

# Энергетика и электротехника

УДК 621.315.175

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ В СИСТЕМЕ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*А.А. Базаров, С.И. Будко<sup>1</sup>*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием тепловых и гидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – воздух», протекающих при плавлении гололеда на проводах. Проблема нарастания ледяной оболочки на поверхности проводов линии электропередач известна давно, и ее решению посвящено много работ в области контроля нарастания гололеда, технических средств борьбы с этим явлением. В последнее время появляются работы, посвященные системам плавки, функционирующим без отключения линий от потребителей, что повышает надежность и бесперебойность энергоснабжения, снижает экономические потери от недоотпуска продукции при перерывах электроснабжения. Процесс плавки гололеда может протекать в условиях нагрева проводников током большой величины до установившейся положительной температуры, при которой разрушается ледяная оболочка. При этом переключение в режим плавки осуществляется на короткий промежуток времени. Альтернативой такому способу является совмещение электроснабжения потребителей и плавки гололеда. В этом случае мощности тепловыделения в проводах меньше, время плавки увеличено, но не требуется отключение потребителей. Проблема сохранения линии в рабочем режиме передачи электрической энергии потребителям решается дополнительной загрузкой линии реактивными токами с помощью подключения определенной индуктивной нагрузки. Увеличение токов и мощности, поступающих от питающего трансформатора в линию, должно быть технически реализуемо, чтобы не перегрузить источник и не вызвать его отключение. В связи с ограничениями мощности требуется проведение точных расчетов тепловых процессов для определения приемлемых режимов расплавления ледяного слоя. Рассмотрено комплексное моделирование термогидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – воздух» и несколько способов определения коэффициентов конвективного теплообмена на границах проводника при различных скоростях ветра.



© Автор(ы), 2024

<sup>1</sup> Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Степан Игоревич Будко, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

***Ключевые слова:** тепловые процессы, гидродинамика, модели турбулентности, коэффициент конвективного теплообмена, гололед, метод конечных элементов, связанные задачи.*

## **Введение**

Передача электрической энергии на большие расстояния в современной электроэнергетике осуществляется по высоковольтным линиям электропередачи с неизолированными сталеалюминевыми проводниками. Для бесперебойной работы линии создают проблему атмосферные гололедные явления, возникающие в условиях перехода температуры с положительной на отрицательную, что сопровождается порывистым ветром и повышенной влажностью воздуха. Гололедные отложения на металлических поверхностях вызывают значительные дополнительные механические нагрузки на арматуру железных опор, тросов и токоведущих проводов.

От того, будет ли образовываться гололед, изморозь или некоторая смесь из данных осадков, будет зависеть толщина стенки со временем нарастания. Структура таких осадков имеет прозрачную, полупрозрачную или замутненную прослойку с плотностью 600–900 кг/м<sup>3</sup>.

Обледенение на проводниках зачастую происходит при следующих погодных условиях: температура окружающей среды варьируется в пределах от –5 до –10 °С, ветер переменной направленности со скоростями от 5 до 20 м/с. Гололед формируется в течение нескольких часов в зависимости от ухудшения погодных условий.

Помимо известного способа плавки гололеда, заключающегося в подключении требующей разогрева линии к отдельному источнику питания с одновременным замыканием в конце линии, известны другие способы, позволяющие не отключать линию электроприемников.

Проблему можно решить с помощью нагрева проводов в линии при достаточном тепловыделении за счет пропускания дополнительных реактивных токов в рабочем режиме сети [1]. Кроме указанной работы имеется немало публикаций сходной направленности. В работах [2–5] рассмотрен метод плавки гололеда без отключения потребителей путем наложения постоянного тока на переменный. Исходя из экспериментальных исследований, представленных в работах, можно сделать вывод, что предлагаемая система плавки гололеда приводит к увеличению тока без изменения режима работы потребителей. Время плавки определяется исходя из величины гололедных отложений.

Известным способом плавки гололеда является нагрев проводов токами высокой частоты [6–10]. Основное преимущество данного метода заключается в том, что благодаря наличию поверхностного эффекта можно повысить мощность тепловыделения при сравнительно небольшом значении тока. Кроме систем плавки гололеда длительное время является актуальной тема выявления процесса гололедообразования и включения профилактического нагрева проводов еще до начала появления и скапливания осадков на проводах [11]. Оценке возможности появления гололеда на проводах посвящены также работы [12–14], где рассмотрены аппаратные средства систем обнаружения гололедных отложений и прогнозирования их формирования. Для повышения эффективности прогнозных моделей применяются обучаемые нейронные сети [11], что позволяет улучшить контроль налипания льда и определить параметры плавки для различных характеристик линий, параметров гололедной и ветровой нагрузки. На осно-

ве вариантов исходных данных могут быть быстро определены динамически изменяющиеся характеристики для различных условий.

Несмотря на обилие и многообразие работ, посвященных борьбе с гололедными отложениями на проводах, остаются нерешенными некоторые вопросы. Объяснений этому много: недостаток мощности в системе в нужный момент времени; недостаток времени для проведения работ по переводу системы в режим плавки гололеда; проблемы в системе контроля гололеда и другие. Нужно учитывать, что меры, принимаемые при плавке гололеда, существенно отличаются на линиях электропередачи разного напряжения.

На линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ для плавки требуется сравнительно небольшая мощность по отношению к пропускаемой через линию, но все же не учитывать на этих линиях фактические потери мощности неправильно. Поэтому при использовании способа плавления гололеда без отключения потребителей необходимо более тщательное обоснование значения тока в линии, чтобы, во-первых, мощности тепловыделения в проводе было достаточно для расплавления гололеда, и во-вторых, питающий трансформатор не был перегружен.

*Целью работы* является исследование математических моделей тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда» при определении параметров системы плавки гололеда на проводах линии электропередач и выбор эффективной процедуры расчета с минимальной погрешностью.

Решение поставленных задач достигается в ходе определения тепловых потоков с поверхности ледяной оболочки провода при различных погодных условиях и определения необходимой величины мощности тепловыделения в проводах, необходимой для освобождения от льда.

Термогидродинамические процессы в системе «воздушная среда – ледяная оболочка» значительно влияют на величину тепловых потоков с поверхности провода. В зависимости от скорости ветра и толщины оболочки коэффициент теплообмена существенно изменяется, а также возникает неоднородность по угловой координате. Эти факторы приводят к усложнению расчетов тепловых процессов. Одновременное численное моделирование таких процессов, как передачи тепла за счет теплопроводности через ледяную оболочку с учетом изменения агрегатного состояния и теплообмен между воздухом и поверхностью ледяной оболочки, весьма сложно и требует ресурсов, превосходящих возможности персонального компьютера.

Для определения тепловых потоков с поверхности провода и точных коэффициентов теплообмена необходимы исследования при различных скоростях ветра.

### **Постановка задачи**

Особенностью тепловых процессов при плавке гололеда на проводах является зависимость параметров граничных условий от направления ветра относительно провода, а также скорости ветра и температуры воздуха. Температура воздуха не только напрямую влияет на величину теплового потока, но и определяет плотность воздуха, что сказывается на его вязкости. Таким образом, коэффициент конвективного теплообмена имеет разную величину вдоль линии окружности провода. Для выявления особенностей процесса теплообмена предусматривается совместное решение тепловой и гидродинамической задач. Необ-

ходимо проанализировать распределение тепловых потоков, температур, определить коэффициенты конвективного теплообмена при различных скоростях ветра.

### Тепловые процессы в проводе с ледяной оболочкой

Процессы передачи тепла в твердых телах описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Модель построена в декартовой системе координат. При анализе влияния ветра необходимо учитывать его направление. Поэтому использование более экономичной осесимметричной модели в данной задаче приведет к существенной погрешности из-за угловой несимметрии условий теплообмена с внешней средой. При использовании численных методов расчета для каждой отдельной подобласти уравнение содержит отличающиеся параметры. В случае нелинейной постановки задачи свойства среды неизменны только в пределах одного элемента. С учетом наличия нескольких сред в системе «ледяная оболочка – провод – воздух» стационарное уравнение теплопроводности записывается в общем виде

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) = w_k - \rho_k C_k \mathbf{u} \cdot \left( \frac{\partial T_k}{\partial x} + \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) \quad (1)$$

с начальными условиями

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (2)$$

Здесь  $k$  – номер материала (1 – алюминий; 2 – лед; 3 – воздух);  $\rho_k$  – плотность материала;  $C_k$  – удельная теплоемкость;  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности;  $T_k$  – температура;  $w_k$  – удельная мощность тепловыделения;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости (задается только для воздушной среды).

Начальные условия для упрощения предполагают задание начальной температуры системы «провод – оболочка», равной температуре окружающей среды. В большинстве вычислительных экспериментов принята температура среды, равная  $-5^\circ\text{C}$ .

Теплопередача в системе «провод – ледяная оболочка» осуществляется за счет теплопроводности. Поэтому с учетом возможностей программного комплекса Comsol геометрическая модель неизменна, но свойства отдельных элементов могут изменяться.

Граничные условия задаются на внешних линиях расчетной области (воздух): на левом краю задана температура  $T = 268$  К; на верхней и нижней линиях задано условие теплоизоляции в виде равенства нулю теплового потока  $Q = 0$ ; на правой линии задан конвективный тепловой поток

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c). \quad (3)$$

Формально при движении воздуха задание теплообмена на выходе из расчетной области не влияет на процессы, протекающие в пределах данной области. С учетом такого подхода размеры области приняты достаточно большими, чтобы не вносить погрешность в расчеты.

Процессы теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и воздухом представляют собой комбинацию процессов теплопроводности и переноса тепла с движущейся воздушной средой. В программе предусмотрен вывод различных составляющих теплового потока с поверхности твердого тела в газовую среду. Так как температура имеет небольшое значение, используется общее значение теплового потока.

### Упрощенный расчет коэффициента конвективного теплообмена

В построенной модели воздух, лед и провод являются компонентами системы. Теплообмен между ними осуществляется путем сложного взаимодействия движущихся и неподвижных сред. Поэтому напрямую коэффициент теплообмена не участвует в расчетах. Он вычисляется по результатам решения связанной термогидродинамической задачи. Так как задачей является оценка коэффициента конвективного теплообмена, который может иметь разное значение на участках поверхности ледяной оболочки провода, то при моделировании в программе Comsol предусмотрено разделение линии окружности на четыре сектора. Это позволяет на каждом участке определять значения тепловых потоков и на их основе определять коэффициенты теплообмена для последующих расчетов процесса плавки гололеда.

Процессы плавления льда в данном исследовании не рассматриваются для упрощения процедуры решения. Значение мощности тепловыделения в проводнике подобрано исходя из условия нагрева не выше нуля градусов.

Для предварительного расчета коэффициента конвективного теплообмена используется стандартная процедура, использующая критерии Рейнольдса и Нуссельта, которые вычисляются через физические свойства воздуха, геометрические параметры и скорость движения [16].

Выражение для числа Рейнольдса имеет вид

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность;  $v$  – скорость движения воздуха;  $d$  – диаметр провода (с учетом ледяной оболочки);  $\eta$  – кинематическая вязкость (в тексте используются обозначения скорости в виде скалярной величины  $v$ , в виде вектора  $\mathbf{V}$  и в виде компонент вектора  $V_x$ ). Динамическая вязкость связана с кинематической вязкостью соотношением

$$\mu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (5)$$

Для значений  $Re$  в пределах от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  определяется число Нуссельта

$$Nu = 0,245 Re^{0,6}. \quad (6)$$

Определив число Нуссельта, можно отыскать коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$ :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}; \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (8)$$

По приведенным соотношениям появляется возможность рассчитать значения коэффициента конвективного теплообмена для провода заданного сечения с ледяной оболочкой в диапазоне скоростей движения воздуха. Определение значений коэффициентов позволяет сделать заключение о степени интенсивности теплообмена. Моделирование теплового процесса позволяет определить уровень мощности, достаточный для плавки гололеда, а также затраченное время на процесс освобождения от ледяной корки.

Значения коэффициента конвективного теплообмена можно рассчитать в соответствии с геометрическими размерами проводников и ледяной оболочки. Полученные с помощью вычислений по формулам (4)–(8) результаты представлены

в табл. 1. Значения соответствуют проводу марки АС-50/8. С учетом ледяной оболочки диаметр провода составляет 20 мм. Температура окружающей среды принята равной  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Недостатком такого способа расчета коэффициентов конвекции является то, что полученные значения вычисляются с некоторой погрешностью и являются усредненными для всей поверхности ледяной оболочки. Для более точного решения задачи поиска коэффициентов теплообмена необходимо произвести численное моделирование связанной термогидродинамической задачи.

Таблица 1

Расчетные значения параметров при различных скоростях ветра

$v$ , м/с	Марка провода	$d$ , мм	Re	Nu	$\alpha_{an}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
1	АС-50/8	0,02	1551	20,11	24,13
5			7606	52,22	62,67
10			15180	79,04	94,85

### Гидродинамические процессы в воздушной среде

Модель гидродинамического процесса выбирается исходя из режима движения воздуха. Для определения характера движения воздуха используется критерий Рейнольдса (4), являющийся мерой отношения сил инерции и внутреннего трения в потоке. При значении числа Рейнольдса меньше критического, равного 2300, вдоль поверхности стенки (ледяной оболочки провода) образуется тонкий ламинарный пограничный слой. Если же число Рейнольдса больше критического значения, то на начальном участке возле стенки, как и в первом случае, образуется ламинарный пограничный слой, но за пределами этого слоя создается турбулентный слой.

Критическому числу Рейнольдса соответствует критическая скорость течения газа или жидкости в области с характерным размером  $d$ :

$$v_{kr} = 2300 \cdot \eta / d. \quad (9)$$

Использование в инженерных разработках полного комплекса уравнений для расчета несжимаемых турбулентных течений привело бы к непомерно большим затратам. Для практических целей, как правило, достаточно знать осредненные характеристики движения. Один из подходов состоит в выводе уравнений переноса некоторых турбулентных величин и моделировании членов более высокого порядка, которые оказываются равными тройным корреляциям. Здесь приводится так называемая  $(k - \varepsilon)$ -модель, типичная модель турбулентности, основанная на двух уравнениях [16, 17]. Для упрощения сделаны допущения о постоянстве температуры, что приводит к неизменности теплофизических свойств, и о постоянстве плотности воздуха. Оба допущения имеют определенную погрешность, но для данной задачи не вносят большой ошибки в расчеты.

С учетом сказанного система уравнений для модели турбулентности записывается в виде:

– уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (10)$$

– уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V}. \quad (11)$$

Здесь  $\mathbf{V}$  – вектор скорости.

Система уравнений (10) и (11), записанная для бесконечно малого объема жидкости (воздуха), не может быть решена аналитически. Требуется использование численного метода с обоснованными допущениями.

Существуют разные модели турбулентности. Одной из них является  $(k - \varepsilon)$ -модель. Она состоит из двух уравнений: уравнения для кинетической энергии и турбулентности  $k$  и уравнения для ее диссипации  $\varepsilon$ .

Данная модель описывает процессы зарождения переноса и рассеивания (диссипации) турбулентных вихрей с применением новой величины – турбулентной вязкости  $\eta_t$ , которая определяется в процессе решения задачи. Дифференциальные уравнения формулируются в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho \mathbf{V}k) = \text{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad}(k)\right) + P_k - \rho\varepsilon + P_{kb}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \text{div}(\rho \mathbf{V}\varepsilon) = \text{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad}(\varepsilon)\right) + \\ + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon + C_{\varepsilon 1}P_{\varepsilon b}), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности с размерностью  $[\text{м}^2/\text{с}^2]$ ;  $\varepsilon$  – диссипация энергии турбулентности ( $\text{м}^2/\text{с}^3$ );  $p$  – давление (Па);  $P_k$  – генерация энергии турбулентности;  $P_{kb}$  и  $P_{\varepsilon b}$  – слагаемые, учитывающие эффекты гравитации. В случае несжимаемой жидкости генерация энергии турбулентности определяется следующим образом:

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (14)$$

С помощью решения системы уравнений (12) и (13) рассчитывается распределение величин  $k$  и  $\varepsilon$  на расчетной области, на основании которых затем определяется значение турбулентной вязкости для каждого конечного элемента по формуле

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (15)$$

Уравнения (12) и (13) включают в свой состав ряд эмпирических констант:

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Их значения получаются путем калибровки модели по серии натуральных экспериментов. Использование полуэмпирических моделей турбулентности предполагает калибровку, заключающуюся в подборе констант. Известно, что более точные результаты получаются именно при моделировании тех течений, для которых была произведена калибровка. Из литературных источников известно, что  $(k - \varepsilon)$ -модель турбулентности откалибрована для развитых турбулентных потоков жидкости и, соответственно, имеет хорошую точность при описании свободного течения жидкости на достаточном удалении от твердых стенок. В это же время применение  $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности для задач расчета течения жидкости возле твердых стенок встречает проблемы.

Использование теории, разработанной для гидродинамических процессов в жидкости, для воздушной среды требует определенных допущений. В частно-

сти, условие несжимаемости воздуха перед стенкой при малой скорости движения вполне допустимо, так как повышение давления в тонком слое воздуха перед проводом незначительно.

В рассматриваемой задаче массовые силы не учитываются ввиду малости, так как плотность газа составляет  $1,3 \text{ кг/м}^3$ .

Уравнения (12) и (13) справедливы при  $\mu_T \gg \mu$ . Однако это неверно вблизи твердой поверхности, где турбулентные флуктуации затухают вблизи стенки. Для учета данного явления вблизи твердой поверхности используются специальные пристенные функции, которые формируют логарифмический закон изменения тангенциальной составляющей скорости в направлении нормали к поверхности. Принимается, что выделяемая турбулентная кинетическая энергия в данной области полностью рассеивается. Использование специальных пристенных функций позволяет определить и корректно задать граничные условия для  $k$  и  $\varepsilon$  на небольшом удалении от твердой поверхности:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (16)$$

На боковой поверхности потока (верхняя и нижняя границы области) задаются условия с логарифмической функцией стенки. В набор функций входит также выражение вида (16). Так как размеры области довольно велики и расстояние от провода до верхней и нижней границ принято равным  $0,3 \text{ м}$ , влияние стенок на характер движения воздуха возле провода будет минимальным.

На входе задается начальное значение скорости

$$\mathbf{V} = -V_0 \mathbf{n}. \quad (17)$$

На выходе расчетной области (на правом краю) задается давление

$$p = p_0. \quad (18)$$

Кроме рассмотренных внешних границ области имеются внутренние границы между воздушной средой и отдельными линиями поверхности ледяной оболочки. Математическая формулировка условий на границе имеет вид:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0; k = (3I_T^2 / 2)(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{V}_0); \varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / \left( (3I_T^2 / 2)(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{V}_0) \right)^{1.5} / L_T. \quad (19)$$

Здесь  $L_T$  – масштаб длины турбулентности;  $I_T$  – интенсивность турбулентности.

Интенсивность турбулентности по умолчанию принята равной  $0,01$ , а масштаб длины турбулентности  $0,05$ . Эти значения очень невелики, что объясняется низким возмущением от провода, помещенного в движущийся воздушный поток.

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель турбулентного движения газового потока, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

## Моделирование

Математическая модель термогидродинамических процессов на границе системы «окружающая среда – ледяная оболочка – проводник» представляет собой объединение тепловой и гидродинамической задач. Для трех сред (окружающее воздушное пространство, сталеалюминевый провод, ледяная оболочка) модели задаются значения плотности и динамической вязкости. Задача решается в стационарном режиме.

В тепловой задаче задаются для всех сред значения теплопроводности, плотности и теплоемкости. Для провода задается мощность источника тепловыделения.

Сечение провода принято равным  $50,26 \text{ мм}^2$ , диаметр провода  $0,008 \text{ м}$ , диаметр ледяной оболочки составляет  $0,02 \text{ м}$ , мощность тепловыделения в проводе соответствует длительно допустимому току и равна  $5,026 \text{ Вт}$ , динамическая вязкость при температуре  $-5^\circ\text{C}$  равна  $\mu = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , плотность воздуха  $\rho = 1.318 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность  $\lambda = 0.024 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ; число Рейнольдса взято из табл. 1. Для задачи в двухмерной постановке протяженность вдоль третьей координаты по умолчанию принимается равной одному метру.

Указанные значения используются для расчета на численной модели и для аналитического расчета.

В ходе исследований выполнен ряд расчетов при разных скоростях движения воздуха – от 1 до 10 м/с.

Несмотря на то, что использовалась стационарная термогидродинамическая модель процессов, возникали некоторые отклонения в балансе мощности тепловыделения в проводе и суммарного теплового потока с поверхности ледяной оболочки в движущийся воздух. Погрешность расчетов  $\varepsilon = 100(Q_{\text{сум}} - P) / P$  определена относительно интегрального значения мощности тепловыделения в проводе  $P = 5.026 \text{ Вт}$ .

Для расчетов использован алгоритм отдельного поочередного решения системы тепловой и гидродинамической задач Stationary Segregated, что приводит к увеличению погрешности даже при большем числе элементов, но время решения в несколько раз меньше.

На рис. 1, 2 представлены распределения температуры при скорости ветра 1 и 10 м/с. Из рисунков видно, что тепловые потоки в окружающую среду быстро уменьшаются и процесс теплообмена протекает в ограниченном пространстве за проводом. Как уже отмечалось, выделяющаяся в проводе мощность не рассчитана на плавление оболочки, а более сложные процессы не рассматривались.

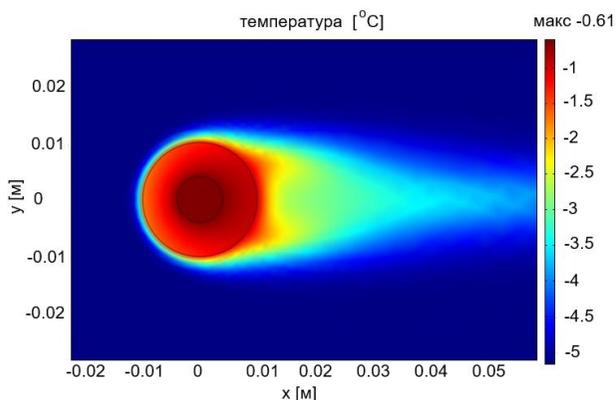


Рис. 1. Распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при турбулентном характере движения

Определение коэффициентов конвективного теплообмена по результатам решения термогидродинамической задачи выполнено с учетом разбиения периметра внешней линии, охватывающей ледяную оболочку, на четыре отрезка (при

построении окружностей в программе предусмотрено разбиение на четыре части). Разбиение на большее число возможно, но для данной задачи нецелесообразно. Интегрирование на границе выполняется для дуги одного участка, потому что интегрирование векторных величин, таких как тепловой поток, сразу для четырех секторов приведет к нулевому результату или близкому к нему. Расчеты выполняются отдельно и суммирование производится с учетом знаков векторных величин.

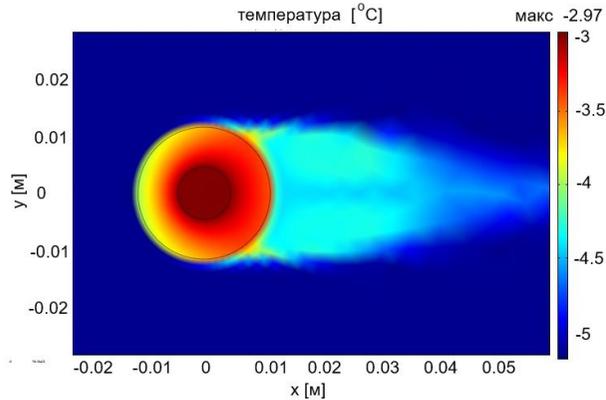


Рис. 2. Распределение температуры при скорости ветра 10 м/с при турбулентном характере движения

При расчетах задано движение воздушного потока слева направо. Поэтому два сектора – левый верхний и левый нижний – испытывают большее воздействие, чем два сектора, находящиеся с правой стороны провода. Средние значения тепловых потоков и температуры могут быть определены через специальные процедуры при численном решении, а также вручную при обработке диаграмм температуры и плотности теплового потока по линии окружности. Для выявления особенностей теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и движущимся воздухом отдельно рассчитаны значения для левой и правой стороны поверхности.

Площадь боковой поверхности для половины ледяной оболочки (длина принята равной 1 м) составляет

$$S_{\delta} = \pi \frac{d}{2} L_{\text{пр}} = 0.0314 \text{ м}^2. \quad (20)$$

Определение тепловых потоков на двух дугах (левая и правая) внешней поверхности ледяной оболочки провода выполнено с помощью встроенной процедуры интегрирования величин по длине дуги  $L_{\delta}$  на линии границы:

$$Q_{\text{инт}} = \int_0^{L_{\delta}} q(x) dx. \quad (21)$$

При поиске коэффициента теплообмена необходимо знать величину температуры поверхности. Для этого можно воспользоваться процедурой интегрирования температуры вдоль линии, а затем разделить полученную величину на длину линии:

$$T_{\text{инт}} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx. \quad (22)$$

Длина линии  $L_0$ , вдоль которой производится интегрирование, соответствует четвертой части длины окружности внешней поверхности ледяной оболочки.

Другой способ расчета теплового потока заключается в разбиении длины дуги на короткие участки, определении среднего значения плотности теплового потока и умножении его на длину линии (четвертая часть длины окружности):

$$q_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_n ; \quad (23)$$

$$Q_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \frac{\pi D}{4} . \quad (24)$$

Аналогичная процедура используется при определении средней температуры на поверхности ледяной оболочки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n . \quad (25)$$

Значения тепловых потоков, определяемые с помощью двух способов расчета, совпадают с небольшими отклонениями, и можно принять

$$Q_{\text{инт}} = Q_{\text{ср}} . \quad (26)$$

Далее будем обозначать эти величины как интегральные, с указанием стороны дуги – левая  $l$  или правая  $r$ .

Другие величины, от которых зависят коэффициенты конвективного теплообмена, существенно отличаются:

$$Q_{\text{инт}}^l = 3.87 \text{ Вт}, \quad Q_{\text{инт}}^r = 1.234 \text{ Вт}.$$

Суммарное значение теплового потока с поверхности ледяной оболочки составляет  $Q_{\text{сум}} = 5.26 \text{ Вт}$ .

На основании выполненных решений для диаграмм, разбитых на участки, определены средние значения температуры поверхности и плотности теплового потока. Полученные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 1 м/с**

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, \text{ }^\circ\text{C}$	-1,68	-1,66	-1,62	-1,56	-1,53	-1,46	-1,4	-1,33
$T_n^r, \text{ }^\circ\text{C}$	-1,25	-1,16	-1,1	-1,03	-0,96	-0,93	-0,91	-0,9
$q_n^l, \text{ Вт/м}^2$	148	145	136	130	120	110	104	94
$q_n^r, \text{ Вт/м}^2$	79	61	45	30	20	20	28	31

По формулам (23) и (25) определены средние значения температур и плотности теплового потока на левой и правой дугах. По полученным значениям найдены коэффициенты конвективного теплообмена для левой и правой дуг:

$$\alpha = \frac{q_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} - T_{\text{ос}}}. \quad (27)$$

Средним значениям температуры на дугах  $T_{\text{ср}}^l = -1.53^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{ср}}^r = -1.03^\circ\text{C}$  соответствуют значения коэффициентов теплообмена:

- для левой верхней дуги:  $\alpha = 35.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;
- для правой верхней дуги:  $\alpha = 9.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Среднее значение  $\alpha = 22.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Коэффициент конвективного теплообмена, полученный по методике, представленной в [15] и приведенный в табл. 1, равен  $24,135 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  при температуре  $-5^\circ\text{C}$ . Разница между средним значением коэффициента теплообмена, полученным с помощью численного расчета, и вычисленным по формулам составляет  $6,7\%$ .

Аналогичные расчеты выполнены для скорости ветра  $5$  и  $10 \text{ м}/\text{с}$ .

По результатам расчетов построены диаграммы плотности теплового потока и температуры вдоль линии дуги (рис. 3, 4).

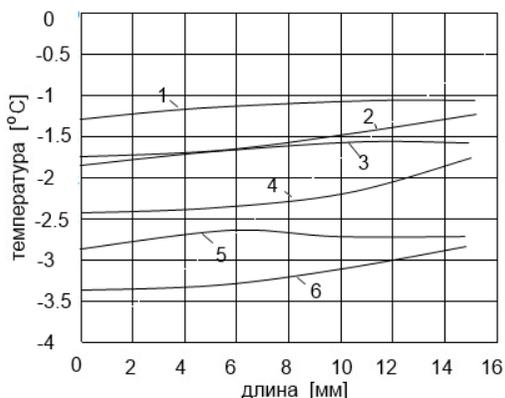


Рис. 3. Диаграммы температуры на поверхности провода: левая верхняя дуга: 1 – при скорости  $1 \text{ м}/\text{с}$ ; 3 – при скорости  $5 \text{ м}/\text{с}$ ; 5 – при скорости  $10 \text{ м}/\text{с}$ ; правая верхняя дуга: 2 – при скорости  $1 \text{ м}/\text{с}$ ; 4 – при скорости  $5 \text{ м}/\text{с}$ ; 6 – при скорости  $10 \text{ м}/\text{с}$

Для варианта расчета при скорости  $5 \text{ м}/\text{с}$  после решения задачи определены тепловые потоки на дугах проводника: на левой дуге  $Q_{\text{инт}}^l = 3.638 \text{ Вт}$ , на правой дуге  $Q_{\text{инт}}^r = 1.322 \text{ Вт}$ . По этим значениям найдено суммарное значение теплового потока с поверхности ледяной оболочки  $Q_{\Sigma} = 4.96 \text{ Вт}$ .

Для варианта расчета при скорости  $10 \text{ м}/\text{с}$  определены тепловые потоки на дугах проводника: для левой дуги  $Q_{\text{инт}}^l = 3.79 \text{ Вт}$ ; для правой дуги  $Q_{\text{инт}}^r = 1.33 \text{ Вт}$ .

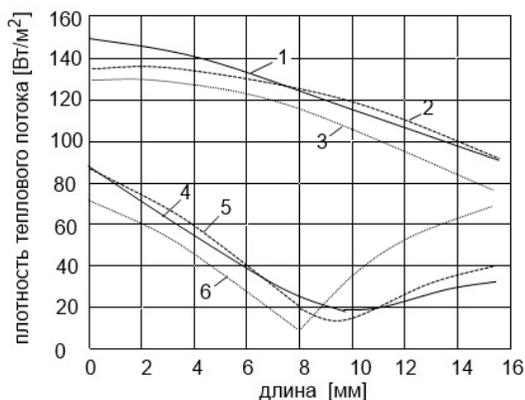


Рис. 4. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности провода: левая верхняя дуга: 1 – при скорости 1 м/с; 2 – при скорости 5 м/с; 3 – при скорости 10 м/с; правая верхняя дуга: 4 – при скорости 1 м/с; 5 – при скорости 5 м/с; 6 – при скорости 10 м/с

Сумма этих значений определяет величину теплового потока с поверхности ледяной оболочки  $Q_{\Sigma} = 5.12$  Вт.

Для определения средних значений температуры и плотности теплового потока на поверхности ледяной оболочки диаграммы разбиты на участки и выполнены расчеты, результаты которых представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

**Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 5 м/с**

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, \text{ }^\circ\text{C}$	-2,38	-2,35	-2,31	-2,24	-2,16	-2,07	-1,96	-1,85
$T_n^r, \text{ }^\circ\text{C}$	-1,8	-1,73	-1,65	-1,6	-1,54	-1,5	-1,49	-1,48
$q_n^l, \text{ Вт/м}^2$	135	135	132	130	122	114	105	93
$q_n^r, \text{ Вт/м}^2$	80	65	48	30	16	27	34	39

После подстановки значений температуры и плотности теплового потока из табл. 3 в формулы (23) и (25) получены средние значения температуры для левой дуги  $T_{\text{ср}}^l = -2.165 \text{ }^\circ\text{C}$  и для правой дуги  $T_{\text{ср}}^r = -1.599 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также значения коэффициента конвективного теплообмена для левой верхней дуги  $\alpha = 42.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$  и для правой верхней дуги  $\alpha = 12.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ . Среднее значение коэффициента для всей поверхности составляет  $\alpha = 27.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ .

Полученный коэффициент конвективного теплообмена по методике, представленной в [15], имеет величину  $47,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ . Разница между средним значением коэффициента теплообмена, полученным с помощью численного расчета, и вычисленным по формулам равна 70,8 %. Коэффициент теплообмена, опре-

деленный аналитически, превышает даже максимальное значение, найденное при численном расчете. Если обратиться к табл. 1, то можно сопоставить полученную разницу с величиной числа Рейнольдса. При малой скорости воздуха критерий Рейнольдса соответствует ламинарному режиму движения. Конечно, говорить о постоянной скорости ветра сложно, так как чаще наблюдается порывистый характер движения. В этом случае стабильного ламинарного движения не бывает даже при сравнительно небольшой средней скорости.

После обработки значений из табл. 4 получено среднее значение температуры на левой дуге, равное  $T_{cp}^l = -3.21$  °С, и на правой дуге, равное  $T_{cp}^r = -2.7$  °С. Значения коэффициента конвективного теплообмена для левой верхней дуги равно  $\alpha = 67.45$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), а для правой верхней дуги  $\alpha = 18.5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Среднее значение коэффициента теплообмена на всей поверхности составляет  $\alpha = 43$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Таблица 4

**Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 10 м/с**

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, \text{°C}$	-3,29	-3,26	-3,2	-3,14	-3,06	-3,01	-2,94	-2,86
$T_n^r, \text{°C}$	-2,76	-2,67	-2,61	-2,58	-2,6	-2,61	-2,63	-2,64
$q_n^l, \text{Вт/м}^2$	134	135	131	125	115	108	93	82
$q_n^r, \text{Вт/м}^2$	72	48	23	15	34	50	59	67

### Расчет коэффициента теплообмена с помощью процедур интегрирования Comsol

Полученные в результате расчетов значения коэффициента конвективного теплообмена продемонстрировали значительное расхождение с величиной коэффициента, найденного через критерии Рейнольдса и Нуссельта. Для сравнения приведен еще один способ расчета, в котором используются только процедуры, предусмотренные программой Comsol.

Для определения средней температуры дуги производится интегрирование по линии дуги, а затем полученная величина делится на длину отрезка:

$$T_{cp} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx . \quad (28)$$

Коэффициент конвективного теплообмена рассчитывается по той же формуле, что и для предыдущих расчетов. Отличие состоит в том, что величина теплового потока с поверхности ледяной оболочки для вычисления коэффициента берется без каких-либо изменений:

$$\alpha = \frac{Q}{(T - T_c) S_{бок}} . \quad (29)$$

Здесь площадь боковой поверхности ледяной оболочки определяется для сектора углом 90 градусов:

$$S_{бок} = \pi DL / 4 = 0.015708 \text{ м}^2.$$

Результаты расчета сведены в табл. 5.

Таблица 5

## Расчетные значения параметров процесса теплообмена средствами Comsol

№	$v$ , м/с	$T_{cp}^l$ , °C	$T_{cp}^r$ , °C	$Q^l$ , Вт	$Q^r$ , Вт	$Q_{\Sigma}$ , Вт	$\alpha^l$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha^r$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{cp,1}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{an}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\varepsilon_{\alpha}$ , %
1	1	273,8	274,4	4	1,2	5,2	21,9	5,99	13,9	24,1	-9,2
2	5	271	271,6	3,73	1,26	4,97	37,7	11,1	24,4	63,4	-40
3	10	270,1	270,5	3,66	1,47	5,11	50,95	18,5	34,7	96	-47

**Обсуждение**

Для сопоставления результатов расчета коэффициента конвективного теплообмена, найденных разными способами, все полученные значения представлены в табл. 6.

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при использовании стандартных средств Comsol, обозначено  $\alpha_{cp,1}$ .

Отклонения средних значений коэффициента теплообмена, найденных средствами Comsol, от значений, найденных по аналитическим выражениям, составляют от -9 до -47 %.

Таблица 6

## Расчетные значения процесса теплообмена средствами Comsol с разбиением дуги окружности ледяной оболочки

№	$v$ , м/с	$Q^l$ , Вт	$Q^r$ , Вт	$Q_{\Sigma}$ , Вт	$\alpha^l$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha^r$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{cp,2}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{cp,1}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{an}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$
1	1	3,87	1,23	5,1	35,6	9,94	22,7	13,9	24,1
2	5	3,64	1,32	4,96	42,6	12,6	27,6	24,4	63,4
3	10	3,79	1,33	5,09	67,45	18,5	42,98	34,7	96

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при разбиении дуги на участки, обозначено  $\alpha_{cp,2}$ .

Коэффициенты конвективного теплообмена, найденные тремя способами, существенно отличаются друг от друга. Для более точного представления о характеристиках реального процесса теплообмена нужен физический эксперимент. Однако учитывая геометрические размеры провода и ледяной оболочки, сложно обеспечить качественный результат без возможности искажения тепловых процессов вносимыми датчиками в ледяную оболочку малой толщины. Кроме того, отдельная проблема заключается в процедуре настройки модели гидродинамики. Картина распределения температуры возле провода с ледяной оболочкой свидетельствует о затухании вихревых процессов на небольшом расстоянии, как и было предусмотрено в настройках модели. Однако известные проблемы используемой  $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности, связанные с поведением потока жидкости (газа) возле поверхности, до конца не преодолены.

Проведенное исследование разных способов определения коэффициента конвективного теплообмена между поверхностью проводов и воздушным пото-

ком показало значительное влияние скорости ветра не только на величину коэффициента теплообмена, но и на возможность использования упрощенных процедур расчета тепловых процессов в системе «воздушная среда – ледяная оболочка – провод». При малой скорости ветра (1 м/с) использование формул для расчета коэффициента теплообмена приводит к допустимым значениям погрешности (менее 10 %). Увеличение скорости до 5 м/с и более приводит к значительному ухудшению точности расчетов – погрешность возрастает до десятков процентов. В таких условиях расчет тепловых процессов внутри системы «ледяная оболочка – провод» с учетом изменения агрегатного состояния при плавлении и кристаллизации становится непредсказуемым. При малом резерве мощности тепловыделения в проводе процесс расплавления льда на проводе может завершиться безрезультатно. Таким образом, несмотря на сложность и ресурсоемкость процедур расчета термогидродинамических процессов, данный этап является необходимым. Только после полноценного численного определения значений коэффициентов теплообмена при различных параметрах ледяной оболочки, температуры и скорости ветра можно переходить к основной задаче – расчету процесса плавления гололеда на проводах.

### **Заключение**

Использование различных моделей термогидродинамических процессов при плавке гололеда на проводах показало возможность повышения точности расчетов в условиях ограниченных возможностей используемого математического аппарата.

Уточненные параметры позволяют улучшить и скорректировать математические модели для проведения моделирования с минимизацией погрешностей, исключения недостоверных расчетов, а также определения мощности и времени при заданных значениях коэффициентов конвекции.

Проведение математических исследований термогидродинамических процессов при плавке гололеда на проводах в различных погодных условиях позволит подбирать оптимальные режимы дополнительной загрузки линии токами для эффективной плавки.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Базаров А.А., Будко С.И.* Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31. № 4. С. 49–67.
2. *Елизарьев А.Ю.* Обеспечение надежности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололедных нагрузок: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 22 с.
3. *Гузаиров М.Б., Максимов В.А., Валеев А.Р.* Совершенствование системы плавки гололеда на высоковольтных ВЛ // Электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 33–37.
4. *Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н.* Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник АМГУ. 2019. № 87. С. 65–66.
5. *Елизарьев А.Ю., Валеев А.Р.* Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 59–66.
6. *Каганов В.И.* Борьба с гололедом в линиях электропередачи с помощью высокочастотной электромагнитной волны // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. № 5. С. 41–45.
7. *Каганов В.И.* Нагрев проводов электрических сетей с помощью высокочастотной электромагнитной волны для борьбы с гололедом // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. № 3. С. 21–25.

8. *Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V.* Breaking the ice: de-icing power transmission lines with highfrequency, high-voltage excitation // *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2003. Vol. 9. No. 5. Pp. 49–54.
9. *Zhou Y.S., Zeng L., Chen P.Y., Pan Z.* A High-Frequency High-Voltage Excitation Melting Ice Power Design // *Appl. Mech. Mater.* 2013. Vol. 325–326. Pp. 271–276.
10. *Розинская Л.Э., Карташев В.В., Лютов А.Г., Рахматуллина Г.Э.* Моделирование установки для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ ПС Альмухаметово ООО «Башкирэнерго» // *Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: Материалы международной научно-практической конференции.* Уфа: УГАТУ, 2016. С. 76–81.
11. *Дементьев С.С.* Диагностика состояния воздушных линий электропередачи с применением нейрокомпьютера // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт.* 2017. № 2 (19). С. 21–26.
12. *Засыпкин А.С. (мл.).* Технология дистанционного контроля гололедообразования на ВЛ и ее обоснование при допустимых упрощениях модели физических процессов // *Электротехнические системы и комплексы.* 2021. № 3 (52). С. 52–56.
13. *Тимофеева М.В., Титов Д.Е.* Развитие моделей оценки ледяных отложений на проводах линий электропередачи // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* 2017. Т. 13. № 4. С. 37–45.
14. *Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv.* Prediction models for dynamic response parameters of transmission lines after ice-shedding based on machine learning method // *Electric Power Systems Research.* 2022. Vol. 202. Pp. 1–11.
15. *Мухеев М.А., Мухеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
16. *Щерба В.Е. и др.* Механика жидкости и газа. Спецглавы. Омск: ОмГТУ, 2020. 92 с.
17. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений. СПб: БалтГТУ, 2001. 108 с.

*Статья поступила в редакцию 20.09.2024 г.*

# STUDY OF THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE AIR ENVIRONMENT IN THE SYSTEM OF MELTING ICE ON THE WIRES OF THE POWER TRANSMISSION LINE

A.A. Bazarov, S.I. Budko<sup>1</sup>

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

**Abstract.** *The paper considers issues related to modeling thermal and hydrodynamic processes in the "wire – ice shell – air" system that occur during melting of ice on wires. The problem of ice shell growth on the surface of power transmission line wires has been known for a long time, and many works in the field of ice growth control and technical means of combating this phenomenon are devoted to its solution. Recently, works have appeared on melting systems that operate without disconnecting lines from consumers, which increases the reliability and uninterrupted power supply, reduces economic losses from undersupply of products during power supply interruptions. The process of ice melting can occur under conditions of heating the conductors with a high current to a steady positive temperature until the ice shell is destroyed. In this case, switching to the melting mode is carried out for a short period of time. An alternative to this method is to combine power supply to consumers and ice melting. In this case, the heat generation capacity in the wires is less, the melting time is increased, but there is no need to disconnect consumers. The problem of maintaining the line in the operating mode of transmitting electric energy to consumers is solved by additionally loading the line with reactive currents by connecting a certain inductive load. The increase in currents and power coming from the supply transformer to the line must be technically feasible so as not to overload the source and not cause its shutdown. Due to power limitations, it is necessary to carry out accurate calculations of thermal processes to determine acceptable modes of melting the ice layer. Complex modeling of thermohydrodynamic processes in the "wire – ice shell – air" system is considered. Several methods for determining the coefficients of convective heat exchange at the boundaries of the conductor at different wind speeds are considered.*

**Keywords:** *thermal processes, hydrodynamics, turbulence models, convective heat transfer coefficient, ice, finite element method, related problems.*

## REFERENCES

1. Bazarov A.A., Budko S.I. Modelirovanie teplovyh processov pri plavke gololeda na linii elektroperedach [Modeling of thermal processes when melting ice on power lines] // Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2023. Vol. 31. No. 4. Pp. 49–67. (In Russian)
2. Elizarev A.Yu. Obespechenie nadezhnosti raboty vozdushnyh linij elektroperedachi v usloviyah gololednyh nagruzok [Ensuring reliable operation of overhead power transmission lines under icy load conditions]. Avtoreferat dic. ... kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2017. 22 p. (In Russian)
3. Guzairov M.B., Maksimov V.A., Valeev A.R. Sovershenstvovanie sistemy plavok gololeda na vysokovo'tnyh VL [Improvement of ice flattening systems on high-voltage overlinenes] // Elektrotekhnicheskie kompleksty i sistemy. Mezhdvuzovskij nauchnyj sbornik. Ufa: UGATU, 2014. Pp. 33–37. (In Russian)
4. Myasoedov Yu.V., Korzhova O.N. Plavka gololyoda na liniyah elektroperedachi: metody,



© The Author(s), 2024

<sup>1</sup> Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Stepan I. Budko, Postgraduate Student.

- innovacii, ekspluatatsiya [Melting ice on power lines: methods, innovations, operation] // Vestnik AmGU. 2019. № 87. Pp. 65–66. (In Russian)
5. *Elizarev A.Yu., Valeev A.R.* Plavka gololeda na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi bez otklyucheniya potrebitel'ev [Melting ice on overhead power lines without disconnecting consumers] // Vestnik UGATU. 2015. Vol. 19. No. 4 (70). Pp. 59–66. (In Russian)
  6. *Kaganov V.I.* Borba s gololedom v liniyakh elektroperedachi s pomoshch'yu vysokochastotnoj elektromagnitnoj volny [Fighting ice in power lines using high-frequency electromagnetic waves] // Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost. 2010. No. 5. Pp. 41–45. (In Russian)
  7. *Kaganov V.I.* Nagrev provodov elektricheskikh setej s i pomoshch'yu vysokochastotnoj elektromagnitnoj volny dlya bor'by s gololedom [Heating of electrical network wires using high-frequency electromagnetic waves to combat ice] // Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost. 2012. No. 3. Pp. 21–25. (In Russian)
  8. *Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V.* Breaking the ice: de-icing power transmission lines with highfrequency, high-voltage excitation // IEEE Ind. Appl. Mag. 2003. Vol. 9. No. 5. Pp. 49–54.
  9. *Zhou Y.S., Zeng L., Chen P.Y., Pan Z.* A High-Frequency High-Voltage Excitation Melting Ice Power Design // Appl. Mech. Mater. 2013. Vol. 325–326. Pp. 271–276.
  10. *Roginskaya L.E., Kartashev V.V., Lyutov A.G., Rahmatullina G.E.* Modelirovanie ustanovki dlya plavki gololeda s ispolzovaniem reaktivnykh tokov na VL 10 kV PS Almuhametovo OOO "Bashkirenergo" [Modeling of an installation for melting ice using reactive currents on a 10 kV overhead line at Almuhametovo Substation LLC "Bashkirenergo"] // Voprosy nadezhnosti raboty sistem elektrosnabzheniya v usloviyakh gololedno-vetrovykh nagruzok. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufa: UGATU, 2016. Pp. 76–81. (In Russian)
  11. *Dementiev S.S.* Diagnostika sostoyaniya vozduzhnykh linij elektroperedachi s primeneniem nejrokompyutera [Diagnostics of the condition of overhead power lines using a neurocomputer] // Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2017. No. 2 (19). Pp. 21–26. (In Russian)
  12. *Zasyplin A.S. (ml.).* Tekhnologiya distantsionnogo kontrolya gololyodoobrazovaniya na VL i eyo obosnovanie pri dopustimyykh uproshtsennykh modeli fizicheskikh processov [Technology of remote control of ice formation on overhead power lines and its justification with acceptable simplifications of the model of physical processes] // Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy. 2021. No. 3(52). Pp. 52–56. (In Russian)
  13. *Timofeeva M.V., Titov D.E.* Razvitie modelej ocenki ledyanykh otlozhenij na provodakh linij elektroperedachi [Development of models for assessing ice deposits on power transmission line wires] // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy. 2017. Vol. 13. No. 4. Pp. 37–45. (In Russian)
  14. *Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv.* Prediction models for dynamic response parameters of transmission lines after ice-shedding based on machine learning method // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 202. Pp. 1–11.
  15. *Miheev M.A., Miheeva I.M.* Osnovy teploperedachi [Basics of Heat Transfer]. M.: Energiya, 1977. 344 p. (In Russian)
  16. *Shcherba V.E. i dr.* Mekhanika zhidkosti i gaza. Spezglavy [Fluid and Gas Mechanics. Special Chapters]. Omsk: OmGTU, 2020. 92 p. (In Russian)
  17. *Belov I.A., Isaev S.A.* Modelirovanie turbulentsnykh techenij [Modeling of turbulent flows]. SPb: BaltGTU, 2001. 108 p. (In Russian)

*Original article submitted 20.09.2024*