

УДК 621.332

## Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения

**Июань Ли, И. П. Викулов**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Ли Июань, Викулов И. П. Электротепловая модель контактной сети переменного тока и механизм плавления гололедных отложений при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 73–85. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-73-85

### Аннотация

**Цель:** разработка электротепловой модели плавления гололедных отложений контактной сети электрифицированной железной дороги при автотрансформаторной системе тягового электроснабжения с учетом неравномерного обледенения и теплофизических свойств многослойной системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». **Методы:** при исследовании процесса плавления построена двумерная нестационарная тепловая модель поперечного сечения системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». Источники тепла определены по закону Джоуля — Ленца при заданном токе нагрева, фазовый переход учтен методом эквивалентной теплоемкости, а внешние теплотери описаны радиационно-конвективным теплообменом. Численное моделирование температурного поля выполнено методом конечных элементов. **Результаты:** установлено, что при электротепловом плавлении гололедных отложений формируется неравномерное температурное поле, обусловленное последовательным переносом тепла от проводника к ледяной оболочке через воздушный зазор. Показано, что геометрическая неравномерность обледенения изменяет граничные условия теплообмена и приводит к различию теплового отклика элементов системы, определяя пространственные особенности и кинетику процесса плавления. **Практическая значимость:** разработанная модель может применяться для анализа тепловых режимов удаления гололеда на проводах контактной сети и оценки энергетических параметров плавильных режимов. Полученные результаты позволяют уточнить физический механизм электротеплового плавления гололедных отложений и могут служить основой для дальнейших исследований процессов противообледенительной защиты контактной сети.

**Ключевые слова:** железная дорога, контактная сеть, автотрансформаторная система, гололедное отложение, плавление льда, метод конечных элементов

### Введение

Электрифицированные железные дороги предъявляют повышенные требования к надежности тягового электроснабжения. Совместная работа системы «токоприемник — контактная сеть» определяет устойчивость и качество токосъема, что напрямую влияет на безопасность движения и тяговые характеристики подвижного состава [1].

В условиях отрицательных температур на проводах контактной сети формируются гололедные отложения, изменяющие геометрию и электрические параметры

проводников. Это приводит к нарушению стабильности контактного взаимодействия, увеличению механической нагрузки на элементы подвески и снижению эксплуатационной надежности системы в зимний период.

Тепловое плавление гололеда током повышенной величины является распространенным инженерным решением для восстановления работоспособности контактной сети [2]. Эффективность такого способа удаления льда определяется тепловым балансом системы, включающим тепловыделение по закону Джоуля — Ленца в проводнике, теплоперенос через многослойную структуру «проводник — лед — окружающая среда» и интенсивность теплообмена с окружающей средой [10].

Существенное влияние на тепловой режим оказывает характер формирования ледяной оболочки. В условиях повышенной влажности рост обледенения контактных проводов имеет явно выраженный неравномерный характер, что связано с аэродинамическими условиями обтекания проводников и особенностями их геометрического профиля. Формирование асимметричной ледяной оболочки приводит к изменению граничных условий теплообмена и может существенно влиять на динамику температурного отклика при электротепловом плавлении.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных противообледенительным мероприятиям на устройствах электроснабжения железных дорог, ряд аспектов электротеплового процесса плавления гололедных отложений, включая взаимосвязь теплового отклика и фазового перехода, остается недостаточно изученным [5, 11]. В частности, требует уточнения влияние геометрической неравномерности ледяной оболочки на распределение температурного поля и кинетику фазового перехода в системе «проводник — лед» [3].

В связи с этим актуальной задачей является разработка физически обоснованной модели электротеплового плавления гололедных отложений, учитывающей реальную структуру многослойной системы и нестационарный характер теплопереноса.

В данной работе рассматривается электротепловой механизм плавления льда на проводах контактной сети. Построена нестационарная тепловая модель поперечного сечения системы «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда», позволяющая исследовать формирование температурного поля и последовательность фазовых преобразований в процессе нагрева.

### **Анализ типов и физико-механических характеристик гололедных отложений контактной сети**

Формирование гололедных отложений на проводах контактной сети определяется совокупностью метеорологических факторов, включая температуру воздуха, скорость ветра, концентрацию и размер переохлажденных капель [4]. Указанные параметры задают режим фазового перехода и условия роста ледяной оболочки.

В зависимости от их сочетания реализуются различные сценарии обледенения, приводящие к образованию ледяных структур, различающихся по плотности, адгезионной прочности и теплофизическим характеристикам. Эти различия определяют величину дополнительной механической нагрузки на проводники, условия токоотвода и параметры теплового плавления.

Согласно метеорологической классификации и данным инженерных наблюдений, основные типы обледенения контактной сети и их ключевые характеристики приведены в таблице [5].

**ТАБЛИЦА. Типы гололедных отложений контактной сети и их основные характеристики**

Тип обледенения	Диапазон плотности, г/см <sup>3</sup>	Адгезионная прочность	Типичная морфология	Влияние на систему «токоприемник — контактная сеть»
Снег	0,05–0,6	Низкая	Цилиндрическая или асимметричная оболочка	Увеличение механической нагрузки на проводники, возможное возбуждение колебаний и галопирования
Изморозь	< 0,6	Средняя	Зернистая, пористая или флаговидная структура	Снижение электрической прочности изоляции, повышение вероятности перекрытия и пробоя
Смешанное обледенение	0,6–0,8	Высокая	Неравномерная плотная оболочка	Одновременное усиление механического и электрического воздействия
Гололед	0,8–0,9	Очень высокая	Прозрачная плотная ледяная корка, образование ледяных наростов	Максимальное энергопотребление при плавлении, наибольшая сложность удаления

Анализ данных таблицы показывает, что типы гололедных отложений существенно различаются по плотности, структуре и адгезионной прочности, что определяет степень их механического и электрического воздействия на контактную сеть. Пористые снежные и изморозевые образования характеризуются пониженной плотностью и ограниченной устойчивостью ледовой нагрузки, тогда как смешанные формы и, в наибольшей степени, плотный гололед обладают повышенной адгезией и непористой структурой. Последний тип формирует максимальную эквивалентную нагрузку на проводники, увеличивает тепловую инерцию системы и требует повышенных энергетических затрат при плавлении [6].

Следовательно, при моделировании процесса удаления льда приоритетное значение имеют физико-механические свойства плотных гололедных образований, формирование которых протекает по термодинамическому механизму «влажного» роста [7].

Переход к схеме «влажного» роста реализуется при выполнении условия  $0 < a_3 < 1$ , где  $a_3$  — коэффициент замерзания, характеризующий долю захваченной воды, переходящей в твердую фазу. При  $a_3 < 1$  часть влаги сохраняется в жидком состоянии, формируя поверхностную пленку и создавая двухфазную систему «лед — вода». В этих условиях температура поверхности поддерживается вблизи точки фазового перехода, что придает процессу квазиизотермический характер.

Значение  $a_3$  определяется локальными условиями теплообмена, прежде всего интенсивностью конвективной теплоотдачи. Повышенная влажность, рост скорости ветра и температура окружающей среды, близкая к  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , способствуют снижению  $a_3$  и формированию плотной ледяной структуры с высокой адгезионной прочностью.

Вследствие сложной геометрии поперечного сечения контактного провода (рис. 1) процесс «влажного» роста характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, которая обусловлена локальными геометрическими и аэродинамическими факторами [8]. Канавочные элементы контактного провода, наветренная зона несущего троса и участки геометрических неоднородностей (зажимы, арматура) характеризуются повышенным коэффициентом захвата капель и интенсифицированным теплообменом, что приводит к локальной аккумуляции ледяной массы и формированию эксцентричной, асимметричной оболочки [9].

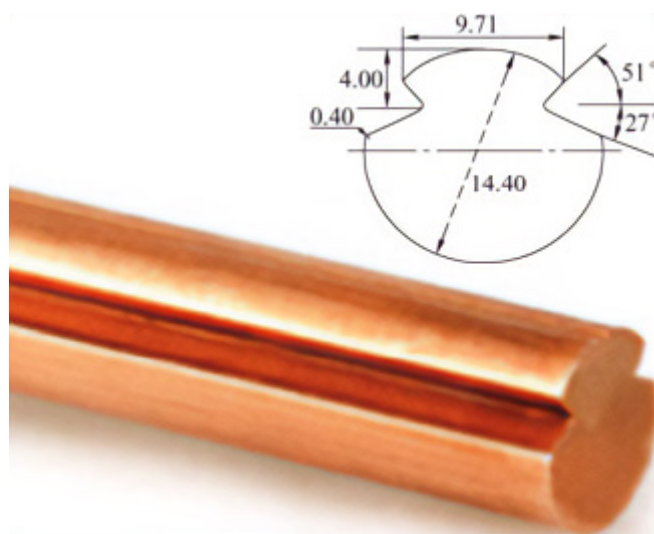
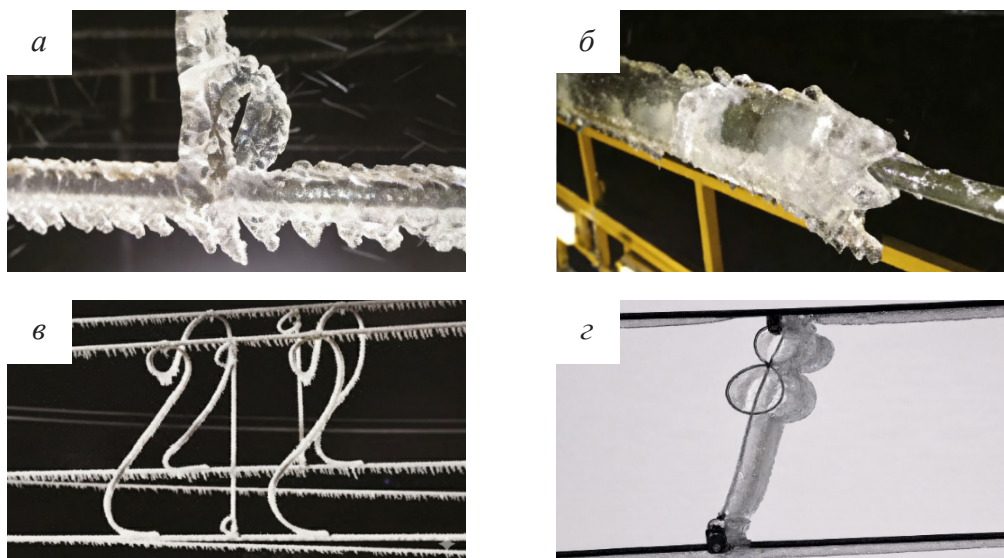


Рис. 1. Схема поперечного сечения контактного провода [5]

Описанные локальные эффекты накопления льда обуславливают формирование выражено несимметричной ледяной оболочки с эксцентричным распределением массы и локальными утолщениями. Инженерные наблюдения (рис. 2) подтверждают типичную морфологию неравномерного обледенения, характеризующуюся смещением ледяной массы к наветренной стороне и формированием асимметричного внешнего контура [5].



**Рис. 2.** Типичные морфологические конфигурации неравномерного обледенения проводов контактной сети [5]: *а* — сосульчатая форма, *б* — веерообразная форма, *в* — гребневидная форма, *г* — серповидная форма

Таким образом, в условиях «влажного» роста текучесть поверхностной водяной пленки и геометрически обусловленные эффекты определяют изменение эквивалентного профиля проводника и граничных условий теплообмена, что непосредственно влияет на интенсивность нагрева и неравномерность процесса плавления.

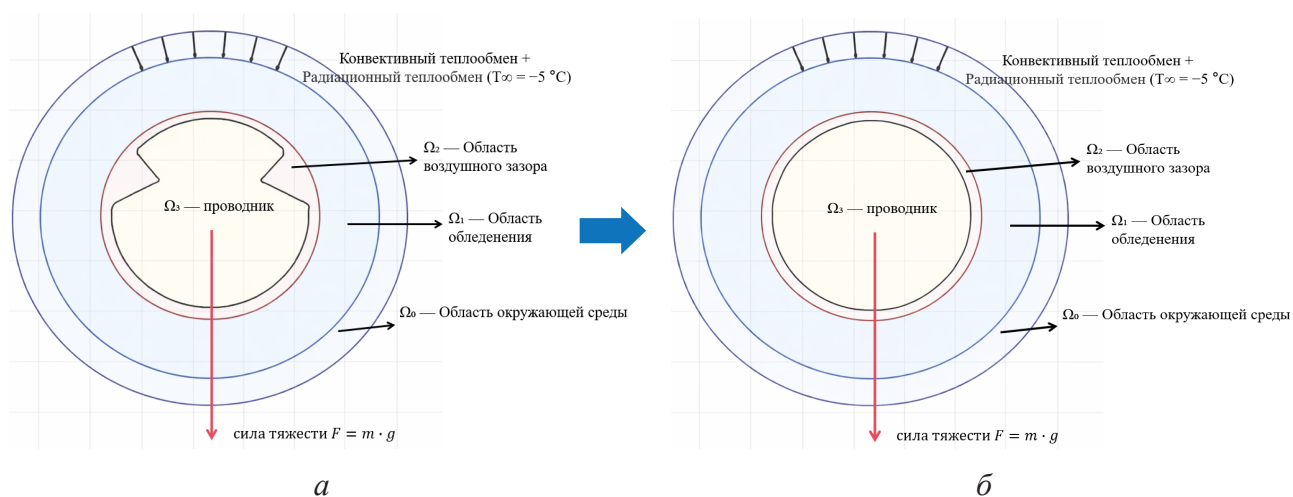
### Процесс плавления и физическая модель

Гололедные отложения, формирующиеся в условиях «влажного» роста, характеризуются высокой плотностью, значительной адгезионной прочностью и выраженной асимметрией распределения массы. Текучесть поверхностной водяной пленки и геометрически индуцированные эффекты (включая влияние продольных канавок контактного провода) приводят к формированию существенно неравномерной ледяной оболочки [10].

Указанные особенности требуют построения тепловой модели плавления, учитывающей реальную геометрию поперечного сечения проводника, многослойную структуру системы «проводник — воздушный зазор — лед» и радиационно-конвективные механизмы теплообмена, что позволяет корректно описать изменение температурного поля при пропускании тока [11].

С целью анализа нестационарного теплового отклика построена двумерная модель теплопереноса в поперечном сечении (рис. 3). При дальнейшей реализации рассматриваемой модели в среде MATLAB принята упрощенная расчетная схема, приведенная к осесимметричной (круговой) форме (рис. 3б), получаемая погрешность при таком преобразовании не превышает допустимых значений.

Расчетная область включает четыре подобласти: проводник  $\Omega_3$ , воздушный зазор  $\Omega_2$ , ледяную оболочку  $\Omega_1$  и приповерхностную воздушную среду  $\Omega_0$ . Геометрия проводника задается с учетом его реального профиля, тогда как лед и воздушный зазор аппроксимируются эквивалентными концентрическими слоями, что обеспечивает сохранение инженерно значимых параметров (наружный диаметр, толщина слоев) при упрощении расчетной схемы и обеспечении вычислительной устойчивости.



**Рис. 3.** Расчетная область и граничные условия тепловой модели:

*a* — исходная схема поперечного сечения, *б* — упрощенная расчетная схема модели

Далее приведены постановка нестационарной задачи теплопереноса и граничные условия, используемые в численной реализации.

В процессе формирования и плавления ледяной оболочки на проводнике система находится в поле действия силы тяжести, которая определяется выражением:

$$f = mg, \quad (1)$$

где  $m$  — масса ледяной оболочки, кг;

$g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

В каждой подобласти  $\Omega_j$  температурное поле  $T(x, t)$  описывается нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\rho_j c_j(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_j \nabla T) + q_j, \quad \mathbf{x} \in \Omega_j, \quad j \in \{w, g, i, a\}, \quad (2)$$

где  $\rho_j$  — плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c_j(T)$  — удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$k_j$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$q_j$  — объемный источник тепла,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

В области проводника объемный источник тепла задается по закону Джоуля — Ленца:

$$q_w = \frac{I^2 R'}{A_w}, \quad q_g = q_i = q_a = 0, \quad (3)$$

где  $I$  — действующее значение тока, А;

$R'$  — сопротивление переменному току на единицу длины, Ом/м;

$A_w$  — площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

На границах раздела  $\Gamma_{jk}$  обеспечиваются непрерывность температуры и теплового потока:

$$T_j = T_k, \quad k_j \nabla T_j \cdot n = k_k \nabla T_k \cdot n, \quad x \in \Gamma_{jk}, \quad (4)$$

где  $n$  — единичная нормаль к границе раздела.

На внешней границе  $\Gamma_{out}$  задается радиационно-конвективный теплообмен:

$$-k_a \nabla T \cdot n = h(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4), \quad (5)$$

где  $T_\infty$  — температура окружающей среды, К;

$h$  — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\varepsilon$  — коэффициент излучательной способности (эмиссивность);

$\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T_s$  — температура поверхности на границе теплообмена.

Начальное распределение температуры принимается равным температуре окружающей среды:

$$T(x, 0) = T_\infty, \quad x \in \Omega_w \cup \Omega_g \cup \Omega_i \cup \Omega_a. \quad (6)$$

В области льда фазовый переход учитывается методом эквивалентной теплоемкости:

$$c_i(T) = c_{ice} + \frac{L_f}{\Delta T_m}, \quad T \in \left[ T_m - \frac{\Delta T_m}{2}, T_m + \frac{\Delta T_m}{2} \right], \quad (7)$$

где  $L_f$  — удельная теплота плавления, Дж/кг;

$T_m$  — температура фазового перехода, К;

$\Delta T_m$  — ширина температурного интервала фазового перехода, К.

Вне указанного интервала принимается  $c_i(T) = c_{ice}$ .

Такой подход обеспечивает энергетическую эквивалентность фазового перехода без явного отслеживания границы фаз и сохраняет вычислительную устойчивость нестационарной задачи.

## Численная реализация модели в среде MATLAB

Для численного исследования электротеплового процесса плавления гололедных отложений разработана вычислительная модель в среде MATLAB с использованием пакета PDE Toolbox, предназначенного для решения задач теплопереноса методом конечных элементов.

На рис. 4 представлены фрагмент программной реализации модели и результаты численного моделирования, отражающие характерную эволюцию температурного поля в процессе электротеплового плавления льда.

Реализация модели основана на решении нестационарного уравнения теплопроводности (2) в многослойной системе «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда». Геометрия расчетной области задается в виде двумерного поперечного сечения контактного провода с ледяной оболочкой. Расчетная область разбивается на несколько подобластей, соответствующих различным физическим средам, для каждой из которых задаются индивидуальные теплофизические параметры: коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость.

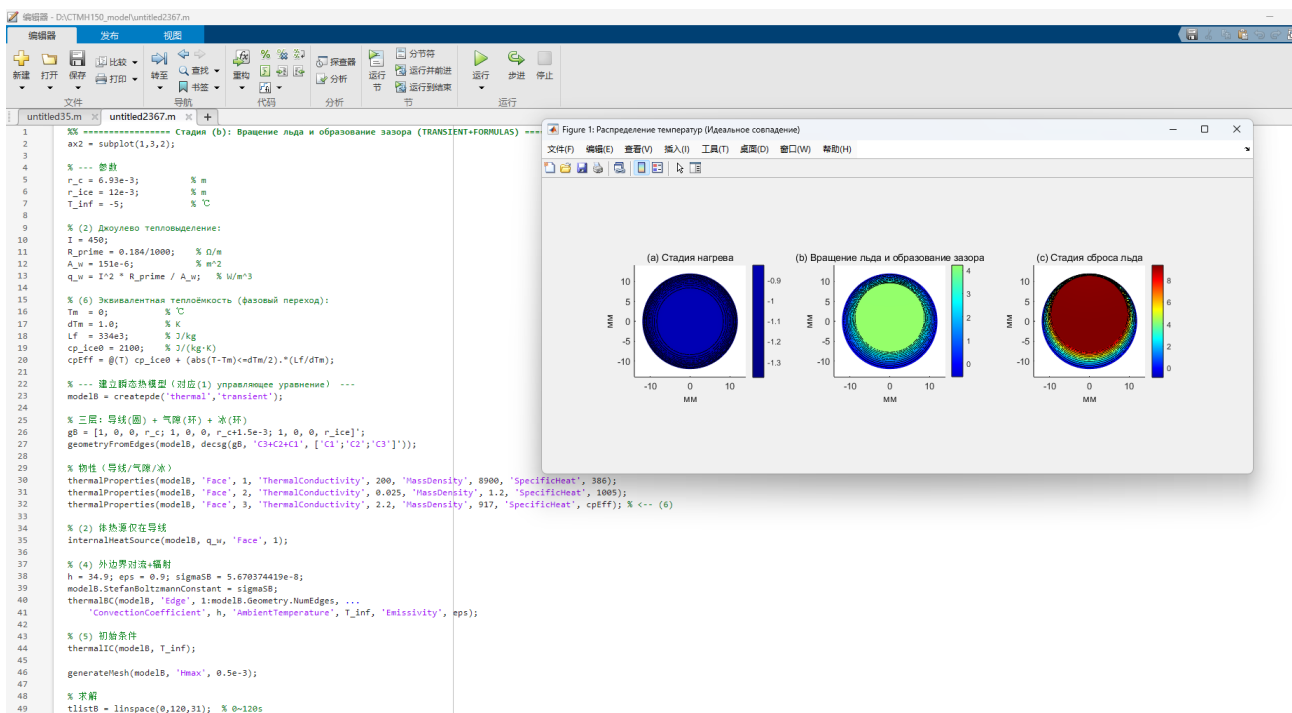


Рис. 4. Моделирование процесса электротеплового плавления гололеда в MATLAB

В области проводника задается объемный источник тепла, определяемый законом Джоуля — Ленца (3). В области льда фазовый переход учитывается методом эквивалентной теплоемкости, что позволяет описывать процесс плавления без явного отслеживания границы раздела фаз и обеспечивает численную устойчивость расчета.

На внешней границе расчетной области реализуются граничные условия радиационно-конвективного теплообмена (5), описывающие теплообмен с окружающей атмосферой. Начальное распределение температуры принимается равным температуре окружающей среды.

Численное решение задачи выполняется методом конечных элементов на неструктурированной сетке. Расчет температурного поля осуществляется во временной области с использованием встроенных алгоритмов интегрирования MATLAB.

### Эволюция температурного поля и стадии процесса плавления

Рассчитанные температурные поля, полученные на разработанной модели (рис. 5), отражают характерную динамику электротеплового плавления, обусловленную последовательным переносом тепла от проводника к внешним слоям системы [11].

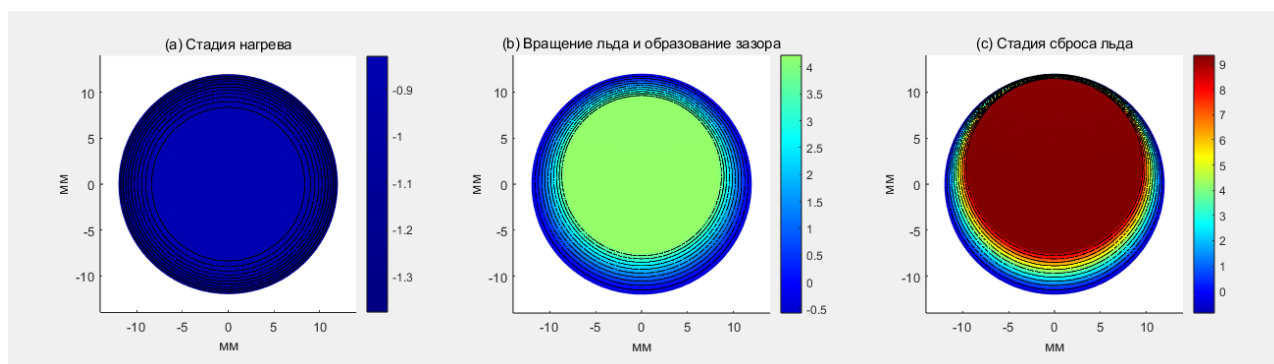


Рис. 5. Изменение температурного поля при электротепловом плавлении гололеда

На начальной стадии тепловыделение по закону Джоуля — Ленца в области проводника  $\Omega_3$  формирует максимум температуры в его поперечном сечении, тогда как воздушный зазор  $\Omega_2$  и ледяная оболочка  $\Omega_1$  сохраняют пониженную температуру вследствие их суммарного теплового сопротивления. Распределение температур носит преимущественно радиальный характер.

По мере нагрева усиливается температурный градиент на границе раздела, что интенсифицирует теплопередачу через многослойную систему «проводник — зазор — лед». Сгущение изотерм вблизи поверхности проводника свидетельствует о доминирующей роли межслойного теплового сопротивления.

При достижении внутренней поверхностью льда температуры фазового перехода инициируется плавление со стороны проводника, тогда как внешняя поверхность остается охлаждаемой радиационно-конвективным теплообменом. Возникающая радиальная температурная стратификация отражает неравномерность теплового отклика и определяет кинетику последующего удаления льда.

## Заключение

В работе исследован электротепловой процесс плавления гололеда, который образуется на проводах контактной сети электрифицированных железных дорог из-за выпадения ледяного дождя. Рассмотрены особенности формирования ледяной оболочки и ее влияние на тепловые условия процесса плавления в многослойной системе «проводник — воздушный зазор — лед — окружающая среда».

Показано, что в условиях «влажного» роста геометрические особенности элементов цепной подвески способствуют формированию пространственно-несимметричной структуры обледенения. Такая морфология ледяной оболочки приводит к изменению граничных условий теплообмена и формированию неоднородного температурного поля при электротепловом нагреве проводника.

На основе разработанной нестационарной тепловой модели установлено, что процесс плавления ледяной оболочки характеризуется последовательным переносом тепла от проводника к внешним слоям системы и сопровождается формированием выраженной радиальной температурной стратификации. Образование воздушного зазора между проводником и ледяной оболочкой существенно изменяет тепловое сопротивление системы и определяет кинетику последующего разрушения ледяного слоя.

Полученные результаты позволяют уточнить физический механизм электротеплового плавления гололедных отложений на проводах контактной сети и могут быть использованы при анализе тепловых режимов противообледенительных мероприятий на электрифицированных железных дорогах.

Следует подчеркнуть, что эффективность плавильных режимов на протяженных участках контактной сети определяется не только теплофизическими характеристиками системы, но и электрическими параметрами тягового контура. В частности, существенное влияние могут оказывать распределение токов между элементами цепной подвески и реактивная составляющая полного сопротивления системы. Комплексный анализ указанных факторов, а также оценка возможностей применения средств динамической компенсации реактивной мощности требуют отдельного рассмотрения и являются предметом дальнейших исследований [11].

## Список источников

1. Бодров П. А., Попова Н. А. Эффективность противогололедных мероприятий на устройствах электроснабжения железных дорог // Инженерный вестник Дона. 2025. № 10 (130).
2. Способ подогрева проводов контактной подвески: патент № 2485656 С1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. № 2012111289/07 / Ефимов А. В., Паранин А. В., Ефимов Д. А.; заявитель ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения»; заявл. 23.03.2012; опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17.
3. Xing Jinhui. Optimization Research on Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

4. Богданова К.В. Методика и технические решения управляемого профилактического подогрева проводов контактной сети постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2024. 162 с.
5. Прогресс исследований в области технологии противообледенительной обработки контактной сети высокоскоростных железных дорог / Ц. Чен [и др.] // Журнал электротехники. 2025. Т. 20, №4. С. 452–464.
6. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н.П. Шакина [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. № 348. С. 130–161.
7. Guo Lei. Ice Mechanism and On-Line Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
8. Министерство железных дорог Китайской Народной Республики. Многожильные провода из меди и медных сплавов для электрифицированных железных дорог: ТВ/Т 3111–2017. Пекин: Китайское железнодорожное издательство, 2017.
9. Study on Mechanical Deicing Technology for Catenary / Gong Yansheng [et al.] // High Speed Railway Technology. 2018. Vol. 9, no. 1. Pp. 43–47.
10. Alexiades V., Solomon A. D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
11. Ли Июань, Викулов И.П. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 1.

Дата поступления: 01.04.2026

Решение о публикации: 10.05.2026

**Контактная информация:**

ЛИ Июань — аспирант; 1005458004@qq.com

ВИКУЛОВ Илья Павлович — кандидат техн. наук, доцент; i\_vikulov@mail.ru

## **Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System**

**Yiyuan Li, I. P. Vikulov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Li Yiyuan, Vikulov I. P.* Electrothermal Model of an AC Catenary and Mechanisms of Ice Melting under an Autotransformer Traction Power Supply System // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 73–85. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-73-85 (In Russian)

## Abstract

**Objective:** to develop an electrothermal model for melting ice accretions on the catenary system of an electrified railway under an autotransformer traction power supply system, taking into account non-uniform icing and the thermophysical properties of the multilayer system “conductor — air gap — ice — ambient environment”. **Methods:** to investigate the melting process, a two-dimensional transient thermal model of the cross-section of the “conductor — air gap — ice — ambient environment” system was developed. Heat sources were defined according to the Joule — Lenz law for a prescribed heating current, phase change was incorporated using the equivalent heat capacity method, and external heat losses were described by radiative-convective heat transfer. Numerical simulation of the temperature field was performed using the finite element method. **Results:** it was established that electrothermal melting of ice accretions leads to the formation of a non-uniform temperature field caused by sequential heat transfer from the conductor to the ice layer through the air gap. It was shown that geometric non-uniformity of icing modifies the heat-transfer boundary conditions and causes differences in the thermal response of the system elements, thereby determining the spatial characteristics and kinetics of the melting process. **Practical significance:** the developed model can be used to analyze thermal regimes for de-icing overhead wires and to evaluate the energy parameters of melting processes. The results obtained allow us to clarify the physical mechanism of electrothermal melting of ice deposits and can serve as a basis for further research into overhead wire de-icing processes.

**Keywords:** railway, catenary, autotransformer traction power supply system, ice accretion, non-uniform icing, finite element method

## References

1. Bodrov P.A., Popova N.A. Effektivnost' protivogolodnykh meropriyatiy na ustroystvakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Efficiency of Anti-Icing Measures on Railway Power Supply Facilities], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2025, no. 10 (130). (In Russian)
2. Efimov A.V., Paranin A.V., Efimov D.A. Sposob podogreva provodov kontaktnoi podveski [Method for Heating Contact Suspension Wires]. Patent RF no. 2485656 C1, IPC H02G 7/16. Application no. 2012111289/07, filed 23.03.2012, published 20.06.2013. Appl.: Ural State University of Railway Transport. Bull. no. 17. (In Russian)
3. Xing Jinhui. Optimization Research on Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation, Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2021.
4. Bogdanova K.V. Metodika i tekhnicheskie resheniya upravlyaemogo profilakticheskogo podogreva provodov kontaktnoi seti postoyannogo toka [Methodology and Technical Solutions for Controlled Preventive Heating of DC Contact Network Wires]: dis. ... PhD in Engineering, Samara, 2024, 162 p. (In Russian)
5. Chen C., et al. Progress issledovaniy v oblasti tekhnologii protivogolodnoi obrabotki kontaktnoi seti vysokoskorostnykh zheleznykh dorog [Research Progress in Anti-Icing Technology for High-Speed Railway Catenary], *Zhurnal elektrotekhniki [Journal of Electrical Engineering]*, 2025, vol. 20, no. 4, pp. 452–464. (In Russian)
6. Shakina N.P., et al. Obrazovanie i prognozirovanie zamerzayushchikh osadkov: obzor literatury i nekotorye novye rezul'taty [Formation and Forecasting of Freezing Precipitation: Literature Review and Some New Results], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo*

*tsentra Rossijskoj Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2012, no. 348, pp. 130–161. (In Russian)

7. Guo Lei. Ice Mechanism and On-Line Anti-Icing Technology for Catenary of Electrified Railway: Dissertation, Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2013.

8. Ministerstvo zheleznykh dorog Kitajskoj Narodnoj Respubliki. Mnogozhil'nye provoda iz medi i mednykh splavov dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Ministry of Railways of the People's Republic of China. Stranded Copper and Copper-Alloy Conductors for Electrified Railways: TB/T 3111-2017], Beijing, China Railway Publishing House, 2017. (In Russian)

9. Gong Yansheng, et al. Study on Mechanical Deicing Technology for Catenary. *High Speed Railway Technology*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 43–47.

10. Alexiades V., Solomon A.D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes, Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1993.

11. Li Yiyuan, Vikulov I.P. Razvitie tekhnologii bor'by s gololyodom na kontaktnoi seti zheleznykh dorog [Development of Ice Mitigation Technology for Railway Catenary], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2025, no. 1. (In Russian)

Received: April 01, 2026

Accepted: May 10, 2026

**Author's information:**

Yiyuan LI — Postgraduate Student; 1005458004@qq.com

Ilya P. VIKULOV — PhD in Engineering, Associate Professor; i\_vikulov@mail.ru