

С. В. Какаулин^{1}, И. К. Кабардин¹, М. Р. Гордиенко¹, А. Т. Янчат¹*

Опробование антиобледенительной системы для борьбы с обледенением на лопастях ветрогенератора с применением гидрофобных покрытий

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: kakaulin_sergeri@mail.ru

Аннотация. Гидрофобные покрытия стали важным инструментом в борьбе с обледенением различных поверхностей, включая лопасти ветрогенераторов. Эти покрытия создают гидрофобный слой на поверхности, который отталкивает воду и предотвращает образование льда. Применение гидрофобных покрытий в сочетании с тепловым и вибрационным методами защиты может значительно увеличить эффективность борьбы с обледенением. Цель исследования заключалась в экспериментальном опробовании антиобледенительной системы на основе гидрофобных покрытий применимо к ветрогенераторам. В работе использовался климатический стенд, который позволяет качественно моделировать основные типы льда, такие как наледь, изморозь и иней. Использование метода фазовой триангуляции позволяет получить точную трехмерную геометрию обледенения и толщины слоя льда, что дает возможность оценить эффективность различных методов защиты и оптимизировать их применение.

Ключевые слова: гидрофобные покрытия, ветрогенератор, метод фазовой триангуляции

S. V. Kakaulin^{1}, I. K. Kabardin¹, M. R. Gordienko¹, A. T. Yanchat¹*

Testing of an Anti-Icing System to Combat Icing on Wind Turbine Blades Using Hydrophobic Coatings

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kakaulin_sergeri@mail.ru

Abstract. Hydrophobic coatings have become an important tool in the fight against icing of various surfaces, including wind turbine blades. These coatings create a hydrophobic layer on the surface that repels water and prevents ice formation. The use of hydrophobic coatings in combination with thermal and vibration protection methods can significantly increase the effectiveness of anti-icing. The purpose of the study was to experimentally test an anti-icing system based on hydrophobic coatings applicable to wind turbines. A climate stand was used in the work, which allows high-quality modeling of the main types of ice such as ice, hoarfrost and frost. The use of the phase triangulation method allows us to obtain an accurate three-dimensional geometry of the icing and the thickness of the ice layer, which makes it possible to evaluate the effectiveness of various protection methods and optimize their application.

Keywords: hydrophobic coatings, wind turbine, phase triangulation method

Введение

Защита ветрогенераторов от обледенения имеет важное значение по нескольким причинам. Во-первых, образование льда на лопастях ветрогенераторов приводит к снижению их производительности из-за изменения формы лопастей и увеличения сопротивления воздуху. Это приводит к уменьшению выработки электроэнергии. Во-вторых, обледенение представляет опасность для ветрогенератора, так как отрыв кусков льда может повредить лопасти и создать угрозу для окружающей среды и людей. Кроме того, регулярное обслуживание и очистка лопастей от льда требует значительных временных и финансовых затрат, что увеличивает операционные расходы ветрогенераторов. Защита от обледенения помогает сократить необходимость в таких процедурах и, как следствие, снизить операционные расходы. Кроме того, обледенение может привести к повышенному износу и повреждениям оборудования, что снижает надежность и срок службы ветрогенераторов [1]. Таким образом, защита ветрогенераторов от обледенения не только повышает их производительность и надежность, но и снижает операционные расходы, что делает эксплуатацию этих устройств более эффективной и безопасной.

Нынешние методы защиты ветрогенераторов от обледенения требуют значительных затрат на обслуживание и не всегда являются энергоэффективными. К примеру, авторы проекта исследовательской программы Energiforsks по ветроэнергетике «Vindforsk IV», чтобы удалять наледь с лопастей ветряных турбин, использовали вертолет и горячую воду (рис. 1).



Рис. 1. Процесс борьбы со льдом при задействовании вертолета [2]

Для испытания антиобледенительной системы для борьбы с обледенением на лопастях ветрогенератора применялись традиционные способы борьбы с обледенением (тепловой и ударно-волновой методы) в сочетании с гидрофобными материалами. За счет системы контроля наледи, метода фазовой триангуляции [3], удалось зафиксировать размеры, поверхностную структуру, форму и цвет

объекта, а по этой совокупности параметров наиболее эффективно решить поставленную задачу.

Экспериментальная установка, материалы и методики экспериментов

Экспериментальная установка для искусственного обледенения представляла собой климатический стенд с четырьмя трубами Ранка, холодный воздух из которых поступал в климатическую трубу (рис. 2). Холодильная мощность каждой трубы порядка 800 Вт при избыточном давлении 6 бар, минимальная температура при 7 бар – минус 22 градуса Цельсия. Скорость потока 3 м/с. Исследуемые объекты – цилиндр или элемент лопасти – располагались на расстоянии 2 м от выходов воздуха из труб Ранка, температура в трубе измерялась на расстоянии 0,1 м за элементом лопасти.

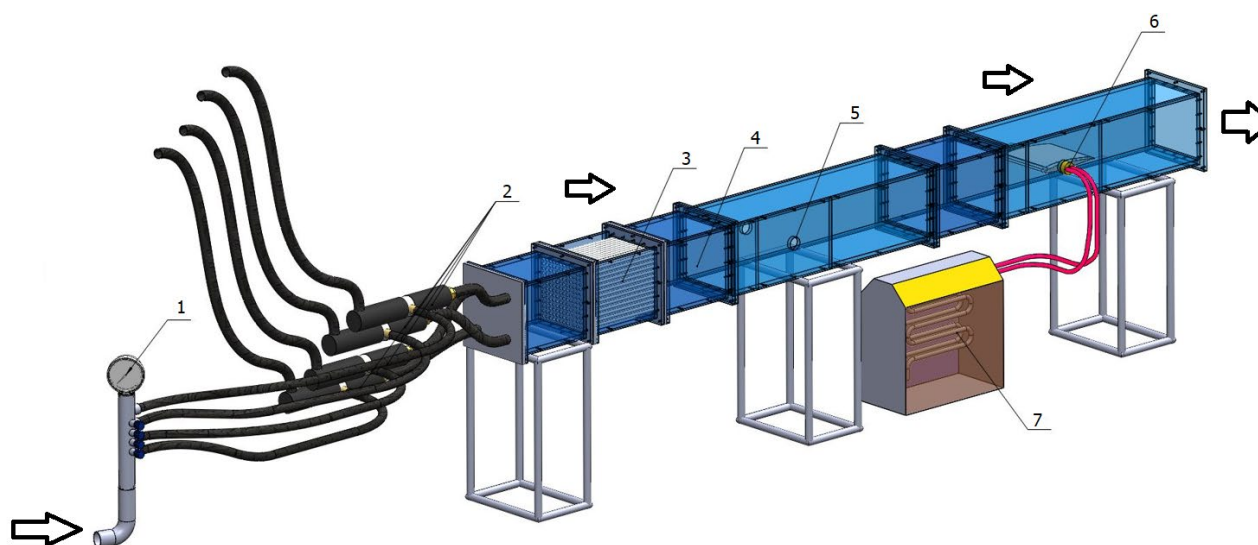


Рис. 2. Схема установки для исследования обледенения при обтекании образца охлажденным воздухом: 1 – вход в трубы Ранка, 2 – трубы Ранка, 3 – хонейкомб, 4 – секция рабочего канала, 5 – технологические отверстия под объект, 6 – исследуемый объект, 7 – холодильная машина

Процессы обледенения, как правило, сопровождаются наличием в воздухе значительного количества капельной влаги в виде дождя, мокрого снега и брызг от водоемов. Для имитации капельной влаги в потоке воздуха перед экспериментальным объектом создан распыл с различной дисперсностью, интенсивностью и размерами капель. Для этой цели используются различные типы форсунок, которые устанавливаются в ядро потока.

Супергидрофобным материалом, исследованным в работе, были фторопластовые войлочные материалы, обеспечившие реализацию поверхностей требуемой шероховатости для достижения супергидрофобности [4]. Особенностью

фторполимеров и политетрафторэтилена (ПТФЭ) является технологическая сложность получения волокон. Известные методы электро- и аэродинамического формования, основанные на использовании растворов полимеров, не применимы для ПТФЭ в силу его нерастворимости. В то же время он наиболее перспективен из-за высокой химической и термической стойкости, низкого коэффициента трения, уникальных диэлектрических свойств и экологичности. Единственным способом получения волокон ПТФЭ является лазерная обработка (абляция) блочного полимера. Нетканые ПТФЭ-материалы получают в виде ваты и войлока, последний более удобен для практического применения. Важным свойством для гидрофобного материала является его стойкость к солевым, кислотным и щелочным растворам.

В исследовании был использован ударно-волновой метод, который реализовывался с помощью компрессора с электромагнитным клапаном AR2W41-15GBV, формирующим импульсы расхода с заданными параметрами. Для реализации нагревательного метода использовалась нихромовая проволока, которая подсоединялась к лабораторному блоку питания и, подобно нити накаливания, излучала тепло. При подаче напряжения 20 В и силе тока 2 А, температура нити достигала 86 градусов.

Ход эксперимента начинается с выведения климатического стенда на рабочие параметры. Для достижения температуры в -12°C во всем рабочем объеме, необходимо запустить климатический стенд на 20 минут при избыточном входном давлении 5 бар. После этого фиксируются начальные параметры, такие как температура внутри рабочего участка, засев капельной влагой и давление на входе труб Ранка, для создания определенного в эксперименте типа обледенения (изморозь). Затем проводятся измерения толщины слоя льда и поверхностной геометрии на лопасти с использованием метода фазовой триангуляции. Этот метод позволяет точно определить толщину льда на поверхности лопасти, что является важным показателем для оценки эффективности защиты от обледенения. После измерений применяется выбранный противообледенительный метод, например, нагрев и ударно-волновое воздействие, либо их комбинация. После применения противообледенительного метода повторяются измерения остаточной толщины слоя льда на лопасти, и повторно делается фото- видео фиксация. Это позволяет оценить эффективность примененного метода и сравнить результаты до и после его применения.

Завершается эксперимент анализом полученных данных и формированием выводов об эффективности противообледенительного метода. Полученные результаты документируются для последующего анализа и отчетности.

Результаты

Было проведено несколько циклов измерений, которые включали в себя противообледенительные воздействия с помощью нагрева, ударно-волнового метода, а также их комбинации.

Первым опробованным методом стал ударно-волновой (рис. 3). Получив обледенение в форме изморози, была зафиксирована наледь толщиной 1,6 мм. По-

сле, при помощи модуля управления клапаном, задавалось время периода 1 секунда и импульс 0,5 секунды. Воздействия на тестируемую поверхность в течение 60 секунд было достаточно, чтобы полностью избавиться ото льда.

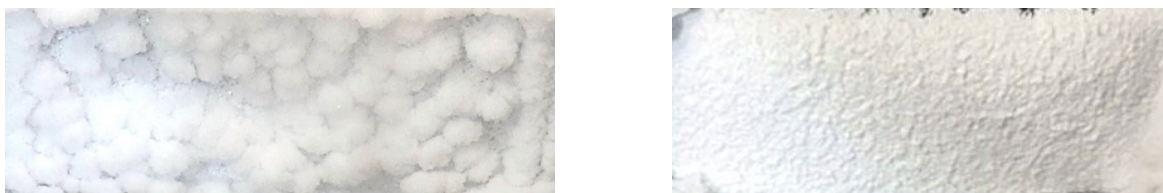


Рис. 3. ПТФЭ а) перед ударно волновым воздействием, б) после 60 секунд ударно-волнового воздействия

Нагрев был еще одним опробованным в исследовании методом (рис. 4). Получив необходимое обледенение, применялся нагревательный метод. Полностью избавиться ото льда с модели лопасти ветрогенератора не удалось, между поверхностью и льдом образуется воздушная прослойка, при этом лед остается держаться на периферии от защитной поверхности. Такой сюжет с большой вероятностью может повторяться в реальных условиях. Поэтому необходимо стряхивать лед с помощью дополнительных средств.

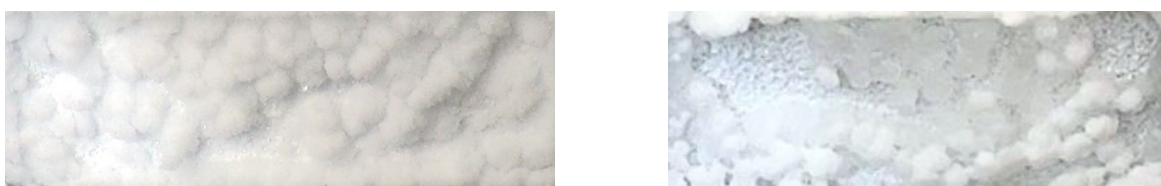


Рис. 4. ПТФЭ а) перед воздействием методом нагрева, б) после 600 секунд воздействия методом нагрева

Заключительные эксперименты проводились в комбинации предыдущих. Для того чтобы гидрофобная поверхность начала работать, необходимо повысить температуру передней кромки выше температуры замерзания воды. После 30 секунд нагрева был задействован ударно-волновой метод, который за несколько импульсов полностью разрушил наледь (рис. 5).

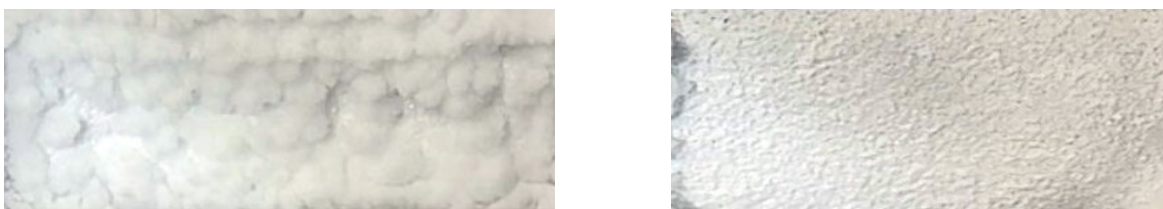


Рис. 5. ПТФЭ а) перед комбинированным воздействием, б) после 33 секунд воздействия комбинированным методом

Проведенные эксперименты показывают явное превосходство комбинированного метода перед методом нагрева и ударно-волновым методом. В отдельности методы либо энергетически неэффективны, либо не полностью справляются с поставленной задачей. Комбинированная система содержит взаимодополняющие элементы и может быть применена на практике.

Заключение

Проведено экспериментальное сопоставление противообледенительных методов защиты лопастей ветрогенераторов, таких как ударно-волновой, нагревательный и комбинированный. По итогам экспериментов комбинированный метод на основе гидрофобных покрытий показал наилучшие результаты в борьбе с обледенением. Важно продолжать исследования и разработки в этой области, чтобы создать более энергоэффективные методы защиты, которые помогут снизить потребление энергии и сделать эксплуатацию ветрогенераторов более устойчивой и экологически дружелюбной.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang, Y.; Xu, Y. An effect assessment and prediction method of ultrasonic de-icing for composite wind turbine blades// *Renewable Energy*. – 2018. – Vol. 118. – P. 1015–1023.3.
2. H. Gedda and M. Widgren Airborne de-icing solutions for wind turbines, Asa Elmqvist Program manager, Vindforsk IV, Stockholm, July 2016.
3. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2023. – Т. 30. – С. 121–126.
4. Л.Б. Бойнович, В.М. Бузник, П.Н. Гракович, В.И. Грязнов, А.С. Пашинин, Г.Ю. Юрков. Создание и модифицирование супергидрофобных материалов на основе волокнистого политетрафторэтилена // *Химическая технология*. – 2015. – Т.462, № 4. – С. 431–334.

© С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, А. Т. Янчат, 2024