

И. К. Кабардин^{1}, В. Е. Ледовский¹, С. В. Какаулин¹, М. Р. Гордиенко¹*

Развитие методов борьбы с обледенением за счет применения антиобледенительных фторполимерных покрытий на нержавеющей стали

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

Аннотация. В представленной работе рассмотрен метод борьбы с обледенением путем создания поверхностей с противообледенительными свойствами. Поверхность создается путем осаждения фторполимерного покрытия на нержавеющую сталь, предварительно обработанную пескоструйным методом. Измерены характеристики смачивания и шероховатость полученного покрытия. Полученные образцы без покрытия и с покрытием протестированы в климатической аэродинамической трубе. Исследовано влияние созданной поверхности на способность противодействовать обледенению. Показаны перспективность и ограничения при использовании полимерных поверхностей на нержавеющей стали. Рассмотрен эффект разрушения супергидрофобных поверхностей на нержавеющей стали в аэродинамическом потоке. Полученные результаты представляют интерес при разработке противообледенительных систем для конструкций с нержавеющей сталью (защитных пластиковых элементов мостов, элементов ветрогенераторов, нефтяных платформ и пр.).

Ключевые слова: фторполимерные покрытия, обледенение, супергидрофобные поверхности, ветрогенератор

I. K. Kabardin^{1}, V. E. Ledovsky¹, S. V. Kakaulin¹, M. R. Gordienko¹*

Development of Anti-Icing Methods through the Use of Anti-Icing Fluoropolymer Coatings on Stainless Steel

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract: In the presented work, a method of combating icing by creating surfaces with anti-icing properties is considered. The surface is created by depositing a fluoropolymer coating on stainless steel pre-sandblasted. The wetting parameters and roughness of the resulting coating were measured. The obtained uncoated and coated samples were tested in a climatic wind tunnel. The effect of the created surface on anti-icing properties is investigated. The prospects and limitations of using polymer surfaces made on stainless steel are shown. The effect of destruction of superhydrophobic surfaces on stainless steel in an aerodynamic flow is considered. The results obtained are of interest in the development of anti-icing systems for stainless steel structures (protective plastic elements of bridges, elements of wind turbines, oil platforms, etc.).

Keywords: fluoropolymer coatings, icing, superhydrophobic surfaces, wind turbine

Введение

Для арктической ветроэнергетики борьба с обледенением представляет собой актуальную задачу [1]. Предсказание аккреции льда и вызываемых ею эффектов, разработка противообледенительных систем являются важной частью проектирования и эксплуатации ветрогенераторов. В смежных отраслях при рассмотрении вопросов обледенения летательных аппаратов уже давно пытаются использовать наноструктурированные поверхности из материалов, используемых в авиации – сталей, алюминиевых и титановых сплавов, которые противостоят обледенению [2]. Для лопастей ветротурбин металлы не используют, их заменяют облегченные пластиковые конструкции. В работе [3] был предложен относительно дешевый литографический способ нанесения на пластиковые поверхности лопастей ветрогенераторов наноструктур или других полимерных покрытий, используемых для защиты от водной и ледовой эрозий в элементах мостов, морских нефтяных платформ и пр. Одним из способов борьбы с обледенением является применение супергидрофобных покрытий в виде напыленного фторполимера на нержавеющей стали. Действительно, такие поверхности приобретают свойства супергидрофобности, обладают малыми коэффициентами теплопроводности и трения, а также хорошей проводимостью и малой силой адгезии к образующемуся льду.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Пластинки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т размером 30×100×1 мм были обработаны пескоструйным методом.

Комплексные испытания включают в себя проверку эффективности исследуемого типа противообледенительной нанопокрывтий в климатической аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН.

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 интенсивностью и размерами капель. Для этой цели используются различные типы форсунок, которые устанавливаются в ядро потока.

Экспериментальная установка по искусственному обледенению представляла собой климатическую трубу, оснащенную трубами Ранка, холодный конец которых был направлен в климатическую трубу (рис. 1). Холодильная мощность каждой трубы Ранка при давлении 6 бар порядка 800 Вт, минимальная температура достигается при 7 бар и составляет -22 °С. Стенд также оснащен холодильной машиной для охлаждения объекта, но в данной работе она не использовалась. Скорость потока порядка 3 м/с. Объект располагался на расстоянии 2 м от выходов воздуха из труб Ранка, температура в трубе измерялась в 0,1 м за объектом.

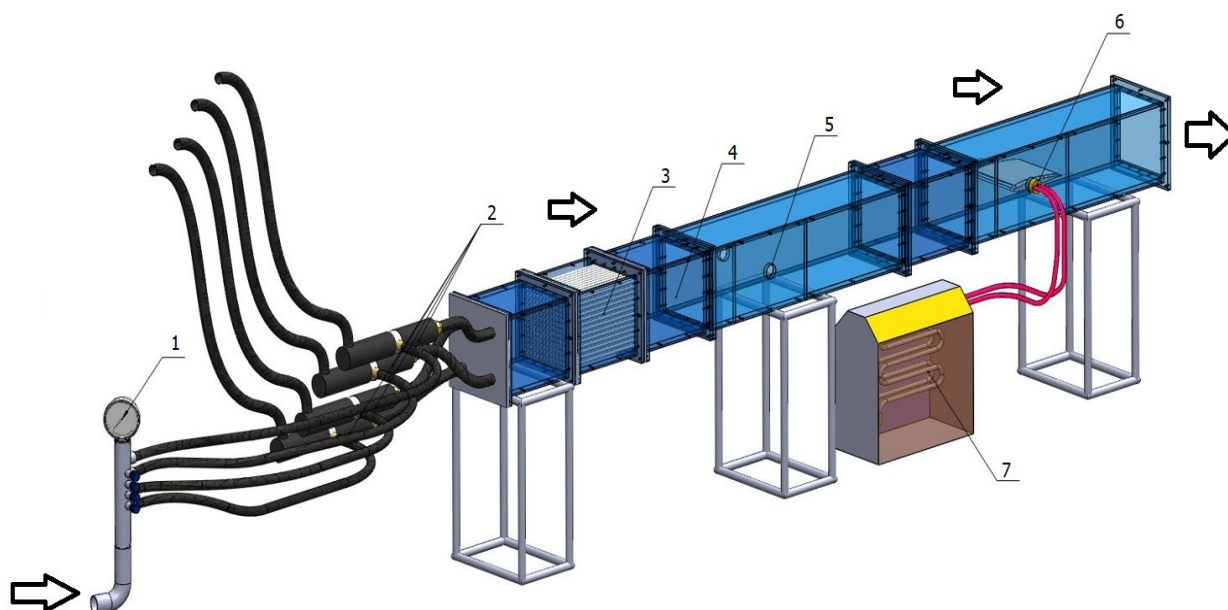


Рис. 1. Схема установки для исследования обледенения при обтекании образца охлажденным воздухом: 1 – вход в трубы Ранка, 2 – трубы Ранка, 3 – хонейкомб, 4 – секция рабочего канала, 5 – технологические отверстия под объект, 6 – исследуемый объект, 7 – холодильная машина

Измерения, выполняемые в климатической трубе в ходе экспериментов, разделяются на три группы:

- 1) визуальный контроль параметров потока в ходе эксперимента (скорости и температуры потока), съемка процесса обледенения видеокамерой и тепловизором с последующей обработкой на компьютере;
- 2) измерение физических и технологических параметров (температуры модели, скорости, температуры воздуха), запись электронного протокола эксперимента.
- 3) проверка износостойкости покрытий.

Результаты и обсуждения

Проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов использовали поверхности из нержавеющей стали, не обработанные фторопластом, а во второй – обработанные.

В первой серии экспериментов в климатическую аэродинамическую трубу помещались образцы без покрытия фторопластом (рис. 2). Первый режим происходил при скорости 2 м/с и температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обледенение происходило по всей поверхности образца с образованием волнообразных капель на поверхности. Новые капли из воздуха налетали на уже имеющиеся слои льда и примерзали к ним. Через 30 мин поверхность образца была покрыта слоем наледи толщиной 6 мм по всей поверхности образца. Второй режим происходил при скорости 3 м/с

и температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обледенение также происходило по всей поверхности образца, но с гораздо большей интенсивностью, и покрытие льдом толщиной 6 мм наступило уже через 15 минут. Через 30 мин поверхность образца была покрыта слоем наледи толщиной 14 мм по всей поверхности образца.

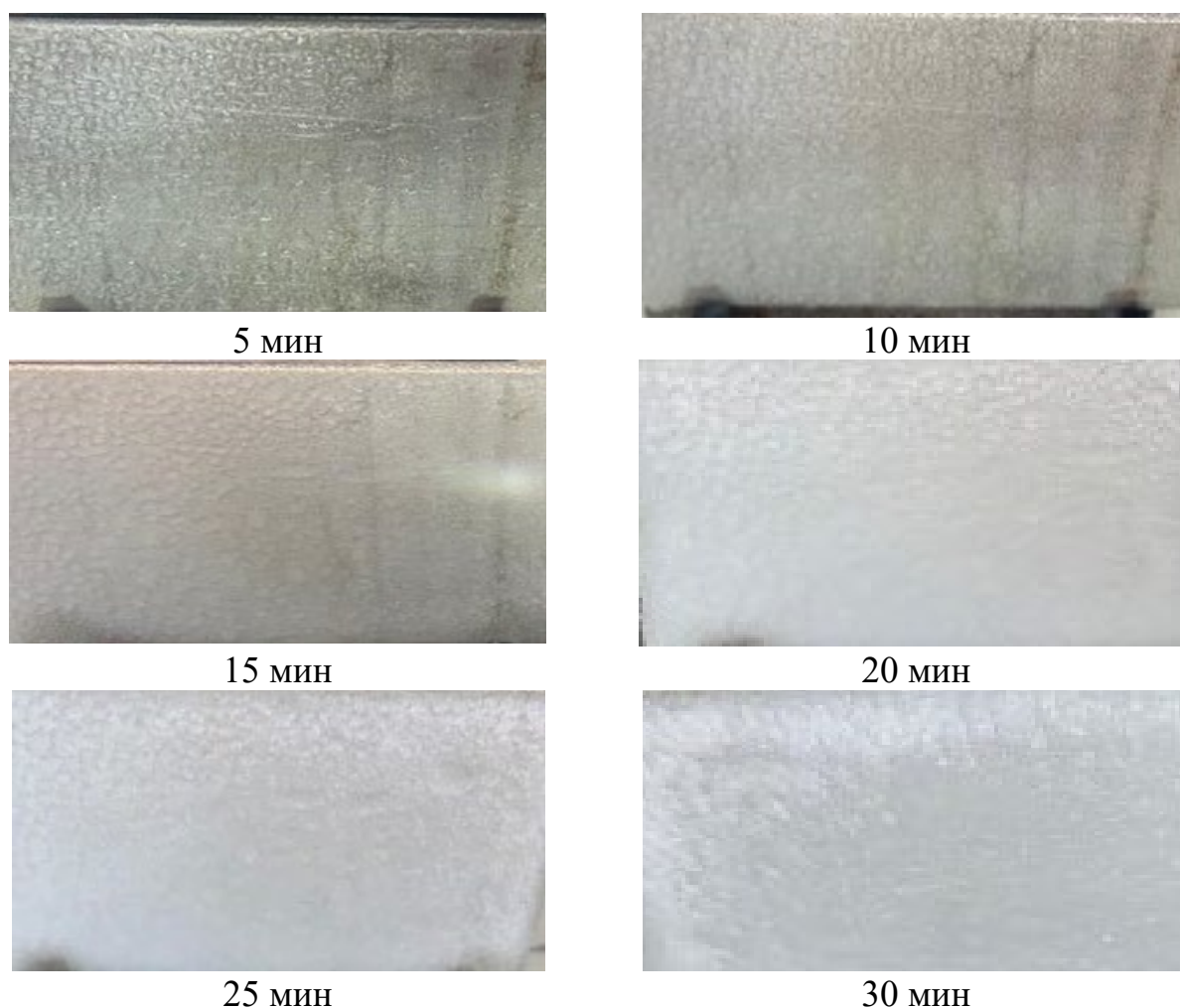


Рис. 2. Фотографии процесса обледенения образца без обработки фторопластом при скорости набегающего потока 2 м/с и температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Во второй серии экспериментов образец, покрытый фторопластом, помещался в климатическую аэродинамическую трубу. Сначала образец подвергался обледенению в течении 30 минут при температуре $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3), обледенение не происходило на открытых участках. Нарост льда происходил на кромке образца, откуда обледенение распространялось вдоль всего образца. В середине эксперимента сформировалась большая капля в центре пластинки, которая не срывалась 20 минут.

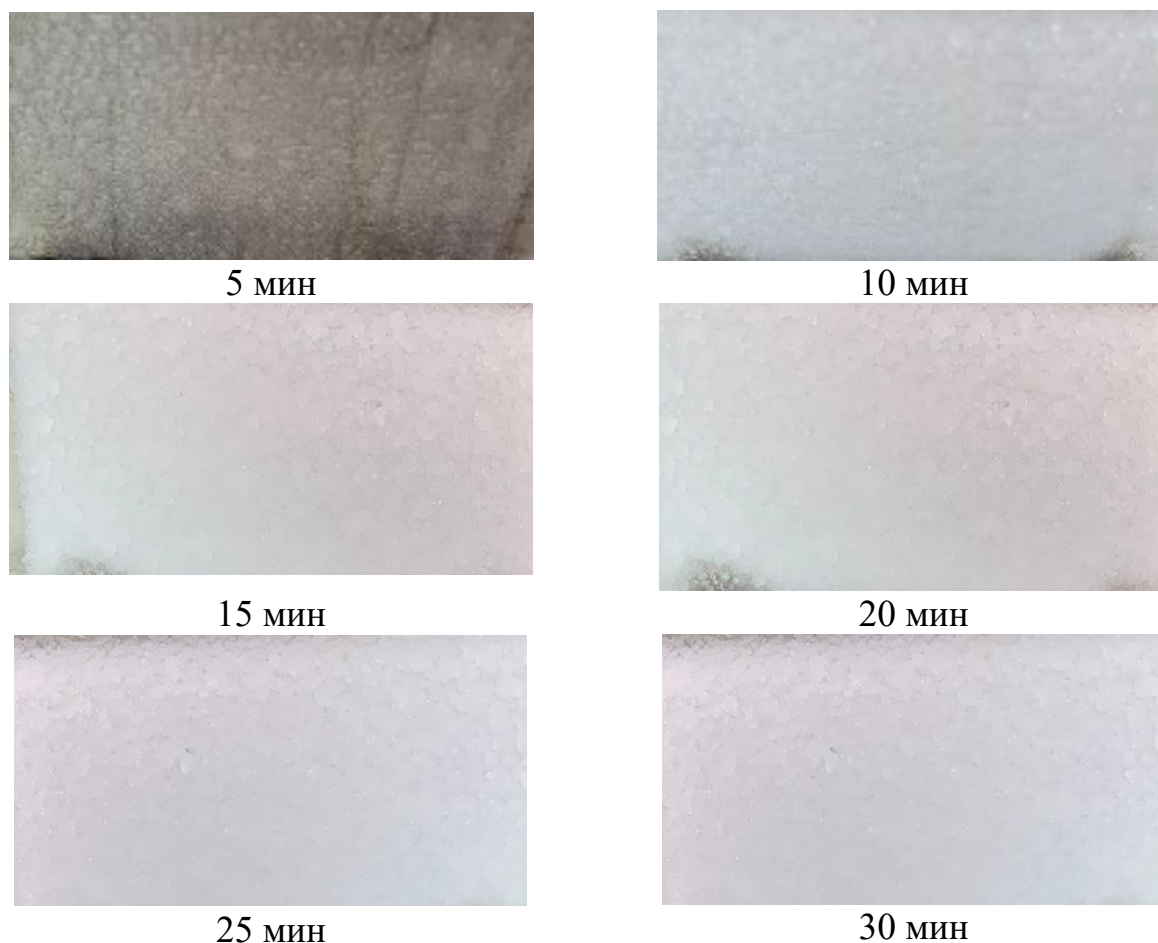


Рис. 3. Фотографии процесса обледенения образца без обработки фторопластом при скорости набегающего потока 3 м/с и температуре -15°C

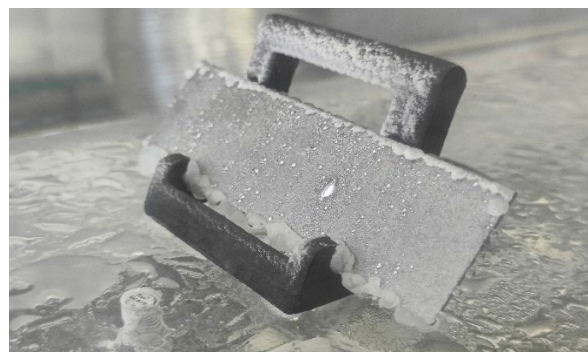
После 30 минут эксперимента температура была снижена до -8°C . Лед продолжает расти на кромках, появляются замерзшие капли в центре пластинки. На месте большой капли образовалась новая, после чего сразу замерзла, что говорит о дефекте гидрофобного покрытия в этом месте. Через 30 минут температура была понижена до -15°C , замерзают все капли, осевшие при прошлых режимах, в первую очередь вокруг больших замерзших капель. Активно забивается пространство льдинками между ледяными шариками (рис. 4).

Заключение

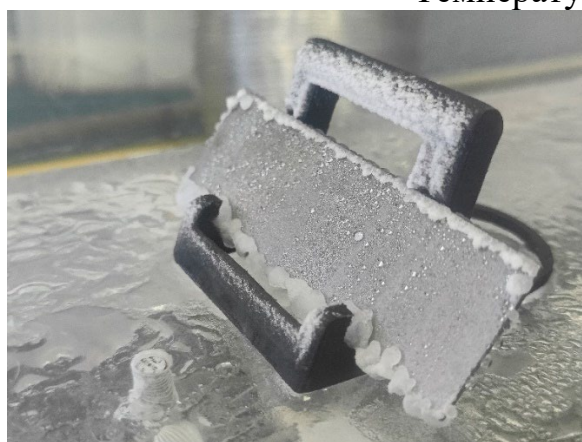
Пескоструйная обработка поверхности нержавеющей стали с последующим осаждением фторполимерного покрытия позволяет придать ей противообледенительные свойства.

В условиях обледенения на стенде исследованы износостойкие свойства нанопокровов. Обнаружено, что структуры с фторполимерным покрытием могут быть устойчивы к циклам заморозки/разморозки, и они обеспечивают защиту ото льда. В случае, когда образец из нержавеющей стали не покрыт фторполимерным покрытием, обледенение идет достаточно интенсивно, и уже через 10 минут поверхность покрывается слоем льда толщиной в несколько миллимет-

ров. При обработке фторполимерным покрытием капли воды отталкиваются поверхностью, и обледенение происходит только на краях образца, а также в областях, где поверхность фторполимера деградировала.



Температура потока $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$



Температура потока $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$



Температура потока $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 4. Обледененные поверхности с нанесением фторполимерного покрытия на нержавеющую пластинку при разных температурах

Полученные результаты могут быть использованы для разработки противообледенительных систем и конструкций с покрытиями, например, для лопастей ветрогенераторов, защитных пластиковых элементов мостов, нефтяных платформ и пр. Однако, необходимо дальнейшее их изучение для выбора опти-

мальных параметров микроструктур, обеспечивающих максимальную защиту от обледенения и износостойкость покрытия.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wenzel R.N., Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988–994 (1936).
2. Safonov, A.I., Sulyaeva, V.S., Gatapova, E.Y., Starinskiy, S.V., Timoshenko, N.I. and Kabov, O.A., Deposition Features and Wettability Behavior of Fluoropolymer Coatings from Hexafluoropropylene Oxide Activated by NiCr Wire, *Thin Solid Films*, vol. 653, pp. 165–172, 2018.
3. Okulov, V.; Kabardin, I.; Mukhin, D.; Stepanov, K.; Okulova, N. Physical De-Icing Techniques for Wind Turbine Blades. *Energies* 2021, 14, 6750.
4. Соловьянчик Л. В., Кондрашов С. В., Нагорная В. С., Мельников А. А. Особенности получения антиобледенительных покрытий (обзор) // «ТРУДЫ ВИАМ», 2018. – №6. DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98

© И. К. Кабардин, В. Е. Ледовский, С. В. Какаулин, М. Р. Гордиенко, 2024