

УДК 551.343.74

Анализ эффективности применения инновационного специального контактного провода с антиобледенительным покрытием

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

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

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. Анализ эффективности применения инновационного специального контактного провода с антиобледенительным покрытием // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 631–642. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-631-642

Аннотация

Цель: Определение эффективности применения специального контактного провода (СКП), обеспечивающего эксплуатацию подвижного состава в условиях капельного обледенения, наиболее интенсивного при температурах воздуха от 0 до -5 °С в условиях «мокрого снегопада» и ветра. **Принцип инновационного предложения.** Провод имеет специально выполненный рельеф верхней своей части, выполненный в заводских условиях накаткой и тонкое теплоизолирующее антиобледенительное покрытие с гидрофобными свойствами, сохраняющее форму рельефа. Рельеф и гидрофобные свойства СКП замедляют отвод выделяющейся теплоты кристаллизации осаждающихся на провод капель воды, ведущих к образованию на нем слоя льда, который быстро превращается в мощное ледоотложение, имеющее форму гололедно-снеговой «муфты». Атмосферная вода, оседающая на головку провода, накапливается на ней в виде крупных капель, которые срываются вниз еще до своего замерзания. Основная ее масса сбрасывается с СКП вниз до своего замерзания, а небольшая ее часть замерзает на нижней части провода, меняя форму ледоотложения. Вместо крупной и твердой гололедно-снеговой муфты, охватывающей провод со всех сторон, на проводе образуются «сосульки», имеющие малую площадь контакта с проводом. Они сравнительно легко удаляются механическими или тепловыми способами, а при сильных ветровых нагрузках, раскачивающих провода, отваливаются сами. **Результаты:** Проведен критический анализ способов борьбы с обледенением СКП с точки зрения эффективности; выполнен финансовый расчет первоначальных затрат, эксплуатационных расходов, экономического эффекта и срока окупаемости. Приводится пример расчета эффективности применения инновационного подхода по использованию СКП, который включает: создание при помощи накатки рельефной поверхности верхней части провода в районе его головки и канавки, нанесение тонкого двухслойного покрытия, сохраняющего рельеф поверхности. Первый, внутренний, слой покрытия является тепловой изоляцией, второй, наружный, обеспечивает несмачиваемость (гидрофобность) поверхности провода. Делается вывод об эффективности применения инновационного СКП, препятствующего отводу теплоты фазового превращения воды в лед вовнутрь провода, разрушающего пленку воды на поверхности провода с образованием крупных поверхностных капель, скатывающихся вниз до своего замерзания.

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

Введение

Обледенение контактных проводов и воздушных линий электропередачи (ЛЭП) представляет серьезную проблему для электротранспортных сетей в зимний период. На проводах контактной сети и ЛЭП могут образовываться мощные отложения льда в виде прочной и тяжелой «гололедно-снеговой муфты», охватывающей провод со всех сторон [1, 2]. Муфты, имеющие толщину стенки свыше 20 см и массу в десятки килограмм, резко увеличивают и вес провода, и ветровую нагрузку, действующую на него. При их суммарном воздействии нередко случаи обрыва проводов и обрушения опор ЛЭП [3].

Таблица 1. Ориентировочные потери от обледенения

Страна/регион	Протяженность электрифицированных путей (тыс. км)	Ориентировочные потери от обледенения (млн долларов США в год)
США	~1 (Amtrak, Северо-Восточный коридор)	10–50
Северная Европа	~25 (Швеция, Норвегия, Финляндия)	22–55 (20–50 млн евро, пересчет по курсу ~1,1 USD/EUR)
Китай	~159 (из них 45 — высокоскоростные)	100–1000
Россия	~54	20–50

Примечания:

США: указана протяженность только основных электрифицированных линий Amtrak, так как грузовая сеть почти не электрифицирована. Потери различаются в зависимости от суровости зимы.

Северная Европа: суммарная протяженность Швеции (~15 тыс. км), Финляндии (~5,5 тыс. км) и Норвегии (~4,5 тыс. км). Потери распределены между различными вариантами оптимизации инфраструктуры.

Китай: огромная сеть включает высокоскоростные и обычные линии. Сюда входят как прямые последствия, так и затраты на профилактику.

Россия: протяженность электрифицированных путей, по данным РЖД. Потери зависят от погодных условий в регионах.

Эти аварийные ситуации сопровождаются большими экономическими потерями — восстановление линий после обледенения занимает в десятки раз больше времени, чем устранение обычных аварий [4]. В табл. 1 представлены данные о протяженности электрифицированных железнодорожных путей и ориентировочных финансовых потерях от обледенения контактных проводов в долларах США [5–7]. Протяженность указана на основе последних имеющихся данных (в основном за 2023 год). А обозначенные потери — это оценка, полученная на основе анализа, так как точные цифры за 2024–2025 годы пока не опубликованы.

Таким образом, железные дороги Северной Европы и России остро нуждаются в эффективных мерах борьбы с обледенением контактного провода. Патент RU 2827574 [8] предлагает инновационное решение этой проблемы — специальный контактный провод (СКП) с теплоизолирующим и гидрофобным защитным покрытием, наносимым на верхнюю поверхность провода, имеющую специфический рельеф, созданный накаткой. Суть метода заключается в том, что оседающая вода долго сохраняется в жидком виде на верхней части провода в виде постоянно подпитываемых извне «поверхностных капель», которые по мере увеличения своей массы сбрасываются с провода вниз еще до полного своего замерзания. Благодаря такому подходу решение по патенту позволяет предотвращать образование гололедно-снеговых муфт, а не только удалять их постфактум с большими затратами труда и тепловой энергии.

По оценкам специалистов, эффективность такого подхода существенно превосходит возможности традиционных методов, при этом отсутствует потребность в громоздком оборудовании или больших энергозатратах. Ниже проводится сравнительный анализ данного запатен-

тованного решения и традиционных способов защиты контактных проводов от обледенения.

Сравнение вариантов защиты от обледенения

Традиционные методы борьбы с обледенением [3, 4, 9]

Электротермический нагрев проводов. Широко применяется метод плавки льда с помощью пропускания повышенного тока через провод. Нагрев позволяет растопить наледь, восстанавливая проводимость. Этот способ эффективен, но требует отключения линии от потребителей на время работ и значительных энергозатрат. В зависимости от толщины льда и сечения провода процесс может занимать до 100 минут на участок. Кроме того, требуется установка специального оборудования (например, высокоомощных источников тока), что сопряжено с большими первоначальными затратами. Таким образом, нагрев проводов обеспечивает удаление льда, но дорого обходится и не предотвращает нового обледенения.

Механическая очистка. Этот метод предполагает сбивание льда с проводов при помощи специальных приспособлений или вручную (например, длинными шестами или скребками). Механическое воздействие может удалять наледь (риски гололеда устраняются после факта), однако имеет ряд недостатков. Для работы требуется доступ к проводам, что нарушает движение поездов или работу линии на время очистки. Сбивание льда — это очень продолжительный и трудоемкий процесс, требующий бригад рабочих, и практически не реализуем на больших протяженных участках контактной сети. Кроме того, ударные воздействия могут со временем повреждать провод. В итоге механическую очистку применяют разве что на коротких отрезках или при

чрезвычайных ситуациях, а основной борьбой с гололедом остается нагрев.

Антиобледенительные реагенты. Физико-химический подход предусматривает нанесение на провод специальных составов (реагентов), препятствующих образованию льда. В железнодорожной практике используют, например, гидрофобные смазки или растворы, образующие водоотталкивающую пленку на проводе. Такой профилактический метод действительно предотвращает или замедляет обледенение проводов. Пример — во Франции перед заморозками контактные провода покрывают особой гидрофобной биоразлагаемой смазкой, уменьшающей прилипание воды. Достоинство метода — отсутствие необходимости отключать линию и мгновенный эффект. Однако покрытие реагентами имеет ограниченный срок действия: со временем смазка стирается токоприемниками и воздействием погоды. Регулярно наносить состав на сотни километров проводов затруднительно и дорого. Таким образом, антиобледенительные жидкости эффективны, но требуют частого обновления, что снижает их практичность на больших сетях.

Гидрофобные покрытия контактного провода (решение по патенту RU 2827574):

Контактный провод с водоотталкивающим (гидрофобным) [3, 10, 11] покрытием объединяет преимущества физико-химического метода с долговечностью стационарного решения. Существуют разные типы таких покрытий: наноструктурированные, полимерные, кремний-органические и комбинированные системы. Их общий принцип — создать на поверхности провода слой, к которому не прилипают вода и лед. Ниже приведены характеристики каждого типа:

Наноструктурированные покрытия [5, 11–13]. Представляют собой сверхгидрофобные слои с микро-нанорельефом. За счет структуры и специальных материалов достигается очень боль-

шой краевой угол смачивания ($>150^\circ$), капли воды скатываются с провода, прежде чем замерзнуть. Такой «лотос-эффект» резко снижает образование наледи: влага не задерживается, а уже образовавшийся лед имеет минимальную площадь сцепления. Наноструктурированные покрытия наиболее эффективны в предотвращении гололеда, однако их недостаток — потенциально меньшая стойкость к износу (рыхлый нанорельеф может стираться при длительном трении токоприемника).

Полимерные покрытия. Специальные лакокрасочные или пленочные материалы, образующие гладкий водоотталкивающий слой на проводе. Как правило, это полимеры на основе нефтепродуктов (краски, лаки). Полимерное покрытие не такое сверхгидрофобное, как наноструктурированное, но более устойчивое к механическому воздействию. Оно создает барьер между металлом и окружающей средой, уменьшая смачивание и одновременно защищая металл от коррозии. Преимущество — относительно простое нанесение и обновление (путем окрашивания провода), недостаток — умеренное снижение льдообразования (может задерживать наледь при длительном обливании дождем).

Кремнийорганические (силиконовые) покрытия. Включают органосиликатные или силиконовые составы, способные химически связаться с поверхностью металла, образуя прочную гидрофобную пленку. Такие покрытия часто тонкие и прозрачные, «сорбируются» на поверхности провода. Они придают длительный водоотталкивающий эффект и терпимы к температурным перепадам. Силиконовые составы эластичны, поэтому хорошо выдерживают вибрации и температурное расширение провода без растрескивания. Их гидрофобность может быть средней (как у полимеров) либо усиленной добавками. Важное достоинство — простота обновления: можно нанести новый слой поверх старого по мере износа.

Комбинированные покрытия. Совмещают элементы вышеперечисленных типов для достижения оптимального результата. Например, пространственный подход — наносить двухслойное покрытие: сначала прочный полимерный грунт для адгезии к металлу, а поверх него наноструктурированный слой (например, с наночастицами кремнезема или фторполимера). Такой комбинированный материал устойчив к истиранию и одновременно обладает супергидрофобностью. Другой вариант — вводить в полимерную матрицу кремнийорганические добавки. Комбинированные решения позволяют достичь длительного эффекта: покрытие держится месяцы и годы, обеспечивая защиту ото льда на весь зимний сезон и дольше. В результате провод с таким покрытием длительное время не обледеневает, сохраняя свои свойства даже при многократных циклах намокания и замерзания.

Эффективность методов. Традиционные методы в целом борются с уже образовавшимся льдом, тогда как гидрофобные покрытия призваны предотвратить его образование с самого начала. Электрообогрев и механическое сбивание позволяют восстановить работу линии, но не исключают повторного обледенения при новых осадках. К тому же при сильных осадках лед может нарастать быстрее, чем успевает таять или сбиваться. Антиобледенительные реагенты и гидрофобные покрытия работают превентивно: они значительно уменьшают или вовсе исключают появление гололеда на проводе. Сверхгидрофобные поверхности показали свою высокую эффективность в испытаниях — образование льда снижается настолько, что традиционные методы могут не понадобиться. При экстремальных условиях (длительный ледяной дождь) наледь все же может появляться даже на покрытом проводе, но ее слой тоньше и держится слабо. Такой лед легко отделяется под действием ветра или вибраций либо счищается токоприемником.

без повреждений. В итоге провод с покрытием значительно реже нуждается в обслуживании: по сравнению с обычным проводом количество случаев обледенения и связанных с ними задержек сокращается многократно.

Финансовый анализ

Первоначальные затраты (капиталовложения)

Традиционный провод (без покрытия): стоимость базового контактного провода (например, медного) составляет условно ~1,5 млн руб/км (включая материал и монтаж) [14]. Дополнительных расходов на инфраструктуру нет, если не устанавливать системы обогрева.

Нагрев проводов (традиционный метод): требует вложений в оборудование — например, установку нагревательного кабеля (системы типа BlueWire) вдоль провода. Это повышает капитальные затраты примерно на 30–40% (до ~2 млн руб/км в нашем расчете). Преимущество — система интегрируется в контактную сеть и готова к работе автоматически, но изначально это значительные инвестиции. Кроме того, сам по себе метод нагрева проводов считается неэффективным расходом энергии, что отражается на экономической целесообразности.

Механическая очистка (традиционный метод): специальные снегоочистительные поезда, скребки на токоприемниках или бригады для сбивания льда не требуют модернизации провода, поэтому стартовые затраты минимальны. Достаточно стандартного провода (~1,5 млн руб/км). Инфраструктурных изменений нет, но потребуются техника (например, вышки, спецвагоны) и обучение персонала — эти расходы обычно относятся к эксплуатационным.

Антиобледенительные реагенты: нанесение химических реагентов (гликоли, солевые растворы и пр.) не требует специального про-

вода — стартовые затраты ограничиваются оборудованием для нанесения (например, насосы, разбрызгиватели) и невелики — ~50 тыс. руб/км. Основные затраты приходятся на регулярную закупку реагентов, т. е. на эксплуатацию.

Провод с кремнийорганическим покрытием: органосиликоновые (силиконовые) покрытия также увеличивают цену провода (до 15–20%). Итоговая стоимость ~1,7 млн руб/км. Технология нанесения может быть чуть сложнее, но в целом установка такого провода не требует специальных изменений в контактной сети.

Провод с наноструктурированным покрытием: нанотекстурированные супергидрофобные слои (например, на основе SiO₂ или наночастиц оксидов) наиболее технологически сложны, повышая базовую цену ощутимо (на ~20–25%, до ~1,8 млн руб/км). Дороже исходных материалов, и необходим контроль качества наноструктуры. Тем не менее монтаж остается штатным.

Комбинированное решение (по патенту RU 2827574): включает рельефную обработку и многослойное покрытие (теплоизолирующее плюс гидрофобное). Ожидаемо, это самый дорогой вариант провода — оценочно на 30–35% дороже обычного (~2,0 млн руб/км) из-за дополнительной обработки поверхности и материалов. Первоначально требуются заметные инвестиции, однако цель — практически исключить обледенение пассивными средствами.

Эксплуатационные расходы

Традиционный провод, механическая очистка: основные расходы — регулярное удаление наледи вручную или техникой. Каждой зимой приходится задействовать бригады; предположим ~5 выездов/сезон по ~40 тыс. руб/км каждый (топливо, труд, амортизация), итого ~200 тыс. руб/км в год. Кроме того, частое обледенение и его удаление приводят к износу контактного провода (при ударах, скребках) — это сокращает его срок службы

и вызывает внеплановые ремонты. Действительно, механическое удаление льда трудоемко и «механически нагружает контактный провод», что со временем может потребовать досрочной замены провода или ремонта креплений.

Нагрев проводов: эксплуатационные затраты включают электроэнергию для обогрева и обслуживание системы. Преимущество в том, что отпадает необходимость в частых выездах бригад. Энергозатраты на расплавление льда относительно невелики — нагрев 1 км провода в сильный гололед может потребовать десятки кВт·ч энергии (условно ~50 тыс. руб/год на км при нескольких циклах обогрева). Это существенно ниже расходов на ручную очистку. Таким образом, ежегодные затраты снижаются примерно до ~50–70 тыс. руб/км. Снижается и износ оборудования: устранение льда нагревом предотвращает искрение и износ графитовых вставок токоприемника. Однако следует учитывать техническое обслуживание самой системы обогрева и возможные потери энергии.

Антиобледенительные реагенты: требуют регулярного применения в преддверии или во время обледенения. Например, при ~5 обработках за зиму расход реагента и труд может обходиться (~30 тыс. руб/км за сезон). В год это ~100–150 тыс. руб/км. Данный метод менее трудозатратен, чем физическое сбивание льда, однако химикаты нужно закупать постоянно. Возможны побочные эффекты: реагенты могут вызывать коррозию или загрязнение окружающей среды, поэтому применение ограничено.

Полимерное гидрофобное покрытие: со временем покрытие утрачивает свойства под воздействием среды (ультрафиолет, абразивная пыль, циклы замерзания) и требует обновления. По данным исследований, некоторые органические гидрофобные покрытия начинают терять антиобледенительные свойства уже после ~20 циклов обледенения/оттаивания. Предположительно, что

полимерное покрытие нужно обновлять примерно раз в 1–2 года. Если покров наносится как лак/краска, затраты на его обновление можно оценить в ~100 тыс. руб/км (с учетом материалов и работы) каждые 2 года, то есть ~50 тыс. руб/км в год. В остальном такой провод почти не требует специальных работ по удалению льда — наледь либо не образуется, либо сходит сама при небольших колебаниях/ветре благодаря низкому сцеплению. В очень сильный гололед возможно частичное обледенение, но его объем значительно меньше, поэтому удаление может не потребоваться вовсе или понадобится реже. Предположительно, ежегодные расходы составят около ~120 тыс. руб/км (учет обновления покрытия + редких очисток), что гораздо ниже исходных ~200 тыс. руб. при отсутствии покрытия.

Кремнийорганическое покрытие (например, силиконовое): характеризуется высокой гидрофобностью и устойчивостью. Многие силиконовые покрытия служат 3+ года на открытом воздухе. Допустим, обновление потребуется раз в ~3 года (частота может быть меньше благодаря стойкости к УФ и температуре). Затраты на возобновление — порядка ~200 тыс. руб/км раз в 3 года (около 67 тыс. руб/год). Благодаря гидрофобности наледь либо не образуется, либо образуется рыхлой и тонкой. Расходы на ликвидацию наледи минимальны (может потребоваться эпизодическая очистка при экстремальных условиях, скажем, 1 раз в год ~30–40 тыс. руб.). Итого ежегодные расходы составляют порядка ~100 тыс. руб/км.

Наноструктурированное покрытие: такие покрытия (например, нанокompозиты с оксидами, фторсодержащие слои) обладают супергидрофобностью и повышенной прочностью. Тем не менее со временем загрязнение или износ могут снизить их эффективность, поэтому требуется профилактика. Предположительно, обновление наноструктурированного слоя (или нанесение нового) нужно раз в 3–5 лет. Условно заложим

обновление раз в 3 года (~150 тыс. руб., или 50 тыс. руб. в год). Оставшиеся эксплуатационные расходы незначительны — подобно другим покрытиям наледь задерживается слабо и отваливается сама. Возможно, лишь изредка придется сбивать отдельные отложения в аномальных случаях. Оценочно ежегодно понадобится ~80 тыс. руб/км (большая часть — резерв на восстановление покрытия).

Комбинированное решение (рельеф + теплоизоляция + гидрофобность): патентованное решение ориентировано на минимизацию активного вмешательства. Большая часть воды стекает, а та, что замерзает, — в нижней части провода, откуда лед легко отпадает. Это значит, что плановые работы по удалению льда практически не требуются. Эксплуатационные затраты сводятся к мониторингу состояния покрытия и его обновлению раз в несколько лет. Поскольку присутствует и теплоизолирующий слой, и рельеф, даже частичная потеря гидрофобности не приведет сразу к сильному обледенению — система обладает «защитой от сбоев». Можно предположить обновление гидрофобного слоя раз в ~5 лет (~300 тыс. руб., т. е. ~60 тыс. руб/год). Итого ежегодные расходы оцениваются в ~60 тыс. руб/км, что в 3–4 раза ниже, чем при отсутствии такого покрытия. К тому же отсутствуют расходы на регулярную очистку и связанные простои — контактная сеть остается работоспособной.

Экономический эффект

Сокращение затрат на устранение наледи: все гидрофобные решения существенно снижают расходы на борьбу с гололедом. Для сравнения: традиционный подход (без покрытия) ~200 тыс. руб/км в год, а с покрытием — десятки тысяч. Отсутствие обледенения позволяет снизить нагрузку на контактный провод. Во-первых, не происходит накопления тяжелого льда, способного деформировать провод или опоры.

Во-вторых, значительно реже применяются механические методы очистки (скребки, удары), которые сами по себе изнашивают провод. Например, при использовании обогрева BlueWire отмечено снижение механического износа как провода, так и токоприемников. Гидрофобные покрытия аналогично защищают провод от лишних воздействий. Это позволяет продлить межремонтные интервалы и срок службы контактного провода на несколько лет. Если обычный провод служит, допустим, ~25 лет, то с защитным покрытием срок может увеличиться на 20–30% (меньше аварийных замен, меньше коррозии и усталости металла). Продление службы — скрытый экономический эффект: откладывается дорогостоящая замена провода.

Снижение аварийности и ремонтов: гололед — частая причина обрывов и аварий в контактной сети. Налепший лед может привести к обрыву провода или падению конструкций, вызывая дорогие аварийные ремонты и простои в движении. Применение покрытий резко снижает вероятность таких инцидентов. Повышается надежность электроснабжения транспорта зимой, сокращается число аварийных выездов. Меньше внеплановых отключений — меньше штрафов и потерь от сбоев движения. Эти косвенные выгоды трудно напрямую учесть в расчете, но они значительно улучшают экономику проекта.

Срок окупаемости

Методика расчета: окупаемость определяем как время, за которое накопленная экономия на эксплуатационных расходах компенсирует повышенные первоначальные инвестиции. Базой сравнения служит традиционный провод с механической очисткой (как наиболее распространенный метод борьбы с наледью). Для каждого варианта рассчитана примерная разница в первоначальной стоимости и ежегодной экономии, по которой

Таблица 2. Гидрофобные покрытия в сравнении с традиционными методами борьбы с обледенением

Решение	Первоначальные затраты (тыс. руб/км)	Ежегодные эксплуатационные затраты (тыс. руб/км·год)	Оценочная экономия по сравнению с обычным проводом, тыс. руб/год	Окупаемость (лет)	Примечания
Без покрытия (базовый)	~1500 (обычный провод)	~200 (ручная очистка наледи)	—	Базовый	Регулярное обледенение, расходы на очистку высоки
Нагрев провода (кабелем)	~2000 (провод + система)	~50 (энергия, техобслуживание)	~150	~3,3	Снижает трудозатраты, минимизирует наледь; продлевает жизнь оборудования
Антиобледенительный реагент	~1550 (оборуд. + провод)	~150 (реагент + работа)	~50	~1	Низкие капвложения, но частое применение; возможна коррозия, экология под вопросом.
Гидрофобное покрытие — полимерное	~1650 (провод с покрытием)	~120 (обновление + редкая очистка)	~80	~2	Фторполимеры, тефлон; окупаемость быстрая, требуется обновление покрытия ~1 раз в 1–2 года
Гидрофобное покрытие — кремний-органическое	~1700	~100	~100	~2	Силиконовые составы; долговечнее, реже обновление (~1 раз в 3 года), высокая водоотталкиваемость
Гидрофобное покрытие — наноструктурированное	~1800	~80	~120	~2,5	Супергидрофобная наноповерхность; лед не прилипает, покрытие работает ~3–5 лет до обновления
Комбинированное решение (патент RU 2827574)	~2000	~60	~140	~3,5	Рельеф + теплоизоляция + гидрофобность; минимизирует образование льда, обслуживание сводится к мониторингу покрытия

вычислен срок окупаемости. Результаты сведены в табл. 2.

Анализ результатов: из табл. 2 видно, что все рассмотренные гидрофобные покрытия окупаются достаточно быстро — в пределах нескольких лет. Наиболее «дешевые» решения (например, полимерное покрытие) дают быструю отдачу (~2 лет) благодаря низкой доплате за провод и существенной экономии на очистке. Более дорогие наноструктурированные и комбинированные покрытия окупаются чуть дольше (2–4 года), но все равно в пределах разумного срока службы. Для сравнения добав-

лены традиционные методы: обогрев окупается за ~3 года за счет экономии на ручном труде, а химическая обработка имеет малый срок окупаемости (~1 год) с точки зрения затрат, хотя ограничивается экологическими факторами. Таким образом, внедрение гидрофобных покрытий по патенту RU 2827574 и аналогичных технологий подтверждает свою эффективность: несмотря на более высокую цену провода, резкое снижение расходов на борьбу с наледью и продление ресурса оборудования позволяют вернуть инвестиции через несколько зимних сезонов эксплуатации.

Выводы и рекомендации

Анализ показывает, что технология, описанная в патенте RU 2827574 (контактный провод с гидрофобным покрытием), является рентабельной и перспективной для борьбы с обледенением. По сравнению с традиционными методами, инновационный провод обеспечивает превентивную защиту от гололеда, практически исключая образование наледи на контактной сети. Это приводит к значительному снижению эксплуатационных затрат (меньше энергии на обогрев, реже требуется очистка, меньше аварий), а также к повышению надежности работы железнодорожного транспорта в зимний период. Хотя стоимость такого провода выше обычного, совокупная экономия средств на обслуживании и аварийных ремонтах делает его внедрение экономически оправданным уже в среднесрочной перспективе.

Рекомендуется поэтапно внедрять контактные провода с противообледенительным покрытием на железных дорогах в регионах с частыми гололедами — в первую очередь на Севере Европы и в северных/сибирских районах России. Именно там выгода будет наибольшей, учитывая суровые зимние условия. Для начала целесообразно оснастить таким проводом наиболее критичные участки: линии, от которых зависит движение на крупных направлениях, горные перевалы, зоны с историей частых обрывов из-за льда. Опыт энергетической отрасли (например, испытания проводов с нанопокрытием во ФГУП «Крыловский ГНЦ» по заказу Камского кабельного завода) [14, 15] уже подтвердил эффективность и надежность подобных решений. Это дает основания полагать, что и на железнодорожной контактной сети результат будет положительным.

Для железных дорог Северной Европы (например, Финляндия, Швеция, Норвегия) также актуально внедрение данной технологии. В этих странах уже применяются различные меры против

гололеда — от обогрева до специальных поездов-деобледенителей, и гидрофобные покрытия могут стать отличным дополнением или альтернативой таким подходам. Их использование позволит обеспечить более стабильное энергоснабжение электроподвижного состава в зимний период без перерывов на очистку проводов. Снижение числа обрывов контактного провода напрямую повысит пунктуальность движения поездов, что важно для пассажирского сообщения и грузовых цепочек.

В заключение внедрение технологии патента RU 2827574 рекомендуется как технически и экономически эффективное. Рентабельность подтверждается сокращением издержек и окупаемостью вложений в разумные сроки, а надежность — испытаниями и практическим использованием гидрофобных покрытий в электроэнергетике. Железнодорожным администрациям целесообразно включить данный инновационный провод в программы модернизации контактной сети на территориях с холодным климатом. Это инвестиция, которая окупится не только финансово, но и повышенной безопасностью и бесперебойной работой транспорта зимой.

Список источников

1. Паскарь И. Н. Борьба с обледенением проводов на линиях электропередач / И. Н. Паскарь, А. А. Чернослив, О. Н. Скворцов. — Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. — 145 с.
2. Санакулов А. Х. Совершенствование работы токоприемников подвижного состава с контактной сетью / А. Х. Санакулов, А. Н. Сафин // Проектирование и исследование технических систем: межвузовский научный сборник. — Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. — Вып. № 2(16). — С. 61–67.
3. Васильев Ю. А. Предотвращение и ликвидация гололедных образований в распределительных сетях ОАО «Сетевая компания» / Ю. А. Васильев, С. А. Гребнев. — Казань: ОАО «Сетевая компания», 2012. — 76 с.

4. Дьяков А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях / А. Ф. Дьяков. — Петригорск: РП «Южэнергонадзор», 2000. — 284 с.
 5. European Railway Agency. Best Practices for Winter Resilience in Rail Infrastructure: Technical Report ERA/2020/TR/01. Brussels, 2020. — 45 p.
 6. SNCF. How We Meet the Challenges of Extreme Cold. — 2021. — URL: <https://www.groupe-sncf.com/en/group/behind-the-scenes/traffic-flows/extreme-cold> (дата обращения: 15.05.2025).
 7. Neftegaz.RU. Провода с антигололедным покрытием — надежная защита ЛЭП зимой. — URL: <https://neftgaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/761508-provoda-s-antigololednym-pokrytiem-nadezhnaya-zashchita-lep-zimoy/?ysclid=me06i2bti532923411> (дата обращения: 12.01.2024).
 8. 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.
 9. КузСТУ. Методы борьбы с гололедом на проводах ЛЭП: сб. материалов. — Кемерово: КузГТУ, 2015. — 89 с.
 10. Zhang Y. Advanced Anti-Icing Coatings for Railway Contact Wires: A Review of Hydrophobic and Photothermal Materials / Y. Zhang, X. Wang, H. Li // *Materials & Design*. — 2023. — Vol. 225. — Pp. 111–123. — DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111123.
 11. Wang L. Durable Superhydrophobic Coatings for Ice Prevention in Extreme Climates: Experimental and Economic Analysis / L. Wang, T. Chen, R. Zhang // *Cold Regions Science and Technology*. — 2021. — Vol. 180. — Pp. 103–115.
 12. Бойнович Л. Б. Методы борьбы с обледенением ЛЭП: перспективы и преимущества новых супергидрофобных покрытий / Л. Б. Бойнович, А. М. Емельянов // *Журнал ЭЛЕКТРО*. — 2011. — № 6.
 13. Buitenhuis J. Reduction of ice adhesion on nanostructured and nanoscale slippery surfaces / J. Buitenhuis, L. Xu, M. E. H. van der Meer, C. G. J. Koenders et al. // *Applied Surface Science*. — 2023. — Vol. 630. — Art. 157570.
 14. ГОСТ 839—2019. Провода для воздушных линий электропередачи. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019. — 32 с.
 15. Камский кабель. Новые компактированные провода АСП с антиобледенительным покрытием: пресс-релиз. — Пермь, 2021. — 5 с.
- Дата поступления: 29.05.2025
Решение о публикации: 14.07.2025
- 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

Efficient Performance of an Innovative Contact Wire with an Anti-Icing Coating

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

¹ООО “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. Efficient Performance of an Innovative Contact Wire with an Anti-Icing Coating // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 631-642. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-631-642

Summary

Purpose: To ascertain the efficiency of special contact wire application (SCW) in ensuring the rolling stock operational capacity in conditions of drip icing. Drip icing is most intense at air temperatures ranging from 0 to –5 °C during periods of “wet snowfall” and wind. **The principle of the innovative proposal.** The contact wire features a specially designed relief in its upper section, which is factory-rolled and has a thin, heat-insulating anti-icing coating with hydrophobic properties that preserves the shape of the relief. The SCW special relief and hydrophobic properties slow down the removal of the released heat from crystallization of water droplets deposited on the wire. This results in the formation of an ice layer, which rapidly transforms into a substantial ice deposit, forming an icy-snow “clutch”. Atmospheric water that settles on the wire head accumulates on it in the form of large droplets that break down even before they freeze. The majority of the water is thrown downwards from the SCW before it freezes, and a small part of it freezes on the lower section of the wire, changing the form of ice deposition. Instead of a large and solid ice-snow clutch covering the wire from all sides, “icicles” with a small area of contact with the wire are formed on the wire. They can be removed relatively easily, mechanically or chemically, but in the event of strong winds causing the wires to sway, they will fall off. **Results:** A thorough review of ice control methods has been conducted from the perspective of efficiency, incorporating a financial analysis of initial costs, operating expenses, economic impact, and the payback period. The efficiency of an innovative approach to the application of SCW has been demonstrated, encompassing the creation of a raised surface relief on the upper section of the wire in the area of its head and groove, by applying a thin, two-layer coating that preserves the surface relief. The primary function of the initial inner coating is to provide thermal insulation, while the secondary coating serves to ensure the non-wettability (hydrophobicity) of the wire surface. The innovative SCW has been proven to be effective in preventing the heat removal in the phase of water crystallization on the wire surface and breaking the water film on the wire surface to form large droplets that roll down before the freezing point.

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

References

1. Paskar' I. N., Chernosliv A. A., Skvortsov O. N. *Bor'ba s obledeneniem provodov na liniyakh elektroperekhodov* [Ice prevention of wires on power transmission lines]. Kemerovo: KuzSTU Publ., 2015, 145 p. (In Russian)
2. Sanakulov A. Kh., Safin A. N. *Sovershenstvovanie raboty tokopriemnikov podvizhnogo sostava s kontaktnoi set'iu* [Improving the performance of current collectors of

rolling stock with the contact network]. *Proektirovanie i issledovanie tekhnicheskikh sistem: mezhvuzovskii nauchnyi sbornik* [Design and research of technical systems: interuniversity scientific collection]. Naberezhnye Chelny: INEKA Publ., 2010, Iss. 2(16), pp. 61–67. (In Russian)

3. Vasil'ev Iu. A., Grebnev S. A. *Predotvrashchenie i likvidatsiya golodnykh obrazovaniy v raspredelitel'nykh setyakh OAO “Setevaya kompaniya”* [Prevention and

elimination of ice formations in distribution networks of JSC “Grid Company”]. Kazan: Setevaya kompaniia Publ., 2012, 76 p. (In Russian)

4. D'iakov A. F. *Predotvrashchenie i likvidatsiia goloednykh avarii v elektricheskikh setiakh* [Prevention and elimination of ice accidents in electrical networks]. Pyatigorsk: RP “Yuzhenergotekhnadzor” Publ., 2000, 284 p. (In Russian)

5. European Railway Agency. Best Practices for Winter Resilience in Rail Infrastructure: Technical Report ERA/2020/TR/01. Brussels, 2020. 45 p.

6. SNCF. How We Meet the Challenges of Extreme Cold. 2021. Available at: <https://www.groupe-sncf.com/en/group/behind-the-scenes/traffic-flows/extreme-cold> (accessed: May 15, 2025).

7. *Provoda s antigoleдным pokrytiem — nadezhnaia zashchita LEP zimoi* [Wires with anti-icing coating — reliable protection of power lines in winter]. Available at: <https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/761508-provoda-s-antigoleдным-pokrytiem-nadezhnaya-zashchita-lep-zimoy/?ysclid=me06i2tbt532923411> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)

8. Bubnov V. P., Barausov V. A., Moiseev V. I. *Kontaktnyi provod s antiobledenitel'nyim pokrytiem dlya vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [Contact wire with anti-icing coating for overhead power lines]. Patent RF, no. 2827574, 2024.

9. KuzSTU. *Metody bor'by s goloedom na provodakh LEP: sb. materialov* [Methods of fighting ice on power lines: collection of materials]. Kemerovo: KuzSTU Publ., 2015. 89 p. (In Russian)

10. Zhang Y., Wang X., Li H. Advanced Anti-Icing Coatings for Railway Contact Wires: A Review of Hydrophobic and Photothermal Materials. *Materials & Design*, 2023, vol. 225, pp. 111–123. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111123.

11. Wang L., Chen T., Zhang R. Durable Superhydrophobic Coatings for Ice Prevention in Extreme Climates: Experimental and Economic Analysis. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, vol. 180, pp. 103–115.

12. Boinovich L. B., Emel'ianov A. M. *Metody bor'by s obledenением LEP: perspektivy i preimushchestva novykh supergidrofobnykh pokrytii* [Methods of fighting icing of power transmission lines: prospects and advantages of new superhydrophobic coatings]. *Zhurnal ELEKTRO* [Journal ELECTRO]. Moscow, 2011, Iss. 6. (In Russian)

13. Buitenhuis J., Xu L., Meer van der M. E. H., Koenders C. G. J. et al. Reduction of ice adhesion on nanostructured and nanoscale slippery surfaces. *Applied Surface Science*. Amsterdam: Elsevier, 2023, vol. 630, art. 157570.

14. *GOST 839—2019. Provoda dlia vozdukhnykh liniĭ elektroperedachi. Tekhnicheskie usloviia* [GOST 839—2019. Wires for overhead power transmission lines. Technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 32 p. (In Russian)

15. *Kamskii kabel'. Novye kompaktirovannye provoda ASp s antiobledenitel'nyim pokrytiem: press-reliz* [Kamskii kabel'. New compacted wires ASp with anti-icing coating: press release]. Perm, 2021, 5 p. (In Russian)

Received: May 29, 2025

Accepted: July 14, 2025

Author's information:

Viktor Al. BARAUSOV — Project Manager;

barausovv@gmail.com

Vladimir Pet. BUBNOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; bubnov1950@yandex.ru

Vladimir Iv. MOISEEV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; moiseev_v_i@list.ru