

Здесь предполагается, что градиенты температуры и концентрации имеют одно направление. Учет конечности ларморовского радиуса приводит к дополнительному затуханию дрейфовых колебаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. – Издательский Дом “Интеллект”, 2008. –280 с.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. –М.: Физматлит, 2002. – 536с.

#### OSCILLATIONS OF AN INHOMOGENEOUS WEAKLY IONIZED PLASMA

**В. Markeev\*, К. Panasyuk\*\***

*\*Moscow State Regional University  
10a, Radio St., Moscow, 105005, Russia*

*\*\*Russian State Technological University  
3, Orshanskaya St., Moscow, 121552, Russia*

*Abstract.* For a strongly non-uniform frequency region of weakly ionized plasma in the limiting cases of large and small electronic diffusion coefficients obtained spectra of drift oscillations on the basis of the solution of the kinetic equation by Grad.

*Keywords:* inhomogeneous weakly ionized plasma, the spectra of the drift oscillations.

УДК 532.529:532.6

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЛЕДЕНЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ И ОБЫЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Э.С. Гринац<sup>1,2</sup>, А.Б. Миллер<sup>1,2</sup>, Ю.Ф. Потапов<sup>1</sup>, А.Л. Стасенко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского»  
140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

*Аннотация.* Обобщены результаты исследований супергидрофобных, гидрофобных и обычных поверхностей в условиях обледенения на стенде. Показана перспективность использования супергидрофобных покрытий для противообледенительных систем. Рассмотрен эффект периодического самоочищения супергидрофобной поверхности ото льда в потоке. Развита простая математическая модель, иллюстрирующая тенденции зависимости гид-

ротермодинамических параметров различных образований на твердой поверхности (пленки, ручейка, капли) от скорости обдува и угла смачивания.

*Ключевые слова:* обледенение, летательный аппарат (ЛА), барьерный лед, адгезия, наномодификация поверхностей материалов, супергидрофобность, аэрофизический эксперимент.

В настоящее время во всех развитых странах экспериментаторы и теоретики проявляют большой интерес к исследованию проблем, связанных с льдообразованием на деталях конструкций и устройств, эксплуатируемых в атмосферных условиях. Для авиации борьба с обледенением представляет собой особенно актуальную задачу. С обледенением воздушного судна, встречающимся в среднем в одном полете из десяти и обусловленным метеорологическими причинами, связано около 7% авиационных происшествий. Поэтому предсказание аккреции льда и вызываемых ею эффектов, разработка противообледенительных систем (ПОС) являются важной частью проектирования и эксплуатации современных летательных аппаратов, а ряд ведущих мировых исследовательских центров в области авиации (NASA, ONERA) реализуют широкомащтабные проекты, включающие комплексные научные подходы к изучению обледенения.

В целях защиты ЛА от обледенения применяются различные противообледенительные системы, для работы которых необходимы достаточно большие энергозатраты, которые можно обеспечить не на всех ЛА. Эта проблема наиболее выражена для авиации общего назначения и особенно для беспилотных летательных аппаратов. В связи с этим для обеспечения необходимого уровня безопасности на некоторые ЛА накладываются ограничения по полетам в условиях обледенения, что нарушает регулярность полетов и снижает их конкурентоспособность.

Разработанные и внедренные в практику методы борьбы с обледенением ЛА не только приводят к необходимости «возить на всякий случай» лишние 1–1.5% веса самолета, но и способны создавать новые проблемы. Например, при использовании теплового воздействия на слой льда, возникающий на передней кромке крыла, образуются капли и ручейки, мигрирующие вниз по потоку и создающие новую наледь (барьерный лед).

При рассмотрении вопросов обледенения уже давно высказывались мысли, что можно найти материал, который будет противостоять обледенению, материал, к которому не будет прилипать лед. Очевидно, эта мысль возникла в результате наличия водоотталкивающих свойств фтороуглеродистых материалов, таких как тефлон. Действительно, работы [1, 2], посвященные вопросам адгезии льда, указывают на уменьшение силы сцепления льда с этими гидрофобными материалами в условиях без потока. Однако указанное уменьшение силы адгезии оказалось в противоречии с наблюдениями, полученными в аэродинамической трубе [3]. Они показали, что адгезия тефлона по отношению к капельному льду (т.е. образованному движущимися по поверхности каплями) слабо отличается от адгезии других материалов. Физические условия образования льда в потоке и без него различны, поэтому целью исследователей стало найти материал с малой адгезией ко льду, образующемуся при обтекании летательного аппарата двухфазным потоком.

В последнее время возникла идея для борьбы с обледенением изменить свойства поверхности летательного аппарата методами нанотехнологий. Нанотехнологии

открывают принципиально новые возможности управления поверхностными свойствами материалов. В частности, поверхность может приобрести свойства супергидрофобности, обладать малыми коэффициентами теплопроводности и трения, а также хорошей проводимостью и малой силой адгезии к образуемому льду. Обычные материалы с такими свойствами, присутствующими одновременно, отсутствуют. Супергидрофобность позволяет существенно уменьшить площадь контакта капли с поверхностью, малый коэффициент теплопроводности замедляет замерзание капли, которая не может передать тепло фазового перехода поверхности, а малый коэффициент трения благоприятствует сдуву капель с нее. При помощи нанотехнологий может быть достигнуто свойство супергидрофобности поверхностей конструкционных материалов, используемых в авиации – сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

При значительном снижении адгезии льда на поверхности, возможна комбинация такой поверхности с тепловыми системами, от которых используется только «тепловой нож», расположенный в районе нахождения линии полного торможения. При постоянном включении «теплого ножа» после попадания в условия обледенения, образующийся лед формируется из двух разделенных частей, которые после достижения определенной толщины будут отрываться от поверхности под воздействием воздушного скоростного напора. Такая комбинированная система позволит в 4...5 раз понизить потребляемую энергию и в несколько раз снизить массу противообледенительных систем. Здесь необходимо иметь в виду тот факт, что на многих самолетах просто не хватает горячего воздуха или электроэнергии, чтобы обеспечить защиту от обледенения требуемых участков поверхности.

В настоящее время на некоторых самолетах (например, RRJ (крыло и воздухозаборник), Ту-334 (крыло), Ту-204 (воздухозаборник), МС-21 (крыло)), из-за недостатка тепловой энергии или ограниченной зоны обогрева допускается образование барьерного льда (лед за зоной обогрева) на нижней поверхности предкрылка или на внутренней поверхности воздухозаборника. Барьерный лед на нижней поверхности предкрылка приводит к увеличению аэродинамического сопротивления самолета и, соответственно, увеличению расхода топлива. Барьерный лед на внутренней поверхности воздухозаборника приводит к увеличению затрат на ремонт двигателя. Применение в области образования барьерного льда поверхностей с покрытиями, снижающими адгезию льда, и (или) устройств, обеспечивающих удаление текущей пленки воды, позволит значительно сократить массу и размеры барьерного льда.

Исследования по применению супергидрофобных противообледенительных нанопокровов только начинаются во всем мире, например, в США [4, 5], Канаде [6], Италии [7] и др. В настоящей работе излагаются методики и результаты исследований в этом направлении, проведенные в ЦАГИ.

Комплексные аэрофизические испытания включают в себя важнейшую структурную часть – проверку эффективности исследуемого типа противообледенительной системы на стенде искусственного обледенения ЦАГИ.

Стенд искусственного обледенения ЦАГИ – это аэродинамическая труба эжекторного типа, создающая водовоздушный поток холодного воздуха, которая оснащена водораспыливающей системой, средствами измерений технологических параметров установки, физических характеристик параметров потока и исследуемых моделей. Принципиальная схема установки показана на рисунке 1.

Аэродинамическая труба представляет собой двадцати пяти сопловой эжектор, использующий в качестве эжектирующего газа сжатый воздух с давлением 1.5 – 5 ати. Эжектируемый воздух с температурой  $-5^{\circ}\text{C} \div -25^{\circ}\text{C}$  забирается из атмосферы в холодное время года. Размеры поперечного сечения  $200 \times 200$  мм. Скорость потока в канале трубы регулируется в диапазоне 10 – 100 м/с за счет изменения давления эжектирующего воздуха.

Образование водовоздушного потока в канале трубы осуществляется за счет впрыска воды в воздушный поток под давлением  $5 \div 7$  ати через вихревую форсунку, установленную на расстоянии 2325 мм от выходного сечения трубы. Расчеты показывают, что за время полета капли воды в канале трубы такой длины она успевает принять температуру потока. Вода к форсунке подается за счет ее вытеснения из бака азотом. Изменение влажности потока достигается за счет установки форсунок с различными геометрическими параметрами, а также варьированием скорости потока в тракте.

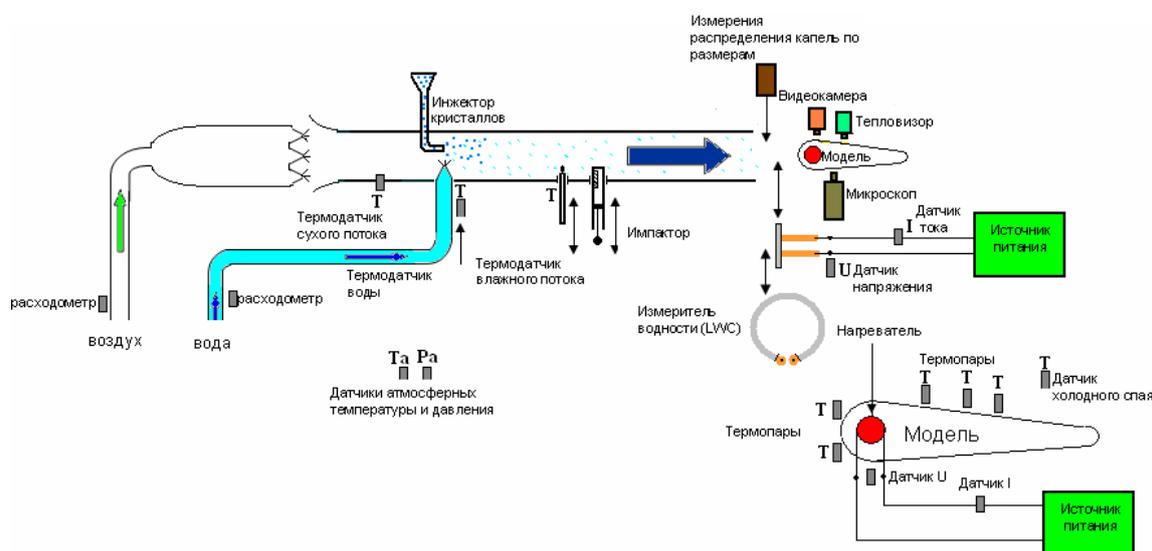


Рис.1. Принципиальная схема установки

Измерения, выполняемые на стенде искусственного обледенения в ходе выполнения экспериментов, разделяются на четыре группы, рисунок 1:

1. Визуальный контроль параметров потока в темпе эксперимента (скорости и температуры потока, значений тока и напряжения системы электрообогрева модели, температуры поверхности модели). Съемка процесса обледенения видеокамерой и тепловизором с последующей обработкой на компьютере.

2. Измерения спектра размеров капель:

- забор проб импактором с последующей обработкой на цифровом микроскопе с целью определения спектра размеров капель;
- измерения ореольной части индикатрисы рассеяния с последующей обработкой на компьютере с целью определения спектра размеров капель.

3. Измерения физических и технологических параметров (температурного поля модели, скорости, температуры, влажности водовоздушного потока) с регистрацией на компьютере. Запись электронного протокола эксперимента.

4. Измерения силы сцепления льда с покрытием

Экспериментальная модель, представляющая собой профиль крыла, предназначена для исследования образования барьерного льда. Сверху профиля устанавливается исследуемый наномодифицированный образец, снизу для сравнения находится обычная пластина из необработанного дюралюминия. Передняя кромка крыла подогревается омическим нагревателем. На рисунке 2 показан характерный вид образующегося барьерного льда.



Рис. 2. Барьерный лед на модели через 10 мин после начала намораживания.

При испытаниях наномодифицированных супергидрофобных образцов были получены следующие результаты. На алюминиевой пластине непосредственно после подачи воды в поток начинал расти барьерный лед. Динамика его образования определяется замерзанием бегущих по образцу отдельных водяных капель или ручейков. В условиях эксперимента визуально наблюдалось движение капель по поверхности алюминиевого образца, их замерзание на некотором расстоянии от передней кромки профиля, формирование и рост вверх по потоку нитевидных ледяных образований. Промежутки между нитевидными образованиями постепенно заполняются льдом, в результате чего формируется непрерывный ледяной барьер. В случае алюминиевого образца барьер непрерывно рос в ходе эксперимента.

В случае наномодифицированных пластин движения капель по поверхности визуально обнаружить не удалось. Центры образования льда появились со значительным запаздыванием относительно алюминиевой пластины. Появляющееся ледяное образование фиксировалась визуально, т.е. при достижении размера порядка 0.1 мм. Количество центров льдообразования на единицу площади было значительно меньше, чем в случае обычного алюминия. Это позволяет сделать предположение о том, что замерзшие участки появлялись в тех местах поверхности, где ее свойства

супергидрофобности были нарушены. На рисунке 3 показан вид двух наномодифицированных образцов, отличающихся способом обработки (образцы А и Б) и тестовой дюралюминиевой пластины в ходе образования барьерного льда. Придание супергидрофобных свойств алюминиевым подложкам образцов производилось в ИФХЭ РАН научным коллективом, возглавляемым член-корр. РАН Л.Б. Бойнович.

Образцы были установлены на модели рисунка 2 и испытаны в идентичных условиях. Скорость потока в экспериментах составляла 80 м/с, температуры – минус 20 °С, водность (массовое содержание воды в единице объема) – 0.57 г/м<sup>3</sup>. Воздух с каплями на кадрах рисунка 3 движется сверху вниз. В момент  $t = 2$  мин (первая сверху тройка горизонтально расположенных кадров) образец В свободен ото льда, на образце А появились центры роста льда, а на алюминиевой пластине уже сформирован ледяной барьер. На второй сверху полоске кадров ( $t = 4$  мин.) ледяные наросты на образце А уже достигли значительных размеров, а на образце В они появились только в правой части пластины. На полоске кадров, соответствующей  $t = 6$  мин, ледяной барьер практически сформирован на всех трех пластинах. На следующей строке кадров ( $t = 8$  мин) произошел срыв куска льда на образце В (ср. с предыдущим кадром при  $t = 6$  мин). Место срыва сразу после него представляло собой визуально чистую поверхность, а затем на ней быстро появились многочисленные центры образования льда. Новое ледяное образование росло, при этом на других участках происходили отрывы льда. Можно видеть места отрывов на полоске кадров ( $t = 10$  мин) в левой части образца А и правой части образца В. В течение всего эксперимента описанное явление (накопление небольшого количества льда с последующим его срывом) повторялось многократно.

Необходимо отметить принципиальную важность полученного результата, обусловленную длительными (и безуспешными до получения результатов настоящей работы) поисками материала, способного к самоочищению ото льда в воздушнокапельном потоке, обтекающем летательный аппарат.

Способность исследуемых материалов самоочищаться ото льда связана, безусловно, с малым значением силы адгезии к барьерному льду. Следует отметить, что сила адгезии в случае образования льда на поверхности катящимися по ней каплями существенно выше, чем в случае намораживания на нее покоящейся воды. Адгезия льда на двух наномодифицированных образцах была измерена при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  и составила менее 10 Н/см<sup>2</sup>. Для обычных материалов, включая гидрофобные краски и лаки, сила адгезии при этой температуре находится в диапазоне 12–20 Н/см<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования дополняются теоретическими. Развита простая математическая модель, иллюстрирующая тенденции зависимости гидротермодинамических параметров различных образований на твердой поверхности (пленки, ручейка, капли) от скорости обдува и угла смачивания.

Построена качественная теория гидротермодинамики первоначально «теплой» капли, движущейся по поверхности профиля и остывающей за счет отвода тепла в воздух и крыло. В частности, эта теория использует закон Юнга–Дюпре для плотности энергии взаимодействия капли с поверхностью тела  $w = \sigma(1 + \cos\theta)$ , где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\theta$  – угол смачивания.

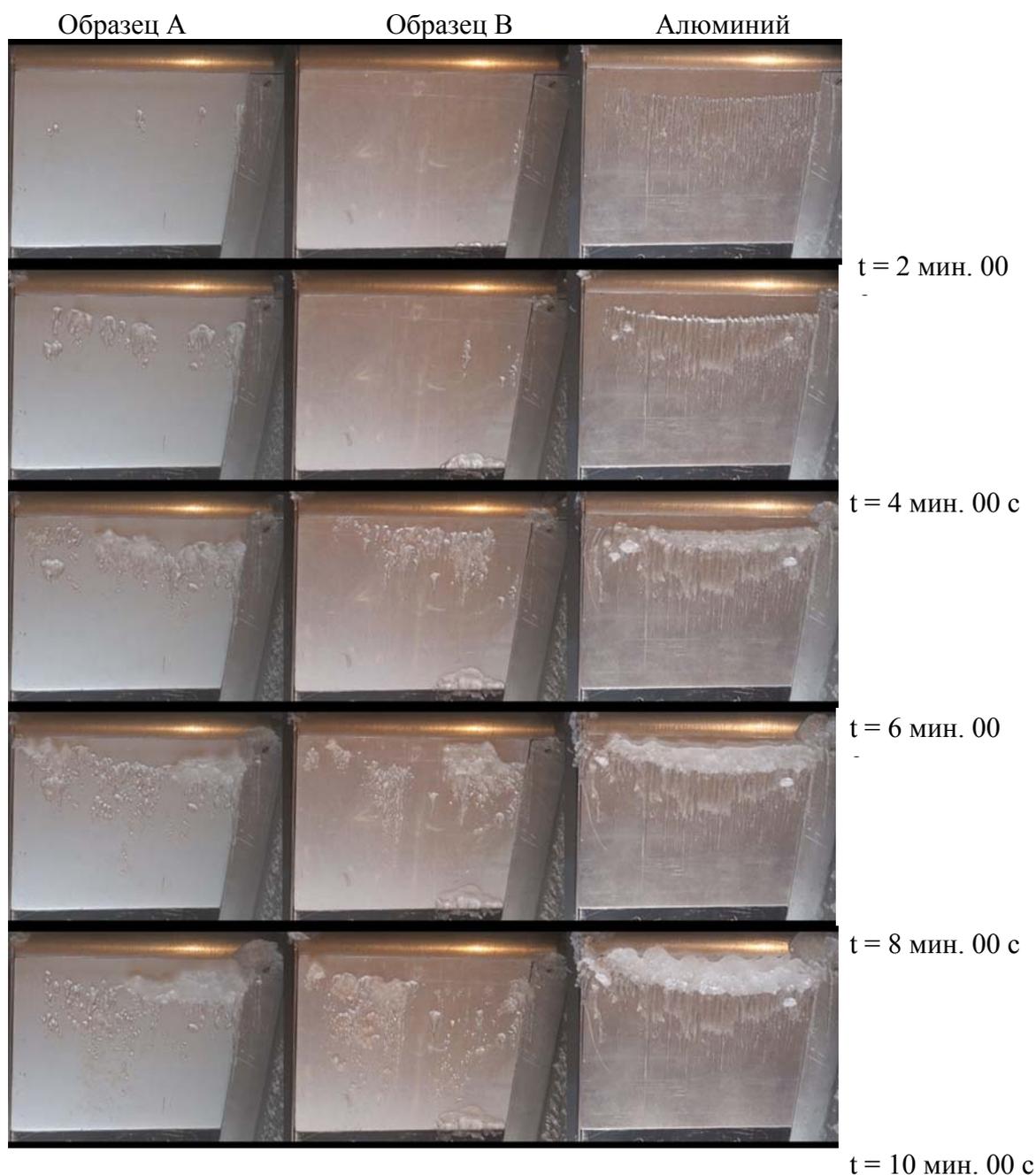


Рис. 3. Кадры видеосъемки эксперимента. Вид наномодифицированных образцов и тестового образца при образовании барьерного льда.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов на основе развитой теории. Показаны изменения скорости (слева) и температуры (справа) эквивалентной по объему сферической капли при ее движении вдоль профиля. Кривые соответствуют различному радиусу капли (0.1–0.5 мм) при скорости обтекания 40 м/с и угле смачивания 120°. Темпера-

тура и давление окружающей среды составляет  $-10^{\circ}\text{C}$  и 760 Торр, соответственно. Кружки отмечают значения величин, при которых температура капли достигает значения  $0^{\circ}\text{C}$  и она может примерзнуть к поверхности.

Показано, что увеличение угла смачивания существенно увеличивает скорость движения капель по поверхности и препятствует их примерзанию. В дальнейшем предполагается тщательное сопоставление экспериментальных и расчетно-теоретических результатов с целью уточнения подгоночных параметров предложенной простой теории.

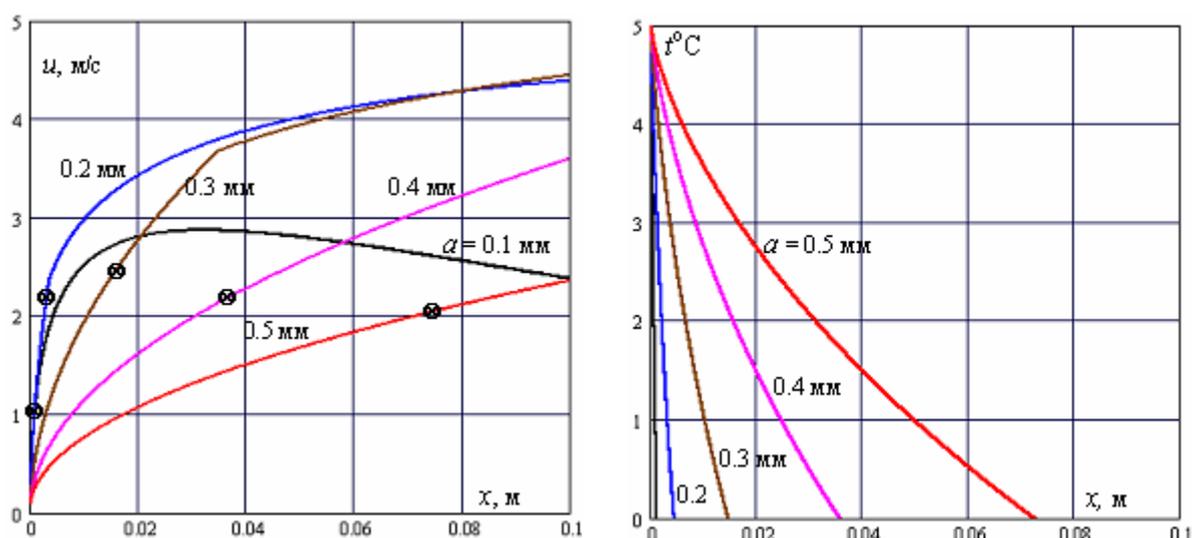


Рис. 4. Изменения скорости (слева) и температуры (справа) эквивалентной по объему сферической капли при ее движении вдоль профиля.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (Гос. контракт №14.740.11.1072).

### Выводы

1. В условиях обледенения на стенде получен эффект периодического самоочищения супергидрофобных поверхностей ото льда, при этом на поверхностях обычных материалов при этих же условиях растет ледяной барьер. Краевой угол смачивания супергидрофобных поверхностей при этом был более  $160^{\circ}$ . Полученный результат, а также непосредственные измерения силы адгезии свидетельствуют о ее существенном уменьшении в случае наномодифицированного супергидрофобного материала. Показано, что гидрофобные поверхности в диапазоне краевых углов  $\theta = 90-120^{\circ}$  не обеспечивают защиты ото льда.
2. Для самоочищения поверхности от барьерного льда скоростным напором набегающего потока значение силы адгезии льда к поверхности, измеренное в соответствии с разработанной методикой испытаний при температуре поверхности менее  $10^{\circ}\text{C}$ , должно составлять менее  $10\text{ Н/см}^2$ .

3. Развита простая математическая модель, иллюстрирующая тенденции зависимости гидротермодинамических параметров различных образований на твердой поверхности (пленки, ручейка, капли) от скорости обдува и угла смачивания. Показано, что увеличение угла смачивания существенно увеличивает скорость движения капель по поверхности и препятствует их примерзанию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Raraty I. F., Tabor D.* The adhesion and stress properties of ice // Proc. Roy. Soc. 1958. Vol. 245A. No. 1241. PP. 184–201.
2. *Eskin S.G., Fontaine W.E., Witzell O.W.* Strength characteristic of ice – in contact with various kinds of surfaces // Refr. Eng. 1957. Vol. 65. No. 12. PP. 33–38, 52.
3. *Stallabrass J.R., Price R.D.* On the adhesion of ice to various materials // Can. Aeronaut. Space J. 1963. Vol. 9. No. 7. PP. 199–202.
4. *Cao L., Jones K. A., Sikk K. V. et al.* Anti-icing superhydrophobic coatings // Langmuir. 2009. Vol. 25. No. 21. P. 12444–12448.
5. *Xiao J., Mackie K.E., Osborn J.H. et al.* In-silico environment for designing anti-icing surfaces. SAE 2011 Int. Conf. on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing. June 2011, Chicago, USA. SAE Paper 2011-38-001, 2011.
6. *Farhadi S., Farzaneh M., Kulinich S.A.* Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces // Appl. Surface Sci. 2011. Vol. 257. No. 14. P. 6264–6269.
7. *Antonini C., Innocenti M., Horn T. et al.* Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems // Cold Regions Sci. Tech. 2011. Vol. 67. No. 1–2. P. 58–67.

### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF THE ORDINARY AND NANO MODIFIED SUPERHYDROPHOBIC SURFACES ICING PROCESSES

E. Grinats<sup>1,2</sup>, A. Miller<sup>1,2</sup>, Y. Potapov<sup>1</sup>, A. Stasenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Federal State Unitary Enterprise "Zhukovsky Central Aero-Hydrodynamic Institute "*

*1, Zhukovsky Str., Zhukovsky, 140180*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology*

*9, Institutskii lane, Dolgoprudny, 141700*

*Abstract.* The results of investigations of superhydrophobic, hydrophobic and ordinary surfaces in the artificial icing conditions are generalized. The availability of the superhydrophobic coatings for anti-icing systems is demonstrated. The effect of the superhydrophobic surface self-cleaning from ice in the flow conditions is considered. The simple mathematical model was developed illustrating dependences tendencies of hydrothermodynamic parameters of different formations on solid surface (film, rivulet, droplet) from the flow velocity and contact angle.

*Keywords:* icing, aircraft, runback ice, adhesion, materials surfaces nano modification, superhydrophobicity, aerophysical experiment.