

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ ПРОЦЕССА ОБЛЕДЕНЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Представлены результаты экспериментальных исследований обледенения аэродинамического профиля крыла NASA 0015. Эксперименты были проведены с использованием высокоскоростной фотокамеры на установке Института адаптотроники и функциоинтеграции технического университета Брауншвейга. Целью экспериментов являлось изучение взаимодействия переохлажденных капелек воды с обледеневающими аэродинамическими поверхностями, а также физических явлений, происходящих при обледенении. Исследована эволюция нарастания льда на начальном этапе процесса обледенения. На основании проведенных исследований установлены новые закономерности процессов обледенения и развития шероховатостей на микроуровне.

*Ключевые слова:* воздушно-капельный поток, обледенение профиля, нарастание льда.

Представлено результати експериментальних досліджень зледеніння аеродинамічного профілю крила NASA 0015. Експерименти проводилися з використанням високошвидкісної фотокамери на установці Інституту адаптотроніки та функціоінтеграції технічного університету Брауншвейга. Метою експериментів було вивчення взаємодії переохолоджених крапель води з аеродинамічними поверхнями, а також фізичних явищ, що відбуваються під час зледеніння. Було досліджено еволюцію наростання криги на початковій стадії процесу зледеніння. На підставі проведених досліджень встановлені нові закономірності процесів зледеніння та розвитку шорсткостей на мікрорівні.

*Ключові слова:* повітряно-крапельний потік, зледеніння профілю, наростання криги.

The results of experimental investigation of the icing processes of NASA 0015 airfoil are presented. The experiments were carried out on icing/deicing facility in IAF of technical university of Braunschweig using a high-speed camera. Studying of the interaction of super-cooled droplets with icing airfoil surface, and also the physical phenomena occurring during the icing process was the objective of the investigation. The evolution of ice growth at the initial stage of the icing process was studied. New laws of icing processes and roughness development at micro-level are established.

*Keywords:* air-droplet flow, airfoil icing, ice accretion.

### **1. Введение**

Обледенение летательных аппаратов в полете – всемирно признанная серьезная проблема безопасности, которой в последнее время уделяется все более пристальное внимание [1–11]. В определенных летных условиях переохлажденные капельки воды, содержащиеся в облаках, могут замерзать, попадая на передний край фюзеляжа, крыльев, лопастей, на элементы оперения самолетов, вертолетов, беспилотных и других летательных аппаратов, воздухозаборники, детали авиационных двигателей. При этом нарастающий лед может по-разному влиять на свойства и характеристики управляемости летательных аппаратов в зависимости от местоположения, количества и типа льда.

Известно, что на начальном этапе процесса обледенения нарастающий лед образует шероховатость в виде неровностей и бугорков еще до того, как будет накоплена значительная масса льда и начнут формироваться крупные рогообразные наросты.

Причем, как правило, несущие поверхности и другие важные, с точки зрения аэродинамики, элементы летательных аппаратов имеют режимы работы, характеризующиеся высокими числами Рейнольдса, и высота элементов шероховатости оказывается больше толщины местного пограничного слоя, даже на самых ранних стадиях развития наледи [12]. Также шероховатость возникает при работе тепловых и пневматических систем защиты от обледенения циклического действия.

Шероховатость влияет на аэродинамические характеристики профиля путем непосредственного увеличения поверхностного трения, инициирует более ранний ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя, способствует увеличению толщины пограничного слоя и, соответственно, раннему срыву потока. Это влияние проявляется, главным образом, в виде изменения распределения давления, увеличения лобового сопротивления, уменьшения угла срыва потока и, в меньшей степени, уменьшения подъемной силы. При этом степень влияния шероховатости зависит от высоты неровностей, плотности их расположения и формы самих неровностей.

Несмотря на проведенные обширные теоретические и экспериментальные исследования проблемы обледенения летательных аппаратов при полете в неблагоприятных метеорологических условиях, тем не менее слабоизученными остались вопросы микрофизики и особенностей образования наледи на обтекаемых воздушно-капельным потоком поверхностях, в том числе на начальных этапах процесса нарастания льда.

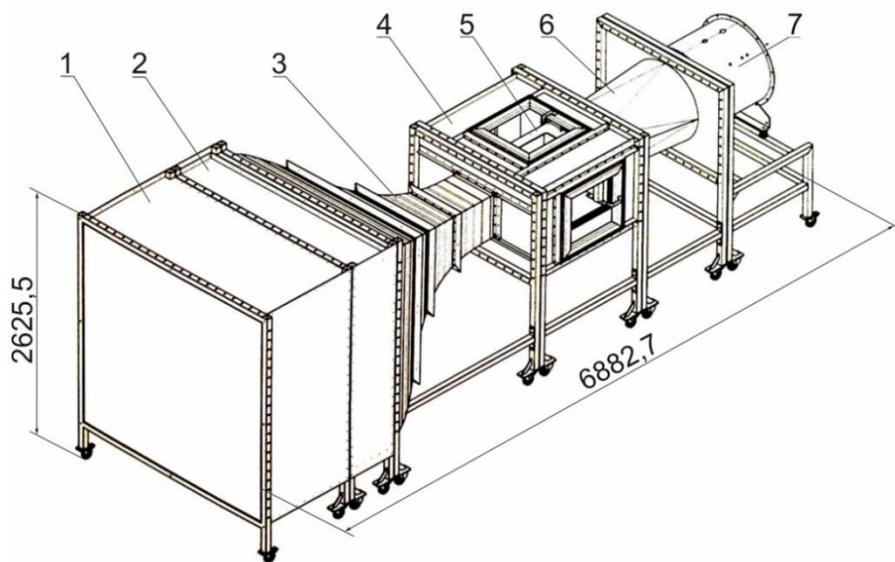
Цель настоящей работы – ответить на следующий вопрос: каков фактический процесс взаимодействия влетающих переохлажденных капелек воды с обтекаемой поверхностью, а также процесс нарастания льда на начальном этапе обледенения ?

## **2. Описание экспериментальной установки**

Подробные наблюдения за развитием неровностей и состоянием влаги на нарастающей ледяной поверхности были проведены на экспериментальной установке, моделирующей условия обледенения, Института адаптотроники и функциоинтеграции технического университета Брауншвейга. Установка представляла собой аэродинамическую трубу незамкнутого типа (рис. 1) с сечением рабочей части 0,45 x 0,45 м и позволяла проводить эксперименты со скоростью невозмущенного воздушного потока до 40 м/с. Аэродинамическая труба была оборудована системой распыления воды и целиком помещена в охлаждаемую термоизолированную камеру, имеющую внутренние размеры 4 x 4 x 9 м. Температура воздуха поддерживается автоматически в диапазоне от 0° С до – 20° С с использованием охлаждающего агрегата мощностью 24 кВт. Распылительная система представляла собой сопло, расположенное в центре сечения за хоннейкомбом. Расстояние между соплом и рабочим телом составляло порядка 2,2 м. Таким образом, в трубе, в сужающемся потоке капельки разгонялись и переохлаждались в воздушном потоке перед выпадением на обтекаемое тело. В проведенных экспериментах диаметр капелек определялся визуально по фотографиям. Водное содержание определялось по скорости воздушно-капельного потока, расхода воды в распылительной системе и площади сечения области выпадения капелек.

В экспериментах использовался алюминиевый профиль НАСА 0015 с длиной хорды 30 см, расположенный горизонтально и обтекаемый под нулевым углом атаки. Профиль был изготовлен из алюминиевого листа толщиной 1 мм с элементами жесткости внутри. Для получения фотографических данных

использовалась рco.dimax высокоскоростная камера, оборудованная 100 мм макрообъективом и позволяющая выполнять серию снимков с частотой до 57000 кадров в секунду разрешением 195 x 148 пикселей (при этом область 50 x 50 пикселей соответствовала 1 мм<sup>2</sup> реального размера полученного изображения).



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – хоннейкомб, 2 – распылительная система, 3 – конфузор, 4 – камера Эйфеля,  
5 – рабочая камера, 6 – диффузор, 7 – вентилятор и двигатель

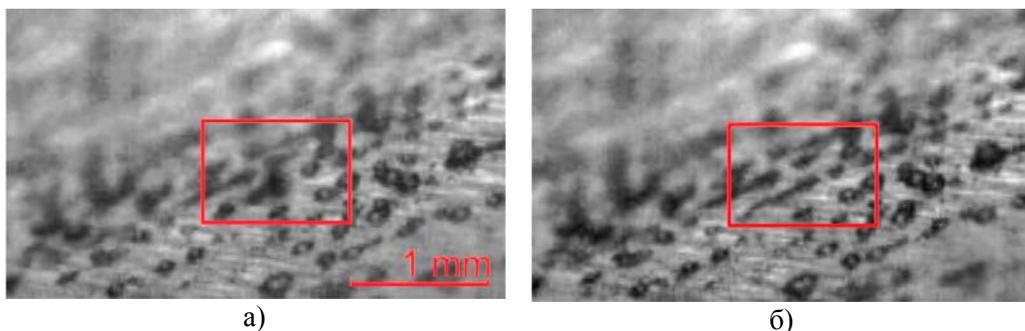
### 3. Результаты исследований

В начальный период процесса обледенения на поверхности крыла образуются отдельные ледяные «бугорки» – поверхностные капли (т. к. угол смачивания на алюминиевой поверхности достаточно большой), которые замерзают со стороны поверхности крыла, имеющей отрицательную температуру, поскольку теплообмен посредством теплопроводности на этом этапе наиболее значителен. Влетающие капельки, попадая на поверхность, как бы скатываются, подпрыгивая и взаимодействуя с уже частично примерзшими поверхностными каплями, но при этом оставляя в местах касания с поверхностью новые капли (на рис. 2 можно видеть эти своеобразные «дорожки» из «бусинок» поверхностных капель, которые формируют выпадающие из потока капельки). В случае столкновения влетающей капельки с поверхностной каплей (рис. 2 а) в начальный момент взаимодействия последняя частично разрушается, образуется некий общий объем жидкости, который под действием кинетической энергии влетающей капельки растягивается по поверхности в виде ручейка, который в дальнейшем под действием сил поверхностного натяжения разрушается, образуя череду поверхностных капель-«бусинок» (рис. 2 б).

Затем, с течением времени, количество замерзших капель увеличивается, они покрывают уже всю поверхность в области выпадения, их размер увеличивается. В результате эта бугристая поверхность обладает меньшим углом смачивания, имеет более высокую температуру (из-за выделения скрытой теплоты фазового перехода) и по этой поверхности уже начинает перемещаться жидкость по

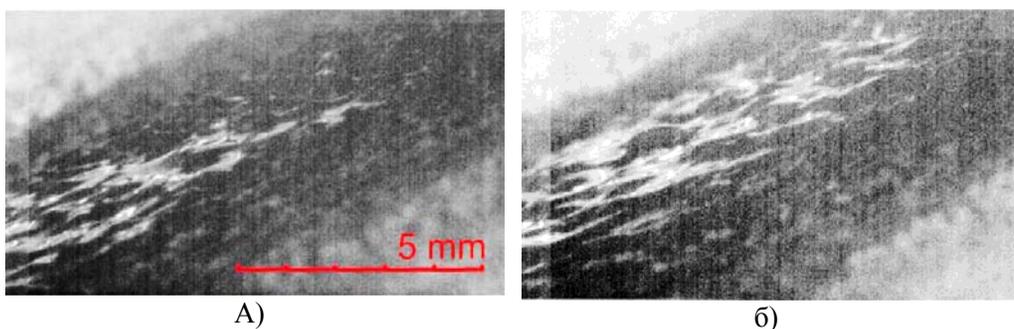
направленію от передней части профиля вниз по потоку (рис. 3). Схематично, для большей наглядности, этот процесс изображен на рис. 4.

В дальнейшем, в зависимости от температуры и водного содержания, физическая картина может отличаться: при достаточно низкой температуре окружающей среды, незамерзшая вода не доходит до конца этой «первоначальной» бугристой поверхности (оставаясь «запертой» между бугорками). Оставшиеся сухими бугорки начинают улавливать капельки из внешнего потока, расти в виде отдельных «иголочек» или «столбиков» (при этом, в промежутках между такими «столбиками» иногда можно наблюдать абсолютно чистую поверхность профиля крыла), однако, также можно наблюдать рост отдельных ледяных «иголочек» и из области, в которой присутствуют и жидкость, и ледяные «бугорки». А в случае относительно большего водного содержания, невысокой скорости воздушно-капельного потока и при температуре, близкой к температуре замерзания, может быть реализован случай, когда лед и жидкость будут покрывать всю поверхность крыла. Тогда оставшаяся незамерзшая вода будет стекать по всей поверхности крыла и срываться во внешний поток с его задней кромки.

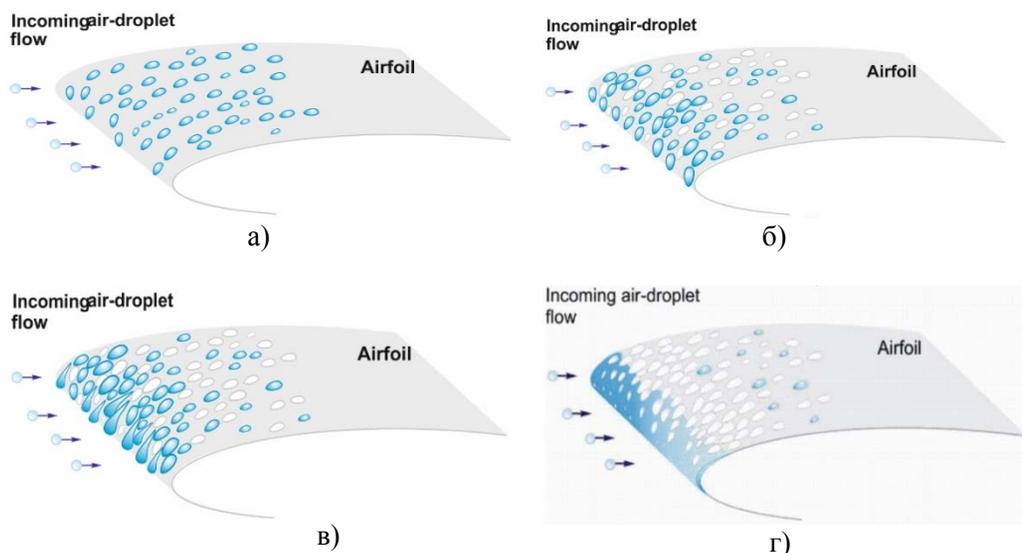


**Рис. 2. Начальный этап процесса обледенения (при температуре – 15 °С).  
Взаимодействие выпадающей капельки с поверхностными, частично замерзшими каплями:**

а) – столкновение влетающей капельки с поверхностной каплей, б) – разделение общего объема жидкости после столкновения на отдельные поверхностные капли



**Рис. 3. Перемещение жидкости по изначально образовавшейся «бугристой» ледяной поверхности (при температуре – 10 °С)**



**Рис. 4. Схема формирования наледи:**

а) – образование начальных поверхностных капель, б) – поверхностные капли растут, их количество увеличивается, некоторые из них замерзают, в) – капли в области торможения становятся достаточно крупными, начинают деформироваться и растекаться, г) – в области торможения накапливается достаточное количество незамерзшей воды, чтобы заполнить все пространство между ледяными бугорками

### **Выводы**

1. С помощью высокоскоростной фотокамеры были проведены наблюдения за процессом взаимодействия влетающих переохлажденных капелек воды с обледеневающей поверхностью аэродинамического профиля на начальном этапе процесса обледенения.
2. Проведенные наблюдения позволяют сделать вывод о том, что основное замерзание поверхностной жидкости происходит со стороны льда, имеющего «бугристую» поверхность. Жидкость на поверхности нарастающего льда находится во впадинах между «бугорками».
3. С понижением температуры количество незамерзшей воды на обтекаемой поверхности значительно уменьшается, а «бугорки» льда имеют тенденцию к росту и с течением времени принимают форму «столбиков» или «иголочек».
4. В некоторых режимах при относительно небольшой отрицательной температуре и высокой влажности жидкость по поверхности может принимать форму несплошной пленки, обтекающей «бугорки» льда, и перемещаться под действием аэродинамической силы.
5. Хотя фотографические наблюдения дают только качественное представление об исследуемом процессе, тем не менее они являются шагом на пути к лучшему пониманию микрофизики процессов обледенения, механизма влияния нарастающей наледи на начальном этапе процесса обледенения на поле течения, и результаты работы могут быть использованы при усовершенствовании существующих или при разработке новых методик, моделирующих процессы обледенения.

### **Библиографические ссылки**

1. Fortin, G., Laforte, J., Beisswenger, A., “Prediction of Ice Shapes on NACA0012 2D Airfoil”, Anti-Icing Materials International Laboratory, Universite du Quebec a Chicoutimi, 2003.

2. Meshcherjakova, T. P. “Designing of Systems of Planes and Helicopters Protection”, 1977.
3. “Aircraft Icing Handbook”, 2000.
4. “Ice Accretion Simulation,” AGARD-AR-344, 1997.
5. Prykhodko, O. A., Alekseyenko, S. V., “Icing of Aerodynamic Surfaces: Conditions of Appearance and Calculation Methodology”, *Aerospace technic and technology* 5:37-47, 2012.
6. Prykhodko, O. A., Alekseyenko, S. V., “Icing of Aerodynamic Surfaces: Modeling of an Air-Droplet Flow”, *Aerospace technic and technology* 4:59-67, 2013.
7. Alekseyenko, S. V., Prykhodko, O. A., “Numerical Simulation of Icing of a Cylinder and an Airfoil: Model Review and Computational Results”, *TsAGI Science Journal* 44(6):761-805, 2013.
8. Prykhodko, A. A., Alekseyenko, S. V., “Numerical Simulation of the Processes of Icing on Airfoils with Formation of a “Barrier” Ice”, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 87(3):598-607, May 2014, doi: [10.1007/s10891-014-1050-0](https://doi.org/10.1007/s10891-014-1050-0).
9. Prykhodko, A. A., Alekseyenko, S. V., “Numerical Simulation of the Process of Airfoil Icing in the Presence of Large Supercooled Water Drops”, *Technical Physics Letters* 40(10): 884-887, 2014, doi: [10.1134/S1063785014100125](https://doi.org/10.1134/S1063785014100125).
10. Alekseyenko, S. V., Prykhodko, O. A., “Mathematical Modeling of Ice Body Formation on the Wing Airfoil Surface”, *Fluid Dynamics* 49(6):715-732, 2014, doi: [10.1134/S0015462814060039](https://doi.org/10.1134/S0015462814060039).
11. Alekseyenko, S. V., “Numerical Simulation of the Icing Surfaces of the Cylinder and Profile”, *PAMM* 13(1):299-300, 2013.
12. Bragg, M. B., Broeren, A. P., Blumenthal, L. A., “Iced-airfoil aerodynamics”, *Prog Aerosp Sci* 41: 323-62, 2005.

Надійшла до редколегії 26.06.2017

УДК 629.7.023.224:629.783

И. А. Гусарова

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»

## ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СТЫКОВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПЛИТОК С U-ОБРАЗНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ДЛЯ МНОГОРАЗОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведены расчеты аэродинамического нагрева теплонапряженного участка U-образного элемента. Установлено, что температура конструкции в районе скругления выше допустимой. Выполнена экспериментальная проверка функционирования U-образного профиля при многократной смене температур в рабочем диапазоне.

**Ключевые слова:** теплозащита, теплопроводность, U-образный профиль, многоразовый космический аппарат, тепловой расчет, теплозащитная система.

Проведено розрахунок аеродинамічного нагріву теплонапруженої ділянки U-подібного елемента. Встановлено, що температура конструкції у районі закруглення більше допустимої. Здійснено експериментальну перевірку функціонування U-подібного елемента в умовах багатократної зміни температур у робочому діапазоні.

**Ключові слова:** теплозахист, теплопровідність, U-подібний профіль, багаторазовий космічний апарат, тепловий розрахунок, теплозахисна система.

---

© И. А. Гусарова, 2017