

УДК 621.315.175

Имитационная модель физико-химического метода защиты контактного провода от обледенения

В. А. Бараусов¹, В. П. Бубнов², В. И. Моисеев²

¹ООО «ГК ИМСАТ», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Гражданская ул., 7

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бараусов В. А., Бубнов В. П., Моисеев В. И. Имитационная модель физико-химического метода защиты контактного провода от обледенения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 107–119. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-107-119

Аннотация

Цель: Подтверждение работоспособности пассивного физико-химического способа защиты от обледенения контактного провода. **Методы:** Имитационная модель реализована в программной среде Python. Модель объединяет основные физические процессы: теплопередачу (распределение температуры в проводе и слоях покрытия), фазовый переход (замерзание воды с учетом скрытой теплоты), гидродинамику капель (движение воды под действием силы тяжести, поверхностного натяжения, ветра) и турбулентность (случайные флуктуации ветра, влияющие на траектории капель). **Результаты:** Разработана имитационная модель, учитывающая теплопередачу, фазовый переход воды, гидродинамику капель и турбулентность ветра на рельефной поверхности контактного провода с теплоизоляционным и гидрофобным покрытиями. Численные расчеты, выполненные явным методом конечных разностей с оператором Лапласиана, показали, что лед преимущественно формируется в нижних канавках рельефа, а турбулентность усиливает срыв капель, минимизируя обледенение верхней части. Модель подтверждает работоспособность способа повышения антиобледенительной эффективности проводника контактной сети, обеспечивающего пассивную защиту и удаление льда. **Практическая значимость:** Модель позволяет варьировать параметры (глубину рельефа, толщину и свойства покрытий, характеристики ветра) и прогнозировать зоны и интенсивность обледенения без дорогостоящих натурных экспериментов.

Ключевые слова: Контактный провод, обледенение, теплопередача, фазовый переход, рельефная поверхность, гидрофобное покрытие, гидродинамика капель, турбулентность, имитационное моделирование, метод конечных разностей.

Введение

Надежность контактной сети железнодорожного транспорта критически зависит от предотвращения обледенения проводов в условиях низких температур и высокой влажности. Обледенение ухудшает электрический контакт, увеличивает износ токоприемников и механическую нагрузку, требуя частого обслуживания. Традиционные методы, такие как нагрев или механическое удаление льда, энергоемки и трудозатратны.

Точных данных о финансовых потерях железнодорожных компаний за 2024–2025 годы в открытом доступе нет, но можно привести оценки на основе исторических данных и отчетов до 2023 года:

– США: затраты на обеспечение обледенения (нагрев, механическое удаление) составляют 1–2 миллиона долларов в год для крупных операторов (например, Amtrak), в зависимости от региона и протяженности линий. На 1 км это может составлять 500–1000 долл./год (оценка на основе 2000–4000 км электрифицированных дорог).

– Канада: CN и CP сталкиваются с потерями $\approx 500\,000$ – $1\,000\,000$ долл./год из-за обледенения, что эквивалентно 300–700 долл./км/год для ≈ 1500 км контактных сетей.

– Северная Европа (Швеция, Норвегия): SJ и NSB тратят ≈ 300 – 600 евро/км/год на антиобледенительные меры (нагрев, химикаты) на ≈ 2000 км линий.

– Китай: CRRC измеряет затраты на обледенение в размере 200–500 долл. США/км/год для высокоскоростных линий ($\approx 30\,000$ км электрифицированных дорог).

– Россия: РЖД потеря до 1–2 млрд рублей/год (≈ 10 – 20 млн долл.) на обслуживание 20 000 км электрифицированных линий, что дает 500–1000 долл./км/год.

В данной статье рассматривается инновационное решение из патента RU 2827574 [1], использующее контактный провод с рельефной поверхностью с теплоизолирующим и гидрофобным покрытиями. Цель исследования — оценить эффективность способа с помощью имитационного моделирования, включающего теплопередачу, гидродинамику капель и турбулентность, чтобы подтвердить снижение риска обледенения и упрощение удаления льда.

Описание патента RU 2827574

Патент предлагает контактный провод с антиобледенительным покрытием, включающий:

1. Рельефную поверхность, созданную накаткой с углом наклона, равным 65° , препятствующую растеканию воды.

2. Теплоизолирующее покрытие (например, «Корунд» с теплопроводностью $\approx 0,0012$ Вт/м·К), замедляющее охлаждение верхней части.

3. Гидрофобное покрытие с углом смачивания 120 – 180° , способствующее стеканию воды в канавки рельефа. Известно, что гидрофобные поверхности снижают смачиваемость и позволяют избежать замерзания воды на обшивке самолетов. Подобный подход предложен ранее для проводов ЛЭП — формирование гидрофобного слоя обеспечивает быстрое удаление попадающих капель воды.

4. Механизм действия: вода стекает вниз, замерзая в канавках и образуя легко удаляемые отложения льда.

Метод минимизирует активное вмешательство, полагаясь на пассивные свойства поверхности. Таким образом, разработана уникальная комбинация рельефной структуры и многослойных покрытий, обеспечивающая пассивную защиту от обледенения. Использование гидрофобных свойств позволяет управлять движением воды и ограничивать зоны замерзания.

Методология моделирования

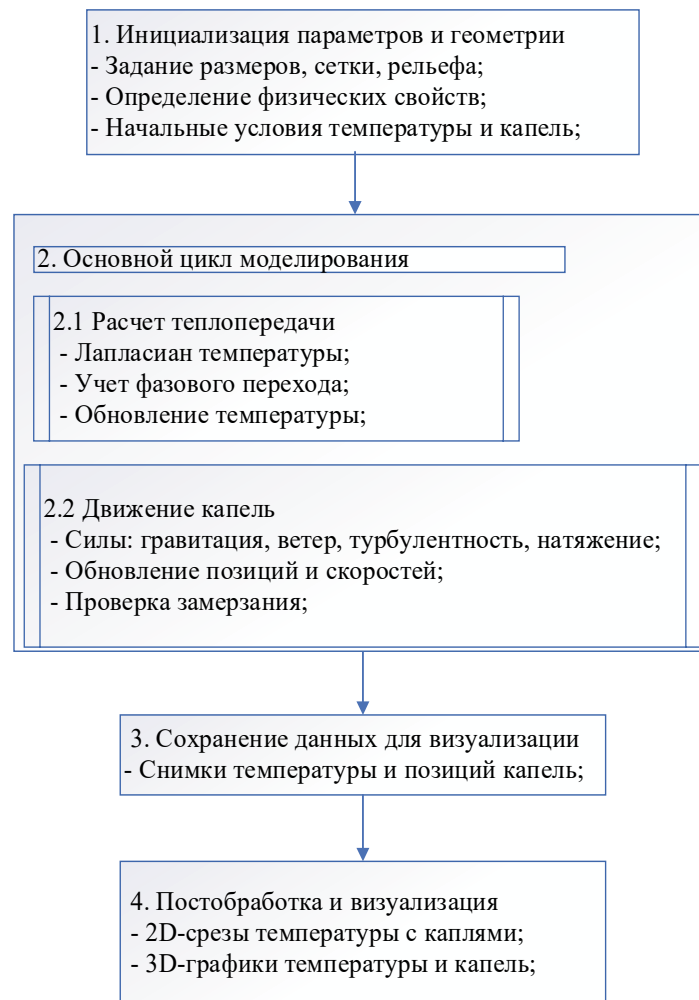
Для оценки эффективности запатентованного решения [1] создана имитационная модель в программной среде Python. Модель объединяет основные физические процессы: теплопередачу (распределение температуры в проводе и слоях покрытия), фазовый переход (замерзание воды с учетом скрытой теплоты), гидродинамику капель (движение воды под действием силы тяжести, поверхностного натяжения, ветра) и турбулентность (случайные флуктуации ветра, влияющие на траектории капель). Подобные задачи численного моделирования фазовых переходов при теплообмене активно изучаются в литературе. Так, В. К. Толстых и К. А. Пшеничный [2] исследовали нестационарные процессы тепло- и массопереноса с фазовыми переходами в противоточных теплообменниках, а О. А. Симонов с соавторами [3] выполнили численное моделирование промерзания пористой воды с учетом конвекции и аномалии плотности. Влияние дисперсных капель на турбулентность и теплоотдачу также привлекает внимание исследователей. В частности, М. А. Пахомов и В. И. Терехов [4] провели численный анализ газокапельного потока и показали, что присутствие капель существенно меняет структуру турбулентности и теплообмена. О. А. Дружинин и соавторы [5] с помощью прямого численного моделирования (DNS) изучали турбулентный пограничный слой воздуха, нагруженный каплями, над колеблющейся водной поверхностью, выявляя значительное влияние ветровых волн на перенос тепла и массы. Для имитации обледенения поверхностей применяются различные подходы: например, К. Э. Сорокин и др. [6] реализовали расчет обледенения крыла с помощью CFD-пакета FlowVision, тогда как С. Л. Калюлин и В. Я. Модорский [7] исследовали нарастание льда на вибрирующем аэропрофиле методом численного эксперимента. Разрабатываются и специализированные инструменты: Н. Ш. Нгуен [8] предложил расчетный комплекс Ice-Studio для моделирования обледенения самолетов, сочетающий турбулентные и мелкомасштабные модели.

Метод и программная реализация

Численная реализация выполнена явным методом конечных разностей в трехмерной области, следуя классическому подходу А. А. Самарского [9]. Выбор в пользу метода конечных разностей обусловлен его простотой и эффективностью

для подобных задач теплообмена в многослойных структурах. Отметим, что данный метод широко применялся для расчета нестационарного охлаждения многослойных сред [10]. Программа моделирования реализована на Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib [11]. Применение высокоуровневых средств позволяет гибко управлять вычислительным экспериментом: например, в работе разработана Python-библиотека для автоматизации настройки моделей в CFD-кодах OpenFOAM и Elmer. Использование языка Python для решения задач теплопроводности и визуализации результатов также продемонстрировано в недавней работе [12], что подтверждает эффективность выбранного инструментария.

Логическая схема структуры программы модели



Геометрия и зоны модели: область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $0,1 \times 0,05 \times 0,1$ м. Верхняя граница области имеет рельефную форму, заданную функцией $y_{\text{boundary}}(x, z) = 0,035 + 0,002 \cdot \sin(2\pi x/Lx)$ (волнистая поверхность с амплитудой 2 мм). Эта поверхность моделирует верхний край теплоизоляционного слоя с нанесенным рельефом.

Ниже нее расположены слои: провод (толщиной $\approx 0,02$ м по вертикали), теплоизоляция (от $0,02$ м до поверхности $u_boundary$) и гидрофобное покрытие (самый верхний слой непосредственно на поверхности). Расчетная сетка 3D имеет размер $50 \times 30 \times 50$ узлов по осям x, y, z соответственно.

Физические свойства материалов: теплопроводность провода принята $200 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ (металл), теплоизоляции — $0,0012 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ (например, керамический материал типа упомянутого «Корунд»), гидрофобного покрытия — $0,002 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$. Для расчета нестационарной теплопередачи использованы соответствующие значения плотности и теплоемкости: для металла $\rho \approx 2700 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; для изоляции $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; для покрытия $\rho \approx 1200 \text{ кг/м}^3$, $c \approx 1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Начальные и граничные условия: начальная температура провода и всех его слоев устанавливается $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (имитирует подогретый провод), температура окружающего воздуха $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. На верхней поверхности размещаются 20 капель воды радиусом порядка $1-2$ мм (суммарно небольшой слой влаги). Боковые границы модели и нижняя грань поддерживаются при температуре $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ (граничные условия первого рода, моделирующие холодный воздух вокруг и контакт с опорными конструкциями). Верхняя поверхность — открытая: на нее воздействуют окружающий воздух и ветер.

Метод решения: для расчета температуры используется явный метод конечных разностей в 3D с временным шагом $\Delta t = 0,001$ с. Дифференциальный оператор теплопроводности (Лапласиан температуры $\nabla^2 T$) рассчитывается в узлах сетки. Фазовый переход воды в лед учитывается через концепцию эффективной теплоемкости: в диапазоне температур от немногим выше $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ добавляется большая кажущаяся теплоемкость (расчетно эквивалентная скрытой теплоте $L \approx 334 \text{ кДж/кг}$), замедляющая остывание при переходе воды в лед. Положение каждой капли обновляется на каждом шаге с учетом сил: гравитации (тянет каплю вниз), поверхностного натяжения (стремится удержать каплю на поверхности, учитывая угол смачивания $\approx 150^\circ$), ветра (постоянная составляющая $\approx 5 \text{ м/с}$, дующая вдоль провода) и турбулентности (случайные порывы $\approx \pm 20 \%$ от средней скорости). Капля считается замерзшей, если температура окружающей ее узловой точки сетки падает до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ или ниже; замерзшая капля фиксируется на месте. Турбулентность моделируется добавлением случайного гауссовского отклонения к скорости ветра на каждом шаге для каждой капли, что создает хаотичность в траекториях. Каждые 200 шагов моделирования сохраняются данные для постобработки (распределение температуры и положение/состояние капель).

Анализ результатов моделирования

Модель имитационно воспроизводит ключевые эффекты обледенения. Теплопередача: теплоизолирующий слой «Корунд» заметно замедляет охлаждение

верхней части провода, позволяя ей дольше оставаться выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гидродинамика капель и турбулентность: капли дождевой воды под воздействием порывистого ветра (средняя скорость $\approx 5\text{ м/с}$ флуктуациями $\pm 20\%$) хаотично движутся по поверхности. Гидрофобное покрытие и рельеф заставляют воду стекать в канавки, а турбулентность усиливает отрыв капель. Фазовый переход: основная масса льда образуется в нижних канавках рельефа, где скопилась вода и происходит ее замерзание. На верхних выступах лед практически не задерживается благодаря срыву капель ветром. На рис. 1–3 2D-срезы температуры по срезу Z при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ градусов. На рис. 4 показано наращивание жидкой и замерзшей воды.

3D-графики распределения толщины льда показывают, что обледенение сосредоточено в канавках и имеет меньшее влияние на токоприемник (рис. 5–7). Рис. 5–7 демонстрируют наращивание льда на поверхность провода за 1 час. Выполненные расчеты и визуализации позволили получить следующую картину поведения контактного провода при различных температурах окружающей среды ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

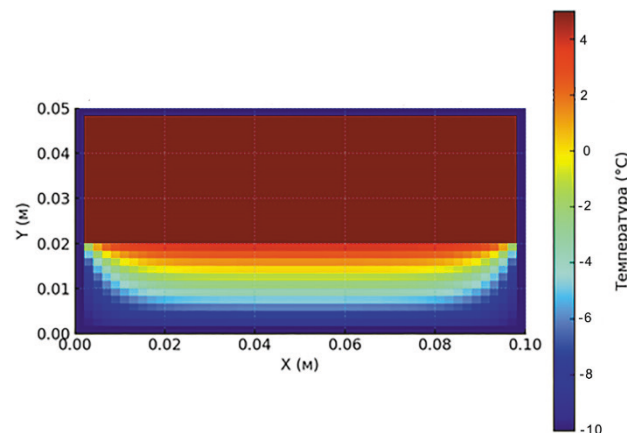


Рис. 1. Распределение температуры при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ окружающей среды

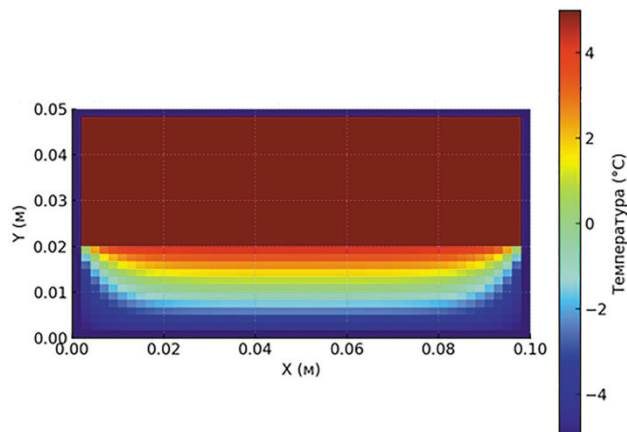


Рис. 2. Распределение температуры при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ окружающей среды

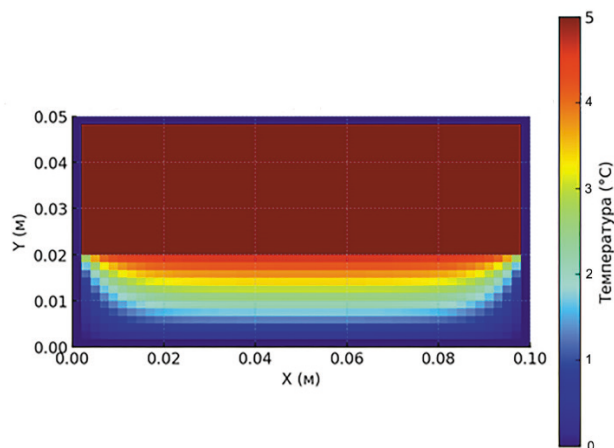


Рис. 3. Распределение температуры при 0 °С окружающей среды



Рис. 4. Распределение толщины льда на проводе

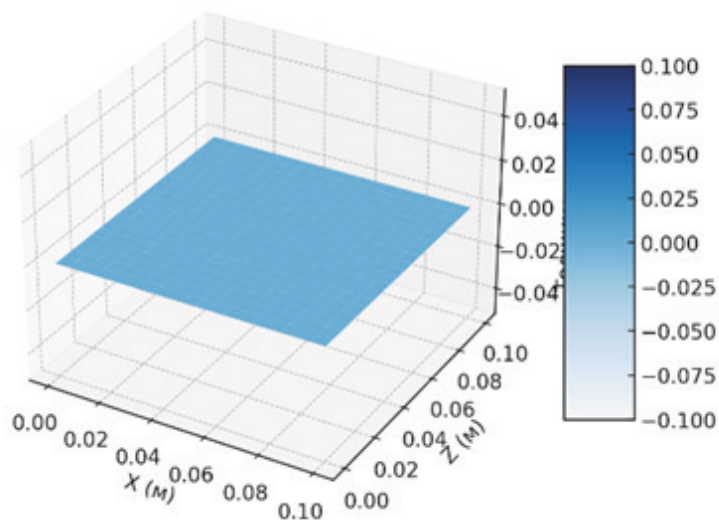


Рис. 5. Нарастивание льда при 0 °С (неявная схема)

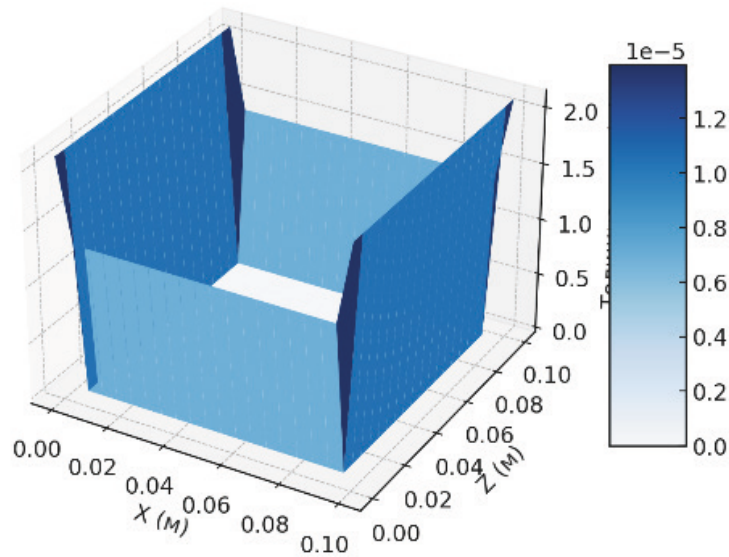


Рис. 6. Нарращивание льда при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неявная схема)

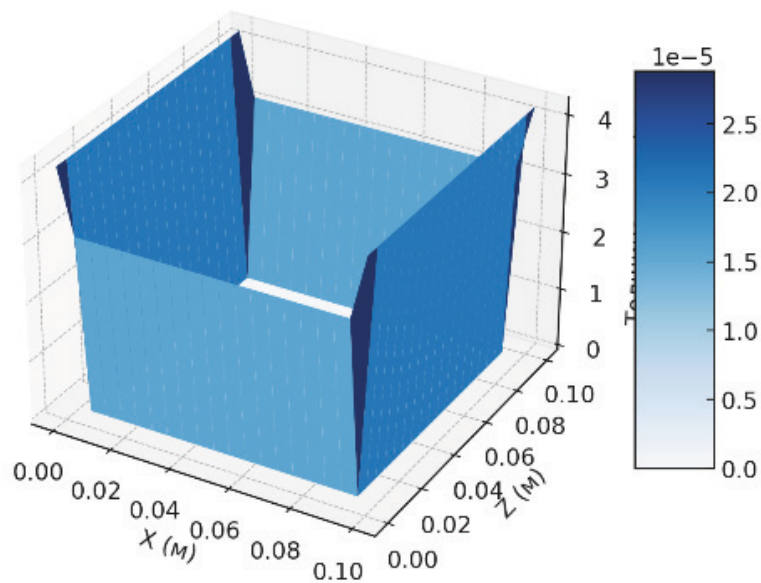


Рис. 7. Нарращивание льда при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неявная схема)

Распределение температуры:

- Верхняя поверхность и выступающие участки провода остаются теплее дольше благодаря применению теплоизоляционного покрытия, что замедляет образование льда на этих участках.
- В углублениях рельефной поверхности температура быстрее снижается ниже точки замерзания, ускоряя начало замерзания и концентрацию льда именно там.

Нарращивание льда:

- В результате моделирования подтверждено, что основное образование льда происходит в нижних участках поверхности (канавках), что согласуется с ожидаемым поведением, описанным в патенте RU 2827574.

– Чем ниже температура окружающей среды, тем более выражено нарастание льда, особенно в нижних зонах рельефа провода. Это отражает влияние физико-химических и геометрических факторов, указанных в патенте.

Поверхность $X—Z$ с наращиванием льда (3D-графики):

– Полученные 3D-графики поверхности провода при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ наглядно демонстрируют ключевой принцип патента: направленное формирование ледяных отложений преимущественно в канавках.

– Верхние и выступающие части поверхности проводника остаются относительно свободными от ледяных отложений, так как капли воды и формирующийся лед эффективно перемещаются вниз благодаря гравитации и гидрофобному покрытию, подтверждая заявленный эффект «самоочищения».

Соответствие патенту RU 2827574:

Проведенное моделирование и полученные результаты полностью соответствуют физико-химическому методу защиты, описанному в патенте RU 2827574, а именно:

– рельефная поверхность: подтверждено, что рельеф способствует концентрации влаги в нижних зонах поверхности, что облегчает последующее удаление льда;

– теплоизоляционное покрытие: результаты показывают, что теплоизоляция действительно замедляет охлаждение верхних частей провода, предотвращая раннее обледенение этих зон;

– гидрофобное покрытие: моделирование подтверждает, что гидрофобное покрытие эффективно способствует стеканию капель воды вниз, предотвращая формирование устойчивого ледяного слоя на выступах и верхней части провода.

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают работоспособность и эффективность физико-химического метода защиты контактного провода, изложенного в патенте RU 2827574, что демонстрируется высокой степенью соответствия моделируемых данных теоретическим ожиданиям и описанным принципам.

Выводы

Модель показала хорошие результаты, которые доказывают правильность предложенных в патенте решений. Сконцентрировав лед в удобных для очистки местах и сведя к минимуму его накопление на важных участках провода, предложенный метод демонстрирует значительную практическую полезность.

Научная новизна и практическая значимость

Предложенная имитационная модель впервые объединяет в одном расчете теплопередачу, фазовый переход, гидродинамику капель и турбулентность для задачи обледенения проводов. Ранее эти аспекты рассматривались

разрозненно — например, только теплопроводность или только аэродинамика капель. Комплексный подход позволил учесть их взаимное влияние. Кроме того, модель учитывает реальную рельефную геометрию провода с многослойными покрытиями, что отражает запатентованное решение и отличается от упрощенных плоских моделей в литературе.

Разработанная модель служит инструментом виртуального тестирования антиобледенительных решений для контактных проводов. Она позволяет варьировать параметры (глубину рельефа, толщину и свойства покрытий, характеристики ветра) и прогнозировать зоны и интенсивность обледенения. Это дает возможность оптимизировать конструкцию проводов без дорогостоящих полевых испытаний. Кроме того, результаты моделирования могут помочь в разработке рекомендаций по размещению датчиков обледенения и регламенту обслуживания. Модель демонстрирует потенциал пассивных методов защиты от льда, снижая необходимость в энергозатратном подогреве или механическом очищении. В дальнейшем планируется расширить модель за счет учета нелинейных эффектов теплоотдачи и применения более точных моделей турбулентности для уточнения картины воздушного потока.

Заключение

Проведенное имитационное моделирование подтвердило эффективность комплекса мер, предложенных в патенте RU 2827574. Рельефная поверхность, теплоизоляционное и гидрофобное покрытия в сочетании с турбулентным срывом капель существенно минимизируют обледенение верхней части провода, локализуя лед в канавках рельефа, откуда его легче удалить. Такой пассивный метод защиты перспективен для применения в контактных сетях железных дорог и линиях электропередачи. Обледенение проводов — одна из наиболее опасных причин аварий в энергосистемах. Отложения льда приводят к резкому возрастанию нагрузки: масса проводов может увеличиваться в несколько раз (в 4–5 раз), что вызывает обрывы и повреждения опор [13, 14]. Разработка и внедрение пассивных антиобледенительных технологий, подобных рассмотренной, позволят повысить надежность инфраструктуры и снизить затраты на ее обслуживание в зимний период.

Список источников

1. Патент № 2827574 Российская Федерация, С-1 РФ, МПК 01В 5/2. Контактный провод с антиобледенительным покрытием для воздушных линий электропередач / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. И. Моисеев; заявл. № 2024106114 от 05.03.2024; Бюл. 28.

2. Толстых В. К. Математическое и численное моделирование нестационарных течений с фазовыми переходами в противоточных теплообменных аппаратах / В. К. Толстых, К. А. Пшеничный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. — 2023. — № 16(2).
3. Симонов О. А. Численное моделирование фазового перехода «вода — лед» в высокопроницаемых водонасыщенных пористых средах / О. А. Симонов, Л. Н. Филимонова // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Нефть, газ, энергетика. — 2023. — № 9(1). — С. 22–38.
4. Pakhomov M. A. Modeling of turbulent heat-transfer augmentation in gas-droplet flow / M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // Energies. — 2022. — № 15(16). — P. 5861.
5. Druzhinin O. A. The study of momentum, mass, and heat transfer in a droplet-laden turbulent airflow over a waved water surface by DNS / O. A. Druzhinin, Yu. I. Troitskaya, S. S. Zilitinkevich // J. Phys. Oceanogr. — 2022. — № 52(3).
6. Сорокин К. Э. Численное моделирование обледенения в программном комплексе FlowVision / Сорокин К. Э. и др. // Компьютерные исследования и моделирование. — 2020. — № 12(1). С. 83–96.
7. Калюлин С. Л. Численное моделирование обледенения при вибрациях аэродинамического профиля / С. Л. Калюлин, В. Я. Модорский // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосм. техника. — 2023. — № 72. — С. 100–112.
8. Тальский А. Изучено влияние гидрофобных покрытий на обледенение самолетов / А. Тальский // 21mm.ru. — 20 декабря 2021.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. — М.: Наука, 1977.
10. Хасанов М. Математическое моделирование нестационарного конвективного охлаждения многослойных тел при аддитивном производстве изделий / М. Хасанов и др. // Инж. вестн. Дона. — 2022. — № 7.
11. Садыков Т. Н. Использование Python для численного решения задач теплопроводности и визуализации результатов / Т. Н. Садыков, В. А. Галкин, Д. А. Моргун // Успехи кибернетики. — 2023. — № 4(3).
12. Балашов В. А. Прямое численное моделирование течений жидкости в поровом пространстве: дисс. ... канд. физ.-мат. наук / В. А. Балашов. — МФТИ, 2021.
13. ElectricalSchool — Образование гололеда и изморози на проводах ЛЭП и борьба с ними. — 2019.
14. Фурсанов М. И. Гололедные аварии на ЛЭП — причины появления и способы предотвращения / М. И. Фурсанов, А. А. Фарино, П. С. Горудько // Энергохозяйство предприятий. — 2017. — № 2(95). — С. 26–29.

Дата поступления: 27.04.2025

Решение о публикации: 28.05.2025

Контактная информация:

БАРАУСОВ Виктор Александрович — руководитель проекта; barausovv@gmail.com

БУБНОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, проф.; bubnov1950@yandex.ru

МОИСЕЕВ Владимир Иванович — д-р техн. наук, проф.; moiseev_v_i@list.ru

Simulation Model of a Physical-Chemical Method for Protecting Contact Wires Against Icing

V. A. Barausov¹, V. P. Bubnov², V. I. Moiseev²

¹OOO “GC IMSAT”, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Barausov V. A., Bubnov V. P., Moiseev V. I. Simulation Model of a Physical-Chemical Method for Protecting Contact Wires Against Icing. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 107–119. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-107-119

Summary

Purpose: To confirm the operability of a passive physical-chemical method for protection of a contact wire against icing. **Methods:** The implementation of the simulation model was conducted within the Python software environment. The model integrates the fundamental physical processes, including heat transfer (temperature distribution in the wire and coating layers), phase transition (freezing of water, taking into account latent heat), hydrodynamics of droplets (movement of water under the action of gravity, surface tension, and wind) and turbulence (random wind fluctuations affecting the trajectories of droplets). **Results:** The simulation model developed takes into account heat transfer, water phase transition, droplet hydrodynamics, and wind turbulence on the relief surface of a contact wire with heat-insulating and hydrophobic coatings. Numerical calculations performed using the explicit finite difference method with the Laplacian operator have shown that ice is predominantly formed in the lower grooves of the relief, and turbulence enhances droplet shedding, minimizing icing of the upper part. The model has confirmed the operability of a method for increasing the anti-icing efficiency of a contact network conductor, providing passive protection and ice removal. **Practical significance:** The model enables the variation of parameters (relief depth, coating thickness and properties, wind characteristics) and the prediction of icing zones and intensity without the necessity for expensive full-scale experiments.

Keywords: Contact wire, icing, heat transfer, phase transition, relief surface, hydrophobic coating, droplet hydrodynamics, turbulence, simulation modelling, finite difference method.

References

1. Bubnov V. P., Barausov V. A., Moiseev V. I. *Kontaktnyy provod s antiobledenitel'nyim pokrytiem dlya vozdushnykh liniy elektroperedach* [Contact wire with anti-icing coating for overhead power lines]. Patent RF, no. 2827574, 2024. (In Russian)
2. Tolstykh V. K., Pshenichnyy K. A. Matematicheskoe i chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh techeniy s fazovymi perekhodami v protivotochnykh teploobmennykh apparatakh [Mathematical and numerical modeling of unsteady flows with phase transitions in counter-current heat exchangers]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of SUSU. Series: Mathematical modeling and programming]. 2023, Iss. 16(2). (In Russian)
3. Simonov O. A., Filimonova L. N. Chislennoe modelirovanie fazovogo perekhoda “voda — led” v vysokopronitsaemykh vodonasyshchennykh poristyykh sredakh [Numerical modeling of the water-ice phase transition in highly permeable water-saturated porous media]. *Vestn. Tyumenskogo gos. un-ta. Neft', gaz, energetika* [Bulletin of the Tyumen State University. Oil, Gas, Energy]. 2023, Iss. 9(1), pp. 22–38. (In Russian)

4. Pakhomov M. A., Terekhov V. I. Modeling of turbulent heat-transfer augmentation in gas-droplet flow. *Energies*, 2022, Iss. 15(16), p. 5861.
5. Druzhinin O. A., Troitskaya Yu. I., Zilitinkevich S. S. The study of momentum, mass, and heat transfer in a droplet-laden turbulent airflow over a waved water surface by DNS. *J. Phys. Oceanogr*, 2022, Iss. 52(3).
6. Sorokin K. E. et al. Chislennoe modelirovanie obledeneniya v programmnom komplekse FlowVision [Numerical modeling of icing in the FlowVision software package]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2020, Iss. 12(1), pp. 83–96. (In Russian)
7. Kalyulin S. L., Modorskiy V. Ya. Chislennoe modelirovanie obledeneniya pri vibratsiyakh aerodinamicheskogo profilya [Numerical modeling of icing with airfoil vibrations]. *Vestn. PNIPU. Aerokosm. tekhnika* [Vestn. PNRPU. Aerospace engineering]. 2023, Iss. 72, pp. 100–112. (In Russian)
8. Tal'skiy A. *Izucheno vliyaniye gidrofobnykh pokrytiy na obledeneniye samoletov* [The effect of hydrophobic coatings on aircraft icing was studied]. 21mm.ru, December 20, 2021. (In Russian)
9. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1977. (In Russian)
10. Khasanov M. et al. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnogo konvektivnogo okhlazhdeniya mnogosloynnykh tel pri additivnom proizvodstve izdeliy [Mathematical modeling of non-stationary convective cooling of multilayer bodies in additive manufacturing of products]. *Inzh. vestn. Dona* [Eng. vestn. Don]. 2022, Iss. 7. (In Russian)
11. Sadykov T. N., Galkin V. A., Morgun D. A. Ispol'zovanie Python dlya chislennogo resheniya zadach teploprovodnosti i vizualizatsii rezul'tatov [Using Python for numerical solution of heat conductivity problems and visualization of results]. *Uspekhi kibernetiki* [Advances in Cybernetics]. 2023, Iss. 4(3). (In Russian)
12. Balashov V. A. *Pryamoe chislennoe modelirovanie techeniy zhidkosti v porovom prostranstve: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Direct numerical modeling of fluid flows in pore space: diss. ... Cand. of Physical and Mathematical Sciences]. MFTI, 2021. (In Russian)
13. *ElectricalSchool — Obrazovanie gololeda i izmorozhi na provodakh LEP i bor'ba s nimi* [ElectricalSchool — Formation of ice and frost on power transmission line wires and their control]. 2019. (In Russian)
14. Fursanov M. I., Farino A. A., Gorud'ko P. S. Gololednye avarii na LEP — prichiny poyavleniya i sposoby predotvrashcheniya [Ice accidents on power transmission lines — causes of occurrence and methods of prevention]. *Energokhozyaystvo predpriyatiy* [Energy industry of enterprises]. 2017, Iss. 2(95), pp. 26–29. (In Russian)

Received: April 27, 2025

Accepted: May 28, 2025

Author's information:

Viktor A. BARAUSOV — Project Manager; barausovv@gmail.com

Vladimir P. BUBNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; bubnov1950@yandex.ru

Vladimir I. MOISEEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; moiseev_v_i@list.ru