

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

Особенности применения пластиковых полимерных наноструктурированных покрытий для защиты от обледенения промышленных конструкций

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

Аннотация. Обобщены результаты исследований супергидрофобных поверхностей в условиях обледенения на климатическом аэродинамическом стенде. Показаны перспективность и ограничения при использовании полимерных пластиковых покрытий для противообледенительных систем лопастей ветрогенераторов. Рассмотрен эффект разрушения супергидрофобных поверхностей с покрытиями в виде нанотравы и наноростов ото льда в аэродинамическом потоке. Установлена устойчивость к разрушению в результате обледенения только линейных микроструктур, имитирующих впадины на наноструктуре листьев лотоса. Адаптирована простая математическая модель, иллюстрирующая эффективность различных наноструктурных образований на твердой поверхности в зависимости от скорости обдува и угла смачивания. Полученные результаты представляют интерес при разработке противообледенительных систем для конструкций с пластиковыми покрытиями (лопастей ветрогенераторов, защитных пластиковых элементов мостов, нефтяных платформ и пр.).

Ключевые слова: обледенение, адгезия, супергидрофобные поверхности, полимерные пластиковые нанопокрывтия, аэрофизический эксперимент

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

Features of the Use of Plastic Polymer Nanostructured Coatings for Protection against Icing of Industrial Structures

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

Abstract. The results of studies of superhydrophobic surfaces under icing conditions on a climatic aerodynamic stand are summarized. The prospects and limitations of using polymer plastic coatings for de-icing systems of wind turbine blades are shown. The effect of the destruction of superhydrophobic surfaces with coatings in the form of nanograss and nanostructures from ice in an aerodynamic flow is considered. Only linear microstructures imitating depressions on the nanostructure of Lotus leaves have been found to be resistant to destruction as a result of icing. A simple mathematical model has been adapted to illustrate the effectiveness of various nanostructured formations on a solid surface, depending on the blowing speed and wetting angle. The results obtained are of interest in the development of anti-icing systems for structures with plastic coatings (wind turbine blades, protective plastic elements of bridges, oil platforms, etc.).

Keywords: icing, adhesion, superhydrophobic surfaces, polymer plastic nanocoats, aerophysical experiment

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 [3] был предложен относительно дешевый литографический способ нанесения наноструктур на пластиковые поверхности лопастей ветрогенераторов или других полимерных покрытий, используемых для защиты от водной и ледовой эрозий в элементах мостов, морских нефтяных платформ и пр. Действительно, такие поверхности приобретают свойства супергидрофобности, обладают малыми коэффициентами теплопроводности и трения, а также хорошей проводимостью и малой силой адгезии к образующемуся льду.

Природным прототипом нанопервоповерхностей, рассматриваемых во многих исследованиях, являются листья лотоса, которые обычно характеризуются сильными водоотталкивающими свойствами. Структура имеет сложный иерархический вид: она включает нанотраву мельчайшего размера, пальцевидные наросты – микростолбики и глубокие впадины – микробороздки (рис. 1).

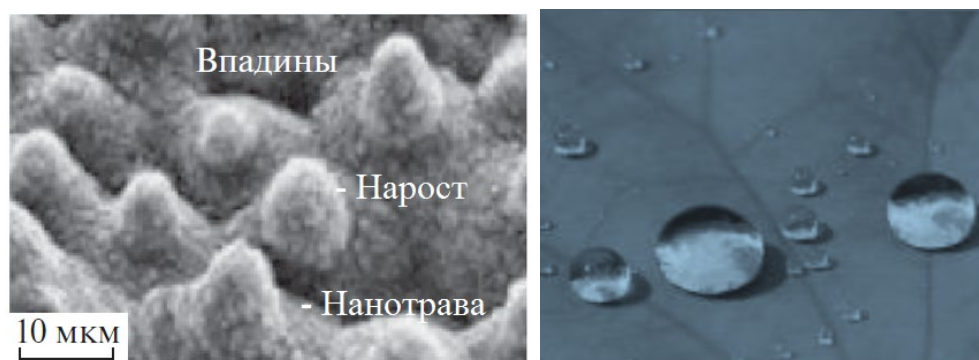


Рис. 1. Структура листа лотоса и форма водяных капель

В этом исследовании сравнивались два типа поверхностей листа лотоса – с мельчайшей нанотравой (рис. 2а) и более крупными микроструктурами в виде микростолбиков (рис. 2б) с сопутствующими микробороздками, имитирующими впадины на рис. 1. Угол смачивания для нанотравы равен 170° с точностью 2° , а для микростолбиков 157° с точностью 1° , что коррелирует со свойствами наноструктур на металлических подложках [4] и соответствует смачивающим свойствам супергидрофобных покрытий. Различие заключается в полимерном материале наноструктур и покрытия и литографическом способе нанесения его на

пластиковую подложку. Для изучения износостойкости данных покрытий к обледенению результаты были сопоставлены с неструктурированной гладкой пластиковой пленкой.

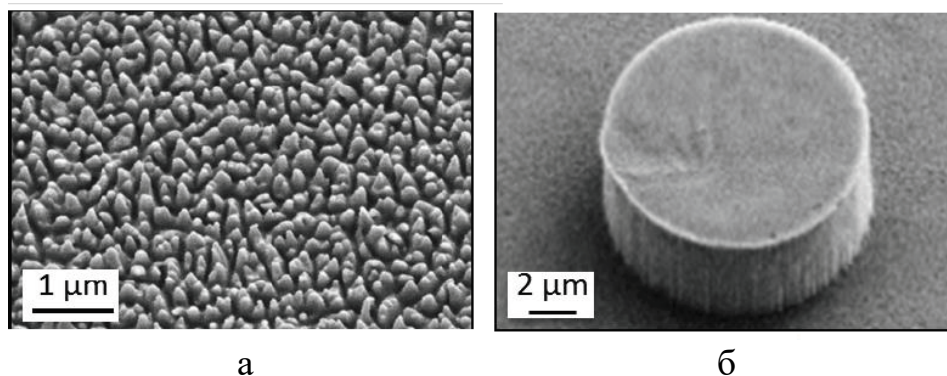


Рис. 2. Примеры моделирования нанотравы и микронаростов – столбиков

Экспериментальная модель представляет собой полый цилиндр, предназначенный для исследования образования льда и износостойкости покрытий. На передней его части монтировались параллельно сразу три исследуемых нанопокрyтия, включая, для сравнения, обычную полимерную пленку без наноструктур.

Комплексные испытания включают в себя проверку эффективности исследуемого типа противообледенительных нанопокрyтий в климатической аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН. В рабочем участке установки с помощью водораспыливающей системы создается водокапельный поток холодного воздуха, контролируемый средствами измерений технологических параметров установки, физических характеристик параметров потока и исследуемых моделей.

Эксперимент проводился в климатической трубе, оснащенной трубами Ранка, холодный конец которых был направлен в климатическую трубу (рис. 3). Холодильная мощность каждой трубы при давлении 6 бар порядка 800 Вт, минимальная температура при 7 бар $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость потока порядка 1,5 м/с. Цилиндр с пленками располагался в 2 м от выходов воздуха из труб Ранка температура в трубе измерялась в 0,1 м за цилиндром, покрытым пленками. Холодильник по-прежнему помогал охлаждать цилиндр, так как воздуха внутри трубы, как выяснялось ранее, для этого недостаточно.

Принципиальная схема установки показана на рис. 4. Установка представляет собой замкнутую аэродинамическую трубу с элементами: (1) рабочий канал квадратного сечения (размеры по внутренней части 200x200 мм) выполненный из органического стекла; (2) испытуемый экспериментальный объект (полый цилиндр в данных экспериментах); (3) охладитель воздуха; (4) металлические вентиляционные каналы; (5) хонейкомб; (6) центробежный вентилятор с электродвигателем; (7) криотермостат проточный LOIP FT-600; (8) система подачи воды

для формирования капельной влаги в воздушном потоке; (9) парогенератор; (10) регулирующие вентили; (11) шаровые краны; (12) обратный клапан; (13) форсунка распылительная; (14) термопреобразователь сопротивления; (15) датчик относительной влажности и температуры; (16) термоанемометр; (17) система фото-видео фиксации; трубопроводы; антифриз.

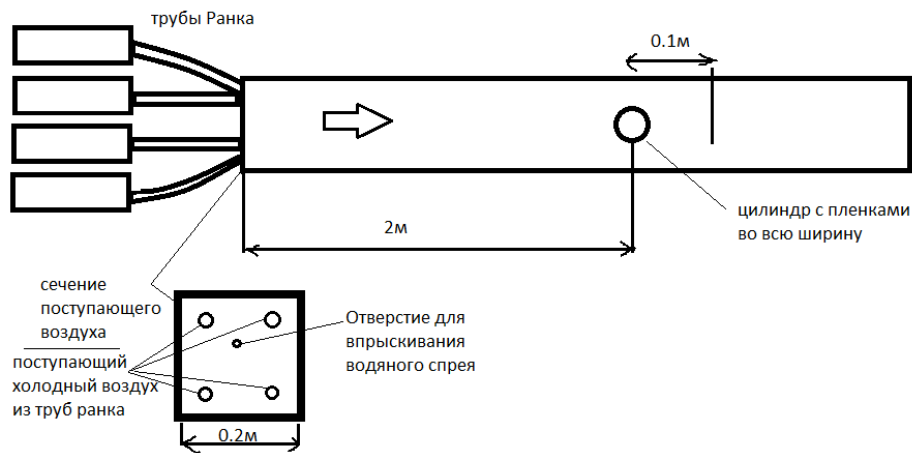


Рис. 3. Принципиальная схема эксперимента для исследования обледенения при обтекании охлаждаемого цилиндра охлажденным воздухом

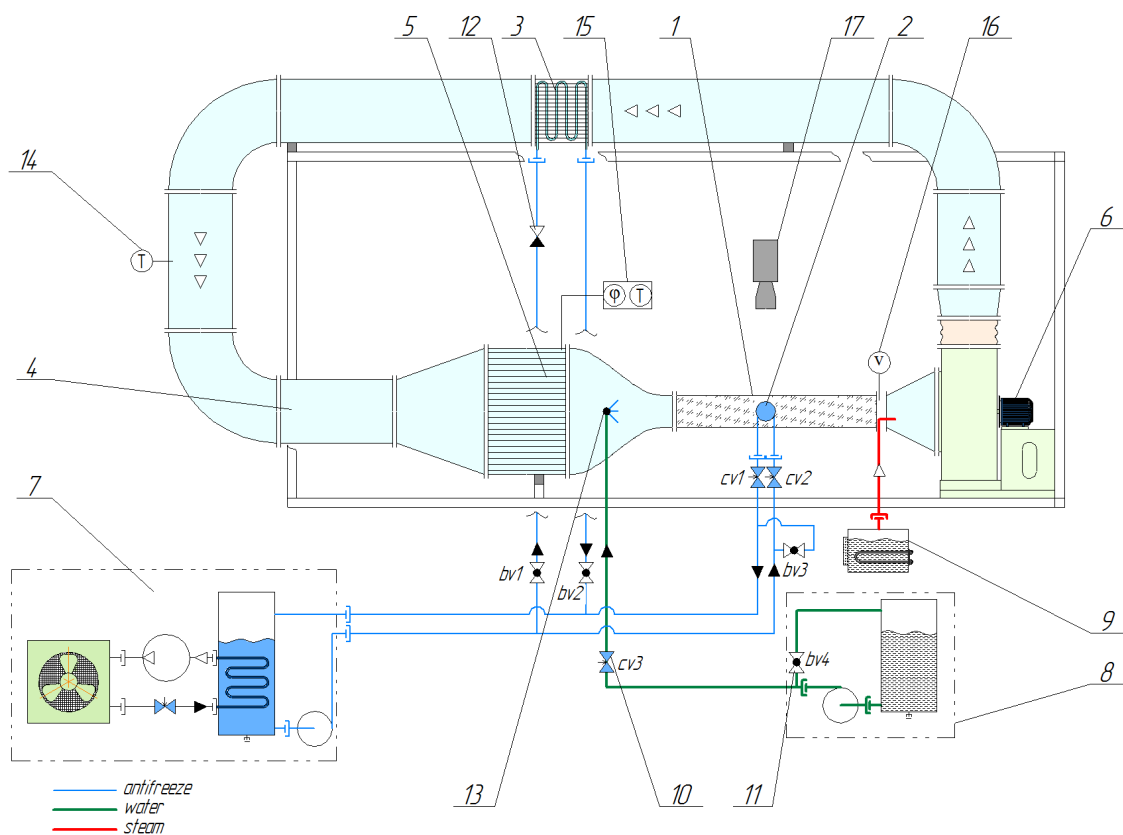


Рис. 4. Принципиальная схема установки для изучения обледенения на охлаждаемом цилиндре

Результаты и обсуждение

Проверка износостойкости к различным режимам обледенения проведена для двух структур, содержащихся в поверхности листьев лотоса. Первая – это мельчайшая структура нанотравы, и вторая – более крупная структура, содержащая комбинацию из микробороздок и микростолбиков для моделирования впадин и наростов без мельчайшей нанотравы.

Было проведена серия из 6 циклов заморозки/разморозки. В первых двух было исследовано влияние только охлажденного цилиндра, с температурой поверхности $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В первом эксперименте водные капли в поток не вносились, а обледенение обеспечивалось конденсацией на охлажденном цилиндре влаги, содержащейся в воздухе (рис. 5). На обоих образцах с наноструктурой образовывалась тонкая глазурная наледь, а на гладкой пленке более толстая наледь имела смешанную структуру льда.

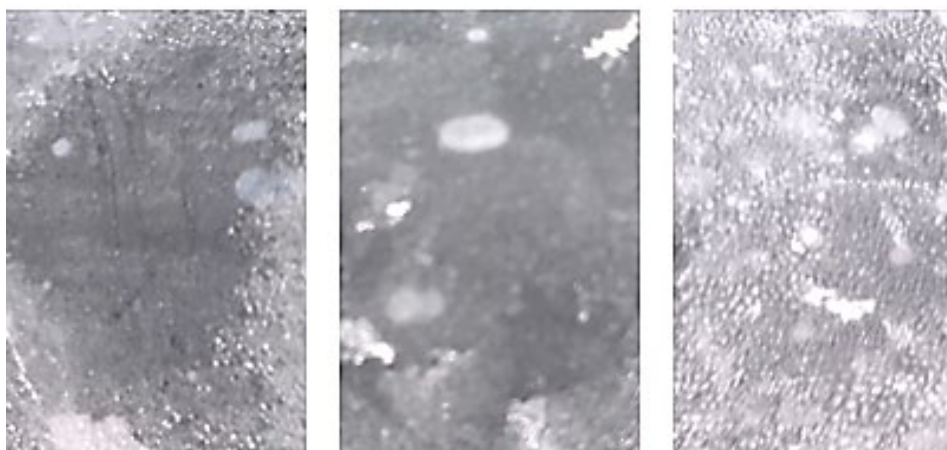


Рис. 5. Образование наледи без водной эмиссии для нанотравы, микростолбков с бороздками и гладкой пленки (слева направо)

Во втором эксперименте в поток впрыскивался водный аэрозоль из промышленного пульверизатора. Размер капель варьировался в диапазоне от 0,5 мм до 1,5 мм, что контролировалось по их размеру на фотографиях. Образование льда показано на рис. 6, где наледь на образцах с наноструктурой различна. За счет большей гидрофобности на покрытии с нанотравой капли воды фиксировались, как на листе лотоса, и замерзали, на втором нанопокрытии, как без эмиссии водных капель, образовывалась очень тонкая глазурная наледь. Возможное объяснение такого эффекта связано с более быстрым переходом к режиму Вензеля для второй наноструктуры. На гладкой пленке, как на воздухе без аэрозоля, опять фиксировалась более толстая наледь со смешанной структурой льда.

В дальнейших исследованиях износостойчивости покрытий было усилено охлаждение цилиндра и воздуха путем использования дополнительной охлаждающей установки из трубок Ранка. Было проведено 4 цикла заморозки/разморозки (см. табл. 1) при избыточном давлении на входе в трубы Ранка 7 атмосфер. Во-

дьяной спрей впрыскивался с торца, где располагались 4 холодных выхода трубы Ранка. Капли, выпущенные из спрея, долетали до цилиндра и замораживались на нем.



Рис. 6. Образование наледи с эмиссией водного аэрозоля для нанотравы, микростолбов с бороздками и гладкой пленки (слева направо)

Таблица 1

Параметры циклов заморозки с охлажденным воздухом

Номер цикла	T воздуха, °С	T цилиндра, °С	T комнаты, °С	V потока, м/с
1	-12,2	-10,2	23	2,5
2	-12,1	-11,3	22	2,5
3	-11,9	-12,2	23	2,5
4	-12,1	-13,4	22	2,5

Дополнительную информацию дает рассмотрение образцов после разморозки (рис. 7). По структуре капель можно заключить, что поверхность с нанотравой полностью потеряла свою супергидрофобность (угол смачивания капель менее 90 градусов). Второй образец сохранил гидрофобность, но непонятно, до какой степени. На гладкой пленке структур не было, соответственно, она просто сохранила свои обычные гидрофобные свойства.

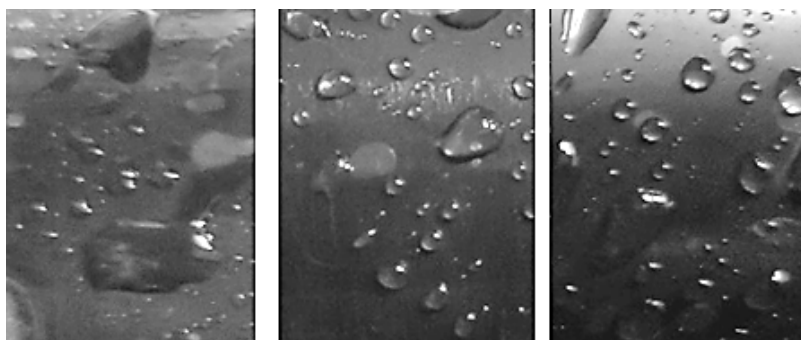


Рис. 7. Структура водных капель после разморозки для нанотравы, микростолбов с бороздками и гладкой пленки (слева направо)

Проведенный предварительный анализ позволяет сделать предположение о том, что после шести циклов заморзания поверхность нанотравы должна быть полностью разрушена, и ее свойства супергидрофобности полностью потеряны. Для заключения по структуре с микростолбиками с линейными бороздками нужно установить их состояние после заморозки визуально под микроскопом.

На рис. 8 приведены результаты сравнения исследованных нанообразцов до и после 6 циклов заморозки/разморозки. Показаны существенные разрушения нанотравы и микростолбов, в то время как линейные микробороздки почти не претерпели изменений.

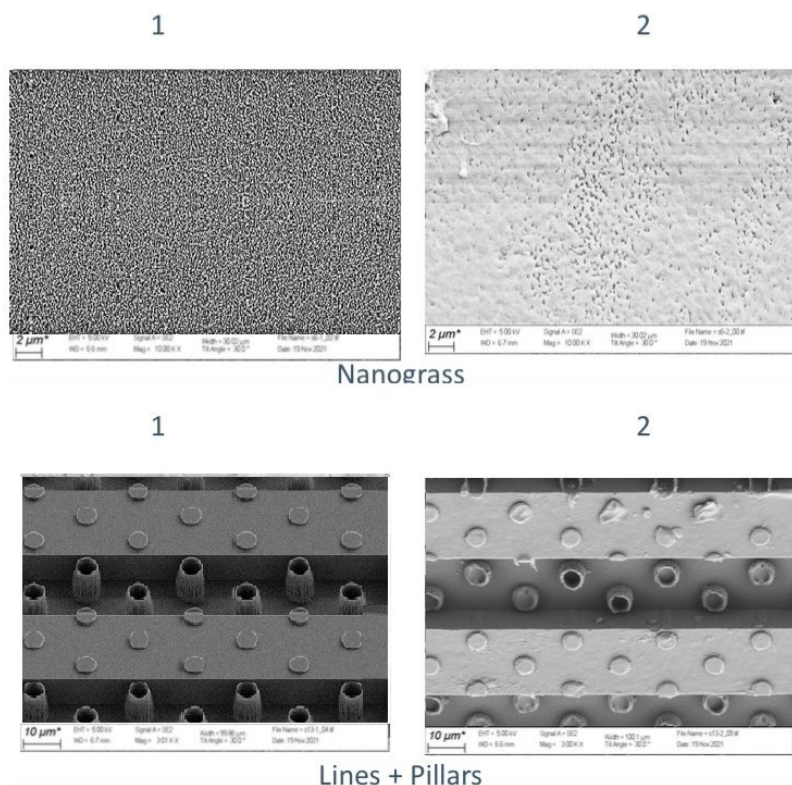


Рис. 8. Состояние наноструктуры до (1) и после (2) эксперимента: верхний ряд фиксирует полное разрушение; нижний ряд – сохранение микробороздок с небольшими изменениями или разрушениями микростолбов

Необходимо отметить принципиальную важность полученного результата, обусловленную установлением формы супергидрофобной структуры, литографически нанесенной на полимерное пластиковое покрытие, способной сохранять свой рисунок после длительного обледенения.

Заключение

В условиях обледенения на стенде исследованы износостойкие свойства полимерных нанопокрытий. Обнаружено, что структуры с микробороздками могут быть устойчивы к циклам заморозки/разморозки, и они обеспечивают лучшую защиту ото льда, чем просто гладкие полимерные покрытия.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки противообледенительных систем и конструкций с пластиковыми полимерными покрытиями, например, для лопастей ветрогенераторов, защитных пластиковых элементов мостов, нефтяных платформ и пр.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wei, K.; Yang, Y.; Zuo, H.; Zhong, D. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wind Energy* 2020, 23, 433–457.
2. Гринац Э.С., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Экспериментальные и теоретические исследования процессов обледенения наномодифицированных супергидрофобных и обычных поверхностей // *Вестник МГОУ. Сер.: Физика – Математика*. 2013. – №3. – С. 84–92.
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, М. Р. Гордиенко, С. В. Какаулин, 2024*