**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 44.39.29

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/72-90

***А. А. Арпиш[1], С. А. Минажова[2]**

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

[2]QazNRG Group, Республика Казахстан, г. Алматы.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3368-6081

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5461-2251

*e-mail: aibar201329@gmail.com

# *АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК*

*В данной статье проведен анализ современных комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок. Обобщены результаты, полученные различными авторами в ходе исследований комбинированных методов. Освещены основные проблемы, возникающие при обледенении ветроэнергетических установок, включая потери и снижение выработки электроэнергии. Показано, что комбинированные методы являются перспективным решением для повышения эффективности минимизации обледенения за счёт синергетического эффекта.*

*В целом анализ показал, что комбинированные методы на основе сочетания функциональных покрытий и теплового воздействия получили широкое распространение. Установлено, что данное сочетание позволяет существенно снизить энергопотребление сохраняя высокую эффективность как противообледенения, так и удаления льда. Кроме того, определено, что комбинированные методы на основе сочетания механических или акустических воздействий, обладают значительным потенциалом снижения энергопотребления при удалении льда, превышающих показатели других рассмотренных комбинаций, однако требуют дальнейших экспериментальных подтверждений.*

*В результате проведенного анализа была предложена иерархическая классификация комбинированных методов минимизации*

*обледенения ветроэнергетических установок, которая учитывает тип физического воздействия на лёд, а также способы реализации и конструктивные доработки систем. Кроме того, проведен качественный сравнительный анализ рассмотренных методов. Полученные результаты могут быть применены для выбора и обоснования комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, а также способствовать повышению надёжности их эксплуатации.*

*Ключевые слова: Ветроэнергетические установки, обледенение, комбинированные методы, синергетический эффект, противообледенение, удаление льда, энергопотребление, эффективность.*

**Введение**

В последние годы в связи с глобальным переходом к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) наблюдается активное развитие ветроэнергетики. По данным отчета World Wind Energy Association (WWEA) общий глобальный объем ветроэнергетики в 2025 году составил 1,346 ТВт, что покрывает приблизительно 11 % мирового спроса. За последний год было введено в эксплуатацию 169 ГВт, что на 35 % больше, чем показатели 2024 года. В результате годовой темп роста увеличился с 11,9 % до 14,3 %. Основным драйвером такого роста является Китай (130 ГВт), Индия (6,3 ГВт), США (6,27 ГВт), Германия (4,6 ГВт) [1].

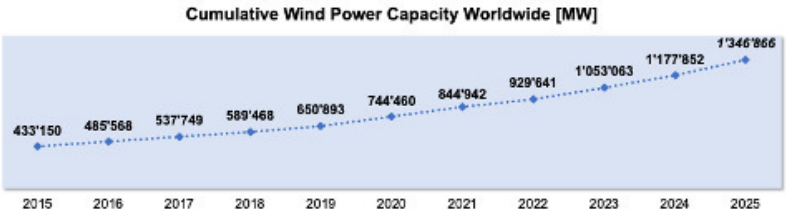



Рисунок 1 – Общая установленная мощность ветроэнергетики в мире на конец 2025 года [1]

Согласно данным Qazaq Green в Казахстане ветроэнергетика занимает первое место по установленной мощности среди объектов ВИЭ и достигла 1,9 ГВт в 2025 году [2]. Кроме того, в 2026 году планируется запуск двух ветроэлектростанций в Костанайской области на 150 МВт [3].

Вместе с тем эксплуатация ветроэнергетических установок (ВЭУ) в условиях холодного климата осложняется обледенением ВЭУ. Обледенение ВЭУ – это процесс образования и накопления льда на элементах ветроустановки при отрицательных температурах и большой влажности. Оно приводит к ухудшению аэродинамики, экстремальным и усталостным нагрузкам ротора и фундамента ВЭУ, чрезмерным вибрациям, вызывая простой, увеличение уровня шума, риску сброса льда, снижению производительности и потерям энергии [4, с. 44–45]. Потери энергии ВЭУ из-за обледенения могут достигать до 20 % от их годового объема выработки электроэнергии, а в отдельные дни во время сильного обледенения до 80 % [5; 6].

В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов минимизации обледенения ВЭУ является одной из важных задач ветроэнергетики. На сегодняшний день существуют различные методы минимизации обледенения, которые традиционно делятся на пассивные и активные. А по режиму работы на системы предотвращения обледенения и системы удаления льда. Пассивные методы, такие как супергидрофобные покрытия не потребляют электроэнергии и относятся к системам предотвращения обледенения, которые противодействуют образованию льда. Такие покрытия снижают адгезию водяных капель к поверхности лопасти, а также способствуют задержке образования льда. Активные методы, такие как электрические системы нагрева, системы подачи горячего воздуха, микроволновые, вибрационные и ультразвуковые системы работают за счет потребления электроэнергии и преимущественно относятся к системам удаления льда, которые удаляют уже образовавшийся слой льда. Кроме некоторых тепловых методов, таких как электронагрев, которые способны работать как в режиме предотвращения обледенения, так и удаления льда. Однако каждый из этих методов имеет свои ограничения: пассивные методы не всегда эффективно предотвращают образование льда и не обеспечивают его удаление, а также некоторые из них могут быть токсичными и приводить к коррозии. В свою очередь, активные методы характеризуются дополнительным энергопотреблением, величина которого зависит от метода и условий обледенения [4, с. 257–273].

Таким образом в последние годы активно развиваются комбинированные методы, объединяющие преимущества различных подходов. Однако в настоящее время наблюдается недостаток комплексных исследований, направленных на систематизацию и сравнительный анализ комбинированных методов.

Целью данной работы является анализ и сравнение современных комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, а также классификация и выявление основных направлений развития.

**Материалы и методы**

Для сбора релевантных, репрезентативных исследовательских статей был проведен поиск с использованием поисковой системы Google Scholar и научной базы данных ScienceDirect. Для поиска был выбран широкий набор ключевых слов, такие как «wind turbine», «wind turbine icing», «anti-icing», «de-icing», «combined», «synergy», «hybrid», «wind turbine anti-icing methods», «wind turbine de-icing methods», которые были использованы в разных комбинациях с применением логических операторов «AND», «OR», и кавычек для уточнения поисковых запросов.

Научные статьи для данного анализа выбирались по следующим критериям:

– Опубликованные на английском языке за последние 10 лет в период с 2016 по 2026 годы;
– Описывающие использование комбинированных методов;
– Наличие описания методики исследования и экспериментальной части;
– Наличие количественных показателей результатов исследований;
– Применимые к ветроэнергетическим установкам.

Были исключены работы:

– Без экспериментального подтверждения;
– С недостаточным описанием методики и условий эксперимента.

В отличие от систематических обзоров, данное исследование ориентировано на качественную систематизацию и сравнительный анализ комбинированных методов с выявлением ключевых тенденций их развития.

Для проведения сравнительного анализа комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ использовался качественный подход, основанный на сопоставлении результатов, представленных в отобранных исследованиях. Сравнение проводилось по следующим критериям: энергопотребление, эффективность предотвращения обледенения и удаления льда, работа в разных климатических условиях, наличие синергетического эффекта, ограничения, стоимость, конструктивная сложность и перспективы развития. Данные критерии были выбраны поскольку отражают основные эксплуатационные характеристики и особенности систем защиты от обледенения.

Количественное сравнение не проводилось в связи с различием условий экспериментов отобранных исследований, в частности климатических условий, методик испытаний и испытуемых объектов. В связи с этим полученные характеристики были обобщены и представлены в виде качественной сравнительной оценки.

**Результаты и обсуждения**

Проведённый анализ литературы позволил выделить несколько направлений исследований, различающихся по типу физического воздействия на процесс обледенения. Основное направление представлено значительным количеством исследований, рассматривающих комбинированные методы на основе сочетания функциональных покрытий и тепловых воздействий. Альтернативное направление рассматривает комбинированные методы на основе механических и акустических воздействий, в сочетании с другими способами воздействия. Данное направление представлено ограниченным количеством исследований.

Анализ работ [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15] показывает, что комбинация функциональных покрытий с тепловыми воздействиями обеспечивает высокую эффективность при снижении энергопотребления. При этом эффективность таких комбинированных методов зависит не только от мощности нагрева, но и от способа реализации и оптимального распределения функций между покрытием и тепловым воздействием. В рамках данного направления были выделены три типа комбинированных методов, различающихся по способу реализации теплового воздействия.

В работах [7; 8; 9] показан первый тип, который реализуется совмещением функциональных покрытий и электронагрева. Авторы работ [7; 8] рассматривают использование полного супергидрофобного покрытия лопасти в сочетании с частичным электронагревом передней кромки. Показано, что такая комбинация может снизить энергопотребление до 90 % в сравнении с нагревом всей поверхности гидрофильной лопасти [7]. Эффективность метода обусловлена тем, что частичный нагрев предотвращает образование льда на передней кромке, а супергидрофобное покрытие снижает адгезию водяных капель к поверхности, препятствуя вторичному обледенению.

Кроме того, интеграция супергидрофобного покрытия и электронагрева в поверхностный слой композита лопасти, как показано в работе [8], может снижать тепловые потери, повышать устойчивость покрытия и уменьшать энергопотребление на 26 % по сравнению с использованием только электронагрева. Также отмечается наличие синергетического эффекта, проявляющегося значительным увеличением времени замерзания капель при наличии небольшого нагрева по сравнению с супергидрофобным покрытием без нагрева.

Однако на основе анализа можно сделать вывод, что при сильном уменьшении нагреваемой области, эффективность рассмотренных методов

в режиме удаления льда может снижаться, что ограничивает их применение в условиях интенсивного обледенения.

В отличие от этого, в работе [9] авторы рассматривают использование фазо-переходных покрытий PCMS-C14 в сочетании с частичным электронагревом. Эффективность метода обусловлена свойствами материала покрытия, который улучшает электронагрев, выделяя скрытое тепло при фазовом переходе. Кроме того, покрытие изолирует и равномерно распределяет тепло, предотвращая возникновение локальных перегревов. В результате достигается снижение энергопотребления на 12,89–19,23 % и сокращение времени удаления льда на 25–68 с в разных климатических условиях по сравнению с одиночным электронагревом. Несмотря на то что данное сочетание в отличие от комбинации с супергидрофобными покрытиями, значительно ускоряет нагрев, оно ограничено температурным диапазоном работы (приблизительно от 7°C до –17°C) и большей стоимостью. Кроме того, данное покрытие нуждается в дальнейшей проверке долговечности и устойчивости к внешним факторам.

В работе [10] показана реализация второго типа, основанного на совмещении супергидрофобного покрытия и теплового воздействия от фототермического нагрева. Такая реализация метода не требует внешнего энергопотребления, как в работах [7; 8; 9], поскольку тепловое воздействие обеспечивается за счет преобразования солнечного излучения. Авторы отмечают 50 % эффективность преобразования и возможность быстрого нагрева поверхности за счет фототермии, а также возможность работы как в режиме предотвращения обледенения, так и удаления льда. Однако применение данного типа метода ограничено погодными условиями, временем солнечной активности и углом падения солнечного излучения.

В работах [11; 12; 13; 14; 15] рассматривается третий тип, в котором тепловое воздействие реализуется комбинированием электронагрева с фототермическим нагревом на основе многофункциональных супергидрофобных покрытий. В отличие от рассмотренных двух типов, этот обеспечивает возможность работы как в пассивном режиме за счет фототермического нагрева, так и в активном режиме за счет электронагрева.

Результаты работы [11] показывают уменьшение времени удаления льда с 76,8 до 42,4 с, увеличение времени замерзания капель до 174 с и сокращение энергопотребления на 26% в сравнении с покрытием без супергидрофобных свойств. Более высокая эффективность такого типа методов обусловлена наличием синергетического эффекта. Данный эффект наблюдается при совместном использовании электро/фототермического

нагрева, проявляющегося большим повышением температуры поверхности по сравнению с их раздельным применением.

Дальнейшее развитие данного типа показано в работах [12; 13; 14; 15], где основной фокус смещается на оптимизацию конструкции, энергопотребления и удешевление стоимости производства. В частности, в работе [12] рассматривается использование чернил каракатицы в качестве более дешевого фототермического материала, что позволило снизить стоимость производства многофункционального покрытия, сохранив при этом высокую эффективность. В результатах исследования отмечается сокращение времени плавления льда и снижение энергопотребления на 41,73 % по сравнению с поверхностью исключительно с электрическим нагревом.

В работе [13] установлено, что использование теплоизоляционных и теплораспределяющих слоев позволяет реализовать конструктивную оптимизацию тепловых потоков. В результате наблюдается уменьшение теплопотерь и более эффективное распределение теплового потока. Отмечается повышение эффективности работы многофункционального покрытия в условиях неравномерного потока солнечного излучения. В частности, замечено приблизительно 10-кратное уменьшение разности температур между образцами с теплоизоляционным слоем и без него в условиях, когда часть подложки была затенена от попадания светового потока. Также отмечается увеличение температуры подложки с теплоизоляционным слоем приблизительно в 1,5 раза больше по сравнению с образцом без него. В целом данная реализация функционально схожа с методом, описанным в работе [9].

В свою очередь, в работе [14] реализовано применение импульсного электронагрева для оптимизации энергопотребления, который позволяет сократить энергозатраты на 13,8–65,5 % по сравнению с постоянным режимом работы электронагрева.

Одним из актуальных направлений развития является интеллектуализация работы систем. В работе [15] реализовывается внедрение трибоэлектрических наногенераторов (TENG), которые преобразуют механическое воздействие в электрический сигнал за счет трибоэлектрического эффекта. Отмечается способность автономной работы, обнаружения и измерения толщины льда в реальном времени, а также определения состояния поверхности. На основе анализа работы можно сделать вывод, что, используя трибоэлектрические наногенераторы, можно реализовать адаптивную интеллектуальную систему управления. Такая система способна автоматически включать электронагрев при обнаружении льда, а также регулировать мощность нагрева в зависимости от толщины льда и состояния поверхности, тем самым

значительно сокращая энергопотребление. Однако в работе установлено, что чувствительность трибоэлектрических наногенераторов зависит от толщины льда. Это может приводить к снижению точности определения толщины льда при слое более 8 мм, вследствие нарушения однозначной зависимости между толщиной льда и электрическим сигналом, что требует корректной настройки системы.

Таким образом, третий тип реализации показывает более стабильную работу, всепогодную эффективность и в отличие от второго типа не зависит от солнечной активности. Однако характеризуется более сложной конструкцией и потенциально высокой стоимостью реализаций.

В целом комбинированные методы, основанные на сочетании функциональных покрытий и тепловых воздействий характеризуются высокой эффективностью и технологической проработанностью. Однако они по-прежнему требуют дальнейшей оптимизации энергопотребления и тепловых потоков.

В связи с этим некоторые исследователи рассматривают другую комбинацию методов, основанную на механическом и акустическом воздействии [16; 17; 18; 19]. В данной работе такие исследования были объединены в отдельное направление, обозначенное альтернативным, в связи с ограниченным количеством исследований в данной области.

В работе [16] авторы рассматривают комбинированный метод, основанный на совмещении ультразвука и электронагрева. Эффективность метода обусловлена тем, что электронагрев, оттапливая лёд, способствует возникновению водяной плёнки на границе лёд-поверхность, которая снижает адгезию льда. В свою очередь ультразвук генерирует сдвиговые напряжения, приводящие к разрушению и отслоению слоя льда. Установлено, что водяная пленка компенсирует недостаток сдвиговых напряжений и ускоряет время удаления льда на 59 % в сравнении с одиночным применением электронагрева. Также отмечается повышение эффективности работы системы по сравнению с раздельным применением электронагрева и ультразвука. При этом, совместное применение двух активных методов повышает энергопотребление по сравнению с одиночным применением ультразвука и снижает по сравнению с одиночным применением электронагрева.

В сравнении с методом, представленным в работе [16] авторы в работе [17] рассматривают совместное применение ультразвука и супергидрофобного покрытия. Принцип работы данного метода схож с описанным в работе [16], однако здесь снижение адгезии льда осуществляется за счет супергидрофобных свойств покрытия. Показано, что эффективность удаления льда возрастает

до 95 % в сравнении с поверхностью без покрытия при ультразвуковом воздействии, а энергопотребление значительно ниже, чем у метода, описанного в работе [16]. Однако возможна неравномерность распределения напряжений, которая может привести к неполному удалению льда.

В работе [18] комбинация реализована сочетанием ультразвука с низкочастотными вибрациями. В данном исследовании низкочастотное резонансное возбуждение используется для создания дополнительных сдвиговых напряжений. Как и в работах [16; 17] совместное применение низкочастотных колебаний компенсирует недостаточное воздействие ультразвука и повышает эффективность удаления льда. Однако эффективность данного метода зависит от точного подбора частоты и мощности возбуждения, что усложняет практическую реализацию. Кроме того, данный метод способен работать только в режиме удаления льда.

В работе [19] показано совместное использование акустических волн и гидрофобных покрытий. В сравнении с методом, описанным в работе [18] данный подход одновременно может выполнять функции предотвращения обледенения, удаления льда, а также мониторинга состояния поверхности. Эффективность метода обусловлена синергетическим эффектом, при котором гидрофобное покрытие снижает адгезию льда, облегчая его удаление, при этом не ухудшая распространение акустических волн в подложке. Однако данный метод чувствителен к климатическим условиям. В связи с этим требуется постоянное изменение резонансной частоты и подачи энергии, что усложняет работу системы.

В целом комбинированные методы альтернативного направления показывают высокую эффективность удаления льда за счет реализации синергетического эффекта разными механизмами. Кроме того, они обладают большим потенциалом снижения энергопотребления, однако в настоящее время уступают методам основного направления по стабильности работы и степени проработанности, что ограничивает его широкое практическое применение.

Следует отметить, что несмотря на значительное повышение долговечности функциональных покрытий, они остаются подверженными к циклической деградации, что со временем может уменьшить эффективность комбинированных методов, где они применяются.

По результатам анализа представленных работ был проведен качественный сравнительный анализ комбинированных методов, результаты которого представлены в таблицах 1–2.

Характеристики одиночных методов в таблицах 1–2 приведены в обобщенном виде на основе анализа литературы и используются в качестве эталона для сравнения с комбинированными методами.

Таблица 1 – Качественный сравнительный анализ по основному направлению исследований

| **Критерий** | **Супергидрофобное покрытие** | **Электронагрев** | **Тип 1 Покрытие+ электронагрев** | **Тип 2 Покрытие+ фототермия** | **Тип 3 Покрытие+ электронагрев+ фототермия** |
|---|---|---|---|---|---|
| Энергопотребление | Отсутствует | Высокое | Среднее | Отсутствует внешнее энергопотребление | Низкое-среднее |
| Эффективность предотвращения обледенения | Среднее | Высокое | Высокое | Высокое при наличии солнца Среднее без солнца | Очень высокое |
| Эффективность удаления льда | Не удаляет лед | Высокое | Высокое | Высокая при наличии солнца Не удаляет лед без солнца | Очень высокое |
| Работа в разных климатических условиях | Ограниченная | Стабильная | Стабильная | Ограничена солнечной активностью | Всепогодно стабильная |
| Синергетический эффект | Отсутствует | Отсутствует | Есть | Есть, но ограничен солнечной активностью | Есть |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Ограничения | Цикличная деградация, не удаляет лед, низкая эффективность при интенсивном обледенении | Высокое энергопотребление | Зависимость от зоны нагрева | Зависимость от солнечной активности | Сложность реализации и высокая стоимость |
| Стоимость | Низкая-средняя | Средняя | Средняя-высокая | Средняя | Высокая -очень высокая |
| Конструктивная сложность | Низкая | Средняя | Средняя | Низкая | Высокая |
| Перспективы развития | Средние (повышение устойчивости) | Средние (снижение энергопотребления) | Высокие (оптимизация нагрева и энергопотребления) | Средние (повышение устойчивости и снижение стоимости) | Высокие (интеллекту-альные системы и оптимизация) |

Анализ, представленный в таблице 1, показывает, что совместное воздействие нескольких методов значительно повышает эффективность и снижает энергопотребление по сравнению с их одиночным применением. Достигается это из-за синергетического эффекта между функциональным покрытием и тепловым воздействием. Кроме того, комбинированные методы третьего типа данного направления обладают двойным синергетическим эффектом, дополнительно возникающим между фототермическим и электротермическим нагревом, что объясняет их наиболее высокую эффективность в разных погодных условиях. Однако это достигается значительным увеличением стоимости производства и усложнением конструкции, которые могут ограничивать их практическое применение и требуют подтверждения экономической целесообразности.

Таблица 2 – Качественный сравнительный анализ по альтернативному направлению исследований

| **Критерий** | **Ультразвук** | **Ультразвук + Электро-нагрев** | **Ультразвук + супер-гидро-фобные покрытия** | **Ультразвук + низкочас-тотные вибрации** | **Акустические волны + гидрофобные покрытия** |
|---|---|---|---|---|---|
| Энерго-потребление | Очень низкое | Среднее-высокое | Очень низкое | Низкое-Среднее | Низкое |
| Эффектив-ность предотвра-щения обледенения | Низкая | Средняя-высокая | Средняя | Низкая | Средняя |
| Эффектив-ность удаления льда | Средняя | Высокая | Высокая | Средняя-высокая | Средняя-высокая |
| Работа в разных климатических условиях | Ограни-ченная | Стабильная | Ограничена деградацией покрытий | Ограничена настройкой частоты | Ограничена настройкой частоты |
| Синергети-ческий эффект | Отсутствует | Есть | Есть | Есть | Есть |
| Ограничения | Неравно-мерное удаление льда | Большое энергопот-ребление, стоимость и сложность | Деградация покрытий | Требует точной настройки частот | Зависима от климати-ческих условий |
| Стоимость | Средняя | Высокая | Средняя-высокая | Средняя-высокая | Средняя-высокая |
| Конструк-тивная сложность | Средняя | Высокая | Средняя | Высокая | Высокая |
| Перспективы развития | Средние (оптимиза-ция параметров) | Средние (снижение энергопот-ребления) | Средние (развитие покрытий и оптимизация системы) | Средние (настройка и управление) | Высокие (умные системы и обнаружение) |

Анализ, представленный в таблице 2, показывает, что комбинированные методы альтернативного направления характеризуются более низким энергопотреблением в режиме удаления льда по сравнению с методами основного направления. При этом их эффективность  такая же высокая.

Однако данные методы характеризуются высокой чувствительностью к настройке параметров системы, что требует точного контроля и оптимизации. Кроме того, они преимущественно ориентированы на удаление льда, и демонстрируют меньшую эффективность противообледенения по сравнению с методами основного направления.

Проведенный анализ работ показывает, что эффективность комбинированных методов зависит не только от комбинации физических воздействий, но и от их различий в реализации и дополнительных функциональных доработках.

В связи с этим на основе анализа литературы была предложена иерархическая классификация комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ, представленная на рисунке 2.

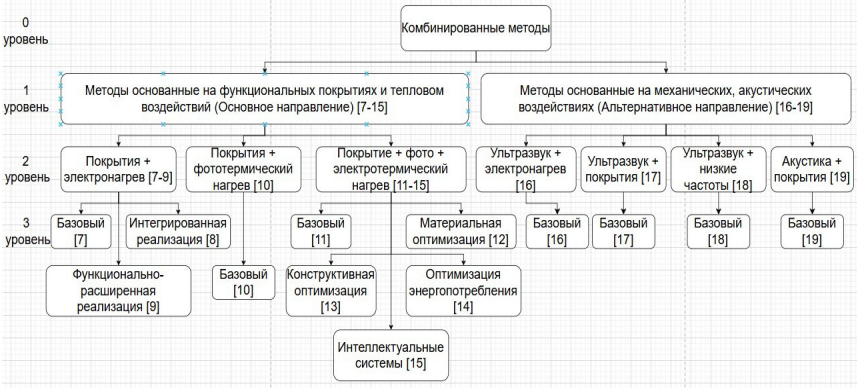



Рисунок 2 – Иерархическая классификация комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ

Предложенная иерархическая классификация состоит из трех уровней систематизации. На первом уровне комбинированные методы разделены по типу физического воздействия на процесс обледенения. На втором уровне, для основного направления разделены по способу реализации теплового воздействия, для альтернативного направления разделены по способу комбинации с другими типами воздействий. При этом различие критериев классификации на этом уровне объясняется разной степенью проработанности двух направлений. На третьем уровне разделены по особенностям дальнейших конструктивных реализаций и функциональных оптимизаций системы.

Следует отметить, что для многофункциональных покрытий с фототермией, а также для всех типов альтернативного направления на третьем уровне рассматриваются лишь базовые реализации. Для методов альтернативного направления это обусловлено ограниченным количеством исследований, представленных в этой области. Для многофункциональных покрытий с фототермией это связано тем, что в данной работе для анализа была выбрана лишь одна репрезентативная работа, представляющая данный тип метода, несмотря на наличие многочисленных исследований. Решение обусловлено тем, что данный тип методов имеет существенное ограничение, связанное с зависимостью от солнечной активности, а его возможные дальнейшие развития частично представлены в рамках третьего типа. Кроме того, показанные на третьем уровне особенности реализации и доработки могут быть реализованы и для других типов комбинированных методов основного направления.

Предложенная классификация может быть уточнена и расширена при включении других баз данных и более широкого подхода к поиску и отбору литературы.

**Выводы**

В работе проведен анализ, систематизация и качественное сравнение комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, на основе которого была разработана иерархическая классификация. Показано, что комбинированные методы обладают высокой эффективностью, обусловленной синергетическим эффектом, а также позволяют уменьшить энергопотребление по сравнению с одиночными методами.

Установлено, что методы основного направления показывают высокую эффективность и практическую применимость, однако требуют дальнейшей оптимизации энергопотребления и повышения устойчивости покрытий. Методы альтернативного направления имеют значительный потенциал снижения энергопотребления при удалении льда, однако менее стабильны и мало изучены.

Определено, что ключевыми ограничениями рассмотренных методов являются деградация покрытий и ограниченность лабораторными условиями. Кроме того, методы рассматривающие многофункциональные покрытия, часто изучаются на плоских подложках, что требует их дополнительной проверки на полноразмерных лопастях ВЭУ.

В целом комбинированные методы являются перспективным направлением, последующее развитие которых связано с оптимизацией и внедрением интеллектуальных систем управления. Полученные в работе

результаты формируют основу для дальнейших исследований в области комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ.

Будущие планы исследований.

Рекомендуется проведение верификации результатов, в условиях приближенных к реальной эксплуатации на динамических моделях ВЭУ. Следует уделить внимание повышению долговечности покрытий, а также дальнейшей оптимизации энергопотребления методов на основе функциональных покрытий с тепловыми воздействиями.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 World Wind Energy Association. WWEA Annual Report 2025: Record Growth and Emerging Challenges [Electronic resource]. – Available online: – https://www.wwindea.org/WPR2025 (Accessed on 26 Apr 2026).

2 Qazaq Green. Renewable energy generation in Kazakhstan exceeded 8.6 billion kWh in 2025 [Electronic resource]. – Available online : – https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/3311/ (Accessed on 14 Mar 2026).

3 Qazaq Green. Kazakhstan to commission 245 MW of renewable energy in 2026 [Electronic resource]. – Available online: – https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/3379/ (Accessed on 14 Mar 2026).

4 **Battisti, L.** Wind Turbines in Cold Climates : Icing Impacts and Mitigation Systems. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – XVII, 341 p. – (Green Energy and Technology). – ISBN 978-3-319-05191-8. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-05191-8

5 **Barber, S., Wang, Y., Jafari, S., Chokani, N., Abhari, R. S.** The impact of ice formation on wind turbine performance and aerodynamics // Journal of Solar Energy Engineering. – 2011. – Vol. 133. – № 1. – 011007. – https://doi.org/10.1115/1.4003187

6 **Gao, L., Tao, T., Liu, Y., Hu, H.** A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbines // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 167. – P. 917–928. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.014

7 **Gao, L., Liu, Y., Ma, L., Hu, H.** A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 140. – P. 943–956. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.112

8 **Meng, Y., Wu, N., Zhang, Y., Yang, J., Wang, S., Xing, S., Liu, S., Yi, X.** Energy-efficient, highly robust anti-icing/de-icing composites and icing wind tunnel assessment // Composites Science and Technology. – 2025. – Vol. 264. – 111121. – https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111121

9 **Sun, Z., Shen, H., Wang, Y., Zheng, H., Feng, F., Li, Y.** Study on the de-icing performance of wind turbine blades based on PCMS-C14 coating combined with electrothermal heating // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2026. – Vol. 172. – 111639. – https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2025.111639

10 **Jiang, G., Chen, L., Zhang, S., Huang, H.** Superhydrophobic SiC / CNTs coatings with photothermal deicing and passive anti-icing properties // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – № 42. – P. 36505–36511. – https://doi.org/10.1021/acsami.8b11201

11 **Zhao, Z., Chen, H., Zhu, Y., Liu, X., Wang, Z., Chen, J.** A robust superhydrophobic anti-icing/de-icing composite coating with electrothermal and auxiliary photothermal performances // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 227. – 109578. – https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109578

12 **Dai, Y., Wen, X., Jin, J., Cong, Q., Xu, J., Qin, X., Chen, T., Wang, M.** A hybrid anti/de-icing method with low cost and all-weather performance // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – Vol. 67. – 104153. – https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104153

13 **Xie, Z., Tan, W., Gong, X., He, X., Zhou, Y., Tian, Y., Wang, H., Chen, R.** All-weather anti-icing/deicing of photo-electrothermal multilayer substrate coupled with photo-electrothermal and highly-efficient thermal management // Surface and Coatings Technology. – 2026. – Vol. 527. – 133399. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133399

14 **Peng, J., Wang, X., Zhou, J., Wang, J., Yang, Y., Mei, Y.** Photothermal/electrothermal superhydrophobic composite coating for efficient anti-icing and de-icing // Composites Part B: Engineering. – 2026. – Vol. 310. – 113144. – https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113144

15 **Wei, L., Wang, Z., Chen, P., Xu, X., Li, Y., Li, F., Tian, G., Ruan, H., Li, W., Zhu, X., Feng, X.** A multifunctional coating integrating photothermal-electrothermal conversion and self-powered ice sensing for all-weather anti-icing // Progress in Organic Coatings. – 2026. – Vol. 210. – 109749. – https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109749

16 **Xu, P., Zhang, D., Gao, W., Li, A.** Hybrid de-icing method combining electrothermal system and ultrasonic guided waves // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 217. – 109804. – https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109804

17 **Tang, P., Liu, Y., Shang, Y., Fang, Z., Li, D.** Interfacial ice-shedding mechanism enabled by superhydrophobicity and ultrasound activation // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2026. – Vol. 171. – 110090. – https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110090

18 **Xu, P., Zhang, D., Gao, W., Li, A.** Development of de-icing method with combined excitation of ultrasonic guided waves and different types of low-

frequency vibrations // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 221. – 110034. – https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110034

19 **del Moral, J., Montes, L., Rico-Gavira, V. J., López-Santos, C., Jacob, S., Oliva-Ramírez, M., Gil-Rostra, J., Fakhfouri, A., Pandey, S., González del Val, M., Mora, J., García-Gallego, P., Ibáñez-Ibáñez, P. F., Rodríguez-Valverde, M. A., Winkler, A., Borrás, A., González-Elipe, A. R.** A holistic solution to icing by acoustic waves : De-icing, active anti-icing, sensing with piezoelectric crystals, and synergy with thin film passive anti-icing solutions // Advanced Functional Materials. – 2023. – Vol. 33. – 2209421. – https://doi.org/10.1002/adfm.202209421

Поступило в редакцию 30.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**А. Ә. Әрпіш[1], С. А. Минажова[2]*
[1]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық
Техникалық Зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ;
[2]QazNRG Group,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
30.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

## ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ МҰЗДАНУЫН АЗАЙТУДЫҢ БІРІКТІРІЛГЕН ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ

*Бұл мақалада жел энергетикалық қондырғыларының мұздануын азайтудың заманауи біріктірілген әдістеріне талдау жасалған. Біріктірілген әдістерді зерттеу барысында әртүрлі авторлар қол жеткізген нәтижелер жинақталып қарастырылды. Сондай-ақ, жел энергетикалық қондырғыларында мұздану кезінде туындайтын негізгі мәселелер, соның ішінде шығындар мен электр энергиясын өндірудің төмендеуі сипатталды. Біріктірілген әдістер синергетикалық әсер есебінен мұзданудың азайтудың тиімділігін арттырудың перспективалы шешімі екені көрсетілді.*

*Жалпы алғанда, талдау функционалдық жабындар мен жылулық әсерді қоса пайдалануға негізделген біріктірілген әдістердің кеңінен*

*таралғанын көрсетті. Бұл комбинация мұзданудың қарсы және мұзды жою тиімділігін жоғары деңгейде сақтай отырып, энергия тұтынуды едәуір төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. Сонымен қатар, механикалық немесе акустикалық әсерлерді үйлестіруге негізделген біріктірілген әдістердің мұзды жою кезінде энергия тұтынуды төмендетуге айтарлықтай әлеуетке ие екендігі анықталды, олар қарастырылған басқа комбинациялардың көрсеткіштерінен асып түседі, алайда қосымша эксперименттік растауды талап етеді.*

*Жүргізілген талдау нәтижесінде мұзға әсер ететін физикалық фактор түрін, сондай-ақ орындау тәсілдері мен жүйелердің конструкциялық жетілдірілуін ескеретін жел энергетикалық қондырғыларындағы мұзданудың азайтудың біріктірілген әдістерінің иерархиялық жіктемесі ұсынылды. Сонымен қатар, қарастырылған әдістерге сапалық салыстырмалы талдау жүргізілді. Алынған нәтижелер жел энергетикалық қондырғыларындағы мұзданудың азайту әдістерін таңдауға және негіздеуге, сондай-ақ олардың жұмыс сенімділігін арттыруға ықпал ете алады.*

*Кілтті сөздер: Жел энергетикалық қондырғылары, мұздану, біріктірілген әдістер, синергетикалық әсер, мұзданудың қарсы күрес, мұзды жою, энергия тұтыну, тиімділік.*

**A. A. Arpish[1], S. A. Minazhova[2]*
[1]K. I. Satbayev Kazakh National
Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]QazNRG Group,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 30.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

## ANALYSIS OF COMBINED METHODS FOR MINIMIZING ICING OF WIND ENERGY INSTALLATIONS

*This article presents an analysis of modern combined methods for minimizing icing of wind energy installations. The results obtained by various authors in the course of studies on combined methods are summarized. The main problems arising from icing of wind energy*

*installations are highlighted, including losses and reduced electricity generation. It is shown that combined methods are a promising solution for improving anti-icing efficiency due to the synergistic effect.*

*In general, the analysis has shown that combined methods based on the combination of functional coatings and thermal effects have become widespread. It has been established that this combination makes it possible to significantly reduce energy consumption while maintaining high efficiency in both anti-icing and de-icing. In addition, it has been determined that combined methods based on the integration of mechanical or acoustic effects have significant potential for reducing energy consumption in de-icing, exceeding the performance of other considered combinations; however, they require further experimental validation.*

*As a result of the conducted analysis, a hierarchical classification of combined methods for minimizing icing of wind energy installations was proposed, which takes into account the type of physical impact on ice, as well as implementation methods and design modifications of systems. In addition, a qualitative comparative analysis of the considered methods was carried out. The obtained results can be used for the selection and justification of combined methods for minimizing icing of wind energy installations, as well as to improve the reliability of their operation.*

*Keywords: Wind energy installations, icing, combined methods, synergy effect, anti-icing, de-icing, energy consumption, efficiency.*

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