Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.29.35

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/214-232

Ф. А. Габыл-Манапова[1], А. Б. Бекбаев[2],
Р. Ш. Абитаева[3], А. Ф. Ишангалиева[4]
[1,2,3]Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К.Сатпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]Средняя общеобразовательная школа имени М-С. Бабажанова,
Республика Казахстан, Западно-Казахстанская обл.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1281-1302
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3520-1710
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0431-9559
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3719-7908
*e-mail: fariza2909@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЕГО ВЛИЯНИЯ

В этой статье разбирается, как на линиях электропередачи образуется лед и почему это мешает нормальной работе энергосистемы. Автор описывает саму физику процесса: как именно нарастает наледь и как она влияет на состояние проводов. Главными причинами здесь выступают погода, влажность и ветер – именно от них зависит, насколько быстро обледенеют линии и ухудшатся их характеристики.

Также в тексте анализируются разные способы следить за состоянием проводов. Рассматриваются как обычные визуальные осмотры и камеры с распознаванием образов, так и специальные датчики. Отдельное внимание уделено оптоволоконным технологиям. Они работают точно, не боятся электромагнитных помех и позволяют контролировать ситуацию на очень больших расстояниях.

В итоге автор делает вывод, что существующие методы мониторинга нужно улучшать, а сами конструкции ЛЭП делать более прочными, чтобы они лучше справлялись с гололедом и не выходили из строя. Перспективы дальнейших исследований направлены на оптимизацию существующих методов диагностики и повышение безопасности эксплуатации ВЛ в условиях интенсивного

обледенения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередачи в условиях неблагоприятных климатических воздействий. Практическая значимость работы заключается в возможности повышения надежности энергоснабжения и снижения эксплуатационных рисков.

Ключевые слова: Воздушные линии электропередачи, гололед, надежность, климатические факторы, мониторинг, диагностика, ледовые нагрузки, пляска проводов.

Введение

Обледенение воздушных линий электропередачи (ВЛ) представляет собой одну из главных проблем для энергетических систем, особенно в регионах с резко континентальным климатом, таких как Казахстан. Это явление может привести к серьезным авариям, нарушению работы энергетических систем и экономическим потерям. Образование льда на проводах изменяет аэродинамические характеристики, увеличивает механическую нагрузку на конструкции, что в свою очередь может вызывать сбои в электроснабжении. Поэтому актуальность исследования процессов гололёдообразования на ВЛ, разработки методов мониторинга и диагностики данного явления невозможно переоценить.

В данной статье рассматриваются физические основы процессов обледенения воздушных линий, влияние климатических факторов на надежность ВЛ, а также методы диагностики и мониторинга гололёдообразования. В данной работе предлагается способ расчета того, как сильно обмерзают провода, на основе существующих теорий и тестов. При расчетах учитываются температура, влажность и скорость ветра. Также рассматриваются современные способы слежения за состоянием линий – как с помощью датчиков на самих проводах, так и дистанционно. Описано, как лед влияет на прочность и электропроводность линий, и даны советы, как сделать работу электросетей надежнее в таких условиях.

Материалы и методы

Почему на линиях электропередачи образуется лед?

Проблема обледенения известна еще с 1920-х годов. Лед портит аэродинамику проводов и часто приводит к поломкам всей линии. Именно поэтому изучению нарастания льда уделяют так много внимания [1]. Когда на проводах происходит обледенение, изменение формы профиля приводит к снижению проводимости и увеличению сопротивления, что может привести к авариям с летальным исходом [2]. Исторические исследования

обледенения неоднократно описывались в литературе [1; 2; 3]. На ранних этапах исследования обледенения проводились в основном эксперименты, направленные на понимание физики обледенения и разработку методов борьбы с обледенением [4]. В 1970-х годах началось развитие численного моделирования обледенения воздушных линии. Целью моделирования было снижение затрат и риска несчастных случаев в процессе сертификации устройств для предотвращения обледенения. С тех пор для создания более точных инструментов моделирования обледенения использовались экспериментальные и численные исследования.

Экспериментальные и теоретические подходы

Для регионов с морозами лед на проводах и линиях связи – одна из главных проблем при проектировании. Если опоры ломаются под весом льда, это приносит огромные убытки и мешает работе энергетиков. С другой стороны, делать опоры слишком массивными «с запасом» очень дорого, что сильно увеличивает стоимость строительства. Поэтому важно иметь оценки интенсивности обледенения и максимальных ледовых нагрузок в различных условиях, чтобы оптимизировать конструкцию сооружений. Влияние температуры воздуха на гололедную нагрузку оказывается незначительным в течение первых 24 часов обледенения в типичных условиях сухого роста, но оно важно при длительном обледенении. Конечная гололедная нагрузка может как увеличиваться, так и уменьшаться с понижением температуры воздуха в зависимости от других атмосферных условий и продолжительности обледенения. Эти результаты во многом объясняют трудности, возникающие при оценке образования гололедных нагрузок простыми методами, использующими регулярно измеряемые метеорологические параметры [5].

Эти оценки могут быть получены путем сбора длительных временных рядов наблюдений за нагрузками на лед, и таким образом для некоторых мест были получены довольно обширные статистические данные (Руднева, 1973). Однако в большинстве случаев это требует слишком много времени и трудоемкости для практических целей, например, при проектировании линии электропередачи. Поэтому необходимо использовать косвенные методы, которые связывают интенсивность образования льда с метеорологическими условиями. Такие методы были разработаны эмпирическим путем путем одновременных измерений накопления льда и метеорологических параметров (McKay and Thompson, 1969; Барановский и Либерсбах, 1977; Ахти и Макконен, 1982), с приемлемыми результатами. Однако обобщение этих результатов затруднено из-за взаимной корреляции факторов, влияющих на рост льда, и их вариабельности в зависимости от местности. Кроме того, большое количество переменных, связанных

с обледенением, некоторые из которых трудно измерить, затрудняет интерпретацию эмпирических наблюдений. Теоретическое моделирование необходимо для выявления основных физических процессов, которые контролируют скорость обледенения проводов.

Модель имитирует оседание капель переохлажденной воды на проводе, например, на потолочном проводнике. Предполагается, что капли воды движутся горизонтально в воздушном потоке в условиях тумана или облачности. Образование льда при ледяном дожде при низких скоростях ветра и образование снега не рассматриваются, поскольку моделирование образования мокрого снега включает в себя содержание снега в воздухе и аэродинамику снежинок, которые плохо известны, а ледяной дождь при низких скоростях ветра может привести к образованию сосулек. Ледяной дождь при низкой скорости ветра и налипание снега могут вызвать обледенение проводов, но в большинстве регионов осадки редко сопровождаются обледенением (Ахти и Макконен, 1982). Кристаллы льда, смешанные с каплями переохлажденной воды, могут незначительно способствовать росту льда (Эшворт и Найт, 1978), но это не учитывается в модели, поскольку количество кристаллов льда в приземных условиях обычно невелико. Пористость льда не учитывается, поскольку жидкая вода, по-видимому, не впитывается в лед при небольших концентрациях жидкой воды и скоростях вращения, характерных для обледенения проволоки в естественных условиях (Lesins et al., 1980). В модели предполагается направление ветра, перпендикулярное проводам [6; 7].

На цилиндрическом объекте интенсивность обледенения I, т.е. скорость увеличения массы льда, деленная на часть площади поверхности ледяного покрова, обращенную к ветру, может быть рассчитана из

$$I = \frac{2}{\pi} E n \vartheta w, \tag{1}$$

где E – эффективность сбора, т.е. отношение массового расхода падающих капель воды к массовому расходу, который ощущался бы на поверхности, если бы капли не отклонялись воздушным потоком, n – доля замерзания, т. е. отношение интенсивности обледенения к массовому расходу падающих капель воды; ϑ – скорость ветра, а w – содержание жидкой воды в воздухе. Величины I, E и n в уравнении (1) – это общие значения для проволоки (или отложения льда). В модели предполагается, что слой льда сохраняет круглую форму в процессе обледенения из-за медленного вращения, которое он испытывает под действием силы тяжести,

как только слой становится асимметричным, и используется уравнение (1). На проводах линий электропередачи наросшие ледяные отложения иногда имеют эллиптическую форму, особенно вблизи опорных конструкций, где предотвращается перекручивание проводов. Однако среднее отклонение от круглой формы невелико, как показывают наблюдения на горе Вашингтон, штат Нью-Гэмпшир (Howe, 1982), и данные из СССР (более 2500 наблюдений), (Драневич, 1971): Отношение малой оси к большой на реальных проводниках линий электропередачи составляет в среднем 0,88 для глазури и 0,82 для инея [8].

Сначала определяется эффективность сбора, основанная на среднем объемном диаметре распределения капель. Расчет основан на численном решении Ленгмюра и Блоджетт для безразмерного уравнения движения капли в воздушном потоке:

$$K\frac{dv_d'}{d_\tau} = \frac{c_d Re_r}{24}(v_a' - v_d') \tag{2}$$

где τ – время, c_d – оэффициент лобового сопротивления капель.

Параметр инерции можно найти с формулой:

$$K = \frac{\rho_w \vartheta d^2}{9\mu D} \tag{3}$$

$$Re_r = \frac{\rho_a d|v_a - v_d|}{\mu} \tag{4}$$

число Рейнольдса капли основано на относительной скорости капли, $v_a' = \frac{v_a}{\vartheta}$ – безразмерная скорость воздуха, а $v_d' = \frac{v_d}{\vartheta}$ – безразмерная скорость капли. Здесь d – диаметр капли, ρ_w – плотность воды, μ – абсолютная вязкость воздуха, D – диаметр цилиндра, а ρ_a – плотность воздуха. Вектор скорости воздуха v_a' получен из уравнения для потенциального обтекания цилиндра, а коэффициент лобового сопротивления c_d как функция Re – из экспериментальных данных Ленгмюра и Блоджетт. Решение уравнения формула (2) затем может быть использована для расчета траекторий капель, на основе которых определяется общая эффективность сбора E_m. Результаты этого расчета приведены Ленгмюром и Блоджетт.

Увеличение диаметра D в процессе обледенения оказывает следующие зависящие от времени эффекты на увеличение ледовой нагрузки:

• Интенсивность обледенения I уменьшается при сухом росте из-за снижения эффективности сбора E.

• Интенсивность обледенения I уменьшается по мере роста влажности из-за уменьшения коэффициента теплообмена h и доли замерзания.

• Площадь сбора и площадь теплообмена увеличиваются.

• Плотность нарастающего льда уменьшается при сухом росте из-за снижения скорости падения капель и температуры поверхности льда. Это увеличивает скорость роста диаметра в зависимости от интенсивности обледенения, влияя на вышеупомянутые процессы, зависящие от времени [9; 10].

Влияние климатических факторов на надёжность и потери электроэнергии

Климатические факторы, влияющие на обледенение

Обеспечение бесперебойного электроснабжения – одна из главных целей для компаний, отвечающих за его поставку и эксплуатацию. Исследования показывают, что воздушные линии (ВЛ) – это самое слабое место в электросетях. В Казахстане их протяженность превышает 90 тысяч километров, а в России – около 460 тысяч. Авария на такой линии может оставить без света целые области. Поскольку линии напряжением 110–500 кВ крайне важны для энергосистемы Казахстана, любые поломки на них обходятся очень дорого.

Надежность линий зависит от многих причин: климата, конструкции, возраста линии и типа используемых проводов. Чтобы сети работали стабильнее, нужно изучать статистику прошлых аварий и понимать, из-за чего они случились. Если сравнивать реальные поломки с прогнозами, можно понять, насколько хорошо работают наши расчеты и принятые меры.

Потери энергии и риски аварий

На рисунке 1 показано, как распределяются причины аварий.



Рисунок 1 – Основные причины частых
аварий на воздушных линиях.

Анализ показывает, что надежность линий зависит от погоды (грозы, лед, ветер), нарушений режима работы, плохого обслуживания или просто износа оборудования. Также мешают животные, птицы, посторонние предметы, вандализм и ошибки людей – как при строительстве, так и при эксплуатации.

Энергосистема – это сложная сеть, где поломка в одном месте может вызвать цепную реакцию. Природные катаклизмы вроде ураганов или сильных морозов чаще всего становятся причиной таких сбоев. Очень важно уметь предсказывать аварии, особенно в тех местах, которые важны для безопасности всей страны. Провода страдают больше всего, так как они находятся под открытым небом и принимают на себя все удары погоды.

Таблица 1 – Статистика поломок ВЛ в зависимости от типа неисправности и напряжения

Класс напряжения, кВ	Количество отключений ВЛ по причинам, %							
	Внешние эффекты	Климатические эффекты			Дефекты			Необъяснимые причины
		молния	ветер-замерзание	другие	использование	структуры	монтаж	
35	16,9	22,7	20,2	1,9	8,2	0,8	1,5	27,7
110	27,0	14,2	16,0	1,8	9,5	2,0	3,1	28,4
220	19,4	15,3	19,1	1,3	7,6	5,7	4,0	27,6
330	20,3	9,3	15,6	1,9	5,9	3,5	4,9	38,5
500	15,1	15,1	16,5	1,0	11,8	3,2	1,2	36,0
750	9,0	15,5	18,5	-	8,8	5,4	4,4	39,4

Данные показывают, что причина аварии почти не зависит от того, какое напряжение в линии. Чтобы повысить надежность, нужно глубже изучать, почему именно выходят из строя отдельные детали.

В Казахстане активно строят новые электростанции и тянут новые линии. Это важно для страны, но климат создает большие сложности. Сильный ветер, скачки температуры и гололед постоянно угрожают работе сетей.

Особенно опасны интенсивное обледенение и «пляска проводов». Из-за этого провода слабеют, хуже проводят ток, а энергия теряется впустую. В худшем случае случаются аварии. Проблема наиболее актуальна для севера, востока и центра Казахстана, где мороз и ветер создают идеальные условия для намерзания льда.

Гололед на проводах и опорах появляется, когда переохлажденные капли воды оседают на металле. В зависимости от погоды это может быть плотный лед, изморозь или иней.

Наличие ледяного слоя приводит к увеличению массы провода, росту натяжения и изгибающих нагрузок, изменению профиля провисания и повышению аэродинамической восприимчивости к колебаниям.

Методы диагностики и мониторинга гололёдообразования

Бесконтактные и контактные методы мониторинга

В настоящее время методы мониторинга образования льда на воздушных линиях в основном делятся на две категории: бесконтактные и основанные на контакте подходы. Бесконтактные методы измерения в основном включают

ручное наблюдение и распознавание изображений. Ручное наблюдение обычно включает визуальный осмотр и взвешивание собранных образцов льда для получения такой информации, как форма льда. Например первые исследователи использовали две камеры для получения снимков ледяного покрова и анализа формы и толщины наростов льда на ледяном покрове. А в других исследованиях применена регрессия опорных векторов для оптимизации параметров Canny (применяемого при обработке изображений), улучшения распознавания кромок на изображениях срастания льда и облегчения определения толщины льда на сложных фоновых изображениях. Однако эти методы не в состоянии обнаружить внутренние изменения, происходящие в процессе замораживания-оттаивания льда. Кроме того, в суровых условиях окружающей среды низкая эффективность наблюдений и такие проблемы, как засорение линзы льдом, препятствуют мониторингу образования льда на воздушных линиях в режиме реального времени [11].

Контактные методы обычно устанавливают датчики непосредственно на линях для мониторинга образования льда, и в первую очередь это электрические и волоконно-оптические датчики. Электрические датчики измеряют силу, угол наклона, емкость, вибрацию и ультразвук. Он может преобразовывать такие характеристики, как вес, изгиб, диэлектрическая проницаемость и собственная частота воздушных линий после обледенения, в электрические сигналы в режиме реального времени, отражая тем самым состояние ледяного покрытия. Однако сильные магнитные поля вокруг линии могут вызывать значительные электромагнитные помехи, снижающие точность измерений, выполняемых электрическими датчиками.

Современные технологии мониторинга

Технология оптоволоконного зондирования, обладающая высокой точностью и устойчивостью к электромагнитным помехам, показала большие перспективы для обнаружения скопления льда на линиях. В настоящее время используются два основных технических подхода: метод распределенного оптического волокна и метод волоконной брэгговской решетки (ВБР). Sun и соавт. предложили распределенный волоконно-оптический метод определения срастания льда (толщины льда), основанный на разнице температур между покрытыми льдом и не покрытыми льдом участками линии, используя оптическую рефлектометрию Бриллюэна во временной области (BOTDR) для измерения температуры. Сюй и др. встроил оптические волокна в TL для измерения внутренней температуры и определил разность фаз между измеренной температурной кривой и кривой температуры окружающей среды, предложил критерий образования льда и разработал формулу для оценки толщины льда [19]. Используя технологию

распределенного зондирования с помощью фазочувствительного оптического рефлектометра во временной области (Ф-OTDR), Дин и его коллеги измерили осевую деформацию линии для определения толщины льда. Несмотря на то, что методы распределенного оптоволоконного зондирования обладают потенциалом для обнаружения образования льда на воздушных линиях на больших расстояниях, они по-прежнему имеют ограничения, связанные с локальным точным развертыванием, что имеет решающее значение для оптимизации стратегий борьбы с обледенением (таких как время таяния и сила тока) [13; 14].

Пассивные методы основаны на отсутствии постоянного вмешательства в процесс измерений – данные получают с помощью осмотров, фотофиксации и анализа эксплуатационных параметров.

Традиционный метод контроля, включающий:

- обходы персонала,
- использование биноклей, тепловизоров,
- фиксацию толщины льда визуально.

Преимущества:

- простота реализации, отсутствие дорогостоящего оборудования,
- возможность оценки сопутствующих повреждений.

Недостатки:

- низкая оперативность,
- зависимость от погодных условий,
- человеческий фактор,
- невозможность контроля в реальном времени.

Анализ эксплуатационных параметров включает контроль: изменения провисания провода, увеличения механической нагрузки, регистрации «пляски проводов», изменения токов и напряжений, появления вибрационных резонансов.

При обледенении увеличивается масса проводов, что приводит к росту угла провисания и появлению низкочастотных колебаний.

Эти признаки используются как косвенный индикатор наличия наледи.

Датчиковые методы включает механические, вибрационные, деформационные, оптические и метеорологические датчики, устанавливаемые непосредственно на провод или опору.

Регистрация собственных колебаний провода (частоты 0.1–10 Гц).

При образовании льда масса провода увеличивается, а собственная частота снижается. Принцип:

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}},$$

где T – натяжение μ – линейная масса (увеличивается при обледенении).

Проблемы таких методов являются установки на многие пролёты, высокая стоимость на длинных ВЛ и чувствительность к ветровым нагрузкам [15].

Таблица 2 – Датчики для мониторинга гололёдообразования

Тип датчика	**Принцип работы**	**Измеряемые параметры**	**Измеряемые параметры**
Вибрационные	Фиксация частоты колебаний провода Измерение натяжения	Частота 0.1–10 Гц	Частота 0.1–10 Гц
Тензодатчики		Механическая нагрузка	Механическая нагрузка
FBG-датчики	Изменение длины волны отражения в волокне	Деформации, температура	Деформации, температура
Метеодатчики	Измерение параметров воздуха	Т, влажность, ветер	Т, влажность, ветер
Акустические	Резонанс и звук от покрытия	Толщина льда	Толщина льда

Датчики деформации (strain-gauges) – фиксируют изменение напряжённого состояния провода или троса.

Современные реализации используют:

- тензодатчики,
- волоконно-оптические датчики (FBG),
- пьезоэлектрические сенсоры.

Преимущества:

- высокая точность измерения массы льда,
- измерение динамики («freezing–thawing cycle»).

Недостатки:

- сложность монтажа,
- ограниченный ресурс.

Радарные и рефлектометрические методы используют отражение радиоволн от поверхности провода:

- изменение амплитуды, фазы и затухания отражённого сигнала,
- оценка толщины льда по изменению диэлектрических свойств.

Преимущества – работают даже при плохой видимости. Минус – высокая стоимость оборудования.

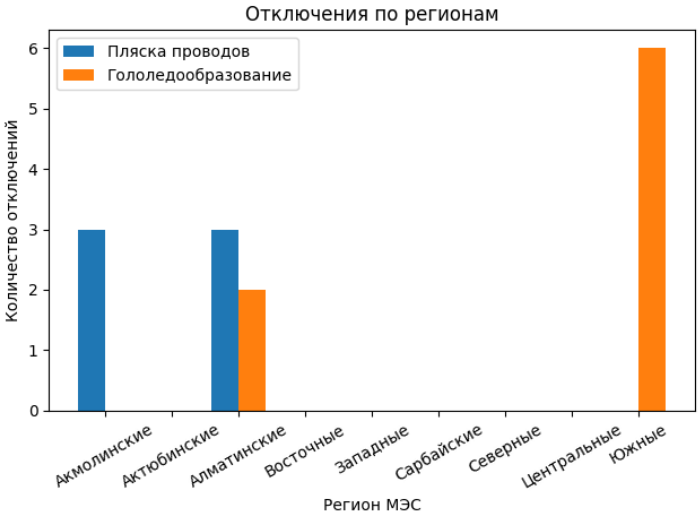


Рисунок 2 – Отключение ВЛЭП из-за пляски и гололедообразование проводов по регионам Казахстана

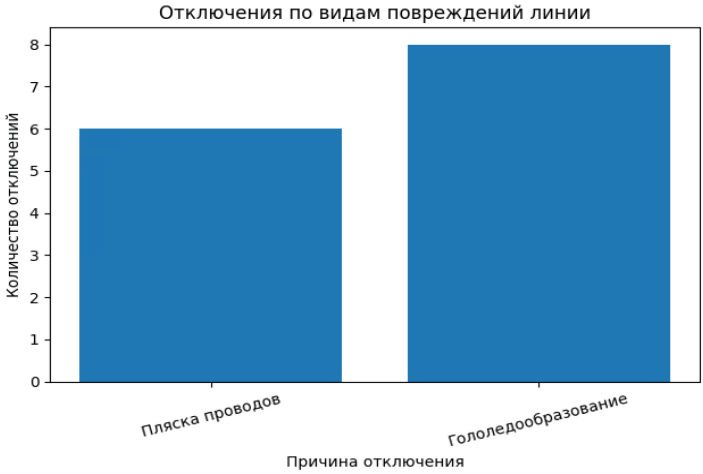


Рисунок 3 – Отключение по видам повреждений линии

Анализ отказов ВЛ АО «KEGOC» (раздел: повреждение воздушных линий) показывает, что существенную долю занимают метеорологические и аэродинамические факторы.

Пляска проводов и грозотроса

Всего зарегистрировано 6 отключений.

Они распределены неравномерно по регионам – зафиксированы преимущественно на линиях 220–500 кВ отдельных МЭС (наиболее характерно для степных ветровых районов).

Поджатие провода (или шлейфа) к телу опоры

Всего 12 отключений.

Причины: провисание, ветровое отклонение, обледенение, неправильная стрелка провеса.

Отмечены в нескольких МЭС, включая линии 110–500 кВ.

Гололёдообразование

Всего 8 отключений.

Наиболее выражено в северных и центральных районах сети, где наблюдаются продолжительные периоды отрицательных температур и влажного ветра.

Вывод по статистике

Метеорологические воздействия образуют взаимосвязанную группу причин

Таблица 3 – Причины образованные метеорологическими воздействиями

Фактор	**Характер**
Гололёд	увеличивает массу и аэродинамический профиль провода
Ветер	возбуждает колебания
Пляска	приводит к КЗ и схлёстыванию фаз
Поджатие к опоре	вторичный эффект колебаний

Именно поэтому эти причины нельзя рассматривать отдельно – они являются одной физической цепочкой процесса.

Гололёдообразование на ВЛ в климате Казахстана

Для Казахстана характерны:

- резко континентальный климат
- частые переходы через 0 °C
- туманы и морось при ветре
- открытая степная местность (большие разгоны ветра)

Такая комбинация – классическая для интенсивного обледенения ВЛ.

Механизм образования

Гололёд возникает при осаждении переохлаждённых капель воды на провод:

- капля касается холодного проводника
- мгновенно замерзает
- формируется асимметричная ледяная муфта
- диаметр провода увеличивается в 2–5 раз
- масса возрастает до 10–20 кг/м

Инженерные последствия

- увеличивается стрелка провеса
- возрастает нагрузка на опоры
- ухудшается электрическая изоляция
- меняется аэродинамика провода

Главное – провод перестаёт быть цилиндром.

Таблица 4 – Физическая зависимость

Параметр	**Без льда**	**С льдом**
Форма	круг	аэродинамический профиль
Подъёмная сила	≈0	появляется
Амплитуда	сантиметры	метры
Частота	высокая (вибрация)	низкая (пляска)
Опасность	износ	авария

Разбор аварий показывает следующую цепочку:

Сначала нарастает лед. Затем провод начинает раскачиваться (пляска).

В итоге из-за колебаний провод приближается к опоре или другим проводам, что ведет к поломке.

Результаты и обсуждение

Исследования подтвердили, что опаснее всего погода от 0 до −10 °С при высокой влажности и ветре. В Казахстане такая погода встречается часто, поэтому риск аварий велик. Лед меняет форму провода, из-за чего ветер начинает его сильно раскачивать – это и есть «пляска», которая часто рвет линии.

Статистика подтверждает: погода запускает целую серию проблем – от простого утяжеления провода до его обрыва или короткого замыкания. При этом неважно, высоковольтная это линия или обычная – лед влияет на них одинаково.

Сравнение способов слежения показало, что обычные осмотры часто не дают вовремя заметить проблему. Датчики на проводах работают лучше, но они дорогие и их сложно устанавливать. Самым перспективным вариантом сейчас выглядит использование оптоволокна. Оно позволяет точно следить за всей линией и не боится электрических помех.

В целом, чтобы линии реже ломались из-за льда, нужно действовать комплексно: учитывать местный климат, ставить современные системы мониторинга и улучшать саму конструкцию опор и проводов.

Выводы

Исследование показало, что лед сильно меняет работу линий электропередачи. Из-за лишнего веса провода сильнее натягиваются и начинают иначе реагировать на ветер. В условиях нашего климата это часто приводит к серьезным сбоям в подаче электричества.

Существующие методы контроля имеют свои плюсы и минусы. Новые технологии, такие как оптоволоконные датчики, дают возможность точнее следить за льдом и вовремя принимать меры.

Чтобы в будущем сети работали стабильнее, нужно не только обновлять системы мониторинга, но и делать конструкции более прочными. Дальнейшая работа должна быть направлена на то, чтобы лучше предсказывать обледенение и не допускать отключений света.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Mackay, D. S., Thompson, G.** Ice accretion on overhead transmission lines [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1969. – Vol. 8. – P. 123–130.

2 **Makkonen, L.** Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [Текст] // Cold Regions Science and Technology. – 1981. – Vol. 3. – P. 145–158.

3 **Lozowski, E. P., Stallabrass, J. R., Hearty, P. F.** The icing of an unheated, non-rotating cylinder. Part I: A simulation model [Текст] // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1983. – Vol. 22. – P. 2053–2062.

4 **Ahti, K., Makkonen, L.** Ice accretion on wires [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1382–1394.

5 **Ashworth, R. A., Knight, C. A.** Ice crystal growth in the atmosphere [Текст]. – New York : Academic Press, 1978. – 237 p.

6 **Lesins, G., Farzaneh, M., Lozowski, E.** Characteristics of ice accretion on overhead conductors [Текст] // Atmospheric Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 215–230.

7 **Howe, K. E.** Ice accretion measurements on Mount Washington [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1005–1012.

8 **Драневич, А. Н.** Обледенение проводов линий электропередачи [Текст]. – М. : Энергия, 1971. – 120 с.

9 **Руднева, Т. В.** Гололедные нагрузки на провода линий электропередачи [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 1973. – 98 с.

10 **Барановский, Н. В., Либерсбах, А. Г.** Методы оценки обледенения проводов воздушных линий [Текст]. – М. : Энергия, 1977. – 110 с.

11 **Бендель, В., Патон, Б.** Обледенение инженерных конструкций [Текст]. – М. : Мир, 1981. – 256 с.

12 **Langmuir, I., Blodgett, K. B.** A mathematical investigation of water droplet trajectories [Текст]. – Washington : U.S. Army Air Forces, 1946. – 45 p.

13 **Sun, Y. et al.** Distributed optical fiber sensing for ice detection on transmission lines [Текст] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 1–12.

14 **Xu, L. et al.** Ice thickness estimation on transmission lines based on temperature phase difference [Текст] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35. – P. 456–465.

15 **Ding, Z. et al.** Ice monitoring on overhead lines using Φ-OTDR technology [Текст] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 12345–12356.

REFERENCES

1 **Mackay, D. S., Thompson, G.** Ice accretion on overhead transmission lines [Text] // Journal of Applied Meteorology. – 1969. – Vol. 8. – P. 123–130.

2 **Makkonen, L.** Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [Text] // Cold Regions Science and Technology. – 1981. – Vol. 3. – P. 145–158.

3 **Lozowski, E. P., Stallabrass, J. R., Hearty, P. F.** The icing of an unheated, non-rotating cylinder. Part I: A simulation model [Text] // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1983. – Vol. 22. – P. 2053–2062.

4 **Ahti, K., Makkonen, L.** Ice accretion on wires [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1382–1394.

5 **Ashworth, R. A., Knight, C. A.** Ice crystal growth in the atmosphere [Text]. – New York : Academic Press, 1978. – 237 p.

6 **Lesins, G., Farzaneh, M., Lozowski, E.** Characteristics of ice accretion on overhead conductors [Text] // Atmospheric Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 215–230.

7 **Howe, K. E.** Ice accretion measurements on Mount Washington [Text] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1005–1012.

8 **Dranevich, A. N.** Obledeneniye provodov liniy elektroperedachi [Icing of overhead power line conductors] [Text]. – Moscow : Energiya, 1971. – 120 p.

9 **Rudneva, T. V.** Gololednye nagruzki na provoda liniy elektroperedachi [Ice loads on overhead power line conductors] [Text]. – Moscow : Energoatomizdat, 1973. – 98 p.

10 **Baranovsky, N. V., Libersbakh, A. G.** Metody otsenki obledenenia provodov vozdushnykh liniy [Methods for evaluating icing of overhead line conductors] [Text]. – Moscow : Energiya, 1977. – 110 p.

11 **Bendel, V., Paton, B.** Obledenenie inzhenernykh konstruktsiy [Icing of engineering structures] [Text]. – Moscow : Mir, 1981. – 256 p.

12 **Langmuir, I., Blodgett, K. B.** A mathematical investigation of water droplet trajectories [Текст]. – Washington : U.S. Army Air Forces, 1946. – 45 p.

13 **Sun, Y. et al.** Distributed optical fiber sensing for ice detection on transmission lines [Text] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 1–12.

14 **Xu, L. et al.** Ice thickness estimation on transmission lines based on temperature phase difference [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35. – P. 456–465.

15 **Ding, Z. et al.** Ice monitoring on overhead lines using Φ-OTDR technology [Text] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 12345–12356.

Поступило в редакцию 30.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 02.09.26.

**Ф. А. Ғабыл-Манапова[1], А. Б. Бекбаев[2], Р. Ш. Абитаева[3], А. Ф. Ишангалиева[4]*
[1,2,3]Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық-Зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]М-С. Бабажанов атындағы жалпы орта білім беретін мектебі, Қазақстан Республикасы, Батыс Қазақстан обл.
30.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ ВОЛЬТТЫ ЭЛЕКТР БЕРІЛІС ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ МҰЗДАНУДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫН ЖӘНЕ ОНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада әуе электр желілерінде мұздың қалай пайда болатыны және оның энергетикалық жүйенің қалыпты жұмысына қалай кедергі келтіретіні қарастырылады. Автор процестің физикалық жағына, атап айтқанда, мұздың қалай жиналатынына және оның сымдардың күйіне әсеріне тоқталады. Бұл жерде ауа райы, ылғалдылық пен жел басты факторлар болып табылады – желілердің қаншалықты тез мұздауы мен олардың сипаттамаларының нашарлауы дәл осыларға байланысты.

Сонымен қатар, мәтінде сымдардың жай-күйін бақылаудың түрлі әдістері талданады. Мұнда қарапайым көзбен шолып тексеру мен кескінді танитын камералардан бастап, арнайы датчиктерге дейінгі мүмкіндіктер сөз болады. Талшықты-оптикалық технологияларға ерекше назар аударылған. Олар өте дәл жұмыс істейді, электромагниттік кедергілерден қорықпайды және жағдайды өте алыс қашықтықтан бақылауға мүмкіндік береді.

Қорыта айтқанда, автор қолданыстағы мониторинг әдістерін жетілдіріп, әуе желілері мұзға шыдап, істен шықпауы үшін олардың конструкциясын барынша берік ету керек деген тұжырымға келеді. Алдағы зерттеулер осы диагностика тәсілдерін оңтайландыруға және қалың мұз жауғанда желілерді қауіпсіз пайдалану деңгейін арттыруға бағытталмақ. Зерттеу барысында алынған нәтижелерді қолайсыз ауа райы аймақтарындағы электр желілерін жобалау мен іске қосу кезінде тікелей қолдануға болады. Ал жұмыстың практикалық маңызы – электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттырып, өндірістік қауіп-қатерді азайтуға мүмкіндік беретіндігінде.

Кілтті сөздер: Әуе электр беріліс желілері, көктайғақ, сенімділік, климаттық факторлар, мониторинг, диагностика, мұз жүктемелері, сымдардың тербелісі.

**F. A. Gabyl-Manapova[1], A. Bekbayev[2], R. Sh. Abitayeva[3], A. F. Ishangalieva[4]*
[1,2,3]Satbayev University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]Secondary School named after M-S. Babazhanova,
Republic of Kazakhstan, West Kazakhstan.
Received 30.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 02.09.26.

INVESTIGATION OF ICE FORMATION ON HIGH-VOLTAGE POWER LINES AND ITS EFFECTS

This study looks at how ice forms on overhead power lines and why it causes problems for the electrical grid. It explains the physics behind ice buildup and how it changes the condition of the wires. Factors like weather, humidity, and wind are what mainly decide how fast the lines freeze and how much their performance drops.

The paper also reviews different ways to keep an eye on the lines. It covers basic visual checks and cameras that use image recognition, along with various sensors. A lot of focus is put on fiber-optic technology because it is accurate, does not get affected by electromagnetic interference, and can monitor the grid over long distances.

In the end, the author argues that just monitoring isn't enough. The power lines themselves need to be built stronger to handle the weight of the ice and avoid breaking. Future work will likely focus on improving these monitoring tools and keeping the grid running during bad storms. These findings are useful for designing and maintaining power lines in cold areas to help prevent outages and make the power supply more dependable.

Keywords: Overhead power lines, ice accumulation, reliability, climatic factors, monitoring, diagnostics, ice loads, conductor galloping.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz