный расчет дает температуру выравнивания 1.36058 за 2.3 с.

По **варианту 2** (линейная аппроксимация граничных условий) расчет дает 1.35689. Вариант 2 дает наилучшую сходимость. Для расчетов выбираем второй вариант граничных условий.

*Линейное тепловое расширение.* Относительное температурное расширение составляет

$$\epsilon_t = (l_2 - l_1) / l_1 = \alpha_t \Delta u \quad (15)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – начальная и конечная длины провода, а  $\Delta u = u_2 - u_1$  – разность температуры,  $\alpha_t$  – коэффициент линейного расширения. Усилие, возникающее в проводе за счет температурного расширения, определяется по

$$T = E \cdot \epsilon_t \cdot \pi d^2 / 4 \quad (16)$$

Расчеты по принятым исходным данным дают: относительное температурное удлинение  $\epsilon_t = 24.4 \cdot 10^{-4}$ , усилие, возникающее в проводе за счет температурного удлинения соответственно  $T = 25.9 \text{ кН}$ .

**Пример расчета термоупругой задачи.**

*Динамика ВЛ с учетом веса провода, веса обледенения и теплопроводности при растапливании обледенения.* В соответствии с решением уравнения движения провод под действием только собственного веса при времени  $t = 2.7$  с перемещается до максимального прогиба  $x_3 = 3.3 \text{ м}$ , при этом натяжение составляет

$T = 12 \text{ кН}$ , затем в результате переходного процесса по истечении времени около 30 с самоустанавливается до формы равновесного состояния с максимальным прогибом ( $x_3 = 0.01438$ )  $x_3 = 2.3 \text{ м}$  (рис. 4, *a* – линия  $\blacksquare$ ,  $x_2 = 0.021253$ ). Решение упругой задачи приведено на рис. 4, *a*.

Пусть плотность обледенения равна плотности самого провода  $\rho_{об} = \rho_{пр}$ , на практике может превышать в несколько раз. На форму рис. 4, *a* равновесного состояния накладывается равномерная по длине масса обледенения. Система снова выходит на равновесное состояние с массой провода и обледенения, это состояние в момент времени  $t = 51$  с приводится на рис. 4, *b* (линия  $\blackrightarrow$ ). При этом максимальный прогиб составляет  $x_3 = 2.95 \text{ м}$  ( $x_3 = 0.01844$ ) и натяжение  $T = 9.8 \text{ кН}$ . Считается, что в момент времени  $t = 51$  с 1/10 часть пролета мгновенно нагрета до температуры  $150^\circ\text{C}$ , и эта температура держится неизменной на этой части и нагревает остальную часть пролета за счет теплопроводности в течение 5 секунд. В течение этого времени эта температура успевает распространиться и выровняться до  $150^\circ\text{C}$  по всей длине. При этом происходит удлинение за счет теплового расширения, рис. 4, *b* (термоупругая задача, линия  $\blacklozenge$ ). В конце нагрева прогиб достигает величины  $x_3 = 6.20 \text{ м}$  ( $x_3 = 0.03875$ ), и температурное натяжение в проводе составляет величину 38 кН. После этого масса обледенения считается сброшенной мгновенно и температура выравнивается с температурой окружающей среды, равной минус  $5^\circ\text{C}$ . Рассчитывается дальнейшее движение, система переходит в новое равновесное состояние с максимальным прогибом  $x_3 = 2.3 \text{ м}$  ( $x_3 = 0.01438$ ) и натяжением в проводе 6.2 кН (это равновесное состояние приведено на рис. 4, *a* сплошной линией).

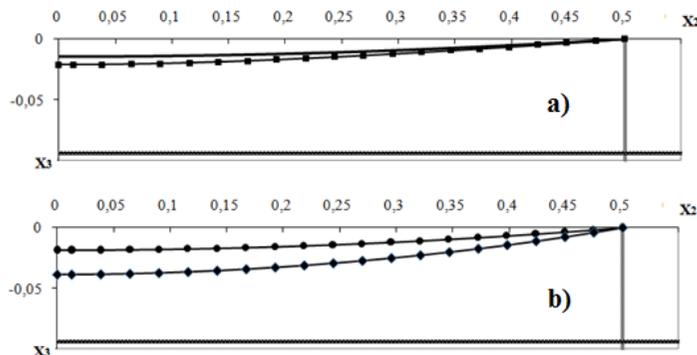


Рис. 4: *a* – упругая задача; *b* – термоупругая задача

**Выводы.** Установлен механизм растапливания области льда, окружающей провод, время покидания (отрыва) обледенения от провода. Что позволяет уточнить алгоритм решения динамической задачи деформирования линии электропередачи с учетом растапливания обледенения проводов нагревом.

### Литература

1. Ильгамов М.А. Введение в нелинейную гидроупругость. М.: Наука, 1991. 200 с.
2. Девнин С.И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании. Л.: Судостроение, 1975. 192 с.
3. Гимадиев Р.Ш. Динамика мягких оболочек парашютного типа. Казань, 2006. 208 с.
4. Гимадиев Р.Ш., Ильгамов М.А. Статическое взаимодействие профиля мягкого крыла с потоком несжимаемой жидкости // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. № 1. С. 43–48.
5. Маркин Ю.С., Гимадиев Р.Ш., Галимуллин Н.Р., Динмухаметов Ф.Ф., Маркин О.Ю., Петрушенко Ю.Я. Стенд для изучения процессов обледенения и растаивания проводов электрических цепей: пат. № 88841 (51) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Оpubл.: 20.11.2009, Бюл. № 32.
6. Антонов Б.М., Исакаев Э.Х., Коновалов П.А., Королев В.А., Мордынский В.П., Сон Э.Е., Терешенко Д.В., Тюфтяев А.С. Создание мобильной установки для плавки гололеда на проводах ВЛ и энергоэффективность ее использования // Изв. РАН. Энергетика. 2013. С. 155–159.
7. Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения: VII Российская конференция, посвященная 80-летию академика РАН Р.И. Нигматулина. Уфа, 2020. С. 26.

8. Модифицированный провод для ЛЭП напряжением до 35 кВ марок ЗАЛП и ЗАЛП-В. URL: <http://www.ruscable.ru/info/cable/zalp.html>

### References

1. Ilgamov M.A. Introduction to nonlinear hydroelasticity. Moscow, Nauka, 1991. 200 p.
2. Devnin S.I. Hydroelasticity of structures with detached flow. Leningrad, Sudostroenie, 1975. 192 p.
3. Gimadiev R.Sh. Parachute-type soft shell dynamics. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet, 2006. 208 p.
4. Gimadiev R.Sh., Ilgamov M.A. Static interaction of a soft wing profile with an incompressible fluid flow. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 1998, no. 1, pp. 43–48.
5. Markin Yu.S., Gimadiev R.Sh., Galimullin N.R., Dinmukhametov F.F., Markin O.Yu., Petrushenko Yu.Ya. Stand for studying the processes of icing and thawing of electrical circuit wires. RF patent 88841 (51). November 20, 2009. Bulletin No. 32.
6. Antonov B.M., Isakaev E.Kh., Kononov P.A., Korolev V.A., Mordynsky V.P., Son E.E., Tereshenok D.V., Tyuftyaev A.S. Creation of a mobile installation for melting ice on overhead lines and energy efficiency of its use. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energy*, 2013, pp. 155–159.
7. Volchenko K.M., Gimadiev R.Sh., Yakimov N.D., Khalitov F.G. The 7th Russian Conference "Multiphase Systems: Models, Experiment, Applications" dedicated to the 80th anniversary of Academician of the Russian Academy of Sciences R.I. Nigmatulin. Ufa, October 5–10, 2020, pp. 26.
8. Modified ZALP and ZALP-V wire for power lines up to 35 kV voltage. Available at: <http://www.ruscable.ru/info/cable/zalp.html>

## DYNAMICS OF POWER LINE WIRE DEFORMATION AT ICE MELTING BY HEATING

© R.Sh. Gimadiev, N.D. Yakimov, F.G. Khalitov

Kazan State Power Engineering University,  
51, ulitsa Krasnoselskaya, Kazan, 420066, Russian Federation

Analysis of the destruction of high-voltage power lines in Russia under the impact of ice and frost deposits has required clarification of the method for calculating the dynamics of the power transmission line loading. This is especially true for ice melting by electric heating. In this paper, a mechanism for melting the ice area surrounding the wire is proposed, and the time for removing the ice from the wire is determined. In this case, heating makes the iced wire stretch, and de-icing is accompanied by the effect of "archery", which entails additional dynamic loads. The paper provides further refinement of the existing algorithm for calculating the dynamics of loading in overhead power lines.

Key words: modelling, dynamics of power transmission line loading, heating, ice melting, experiment.