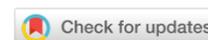


УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 005.41

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Анализ жизненного цикла объектов строительства на примере ветроэнергетических сооружений



EDN: FNVSUB

Н.С. Самарская

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[✉ nat-samars@yandex.ru](mailto:nat-samars@yandex.ru)

Аннотация

Введение. Строительство играет ключевую роль в экономике Российской Федерации, способствуя устойчивому развитию и улучшению условий жизни населения. Современные строительные объекты представляют собой жилые и коммерческие здания, коммунальные и инфраструктурные сооружения, такие как дороги и мосты, а также промышленные и энергетические объекты, включая ветроэнергетические сооружения. Ветроэнергетика становится важной частью строительной отрасли, способствуя инновациям и технологическому прогрессу.

Как объекты строительной отрасли ветроэнергетические сооружения (ВЭС) проходят свой жизненный цикл, включающий основные этапы: проектирование, строительство, эксплуатацию и утилизацию (реновацию). Каждый этап требует эффективного управления для обеспечения надежного функционирования и безопасности объекта. Так, для обеспечения в будущем генерации экологически безопасной энергии ветроэнергетическим сооружением возникает необходимость анализа планируемого объекта строительства и, как следствие, управление решениями еще на этапах проектирования и строительства. В ходе такого анализа появляется возможность выявить потенциальные проблемы этапа эксплуатации ветроэнергетического сооружения. К ним прежде всего можно отнести износ, коррозию конструктивных элементов и обморожение лопастей.

Данные проблемы являются причиной снижения производительности и срока службы объекта. В связи с этим целью работы являлся поиск возможности увеличения срока эксплуатации в жизненном цикле ветроэнергетических сооружений за счет решения проблемы обледенения лопастей на этапах проектирования и строительства.

Материалы и методы. Исследования базируются на методе анализа жизненного цикла строительных объектов, включающем систематизацию и оптимизацию процессов управления ими. Модель жизненного цикла ветроэнергетических сооружений, разработанная автором ранее, помогла выявить проблемы этапа эксплуатации объекта. Наиболее значимой проблемой, существенно влияющей на продолжительность этапа эксплуатации, является проблема обледенения лопастей. Анализ жизненного цикла ветроэнергетического сооружения показал, что обеспечить успешное решение этой проблемы целесообразно на этапах проектирования и строительства объекта. Данные проведенного анализа проблемы базируются на результатах исследований отечественных и зарубежных авторов.

В результате произведено обобщение и систематизация существующих методов борьбы с обледенением, на основе чего предложен новый способ реализации и разработана соответствующая методика выполнения работ. Такое решение, предусмотренное еще на этапе проектирования строительного объекта, позволит успешно управлять его жизненным циклом и, в частности, этапом эксплуатации.

Результаты исследования. В ходе проведенных исследований автором достигнута цель — увеличение продолжительности этапа эксплуатации в жизненном цикле ветроэнергетических сооружений. Для достижения поставленной цели проведен анализ жизненного цикла объектов строительства, в ходе которого выявлены причины, оказывающие влияние на срок эксплуатации объекта. Наиболее значимой причиной, приводящей к резкому сокращению срока службы объекта строительства, является проблема обледенения лопастей в холодный период года.

На основе анализа условий эксплуатации определены причины обледенения лопастей ветроэнергетических сооружений, установлены основные принципы защиты от обледенения и предложен новый способ решения этой проблемы с применением беспилотного летательного аппарата (далее — БПЛА), а также разработана методика

нанесения гидрофобных покрытий для предотвращения процесса обледенения. Внедрение результатов исследования позволит обеспечить требуемую производительность, что, в свою очередь, увеличит срок службы ветроэнергетического сооружения.

Обсуждение и заключение. Успешное управление жизненным циклом таких объектов строительства как ветроэнергетические сооружения требует внимания не только на этапе эксплуатации объекта, но и на этапах проектирования и строительства. Ключевая задача этапа эксплуатации ветроэнергетического сооружения — обеспечение необходимой производительности и увеличение срока службы объекта — может быть решена путем тщательного анализа жизненного цикла и предотвращением будущих проблем эксплуатации еще на этапах проектирования и строительства. Предложенный в исследовании способ борьбы с обледенением лопастей может быть внедрен не только для существующих ветроэнергетических сооружений, не имеющих специальных систем против обледенения, но и для проектируемых объектов. Причем предлагаемые решения для борьбы с обледенением лопастей могут быть включены в проектную документацию как обязательные виды работ, осуществляемые на этапе строительства, а также впоследствии — на этапе эксплуатации с определенной периодичностью.

Решение проблемы на этапе проектирования объекта позволит обеспечить повышение производительности и увеличение срока службы ветроэнергетического сооружения, функционирующего в условиях холодного и влажного климата. Таким образом, результаты исследования представляют собой теоретическую базу для управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений как одних из перспективных объектов строительства.

Ключевые слова: жизненный цикл, объекты строительства, ветроэнергетические сооружения, борьба с обледенением лопастей, гидрофобные покрытия

Для цитирования. Самарская Н.С. Анализ жизненного цикла объектов строительства на примере ветроэнергетических сооружений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):76–85. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Original Empirical Research

Life Cycle Analysis of Construction Facilities Using the Example of Wind Power Facilities

Natalia S. Samarskaya 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 nat-samars@yandex.ru

Abstract

Introduction. Construction plays a major role in the economy of the Russian Federation contributing to sustainable development and improving the living conditions of the population. Modern construction facilities include residential and commercial buildings, municipal and infrastructural structures such as roads and bridges, as well as industrial and energy facilities, including wind power facilities. Wind energy is becoming an important part of the construction industry, contributing to innovation and technological progress. As objects of the construction industry, wind power facilities go through their life cycle which includes the main stages: design, construction, operation and disposal (renovation). Each stage requires effective management to ensure reliable operation and safety of the facility. Thus, in order to ensure the future generation of environmentally safe energy by a wind power plant, it becomes necessary to analyze the planned construction site and, as a result, manage solutions at the design and construction stages. During such an analysis, it becomes possible to identify potential problems during the operation phase of a wind power facility. These include, first of all, wear, corrosion of structural elements and frostbite of the blades. These problems are the reason for the decrease in performance and service life of the object. The aim of the work was thus to search for the possibility of extending the service life in the life cycle of wind power facilities by solving the problem of blade icing at the design and construction stages.

Materials and methods. The research is based on the method of analyzing the life cycle of construction facilities, including the systematization and optimization of their management processes. The model of the life cycle of wind power facilities, developed by the author earlier, helped to identify the problems of the facility's operation phase. The most significant problem that significantly affects the duration of the operation phase is the problem of blade icing. An analysis of the life cycle of a wind power facility has shown that it is advisable to ensure a successful solution to this problem at the design and construction stages of the facility. The data of the conducted analysis of the problem are based on the research results of domestic and foreign authors.

As a result, a generalization and systematization of existing anti-icing methods was carried out, on the basis of which a new method of implementation was set forth and an appropriate work methodology was developed. Such a solution, envisaged at the design stage of the construction facility, will enable one to successfully manage its life cycle, and, in particular, the operation stage.

Results. Throughout the course of the research, the author has been able to increase the duration of the operation stage in the life cycle of wind power facilities. To this end, an analysis of the life cycle of construction facilities was carried out, during which the causes affecting the life of the facility were identified. The most significant reason leading to a sharp reduction in the service life of the construction site is the problem of icing of the blades during the cold season.

Based on the analysis of operating conditions, the causes of icing of the blades of wind power structures have been determined, the basic principles of anti-icing protection have been established, and a new method for solving this problem using UAVs (unmanned aerial vehicles) has been set forth, as well as a technique for applying hydrophobic coatings to prevent the icing process. The implementation of the research results will ensure the required performance, which, in turn, will increase the service life of the wind power plant.

Discussion and conclusion. Successful lifecycle management of such construction facilities as wind power plants requires attention not only at the stage of operation of the facility, but also at the stages of design and construction. The key task of the operation stage of a wind power facility is to ensure the necessary productivity and increase the service life of the facility. This can be solved by carefully analyzing the life cycle and preventing future operational problems at the design and construction stages. The method set forth in the study to combat blade icing can be implemented not only for existing wind power plants that do not have special anti-icing systems, but also for projected facilities. Moreover, the suggested solutions for combating icing of the blades can be included in the design documentation as mandatory types of work carried out during the construction phase, as well as subsequently during the operation phase with a certain frequency.

Solving the problem at the design stage of the facility will ensure an increase in productivity and an increase in the service life of a wind power plant operating in cold and humid climates. Thus, the results of the study provide a theoretical basis for managing the life cycle of wind power facilities, as one of the promising construction projects.

Keywords: life cycle, construction sites, wind power facilities, anti-icing of blades, hydrophobic coatings.

For citation. Samarskaya NS. Life Cycle Analysis of Construction Facilities Using the Example of Wind Power Facilities. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2025;4(1):76–85. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-76-85>

Введение. Строительство является одной из ключевых отраслей экономики Российской Федерации, играя важную роль в устойчивом социально-экономическом развитии страны и улучшении условий жизнедеятельности населения. Современные объекты строительной отрасли представляют собой разнообразный спектр сооружений, каждый из которых играет свою уникальную роль в инфраструктурном развитии общества. К ним относятся жилые и коммерческие здания, инфраструктурные объекты, такие как дороги, мосты и туннели, а также промышленные сооружения. Особое внимание в последние годы уделяется ветроэнергетическим сооружениям, которые становятся все более значимыми в контексте устойчивого развития и поиска альтернативных источников энергии [1]. Ветроэнергетические сооружения не только способствуют снижению зависимости от ископаемых видов топлива, но и минимизируют экологический след, обеспечивая чистую и возобновляемую энергию. Их интеграция в строительную отрасль открывает новые перспективы для инноваций и технологического прогресса, делая ветроэнергетику важным элементом современной строительной практики.

Ветроэнергетические сооружения, как и любые другие объекты строительства, проходят через определенный жизненный цикл, который включает в себя несколько ключевых этапов: проектирование, строительство, эксплуатацию и ликвидацию или реновацию. Каждый из этих этапов требует тщательного управления и контроля, чтобы обеспечить эффективность, безопасность и долговечность установок. Так, на этапе проектирования важно учитывать климатические условия, топографию местности и потенциальные ветровые ресурсы, чтобы максимизировать производительность будущих установок. Этап строительства ветроэнергетических сооружений требует использования высококачественных материалов и передовых технологий, что гарантирует надежность и устойчивость конструкций. Эксплуатация ветроэнергетических установок является критическим этапом, поскольку от нее зависит их экономическая целесообразность и экологическая эффективность. Регулярное техническое обслуживание и мониторинг состояния оборудования позволяют предотвратить поломки и продлить срок службы установок. Этап ликвидации или реновации предполагает либо демонтаж устаревших установок, либо их модернизацию для повышения эффективности. Этот процесс аналогичен жизненному циклу других объектов строительства, где также важно учитывать аспекты устойчивого развития и минимизацию воздействия на окружающую среду [2].

Таким образом, задачи управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений на каждом этапе уникальны и требуют различных подходов и решений. При этом следует отметить, что для обеспечения максимальной эффективности генерации экологически чистой энергии ветроэнергетическими сооружениями в долгосрочной перспективе необходимо осуществлять комплексный анализ планируемого объекта на начальных этапах

его жизненного цикла. Это предполагает реализацию системного подхода к управлению проектными и строительными решениями уже на стадии проектирования и возведения сооружения.

Проведение такого многофакторного анализа позволяет идентифицировать потенциальные проблемные зоны, которые могут проявиться в процессе эксплуатации объекта строительства. К числу наиболее критичных факторов относятся:

- механический износ конструктивных элементов сооружения;
- коррозионные процессы, воздействующие на металлические компоненты;
- обледенение лопастей ротора, особенно в условиях низких температур;
- деградация электронных компонентов под воздействием агрессивных внешних факторов.

Воздействие данных негативных факторов приводит к существенному снижению эксплуатационных характеристик объекта, включая уменьшение вырабатываемой мощности и сокращение межремонтных интервалов. В долгосрочной перспективе это влечет за собой уменьшение общей эффективности использования ветроэнергетического сооружения и требует дополнительных затрат на техническое обслуживание и восстановительные работы.

Своевременное выявление и учет потенциальных проблем на ранних этапах жизненного цикла сооружения позволяют разработать превентивные меры, направленные на повышение надежности и долговечности конструкции, что в конечном итоге обеспечивает оптимизацию эксплуатационных характеристик объекта в течение всего периода его функционирования.

Одной из ключевых проблем, существенно влияющих на срок эксплуатации ветроэнергетического сооружения, является обледенение лопастей. Такая проблема представляется критичной для объектов, размещенных в регионах с холодным и влажным климатом (рис. 1). Данный феномен препятствует эффективной выработке энергии (при толщине льда до 30 см выработка энергии снижается на 80 %), приводит к дисбалансу из-за неравномерного распределения льда на лопастях, утяжеляет конструкцию, снижая эффективность вращения [3]. Как следствие, происходит ускоренный износ оборудования: смещение центра тяжести, повышенная нагрузка на механизмы вращения и механическое повреждение поверхности лопастей. В результате обледенение может привести к сбоям в работе и необходимости преждевременного технического обслуживания [4].

Обледенение, представляющее собой отложение льда на обтекаемых частях ветроэнергетической установки, происходит, как правило, в режиме эксплуатации в условиях тумана, дождя или мокрого снега. При этом достаточными условиями для возникновения обледенения являются: наличие повышенной влажности, отрицательная температура воздуха и низкая температура рабочих поверхностей [5].



Рис. 1. Пример обледенения лопасти ветрогенератора

Важным параметром, характеризующим процесс обледенения лопастей, является интенсивность обледенения, представляющая собой толщину льда, который образуется на единице площади поверхности, контактирующей с осадками [6]. Можно выделить три степени интенсивности обледенения:

- слабое обледенение, представляющее собой накопления льда, ликвидация которого не требует больших трудозатрат. Оно не несет серьезной опасности для ВЭС;
- умеренное обледенение, при котором скорость накопления льда еще недостаточна для того, чтобы серьезно повлиять на безопасность и стабильность работы ВЭС;
- сильное обледенение, представляющее собой масштабное накопление льда, при котором есть вероятность вызвать заметную потерю скорости вращения ветротурбины. Данная степень интенсивности обледенения будет критической с точки зрения безопасности и повлечет за собой существенные экономические последствия (снижение производительности, увеличение расходов на техническое обслуживание и сокращение срока службы оборудования).

Учитывая значимость проблемы обледенения лопастей ветроэнергетических сооружений, научное сообщество предлагает ряд стратегий, направленных на снижение негативного воздействия ледяных образований [7, 8]. К современным методам борьбы с обледенением относятся:

- использование систем подогрева в конструкции турбины или нагревательных элементов на концах лопастей. Благодаря поддержанию температуры выше нуля градусов сохраняются аэродинамические свойства лопастей и обеспечивается стабильное функционирование ветроэнергетического сооружения в условиях обледенения;
- применение гидрофобного пластика в конструкции лопастей позволяет снизить адгезию воды и минеральных частиц к поверхности. В результате происходит препятствие удержанию влаги на поверхности лопасти и снижение вероятности обледенения;
- нанесение специальных покрытий на лопасти ветроэнергетического сооружения для создания защитного слоя. Такие покрытия обладают свойствами, предотвращающими образование ледяных структур;
- механическое удаление обледенения с помощью верхолазного оснащения или подъемника, а также удаление льда с вертолета с использованием горячих жидкостей. Однако данный метод позволяет решить проблему обледенения кратковременно и требует значительных организационных затрат.

На основании проведенного анализа современных методов борьбы с обледенением наиболее эффективным решением можно считать нанесение специальных покрытий на лопасти ветроэнергетического сооружения. Такой метод борьбы с обледенением относительно прост, имеет меньшее энергопотребление в сравнении с нагревательными системами, обеспечивает сравнительно длительную защиту, сохраняет аэродинамические характеристики объекта и практически не изменяет массу лопастей.

Однако, принимая во внимание размеры ветроэнергетических сооружений и необходимость повторного и периодического нанесения специальных покрытий, выбор способа реализации данного метода остается существенной проблемой.

Материалы и методы. Настоящее исследование базируется на методологии анализа жизненного цикла строительных объектов, которая включает комплексную систематизацию и оптимизацию процессов управления на всех этапах существования сооружения [9].

Разработанная ранее автором модель жизненного цикла ветроэнергетических сооружений позволила провести детальный анализ потенциальных проблем, возникающих в процессе эксплуатации объекта [2]. Среди выявленных факторов особое внимание было уделено проблеме обледенения лопастей, которая оказывает существенное влияние на продолжительность и эффективность эксплуатационного этапа.

Проведенный анализ жизненного цикла ветроэнергетического сооружения продемонстрировал, что наиболее целесообразным является решение проблемы обледенения на начальных этапах проектирования и строительства объекта. Эмпирическая база исследования сформирована на основе анализа результатов работ отечественных и зарубежных исследователей в данной области. В ходе исследования была осуществлена систематизация существующих методов борьбы с обледенением, что позволило разработать инновационный подход к решению данной проблемы и создать соответствующую методику реализации противообледенительных мероприятий.

Внедрение предлагаемого решения в проектную концепцию строительного объекта создаст предпосылки для результативного управления жизненным циклом ветроэнергетического сооружения, уделяя приоритетное внимание обеспечению эффективности его эксплуатации.

Результаты исследования. Проблема борьбы с обледенением лопастей ветроэнергетического сооружения может быть успешно решена путем нанесения гидрофобных покрытий, позволяющих создать защитный слой и препятствовать процессу образования наледи. Эти покрытия обычно создают на основе материалов с микро- или наноструктурами, которые придают поверхности чрезвычайно высокие водоотталкивающие свойства [10]. Микроструктуры на поверхности покрытия способствуют тому, что капли воды не могут равномерно распределяться

по поверхности, а вместо этого формируются в шарики и скатываются, унося с собой влагу и препятствуя образованию льда.

Для решения проблемы обледенения лопастей ветрогенераторов были выбраны два состава («Силокор-Антилед» и графен), которые благодаря своим физико-химическим характеристикам и способности длительное время сохранять гидрофобные свойства наилучшим образом подходят для соответствующих климатических условий эксплуатации ветрогенераторов. Основными компонентами и химическими веществами, входящими в состав «Силокор-Антилед», являются: силиконовый полимер (основной компонент, обеспечивающий гидрофобные свойства покрытия), растворители для разжижения полимера, технологические добавки, улучшающие эксплуатационные характеристики покрытия, и наполнители, повышающие механические свойства покрытия [11].

В отличие от «Силокор-Антилед», графен — это двумерная аллотропная модификация углерода, состоящая из атомов углерода, расположенных в гексагональной кристаллической решетке [12]. Графен состоит исключительно из атомов углерода. Каждый атом углерода имеет 6 электронов: 2 во внутренней оболочке и 4 — во внешней. Таким образом, по химическому составу графен идентичен алмазу и графиту, так как состоит из тех же атомов углерода. Однако различие в физических свойствах обусловлено их особым пространственным расположением. Благодаря этой особенности материал обладает уникальными свойствами, такими как гидрофобность, высокая прочность и электропроводность. Поэтому также может быть использован для борьбы с обледенением лопастей ветрогенераторов.

Для предпочтительного выбора состава произведен сравнительный анализ, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ гидрофобных составов для борьбы с обледенением лопастей ветрогенератора

Показатель	Гидрофобный состав	
	«Силокор-Антилед»	Графен
Долговечность	Длительный срок службы при условии правильной подготовки поверхности и нанесения	Высокая долговечность благодаря прочности и устойчивости к внешним воздействиям, подходит для экстремальных условий
Экономическая эффективность	Более экономичное решение, особенно для крупных объектов	Высокая стоимость производства и нанесения
Экологичность	Содержит растворители, что может требовать дополнительных мер по утилизации и безопасности	Экологически безопасный материал при условии использования безопасных методов производства и нанесения
Совместимость с поверхностями	Подходит для металлических, бетонных, окрашенных и других поверхностей	Универсален, может быть нанесен на различные материалы, включая сложные и деликатные поверхности
Светопропускание	Высокий коэффициент светопропускания, что может быть важно для некоторых видов применений	Не влияет на светопропускание, может быть использован в прозрачных покрытиях
Нанесение и обработка	Простота нанесения благодаря двухкомпонентной системе. Требуется тщательной подготовки поверхности перед нанесением	Более сложная процедура нанесения, часто требующая использования специализированных методов

Анализируя данные таблицы 1, можно заключить, что для большинства вариантов применения состав «Силокор-Антилед» может быть предпочтительным выбором благодаря своей доступности и эффективности. В то время как графен может быть оптимальным решением для специализированных и высоконагруженных условий эксплуатации, где его уникальные свойства могут быть максимально реализованы. Оба состава успешно применяются для защиты от обледенения скатных кровель, водосточков, мачтовых конструкций, для обработки керамической и полимерной черепицы, шифера [11]. Учитывая такой спектр областей применения, данные составы вполне можно рассматривать для защиты лопастей ветрогенератора в условиях постоянно повторяющихся циклов замерзания-оттаивания. Кроме того, результаты проведенных аналитических исследований подтвердили, что покрытия с использованием графена являются весьма перспективными. Так, ученые университета Райса предложили использовать графеновые наноленты как эффективный антиобледенитель для различных поверхностей, включая крылья самолета, линии электропередач, лопасти вертолета [13, 14]. Графеновые наноленты формируют

связь в композите, проводя электрический ток через материал с минимальной нагрузкой. Возникающее электро-термическое тепло приводит к нагреву поверхности объекта. Между поверхностью и льдом во время растапливания образуется талая вода — благодаря этому наледь можно удалить, не дожидаясь окончания процесса. Следовательно, графеновое покрытие является перспективным материалом, который можно наносить на поверхность лопастей ветрогенератора или использовать графеновые наноленты, снижая вероятность обледенения рабочих поверхностей и продлевая тем самым срок службы объекта.

Так как нанесение гидрофобных покрытий в рамках данной работы рассматривается на уже возведенный и функционирующий ветрогенератор, возникает задача организации данного процесса. Вместо живой рабочей силы или использования громоздкой авиатехники можно обеспечить нанесение покрытий с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Интеграция БПЛА в сферу высотных работ позволит повысить эффективность обслуживания ветрогенераторов, так как данная область в нынешних реалиях слабо развита. Несмотря на временные ограничения применения БПЛА в мирных целях, данный инструмент остается по-прежнему весьма перспективным для решения многих задач.

Предлагаемый способ нанесения гидрофобных покрытий на поверхность лопастей ветрогенератора предполагает выбор соответствующего задачам БПЛА, а также разработку методики выполнения операций.

Для реализации процесса распыления гидрофобных составов летательный аппарат должен обладать возможностью установки подвешенного оборудования на его корпус. В этой связи наиболее подходящим вариантом является агродрон, который может быть оснащен подвесной системой как для посева, так и для опрыскивания полей. В контексте борьбы с обледенением подвесное оборудование для опрыскивания будет использоваться для нанесения гидрофобных составов на поверхности ветрогенератора.

Для выполнения процесса нанесения гидрофобных составов на лопасти ветрогенератора может быть использована следующая схема облета (рис. 2).

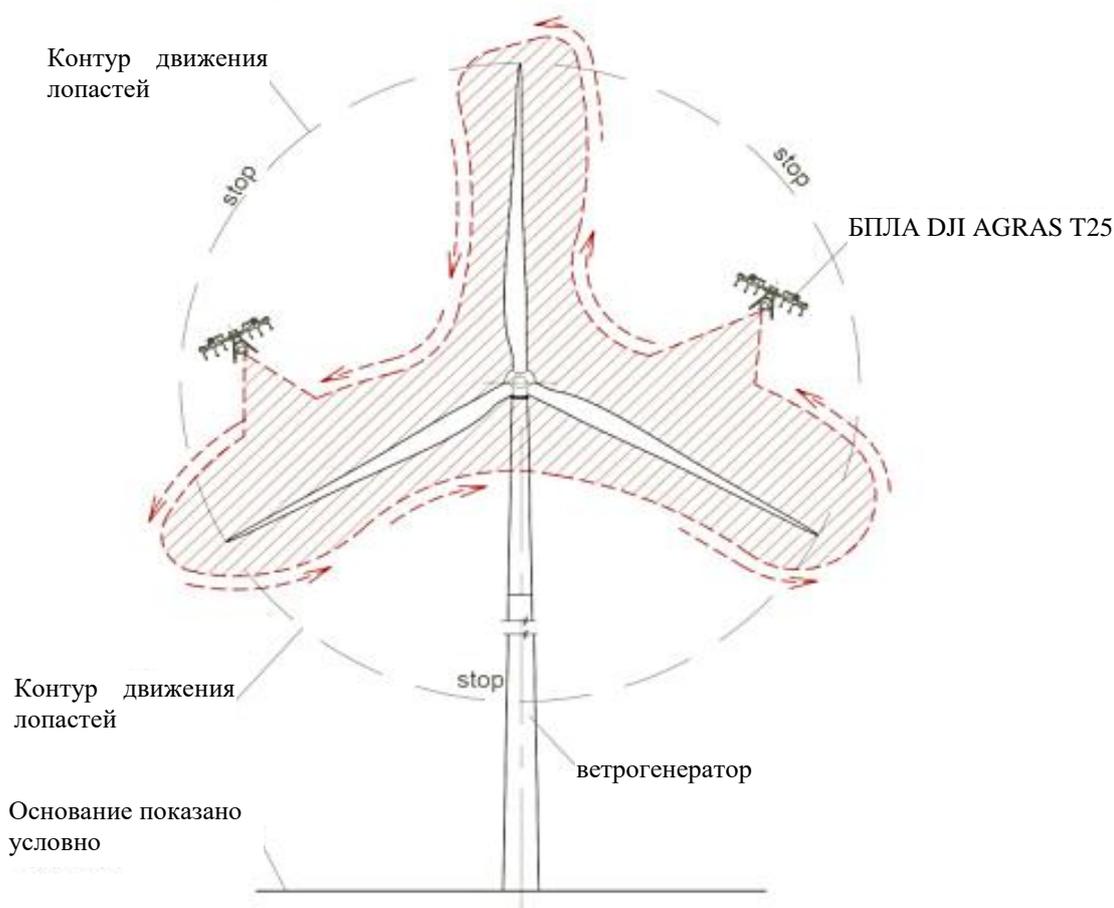


Рис. 2. Схема облета при обработке лопастей гидрофобными покрытиями с помощью БПЛА

В качестве примера был рассмотрен БПЛА DJI AGRAS T25, предназначенный для сельскохозяйственных нужд. Аппарат способен нести до 25 кг полезной нагрузки, что позволяет использовать его для распыления больших объемов материала. Время нахождения в воздухе составляет 15 мин, а дальность управления — около 5 км,

что позволяет оператору свободно перемещаться и управлять аппаратом на значительном расстоянии. Особенностью данной модели БПЛА является высокоточная система распыления, обеспечивающая равномерное распределение вещества.

Также аппарат оборудован современными сенсорами и системами навигации, включая GPS, что позволяет ему точно следовать заданным маршрутам и избегать препятствий на пути. Агродрон может быть оснащен мультиспектральными камерами и датчиками для сбора данных о состоянии покрытия, что помогает в принятии более обоснованных технических решений.

На основании анализа существующих методов борьбы с обледенением и с учетом недостатков текущих подходов в свете вышеизложенных проблем была разработана методика нанесения гидрофобных составов на поверхности ветрогенераторов с помощью БПЛА. Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. *Подготовка и сбор данных о метеоусловиях.* Перед началом работ по нанесению гидрофобного состава на лопасти ветрогенератора необходимо собрать актуальные метеоданные, включающие в себя скорость ветра, температуру воздуха и влажность. Эти параметры важны для обеспечения безопасности эксплуатации БПЛА и качества обработки поверхностей.

2. *Предварительный облет ветрогенератора с фотофиксацией.* Необходим для выявления возможных мест образования наледи, а также идентификации повреждений и проблемных зон. На данном этапе также может быть произведена оценка труднодоступных участков и зафиксировано время пролета.

3. *Выбор и подготовка гидрофобного состава.* Исходя из особенностей ветрогенерирующего объекта, климатических данных и критериев таблицы 1, следует осуществить обоснованный выбор гидрофобных материалов. Далее подготовить раствор, перемешать компоненты в подготовленной таре.

4. *Сборка и подготовка БПЛА.* При необходимости следует произвести сборку и заправку беспилотного летательного аппарата, оснащенного системой распыления. Убедиться в исправности всех элементов и правильности их установки.

5. *Облет ветрогенератора и нанесение гидрофобного покрытия.* Нанесение гидрофобного покрытия для борьбы с обледенением осуществляют в несколько этапов до достижения толщины слоя 50–70 мкм.

Этап 1. Управление БПЛА с полным облетом ветрогенератора согласно схеме (рис. 2) и нанесение первого слоя покрытия пневматическим способом. Важной задачей этого этапа является обеспечение равномерного распределения состава по поверхности лопастей.

Этап 2. Высыхание первого слоя в течении 15 мин и нанесение второго слоя гидрофобного состава аналогичным способом, обеспечивая равномерное распределение материала.

Этап 3. После полного высыхания облет ветрогенератора и нанесение третьего слоя покрытия.

6. *Контроль качества покрытия.* Для выполнения визуального контроля качества покрытия на наличие дефектов следует осуществить облет ветрогенератора с фото- видеофиксацией. При обнаружении недостатков произвести корректировку путем нанесения еще одного слоя гидрофобного покрытия.

7. *Документация и отчетность.* Составить отчет о проделанной работе, в который необходимо включить время и дату выполнения работ, метеоусловия, выбранный состав гидрофобного покрытия и все этапы процесса нанесения состава на рабочие поверхности ветрогенератора.

Обсуждение и заключение. Эффективное управление жизненным циклом ветроэнергетических установок как объектов капитального строительства предполагает использование комплексного подхода, интегрирующего управленческие решения на всех этапах: от проектной концепции до эксплуатационного мониторинга.

Фундаментальной целью эксплуатационного периода функционирования ветроэнергетического сооружения является увеличение производительности при одновременном повышении ресурса работоспособности сооружения. Достижение данной цели обеспечивается посредством превентивного анализа потенциальных эксплуатационных рисков и их нивелирования на начальных этапах жизненного цикла объекта. Разработанная методология противодействия обледенению лопастных элементов демонстрирует универсальность применения как в отношении существующих ветроэнергетических сооружений, не оснащенных специализированными противообледенительными системами, так и для перспективных проектов. При этом комплекс противообледенительных мероприятий может быть нормативно закреплён в проектной документации в качестве императивных требований, подлежащих реализации как на стадии строительства, так и в рамках периодического обслуживания в процессе эксплуатации.

Внедрение превентивных мер на этапе проектной подготовки обеспечивает существенное увеличение срока службы ветроэнергетического сооружения, эксплуатируемого в условиях неблагоприятного климатического воздействия с повышенной влажностью и низкими температурными режимами. Следовательно, полученные в ходе исследования результаты формируют теоретико-методологическую базу для осуществления многоаспектного управления жизненным циклом ветроэнергетических сооружений, позиционируемых как важный сегмент современного строительного сектора.

Список литературы / References

1. Бежан А.В. Роль ветроэнергетики в социально-экономическом развитии районов Арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области). *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(3):449–457. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-449-457>
- Bezhan AV. Role of Wind Energy in the Socio-economic Development of the Arctic Regions of the Russian Federation (Using the Example of the Murmansk Region). *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(3):449–457. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-449-457>
2. Самарская Н.С., Парамонова О.Н., Лысова Е.П., Чистякова В.Д. Разработка модели жизненного цикла для ветроэнергетической установки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(4):25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
- Samarskaya NS, Paramonova ON, Lysova EP, Chistyakova VD. Development of a Life Cycle Model for a Wind Power Plant. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
3. Умурзаков А.К. Способы борьбы с обледенением лопастей ветрогенератора. *Мировые естественно-научные исследования современности. Технический прогресс*. 2023;229–230.
- Umurzakov AK. Ways to Combat Icing of Wind Turbine Blades. *Modern World Natural Science Research. Technological Progress*. 2023; 229-230. (In Russ.).
4. Okulov V, Kabardin I, Mukhin D, Stepanov K, Okulova N. Physical Deicing Techniques for Wind Turbine Blades. *Energies*. 2021;14(20):6750. <https://doi.org/10.3390/en14206750>
5. Martini F, Contreras Montoya LT, Ilinca A. Review of Wind Turbine Icing Modelling Approaches. *Energies*. 2021;14(16):5207. <https://doi.org/10.3390/en14165207>
6. Wang Q, Yi X, Liu Y, Ren J. Numerical Investigation of Dynamic Icing of Wind Turbine Blades under Wind Shear Conditions. *Renewable Energy*. 2024;227:120495. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120495>
7. Contreras Montoya LT, Lain S, Ilinca A. A Review on the Estimation of Power Loss Due to Icing in Wind Turbines. *Energies*. 2022;15(3):1083. <https://doi.org/10.3390/en15031083>
8. Meledin VG, Kabardin I, Dvoinishnikov SV, Zuev VO. Experimental Research on Combined Methods against Icing of Wind Turbine Blades. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2024; 33(4):779–791. <https://doi.org/10.1134/S181023282404009X>
9. Беляев А.В., Антипов С.С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019;1:65–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (дата обращения 10.02.2025).
- Belyaev AV, Antipov SS. Life Cycle of Construction Objects in Information Modeling of Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2019;1:65–72. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36973984> (accessed: 10.02.2025).
10. Шустиков С.А., Ульянова Н.В. Обзор конструктивных решений по борьбе с обледенением самолета. В: *Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве»*. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 2021. С. 337–344. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48286208> (дата обращения 10.02.2025).
- Shustikov SA, Ulyanova NV. Review of Constructive Solutions for Aircraft Deicing. *Proceedings of All-Russian Scientific Practical Conference Modern Technologies in Shipbuilding and Aviation Education, Science and Manufacturing*. 2021. P. 337–344 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48286208> (accessed: 10.02.2025).
11. Ахременко С.А., Викторов Д.А., Протченко М.В. Анализ перспектив развития современных систем антиобледенения. В: *Материалы международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве»*. Брянск: БГИТУ; 2019. С. 136–142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811094> (дата обращения 10.02.2025).
- Akhremenko SA, Viktorov DA, Protchenko MV. Analysis of Prospects for the Development of Modern Deicing Systems. *Innovations in Construction*. 2019. P. 136–142. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811094>. (accessed: 10.02.2025).
12. Куркина И.И. Исследование структурных, электрических и оптических свойств фторированного графена и структур графен/фторированный графен/кремний. В: *Материалы V Международной конференции с элементами научной школы «Новые материалы и технологии в условиях Арктики»*. Якутск: СВФУ им. М.К.Аммосова; 2022. С. 43–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49580222> (дата обращения 10.02.2025).
- Kurkina II. Investigation of the Structural, Electrical and Optical Properties of Fluorinated Graphene and Graphene/fluorinated Graphene/silicon Structures. *New materials and technologies in the Arctic*. 2022. P. 43–44. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49580222> (accessed: 10.02.2025).
13. Лебедева О.С., Лебедев Н.Г. Пьезопроводимость графеновых нанолент. Упругопластические деформации. *Физика твердого тела*. 2024;66(4):608–614. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.04.57799.25>

Lebedeva OS, Lebedev NG. Piezo Conductivity of Graphene Nanoribbons. Elastoplastic Deformations. Solid State Physics. 2024;66(4):608-614. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.04.57799.25>

14. Wang H, Wang HS, Ma C, Chen L, Jiang C, Xie X. et al. Graphene Nanoribbons for Quantum Electronics. *Nature Reviews Physics*. 2021;3(12):791–802. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00370-x>

Об авторе:

Самарская Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Natalia S. Samarskaya, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025