Том 27, № 05, 2024 Vol. 27, No. 05, 2024

#### ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
 2.9.4. – Управление процессами перевозок;
 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;
 2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 532.696.52 DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-8-23

## Особенности взаимодействия жидкости с поверхностью в приложении к проблеме обледенения летательных аппаратов

И.А. Амелюшкин<sup>1,2</sup>, Е.В. Кривопалова<sup>1</sup>, М.А. Кудров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия <sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

г. Долгопрудный, Россия

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 20411.1770290019 18.004 на НИР «Флагман 1»

Аннотация: Управление взаимодействием жидкости с поверхностью представляет большой интерес в широком спектре областей практических приложений: возможность полной защиты летательных аппаратов от обледенения, снижение коэффициента трения на десятки процентов, увеличение расхода жидкости в трубах и каналах; при этом модели ряда приведенных выше процессов далеки от своего завершения. В настоящей работе описаны режимы обтекания жидкостью гидрофобного тела, содержащего в порах воздух, в приложении к задачам противодействия обледенению летательных аппаратов и снижения трения жидкости при обтекании ею твердых тел. Получены аналитические выражения расхода жидкости в каналах, смазка на стенках которых обеспечивает скольжение, а также оценки параметров вымывания слоя воздушной смазки из пор гидрофобного покрытия. На примерах течения между плоскостями и в цилиндрической трубе показано влияние толщины слоя смазки на расход жидкости, в частности, показана возможность его увеличения на несколько десятков процентов за счет скольжения. Разработана физико-математическая модель расчета элементарного акта взаимодействия молекулы потока с твердым телом в целях сокращения времени молекулярного моделирования при учете важных физических особенностей. Получены оригинальные выражения коэффициентов отскока молекул от поверхности твердого тела в зависимости от его физических свойств и температуры. Развиты модели взаимодействия на примере молекулы воды и твердого тела из алюминия, получены значения коэффициентов изменения скорости молекул при соударении. На основе анализа известных экспериментальных данных показана зависимость угла смачивания капель воды на плоской поверхности от температуры Дебая материала. Полученные результаты и развитые математические модели могут быть использованы при создании покрытий, препятствующих обледенению летательных аппаратов или полностью устраняющих его, в частности образования барьерного льда при течении затвердевающих жидкой пленки и капель на поверхности обтекаемых элементов летательного аппарата.

**Ключевые слова:** гидрофобные покрытия, обледенение, режимы обтекания, метастабильные капли, акт удара молекул, температура Дебая.

Для цитирования: Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В., Кудров М.А. Особенности взаимодействия жидкости с поверхностью в приложении к проблеме обледенения летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 5. С. 8–23. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-8-23

## Features of the liquid interaction with surfaces as applied to the problem of aircraft icing

## I.A. Amelyushkin<sup>1,2</sup>, E.V. Krivopalova<sup>1</sup>, M.A. Kudrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Russia <sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

# The Study was conducted within the framework of the State contract № 20411.1770290019 18.004 for R&D "Flagman 1"

Abstract: Managing the interaction of liquids with surfaces is of great interest over a wide range of practical applications: the possibility of aircraft complete ice protection, a reduction of the friction coefficient by tens of percent, an increase in fluid flow in pipes and channels; however, the models of a number of the above processes are far from completion. This paper describes the flow modes of liquid around a hydrophobic body containing air in its pores in application to problems of aircraft icing and reducing liquid friction when it flows around solid bodies. Analytical expressions for liquid flow in channels, where lubrication on the walls allows for sliding, have been obtained, as well as estimates of parameters for washing away of the air lubrication layer from the pores of the hydrophobic coating. Using examples of flow between plates and in a cylindrical pipe, the influence of the lubrication layer thickness on fluid flow is shown, specifically demonstrating the potential increase in flow by several tens of percent due to sliding. A physical-mathematical model has been developed for calculating the elementary interaction act of a flow molecule with a solid body to reduce the time of molecular simulation while taking into account important physical features. New original analytical expressions for the rebound coefficients of molecules from the surface of a solid body have been obtained, depending on its physical properties and temperature. Interaction models have been developed using the example of water molecule and solid aluminum body, with values of the velocity change coefficients for molecular during collision obtained. Based on an analysis of known experimental data, the dependence of the contact angle of water droplets on a flat surface on the Debye temperature of the material has been demonstrated. The results obtained and the developed mathematical models can be used to create coatings that prevent or completely eliminate aircraft icing, particularly the formation of barrier ice during the flow of solidifying liquid film and droplets on the surfaces of streamlined elements of the aircraft.

Key words: hydrophobic coatings, icing, flow modes, metastable droplets, molecular collision act, Debye temperature.

For citation: Amelyushkin, I.A., Krivopalova, E.V., Kudrov, M.A. (2024). Features of the liquid interaction with surfaces as applied to the problem of aircraft icing. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 5, pp. 8–23. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-8-23

#### Введение

Обеспечение безопасности полета – необходимое условие возможности эксплуатации воздушного судна [1]. Согласно известным данным о летных происшествиях ряд аварий и катастроф летательной техники (в том числе с потерями человеческих жизней) вызваны обледенением. Мировая статистика показывает, что число летных происшествий, возникающих из-за опасных воздействий внешней среды, в общем балансе аварийности в авиации весьма значительно. Доля этих происшествий достигает 25–30% от общего количества летных происшествий [2]. Экспериментальные и теоретические исследования физи-

ческих процессов, сопровождающих обледенение летательных аппаратов в переохлажденных облаках, содержащих метастабильные капли воды, проводятся в течение более чем полувека [3, 4], разрабатываются методы борьбы с этим неблагоприятным явлением [5, 6]. Использование гидрофобных покрытий представляет интерес в широкой области практических приложений, в частности в задачах противодействия обледенению летательных аппаратов [7–9], при снижении гидродинамического сопротивления [10-12], а также в ряде других приложений [5, 11], в том числе информационно-измерительной аппаратуры [7, 13], элементов компрессора двигателей [14]. Несмотря на значительные успехи в создании (напр., [1-3, 7-9]) и моделировании (напр., [1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11,]) статических и гидродинамических (при малых скоростях потока) свойств, проблема управления ударом крупных капель, в частности переохлажденных, в задачах противодействия обледенению летательных аппаратов в настоящее время далека от своего завершения. Отметим, что при использовании гидрофобных покрытий в задачах управления налипанием частиц и капель аэрозольного потока важную роль играет число Стокса [15, 16], характеризующее инерционное осаждение частиц аэрозоля, и форма обтекаемого тела, которая приводит к различию скоростей частиц аэрозоля и газовой фазы этой среды, при этом линии тока газовой фазы (газа), вообще говоря, не совпадают с траекториями частиц [17]. Чем больше число Стокса, тем больше скорость удара переохлажденных капель и интенсивность их осаждения на поверхности обтекаемого тела [15]. В более ранней работе [4] показано влияние параметра, равного отношению размера обтекаемого тела и капель, на область возможного роста льда на обтекаемом теле. Отметим, что наряду с областью попадания переохлажденных капель на поверхность обтекаемого тела важную роль играет значение нормальной к поверхности составляющей вектора скорости удара, так как от нее зависит проникновение жидкости в поры покрытия и адгезионное сцепления льда с поверхностью. Двигаясь по инерции, частицы осаждаются на поверхности обтекаемых тел в условиях обледенения как на внешних элементах конструкции летательных, так и во внутренних каналах, в ударных волнах; в специфических условиях сальтации (подъема с поверхности) частиц снега возможно образование областей повышенной концентрации частиц, существенно влияющих на тепломассообмен тел в гетерогенном потоке и неравномерности перемешивания фаз взаимодействующих потоков в микроканалах. Эти обстоятельства в большинстве практических задач снижают скорость удара частиц и капель аэрозоля об обтекаемое тело, что приводит к затруднению проникновения вещества частиц в поры гидрофобного покрытия и снижению процессов эрозии и абляции элементов покрытия. Такие покрытия, как правило, эффективно работают непревышении при числом Вебера  $(We = HρV^2/σ)$  некоторого критического значения, при котором составляющая капли жидкость начинает проникать в поры покрытия. Здесь Н – характерный размер рельефа поверхности, ρ – плотность жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, V - скорость удара капли. При проникновении жидкости в поры гидрофобного покрытия под действием сил скоростного напора при числах Вебера, превышающих его критическое значение Wecrit (то есть когда силы инерции жидкости превышают силы давления поверхностного натяжения [15] на краях пор и давления внутриполостного воздуха при его сжатии), эффективность гидрофобных и льдофобных покрытий может быть снижена.

Следует отметить, что молекулярное моделирование описанных выше процессов осложняется необходимостью моделирования поведения множества атомов поверхностного слоя твердого тела, а также то, что моделирование взаимодействия молекул жидкости или газа с множеством атомов твердого тела осложняется как значительными затратами вычислительных ресурсов, так и сложностью современных квантово-химических методов расчета соответствующих потенциалов взаимодействия и векторов силы в твердом теле, поскольку модель парного взаимодействия молекул и атомов, вообще говоря, не вполне корректна.

Актуальность настоящего исследования представляется весьма высокой в силу многих обстоятельств, которые будут перечислены ниже. Применение гидрофобных покрытий в определенном диапазоне параметров потока позволяет полностью устранить образование льда [7]. Кроме того, их использование в сочетании с тепловой противообледенительной системой может снизить ее энергозатраты и вес и при этом предотвратить образование на крыле барьерного льда [7, 15]. Последний эффект достигается за счет уноса с крыла потоком воздуха образовавшихся на передней кромке крыла капель воды. Отметим, что создание на поверхности обтекаемого жидкостью тела слоя воздушной или иной смазки за счет удержания газа в порах нанорельефного тела позволяет значительно снизить сопротивление трения [17] и в ряде задач интенсифицировать перемешивание жидкостей при малых значениях числа Рейнольдса [18]. В последнем случае рельеф поверхности будет способствовать «подкручиванию» жидкости и возникновению вихревых структур: в результате векторы частиц жидкости в ряде областей будут направлены навстречу друг другу, что способствует взаимному проникновению жидкостей, в частности образованию областей повышенной концентрации малых частиц. Управление неустойчивыми гидродинамическими явлениями при сворачивании жидкой пленки в ручейки и распаде ручейков в отдельные капли [19] представляет интерес в задачах управления теплообменом и методах визуализации ламинарно-турбулентного перехода на элементах конструкции летательных аппаратов, применяемых в аэрогидродинамических институтах. Тем не менее применение гидрофобных покрытий для снижения сопротивления элементов гидросредной техники осложнено рядом обстоятельств: наряду с гидродинамическим вымыванием слоя воздуха может иметь место образование органических соединений, микроорганизмов и иных форм образования различных элементов на поверхности.

По мере вымывания воздуха из пор рельефного гидрофобного покрытия режимы 6 и 7 на рис. 3 могут перейти в режимы с меньшим скольжением за счет малости воздуха в порах гидрофобного покрытия, вплоть до режима 1, когда воздуха в порах практически не остается.

Заметим, понятия «гидрофобность» и «льдофобность» во многих аспектах имеют одинаковую физическую природу, связанную прежде всего с рельефом поверхности и физико-химическими свойствами материала, но при этом присутствуют различия и немонотонные зависимости свойств от различных параметров, которые следует иметь в виду. Так, например, известно, что при ударе переохлажденных капель о гидрофобную поверхность жидкость по инерции проникает в поры покрытия при достаточно больших скоростях, а увеличение объема вещества при замерзании может привести не только к увеличению трения за счет увеличения давления на элементы рельефа, но и повредить рельеф расширением жидкости при ее отвердевании. В статье [20] приведена классификация гидрофобных и льдофобных покрытий с описанием их различий и других аспектов, актуальных для прикладных задач.

Цель настоящей работы – развитие математических моделей и численных алгоритмов расчета гидрофобных свойств покрытий, зависящих от геометрии рельефа, физикохимических свойств материала, параметрические исследования новых эффектов, сопровождающих взаимодействия жидкости и переохлажденных капель аэрозольного потока с твердым телом в приложении к проблеме обледенения летательных аппаратов.

При решении соответствующих цели поставленных задач использованы методы математического и компьютерного моделирования с учетом анализа результатов работ других исследователей.

### Динамические характеристики гидрофобных покрытий

Эффект снижения сопротивления достигается за счет удержания в порах поверхности обтекаемого жидкостью тела слоя воздуха, который выполняет роль смазки (рис. 1). Толщина слоя смазки h определяется размерами выступов рельефной поверхности L и поверхностными свойствами, которые описываются краевым углом смачивания плоской поверхности жидкостью в воздухе. При этом в результате приравнивания значения касательных напряжений на границе раздела жидкости и смазки выражение для длины скольжения имеет следующий вид:

 $b \cong h \cdot \mu_{\mathsf{m}} / \mu_{\mathsf{CM}}, V(h) = b \partial V(h) / \partial y.$ 

Значение параметра *b* определяется множеством процессов, имеющих аэрогидродинамическую и химическую природу, которые зависят от геометрической формы рельефного тела [21]. Их моделирование требует больших вычислительных затрат и не вполне оправданно по сравнению с эмпирическими методами. Кроме того, достоверность моделирования в значительной степени зависит от точности измерения множества входящих в уравнения параметров, погрешности определения которых могут привести к неприемлемо большому диапазону расчетных значений параметра b. Заметим, что в случае устойчивой толщины смазки длина скольжения b может быть легко рассчитана на основе приведенной выше формулы в зависимости от измеряемой с приемлемой точностью толщины слоя смазки h.





covered with a lubricating layer

q

Если роль смазки (индекс «см») выполняет воздух, а жидкости (индекс «ж») - вода, отношение вязкостей  $\psi = \mu_{\varkappa} / \mu_{cM} \cong 50$  . Отметим, что в ряде случаев под вязкостью смазки следует понимать эффективную вязкость системы, коэффициент вязкости которой может отличаться от коэффициента вязкости вещества смазки. При движении жидкости между плоскостями, одна из которых подвижна (рис. 1), а неподвижная покрыта слоем смазки толщиной h, выражение для отношения расходов жидкости (с использованием смазки и без нее) имеет следующий вид:  $\frac{q}{q_0} = \frac{(1-\xi)(1+(2\psi-1)\xi)}{1+(\psi-1)\xi}$ , так как распределение скорости в зазоре определяется соотношением

$$\frac{u}{u_0} = \frac{\frac{y}{H} + (\psi - 1)\xi}{1 + (\psi - 1)\xi}.$$
 (1)

Оно получено в результате решения известной задачи Куэтта для случая течения жидкости по поверхности, покрытой слоем смазки. Здесь у – отношение вязкости жидкости к вязкости смазки,  $\xi = h / H < 1$ . Выражение для расхода имеет вид

$$q = \int_{h}^{H} \rho V(y) dy D = \frac{\rho D u_0 H}{2} \frac{(1-\xi)(1+(2\psi-1)\xi)}{1+(\psi-1)\xi}; (2)$$
$$q_0 = q(\xi = 0) = \frac{\rho D u_0 H}{2}.$$

В плоском канале выражения для скорости и расхода имеют вид

$$V(y) = -\frac{H^2}{2} \frac{1}{\mu_{\pi}} \frac{\partial P}{\partial x} \left( \left( \frac{y}{H} \right)^2 - \frac{y}{H} + \xi(\psi - 1) \right);$$
  
=  $2 \int_h^{H/2} \rho V(y) dy D = \rho D \frac{H^3}{12} \frac{1}{\mu_{\pi}} \frac{\partial P}{\partial x} \left( 1 + 4\xi^3 - 6\xi^2 + 12(1 - 2\xi)\xi(\psi - 1) \right).$  (3)

Выражение для скорости получено путем решения известной задачи Пуазейля для плоского канала. Две противоположные стенки этого канала покрыты слоем смазки, а две другие противоположные стенки находятся друг от друга на расстоянии D, которое многократно превышает ширину канала H. Здесь  $\xi < 0,5$  в предположении, что смазка не может заполнять весь плоский канал;  $\frac{\partial P}{\partial x} \cong \Delta P/L$ , где $\Delta P$  – перепад давления между концами трубы длиной *L*. На основе аналогичных процедур получаются выражения для цилиндрического канала:



Рис. 2. Особенности скольжения жидкости по рельефному твердому телу, которое покрыто слоем смазки:
а – зависимость толщины слоя воздуха h у рельефной поверхности в жидкости от расстояния между выступами рельефного тела и угла смачивания капли воды на плоской поверхности, характеризующего физические свойства материала рельефного тела: 1 – 30°, 2 – 45°, 3 – 60°, 4 – 90°, 5 – 150°; б – эффект изменения расхода жидкости q между плоскостями за счет слоя смазки различной вязкости: 1 – вязкости смазки и жидкости отличаются в 50 раз (вода и воздух ψ = 1/50), 2 – вязкости смазки и жидкости отличаются в 100 раз (ψ = 1/100), 3 – вязкости смазки и жидкости отличаются в 20 раз(ψ = 1/20), 4 – вязкости жидкости и слоя смазки равны (ψ = 1)
Fig. 2. Features of liquid sliding on a relief solid body covered with a lubricating layer:

a – dependence of the thickness of the air layer h on the relief surface in the liquid relative to the distance between the protrusions of the relief body and the contact angle of a water droplet on a flat surface, characterizing the physical properties of the material of the relief body:  $I - 30^{\circ}$ ,  $2 - 45^{\circ}$ ,  $3 - 60^{\circ}$ ,  $4 - 90^{\circ}$ ,  $5 - 150^{\circ}$ ;  $\delta$  – the effect of changing the fluid flow rate q between planes due to the lubricating layer of different viscosity: I – the viscosities of the lubricant and liquid differ by 50 times (water and air  $\psi = 1/50$ ), 2 - 100 times ( $\psi = 1/100$ ), 3 - 20 times ( $\psi = 1/20$ ), 4 – viscosities of the liquid and the lubricating layer are equal ( $\psi = 1$ )

$$V(r) = -\frac{R^2}{4} \frac{1}{\mu_{\pi}} \frac{\partial P}{\partial x} \left( \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \psi \left( 1 - \left(1 - \frac{1}{\psi}\right) (1 - \xi)^2 (1 - \ln(1 - \xi)^2) \right) \right); \tag{4}$$

$$q = \int_{0}^{R-h} \rho V 2\pi r dr = \frac{\pi \rho \Delta P}{\mu_{\mathsf{x}} L} \frac{R^{4}}{8} (1-\xi)^{4} \left( 1 - 2\psi \left( \frac{1}{(1-\xi)^{2}} - \left( 1 - \frac{1}{\psi} \right) (1 - \ln(1-\xi)^{2}) \right) \right).$$
(5)

При выводе выражения для расхода жидкости используется допущение, что слой смазки не вымывается под действием касательных напряжений. Данное предположение вполне оправданно по крайней мере в течение короткого времени движения жидкости по поверхности, на которой образован слой воздушной смазки. Кроме того, даже при длительном движении жидкости по такой поверхности слой воздушной смазки будет стационарным при большой разнице температур холодной жидкости и нагретой поверхности. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

На рис. 3 показаны режимы взаимодействия жидкости с рельефным телом, в порах которого находится воздух. Режим 1 отражает практически полное отсутствие газа в порах, в статических условиях это соответствует известному состоянию Венцеля. Режимы 2-3 характеризуются небольшим количеством воздуха и движением жидкости с замкнутыми линиями тока внутри поры гидрофобного покрытия. Их отличает форма мениска, зависящая от смачивания жидкостью стенок пор. Режимы 4-5 характеризуются практически полным заполнением пор гидрофобного покрытия воздуха и так же, как и режимы 3-4, отличаются друг от друга формой мениска. Эти режимы (4-5) внешне напоминают известное состояние Касси и Бакстера, которое описано ими для случая неподвижной капли на рельефном твердом



Рис. 3. Схема режимов движения жидкости по пластине, в порах которой находится воздух Fig. 3. Diagram of liquid flow modes over a plate in the pores of which air is present

теле. Режимы 6 и 7 неустойчивы и могут быть реализованы при большой разнице температур твердого тела и жидкости, которая приводит к испарению жидкости и образованию газового слоя [22]. Этот слой снижает теплообмен жидкости с твердым телом за счет известного эффекта Лейденфроста (например, в задачах охлаждения тела жидким хладагентом) и приводит к снижению гидродинамического сопротивления за счет того, что вязкость газообразного слоя, как правило, на порядок меньше вязкости жидкости. Отметим, что в случае ступенчатого и направленного в одну сторону ступенек рельефа возможно движение капель по горизонтальной поверхности за счет разницы давлений у границ капель вблизи линии, проходящей через центр капель перпендикулярно ступенькам поверхности [22]. При движении жидкости по поверхности в виде пленки последняя распадается на ручейки, а ручейки затем на капли (неустойчивость Рэлея – Плато).

Для определения свойств материала твердого тела зависимость параметров колебаний кристаллической решетки от температуры Дебая, молярной массы и внешней температуры может быть рассчитана согласно следующему выражению [23]:

$$\Delta a^{2}(T) = \frac{9\hbar^{2}N_{A}}{4k_{B}} \frac{1}{\mu_{A}\theta_{D}} \left( 1 + 4\left(\frac{T}{\theta_{D}}\right)^{2} \int_{0}^{\frac{\theta_{D}}{T}} \frac{xdx}{e^{x}-1} \right) = \frac{9\hbar^{2}N_{A}}{4k_{B}} \frac{1}{\mu_{A}\psi} \left( 1 + 4\psi^{2} \int_{0}^{\psi} \frac{xdx}{e^{x}-1} \right).$$
(6)

Из этого выражения можно оценить круговую частоту колебаний атомов кристаллической решетки:  $\omega = \frac{\sqrt{3R_0T_w/\mu_A}}{\Delta a\sqrt{2}}$ .

На рис. 4 показаны температурные зависимости амплитуды колебаний, характерных тепловых скоростей колебаний атомов кристаллической решетки алюминия и соответствующих частот.

Выражение для скорости отраженных от поверхности молекул будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{V}^{r} = \frac{\mathbf{V}^{i} \left(1 - \frac{\mu_{A}}{\mu}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\mu_{A}}{\mu} (\mathbf{n} + 2\tau) \Delta a \omega \sin \omega t}{1 + \frac{\mu_{A}}{\mu}}.$$
 (7)

Данное выражение позволяет учесть теплообмен потока с поверхностью и значительно сократить время расчетов, поскольку моделирование каждого из взаимодействующих между собой и с молекулами потока атомов обтекаемого тела требует колоссальных вычислительных ресурсов. При выводе данного выражения не учитываются физико-химические превращения в результате взаимодействия молекул как упругих шаров и при взаимном обмене импульсами, что может быть вполне оправданно в задачах отсутствия физико-химических и фазовых превращений при моделировании взаимного обмена импульсом и энергией потока с поверхностью.



**Рис. 4.** Температурная зависимость параметров колебаний атомов твердого тела (алюминия), которые отнесены к соответствующим значениям при нулевой (по Цельсию) температуре

Fig. 4. Temperature dependence of the parameters of atom vibrations in a solid body (aluminum), which are related to the corresponding values at zero (Celsius) temperature

Здесь одна компонента по нормали к поверхности (вектор n идентичен орту j), две по касательной (вектор  $\tau$  идентичен ортам i и k):

$$V_n^r = \frac{V_n^i \left(1 - \frac{\mu_A}{\mu}\right) + \frac{2 \mu_A}{\sqrt{3} \mu} \Delta a \omega \sin \omega t}{1 + \frac{\mu_A}{\mu}},$$
$$V_\tau^r = \frac{V_\tau^i \left(1 - \frac{\mu_A}{\mu}\right) + \frac{4 \mu_A}{\sqrt{3} \mu} \Delta a \omega \sin \omega t}{1 + \frac{\mu_A}{\mu}}.$$
(8)

Отсюда выражение для коэффициентов изменения скорости будет иметь следующий

вид:  $a_n = \frac{1-\xi+\xi \frac{\sqrt{R_0T/2\mu_A}}{v^i \cos a^i} \sin \omega t}{1+\xi}$ . Усредняя по времени, получим  $\langle a_n \rangle = \frac{1-\xi+\xi \frac{1,39\sqrt{2R_0T/\mu_A}}{v^i}}{1+\xi}$ . При этом выражение отклонения от среднего значения имеет вид  $\delta a_n = \frac{\xi}{1+\xi} \frac{\sqrt{2R_0T/\mu_A}}{v^i \cos a^i}$ .

Аналогичные построения можно провести и для коэффициента изменения касательной компоненты вектора скорости молекулы при ударе о поверхность:

$$a_{\tau} = \frac{\left(1 - \frac{\mu_A}{\mu}\right) + 2\frac{\mu_A \sqrt{R_0 T/2\mu_A}}{\mu_V t^i \sin\alpha^i} \sin\omega t}{1 + \frac{\mu_A}{\mu}}.$$
 (9)

На рис. 5 показаны зависимости коэффициентов отскока молекул от поверхности в зависимости от скорости удара и материала поверхности.

$$tg\alpha^{r} = \frac{1 + \frac{2}{\mu/\mu_{A} - 1}\sqrt{\frac{R_{0}T_{w}}{2\mu_{A}} \frac{\sin\omega t}{\sin\alpha^{i}}}}{1 + \frac{1}{\mu/\mu_{A} - 1}\sqrt{\frac{R_{0}T_{w}}{2\mu_{A}} \frac{\sin\omega t}{v^{i} \cos\alpha^{i}}}},$$
  
$$< tg\alpha^{r} > = \frac{1 + \frac{1}{\mu/\mu_{A} - 1}\sqrt{\frac{R_{0}T_{w}/\mu_{A}}{\sin\alpha^{i}}}}{1 + \frac{1}{\mu/\mu_{A} - 1}\sqrt{\frac{R_{0}T_{w}/\mu_{A}}{\cos\alpha^{i}}}}.$$
 (10)

Отсюда для алюминия нетрудно получить связь угла отражения  $\alpha^r$  (индекс r – reflected – отраженный) с углом падения  $\alpha^i$  (индекс i – incident – падающий):

$$tg\alpha^{r} = \frac{\sin\alpha^{i} + \frac{2\sqrt{R_{0}T_{W}/\mu_{A}}}{V^{i}(\mu/\mu_{A}-1)}}{\cos\alpha^{i} + \frac{\sqrt{R_{0}T_{W}/\mu_{A}}}{V^{i}(\mu/\mu_{A}-1)}},$$
  
для алюминия:  $tg\alpha^{r} = \frac{\sin\alpha^{i} + \frac{6\sqrt{R_{0}T_{W}/\mu_{A}}}{V^{i}}}{\cos\alpha^{i} + \frac{3\sqrt{R_{0}T_{W}/\mu_{A}}}{V^{i}}}.$ 

Среднее значение скорости отраженных молекул будет иметь следующий вид:



**Рис. 5.** Расчет коэффициентов изменения скорости молекулы воды при ее ударе по нормали к поверхности плоских твердых тел из различных материалов при температуре –10 °C:

а – зависимость от скорости удара средних значений коэффициентов изменения скорости молекул при их ударе о тела из различных материалов; б – зависимость от молярной массы (материала твердого тела) максимального отклонения от среднего значения коэффициентов изменения скорости при различных значениях начальных скоростей удара молекул о поверхность (скорости обозначены цифрами в м/с)

Fig. 5. Calculation of the coefficients of change in the speed of water molecules upon impact normal to the surface of flat solid bodies made of various materials at a temperature of -10 °C:

a – dependence on the impact velocity of the average values of the coefficients of change in the speed of molecules upon their collision with bodies made of different materials;  $\delta$  – dependence on the molar mass (solid body material) of the maximum deviation from the average value of the coefficients of change in speed at various initial impact velocities of molecules against the surface (velocities are indicated by numbers in m/s)

$$\langle V^r \rangle = \frac{V^i \left(1 - \frac{\mu_A}{\mu}\right) + \frac{\mu_A}{\mu} \sqrt{3R_0 T_w / \mu_A}}{1 + \frac{\mu_A}{\mu}}, \qquad (11)$$

в безразмерном виде получили:

 $< M^r > = \frac{M^{i}(1-\xi) + \frac{\mu_A}{\mu} \sqrt{\frac{3T_W}{\gamma T}\xi}}{1+\xi}$ . Это выражение получено путем деления выражения (11) на характерное значение скорости звука  $\sqrt{\gamma R_0 T/\mu}$ . Цветом на рисунке показаны значения этого параметра от 0 до 1.

На рис. 6 и 7 приведены иллюстрации расчетов параметров отскока молекул от поверхности. На рис. 6 показана зависимость среднего угла отражения от угла падения молекулы воды на чистое твердое тело из алюминия. На рис. 7 показана зависимость отнесенной к скорости звука среднего значения скорости отскока молекулы от поверхности  $\langle V^r \rangle / \gamma R_0 T/\mu$  в зависимости от параметра М<sup>i</sup> (отношение скорости удара молекулы к скорости звука в окрестности области удара, размер окрестности значительно превышает

длину свободного пробега молекул водяного пара при температуре –10 °C), отношения температур поверхности к температуре пара и коэффициента  $\xi = \mu_A/\mu$ , равного отношению молярных масс материала твердого тела  $\mu_A$  и падающей на него молекулы  $\mu$ .

Отметим, что эти модели могут быть применимы в задачах, в которых кинетическая энергия молекул при ударе с атомами твердого тела значительно превышает их потенциальную энергию взаимодействия, когда более существенно проявляются эффекты многочастичного взаимодействия между молекулами. Кроме того, в настоящем исследовании пренебрегается процессами электризации и разделения зарядов при взаимодействии капель или потока жидкости с твердым телом.

Кристаллизация капель при ударе имеет место при превышении критического значения скорости удара  $V^*$ , температурная зависимость которого получена в работе [24]:  $V^* = U^* (1 - T/T_f)^{-7/10}$ . Здесь показатель степени и значение  $U^* = 8,9$  см/с получены ра-



Рис. 6. Зависимость угла отражения от угла падения молекул на обтекаемую поверхность твердого тела;
 б – средние значения числа коэффициентов восстановления скорости отраженных молекул
 Fig. 6. Dependence of the angle of reflection on the angle of incidence of molecules on the streamlined surface of a solid body; б – average values of the number of speed return coefficients of the reflected molecules



Рис. 7. Зависимость среднего значения безразмерной скорости отскочивших от поверхности твердого тела молекул  $< M^r >$  от безразмерных параметров  $M^i$  (по смыслу близок числу Маха) падающих молекул, отношения температур поверхности к температуре потока  $T_s/T$  и от параметра  $\xi = \mu_A/\mu$ 

Fig. 7. Dependence of the average value of the dimensionless velocity of molecules  $\langle M^r \rangle$  rebounding from the surface of a solid body on the dimensionless parameters M<sup>i</sup> (which is conceptually similar to the Mach number) of the falling molecules, the ratio of surface temperatures to the flow temperature  $T_s/T$  and on the parameter  $\xi = \mu_A/\mu$ 

нее экспериментально [24]. Заметим, что максимальное значение нормальной компоненты скорости  $V_n^{max}$  удара капель о поверхность можно описать приближенной формулой [16]  $\frac{V_n^{max}}{V_{\infty}} \cong \exp(-1/4$ Stk). Здесь Stk =  $\frac{V\rho D^2}{18R\mu}$  – число Стокса, которое характеризует неравновесность двухфазного потока по скорости или инерционное осаждение капель на поверхности обтекаемого тела,  $V_{\infty}$  – скорость движения обтекаемого тела. Таким образом, для кристаллизации переохлажденных капель при ударе о поверхность необходимо выполнение следующего неравенства:

$$U^* (1 - T/T_f)^{-7/10} < V_{\infty} \exp(-1/4\text{Stk}) = \sqrt{\frac{\text{We} \cdot \sigma}{D\rho}} \exp(-1/4\text{Stk})$$

Таким образом, при We  $< \frac{V_0^2 D \rho}{\sigma} (1 - T/T_f)^{-7/5} \sqrt{e}$  капли останутся жидкими.

#### Физико-химические характеристики неоксидированных металлических поверхностей

На основании экспериментальных данных статьи [25], где в качестве подложек использовались Ag, Au, Cu, Fe, Nb, Ni, Sn, Ti, и W, была выявлена линейная зависимость между атомным радиусом элементов подложки и углом их смачивания водой. Авторы получили уравнение  $\theta \approx -0.582 \cdot r_{\rm A} + 148$  для оценки угла смачивания дистиллированной воды на поверхности металлов и полуметаллов таблицы Менделеева. Расчетные значения подтверждали измерением угла смачивания на (Al, Si, Hg, Mo). В данной части работы была получена зависимость угла смачивания в от температуры Дебая T<sub>D</sub>, которая описывается выражением  $\theta = 17,1 \cdot \ln(T_D) - 28,4$  (интерполяция экспериментальных данных). Самое большое значение  $\theta = 95,6^{\circ} - y$  бериллия (Ве) при  $T_D = 1463$  К. Таким образом, металлическая поверхность Ве является гидрофобной по определению. Наименьший угол смачивания 46,2° наблюдается на поверхности свинца (Pb) при  $T_D = 88$  К. На графике (рис. 8) показано, что угол смачивания зависит от температуры Дебая. При достижении температуры Дебая возбуждаются все нормальные колебания кристаллических решеток и дальнейшее повышение температуры не может привести к увеличению числа их колебаний. Поэтому значение угла смачивания также будет зависеть от характеристической температуры, которая разграничивает классическую и квантовую области температурной зависимости теплоемкости. На рис. 8 показана температурная зависимость краевого угла смачивания капли воды на плоской поверхности твердого тела от его температуры. Зависимость угла смачивания  $\theta$  от амплитуды колебаний (a, Å) атомов металлов и полуметаллов имеет вид прямой линии и описывается  $\theta = -178, 1a + 94, 0$ . На рис. 9 видна обратная зависимость – чем больше амплитуда колебаний атомов в кристаллических решетках элементов (Pb, Ag, Al, Zn, W, Fe, Ni, Ge, Cu, Si, Be, Au, Nb, Sn, Ti, Mo, Hg, C (графит)), тем меньше будет угол смачивания. Сравнение этих подложек показывает, что наименьший угол смачивания будет на свинцовой подложке( $\theta = 46, 2^{\circ}$ ) при максимальной амплитуде колебаний атомов, а максимальный будет на подложке из бериллия ( $\theta = 95,6^{\circ}$ ) при минимальной амплитуде колебаний атомов. Отметим, что при температуре окружающей среды T = -10 °C колебания атомов в металле максимально будут отличаться в 3,3 раза. В порядке возрастания амплитуды колебаний атомов элементы можно расположить следующим образом: Мо, W, Ni, Be, Fe, Si, Ge, Ti, Nb, Cu, Au, Ag, Al, Zn, Sn, Hg, Pb. Полученные результаты могут быть использованы в задачах создания покрытия обшивки элементов конструкции летательных аппаратов в целях противодействия обледенению. Кроме того, при полете в условиях обильных осадков - когда аэродинамическое качество снижается на несколько десятков процентов [26] за счет образующегося и распадающегося на ручейки и капли слоя пленки, покрытия с увеличенным скольжением могут быть весьма актуальны. Их использование поможет снизить количество воды на поверхности летательных аппаратов, включая беспилотную технику, тем самым повысив аэродинамическое качество и другие параметры летательного аппарата, на которые осадки влияют неблагоприятно.



Рис. 8. Зависимость угла смачивания от температуры Дебая для Pb, Ag, Al, Zn, W, Fe, Ni, Ge, Cu, Si, Be, Au, Nb, Sn, Ti, Mo, Hg, C (графит)

Fig. 8. Dependence of contact angle on Debye temperature for Pb, Ag, Al, Zn, W, Fe, Ni, Ge, Cu, Si, Be, Au, Nb, Sn, Ti, Mo, Hg, C (graphite)



Рис. 9. Зависимость угла смачивания от амплитуды колебаний атомов металлов и полуметаллов (Mo, W, Ni, Be, Fe, Si, Ge, Ti, Nb, Cu, Au, Ag, Al, Zn, Sn, Hg) при −10 °C

**Fig. 9.** Dependence of the contact angle on the vibration amplitude of metal and semimetal atoms (Mo, W, Ni, Be, Fe, Si, Ge, Ti, Nb, Cu, Au, Ag, Al, Zn, Sn, Hg) at -10 °C

#### Заключение

Проведены исследования процесса взаимодействия жидкости с телами, которые покрыты гидрофобным слоем: описаны режимы взаимодействия жидкости с рельефным телом, получены оценки параметров физических величин, в частности влияния толщины слоя смазки на распределение профиля скорости в пограничном слое. При этом получены аналитические выражения, показывающие эффект снижения расхода жидкости в плоском и цилиндрическом каналах между плоскостями в зависимости от отношения вязкости смазки к вязкости жидкости и толщины слоя смазки. Снижение сопротивления жидкости, движущейся по поверхности летательного аппарата, способствует ее сдуву потоком воздуха и, как следствие, препятствует образованию барьерного льда. Получены оценки характерного времени вымывания флюида из пор рельефного тела, в частности время вымывания воздуха, содержащегося в порах гидрофобного тела, по поверхности которого течет вода. Это важно учитывать при моделировании текущей по поверхности летательного аппарата жидкой пленки, поскольку эффект снижения роста барьерного льда на крыле летательного аппарата уменьшается при вымывании газа из пор покрытия. Показано влияние температуры Дебая на краевой угол смачивания на плоской поверхности:  $\theta = 17,1 \cdot \ln(T_D) - 28,4$ ; приведено возможное объяснение влияния особенностей колебаний атомов кристаллической решетки гидрофобного тела на краевой угол смачивания. Эта зависимость может быть использована при выборе материала покрытия обшивки летательной техники гражданской авиации (ГА). Развита модель элементарного акта взаимодействия молекул жидкости с поверхностью твердого тела из различных материалов, получены оригинальные выражения для коэффициентов отскока молекул от поверхности, проведены параметрические исследования. Модели коэффициентов отскока позволят сократить время расчета взаимодействия потока с твердым телом, сохраняя при этом описание обмена импульсом и энергией между молекулами потока и атомами твердого тела. Эти модели могут быть использованы при расчетах льдофобных и гидрофобных покрытий элементов ГА.

### Список литературы

**1.** Ципенко В.Г., Шевяков В.И. Обеспечение безопасности полета транспортных воздушных судов с учетом новых сертификационных требований к условиям обледенения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 3. С. 45–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-45-56

2. Андреев Г.Т., Васин И.С. Исследования влияния обледенения на аэродинамические характеристики гражданских самолетов в обеспечение безопасности летной эксплуатации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2006. № 97. С. 62–65.

**3.** Messinger B.L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed // Aeronautical Sciences. 1953. Vol. 20, no. 1. Pp. 29–42. DOI: 10.2514/8.2520 4. Тенишев Р.Х. Противообледенительные системы летательных аппаратов. Основы проектирования и методы испытаний / Р.Х. Тенишев, Б.А. Строганов, В.С. Савин, В.Г. Кординов, А.Н. Тесленко, В.Н. Леонтьев. М.: Машиностроение, 1967. 320 с.

5. Миляев К.Е., Семенов С.В., Балакирев А.А. Обзор способов борьбы с обледенением в авиационных двигателях // Вестник МНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 59. С. 5–19. DOI: 10.15593/2223-9982/ 2019.59.01

6. Yamazaki M., Jemcov A., Sakaue H.A. Review on the current status of icing physics and mitigation in aviation [Электронный ресурс] //Aerospace. 2021. Vol. 8, iss. 7. ID: 188. DOI: 10.3390/aerospace8070188 (дата обращения: 04.02.2024).

7. Бойнович Л.Б. Противообледенительные свойства супергидрофобных покрытий из алюминия и нержавеющей стали / Л.Б. Бойнович, А.Г. Домантовский, А.М. Емельяненко, А.Б. Миллер, Ю.Ф. Потапов, А.Н. Ходан // Известия Академии наук. Серия Химическая. 2013. № 2. С. 383–390.

**8.** Бойнович Л.Б. Супергидрофобные покрытия – новый класс полифункциональных материалов // Вестник РАН. 2013. Т. 83, № 1. С. 10–19. DOI: 10.7868/S08695873130 10039

**9. Орлов О.П., Сверчков А.В.** Оценка возможности применения водоотталкивающих покрытий для снижения гидродинамического сопротивления транспортных судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Т. 1 (383). С. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59

**10. Bazant M.Z., Vinogradova O.I.** Tensorial hydrodynamic slip // Journal of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 613, no. 10. Pp. 125–134. DOI: 10.1017/S002211200800356X

**11. Whitesides G.M.** The origins and the future of microfluidics // Nature. 2006. Vol. 442. Pp. 368–373. DOI: 10.1038/nature05058

**12.** Park H., Choi C.H., Kim C.J. Superhydrophobic drag reduction in turbulent flows: a critical review [Электронный ресурс] // Experiments in Fluids. 2021. Vol. 62. ID: 229. DOI: 10.1007/s00348-021-03322-4 (дата обращения: 04.02.2024). **13. Нгуен Н.Ш.** Выбор места расположения датчика обледенения и датчика полного давления в условиях обледенения // Труды МФТИ. 2022. Т. 14, № 1 (53). С. 3–14. DOI: 10.53815/20726759 2022 14 1 3

**14. Cross T.J.S.** Glaciated ice icingand shedding in gas turbine compressors [Электронный ресурс] // Conference: Future Propulsion & Power CDT Innovation Day Showcase. 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.17004.64644 (дата обращения: 04.02.2024).

**15.** Амелюшкин И.А. Критерии подобия и особенности обледенения тел в потоках воздуха, содержащего переохлажденные капли // Ученые записки ЦАГИ. 2023. Т. 54, № 3. С. 22–41.

16. Амелюшкин И.А., Миллер А.Б., Стасенко А.Л. Оценка периода шероховатости противообледенительных покрытий тела в потоке воздуха с переохлажденными каплями // Вестник МГОУ. Серия физика и математика. 2021. № 1. С. 54–63. DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63

17. Морозов М.А. Расчет трубопроводных систем с учетом степени 128 гидрофобности внутренних поверхностей / М.А. Морозов, А.В. Волков, А.В. Рыженков, А.Г. Парыгин, М.В. Лукин, А.В. Наумов // Нефтяное хозяйство. 2016. № 4. С. 130–133.

**18.** Stone H.A., Stroock A.D., Ajdari A. Engineering flows in small devices // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. Pp. 381–411.

**19. Hartman M., Fricke M., Weimar L. et al.** Breakup dynamics of capillary bridges on hydrofobic stripes [Электронный ресурс] // International Journal of Multiphase flow. 2023. Vol. 140. ID: 103582. DOI: 10.1016/j.ijmultipha seflow.2021.103582 (дата обращения: 04.02.2024).

**20. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V. et al.** A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. 2019. Vol. 105. Pp. 74–97. DOI: 10.1016/j.paerosci. 2019.01.002

**21.** Niavaranikheiri A. Molecular dynamics and continuum simulations of fluid flows with slip boundary conditions: Doctoral Thesis.

Michigan: Michigan State University, 2011. 155 p.

**22.** Marin A.G., Cerro D.A., Römer G.R.B.E. et al. Capillary droplets on Leidenfrost microratchets [Электронный ресурс] // Physics of Fluids. 2012. Vol. 24, iss. 12. ID: 122001. DOI: 10.1063/1.4768813 (дата обращения: 04.02.2024).

**23. Петров Ю.В.** Введение в физику твердого тела: учеб. пособие для вузов. М.: МФТИ, 1999. 195 с.

**24.** Amelyushkin I.A., Stasenko A.L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud // CEAS Aeronautics Journal. 2018. Vol. 9, no. 4. Pp. 711–720.

**25.** Somlyai-Sipos L., Baumli P. Wettability of metals by waters [Электронный ресурс] // Metals. 2022. Vol. 12, no. 8. ID: 1274. DOI: 10.3390/met12081274 (дата обращения: 04.02.2024).

**26. Yihua C., Zhenlong W., Zhengyu X.** Effects of rainfall on aircraft aerodynamics // Progress in Aerospace Sciences. 2014. Vol. 71. Pp. 85–127. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003

## References

**1. Tsipenko, V.G., Shevyakov, V.I.** (2019). Promotion of transport aircraft flight safety taking into account updated certification requirements for icing conditions. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 3, pp. 45–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-45-56 (in Russian)

2. Andreev, G.T., Vasin, I.S. (2006). Investigation of icing influence on aerodynamic characteristics of civil aeroplanes to provide flight safety. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 97, pp. 62–65. (in Russian)

**3.** Messinger, B.L. (1953). Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed. *Aeronautical Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 29–42. DOI: 10.2514/8.2520

4. Tenishev, R.Kh., Stroganov, B.A., Savin, V.S., Kordinov, V.G., Teslenko, A.N., Leontyev, V.N. (1967). Aircraft de-icing systems. Fundamentals of design and testing methods. Moscow: Mashinostroyeniye, 320 p. (in Russian)

5. Milyaev, K.E., Semenov, S.V., Balakirev, A.A. (2019). Ways of fight against frosting in the aviation engine methods of countering with icing in the aircraft engine. *Vestnik MNIPU*. *Aerokosmicheskaya tekhnika*, no. 59, pp. 5–19. DOI: 10.15593/2223-9982/2019.59.01 (in Russian)

6. Yamazaki, M., Jemcov, A., Sakaue, H.A. (2021). Review on the current status of icing physics and mitigation in aviation. *Aerospace*, vol. 8, issue 7. ID: 188. DOI: 10.3390/aerospa ce8070188 (accessed: 04.02.2024).

7. Boinovich, L.B., Emelyanenko, A.M., Khodan, A.N., Domantovskii, A.G., Miller, A.B., Potapov, Y.F. (2013). Antiicing performance of superhydrophobic coatings on aluminum and stainless steel. *Russian Chemical Bulletin*, no. 2, pp. 383–390. (in Russian)

**8.** Boinovich, L.B. (2013). Superhydrophobic coatings as a new class of polyfunctional materials. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 83, no. 1, pp. 10–19. DOI: 10.1134/S1019331613010024 (in Russian)

**9.** Sverchkov, A.V., Orlov, O.P. (2018). Assessing the possibility of applying hydrophobic coatings to reduce hydrodynamic resistance of cargo carriers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*, vol. 1 (383), pp. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59 (in Russian)

**10. Bazant, M.Z., Vinogradova, O.I.** (2008). Tensorial hydrodynamic slip. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 613, no. 10, pp. 125–134. DOI: 10.1017/S002211200800356X

**11. Whitesides, G.M.** (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, vol. 442, pp. 368–373. DOI: 10.1038/nature05058

**12.** Park, H., Choi, C.H., Kim, C.J. (2021). Superhydrophobic drag reduction in turbulent flows: a critical review. *Experiments in Fluids*, vol. 62. ID: 229. DOI: 10.1007/s00348-021-03322-4 (accessed: 04.02.2024).

**13.** Nguyen, N.S. (2022). Selection of the location of the ice detector and the total pressure probe in icing conditions. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, vol. 14,

no. 1 (53), pp. 3–14. DOI: 10.53815/2072675 9\_2022\_14\_1\_3 (in Russian)

14. Cross, T.J.S. (2022). Glaciated ice icingand shedding in gas turbine compressors. *In: Conference: Future Propulsion & Power CDT Innovation Day Showcase*. DOI: 10.13140/RG. 2.2.17004.64644 (accessed: 04.02.2024).

**15.** Amelyushkin, I.A. (2023). Similarity criteria and peculiarities of ice accretion on bodies in air flows containing supercooled droplets. *Uchenye Zapiski TsAGI*, vol. 54, no. 3, pp. 22–41. (in Russian)

16. Amelyushkin, I.A., Miller, A.B., Stasenko, A.L. (2021). Estimation of the roughness period of anti-ice body coatings in air flow with supercooled droplets. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, no. 1, pp. 54–63. DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63 (in Russian)

17. Morozov, M.A., Volkov, A.V., Ryzhenkov, A.V., Parygin, A.G., Lukin, M.V., Naumov, A.V. (2016). Calculation of the pipeline systems according to the degree of hydrophobicity of internal surfaces. *Oil industry*, no. 4, pp. 130–133. (in Russian)

**18.** Stone, H.A., Stroock, A.D., Ajdari, A. (2004). Engineering flows in small devices. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 381–411.

**19. Hartman, M., Fricke, M., Weimar, L. et. al.** (2023). Breakup dynamics of capillary bridges on hydrophobic stripes. *International Journal of Multiphase flow*, vol. 140. ID: 103582. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021. 103582 (accessed: 04.02.2024).

20. Huang, X., Tepylo, N., Pommier-Budinger, V. et al. (2019). A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 105, pp. 74–97. DOI: 10.1016/j.pa erosci.2019.01.002

**21.** Niavaranikheiri, A. (2011). Molecular dynamics and continuum simulations of fluid flows with slip boundary conditions: Doctoral Thesis. Michigan: Michigan State University, 155 p.

**22.** Marn, A.G., Cerro, D.A., Römer, G.R.B.E. et. al. (2012). Capillary droplets on Leidenfrost

micro-ratchets. *Physics of Fluids*, vol. 24, issue 12. ID: 122001. DOI: 10.1063/ 1.4768813 (accessed: 04.02.2024).

**23. Petrov, Yu.V.** (1999). Introduction to solid state physics: Tutorial. Moscow: MFTI, 195 p. (in Russian)

**24.** Amelyushkin, I.A., Stasenko, A.L. (2018). Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud. *CEAS Aeronautics Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 711–720.

**25.** Somlyai-Sipos, L., Baumli, P. (2022). Wettability of metals by waters. *Metals*, vol. 12, no. 8. ID: 1274. DOI: 10.3390/met12081274 (accessed: 04.02.2024).

**26.** Yihua, C., Zhenlong, W., Zhengyu, X. (2014). Effects of rainfall on aircraft aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 71, pp. 85–127. DOI: 10.1016/j.paerosci. 2014.07.003

#### Сведения об авторах

Амелюшкин Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, и. о. нач. отдела аэрофизики многофазных течений, разреженных газов и плазмы ЦАГИ, программист МФТИ, Amelyushkin\_Ivan@mail.ru.

Кривопалова Елена Викторовна, инженер ЦАГИ, shashlova08@mail.ru.

Кудров Максим Александрович, кандидат технических наук, доцент, директор Института аэромеханики и летательной техники, заведующий лабораторией информационных технологий и прикладной математики МФТИ, mkudrov@mail.ru.

#### Information about the authors

**Ivan A. Amelyushkin,** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Acting Head of the Department of Aerophysics of Multiphase Flows, Rarefied Gases and Plasma at TsAGI, Programmer at MIPT, Amelyushkin Ivan@mail.ru.

Elena V. Krivopalova, Engineer of TsAGI, shashlova08@mail.ru.

Maxim A. Kudrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Aeromechanics and Flight Engineering, Head of the Laboratory of Information Technology and Applied Mathematics at MIPT, mkudrov@mail.ru.

Поступила в редакцию	13.04.2024	Received	13.04.2024
Одобрена после рецензирования	24.07.2024	Approved after reviewing	24.07.2024
Принята в печать	26.09.2024	Accepted for publication	26.09.2024