УДК 532.529:536.24

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63

ОЦЕНКА ПЕРИОДА ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕЛА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА С ПЕРЕОХЛАЖДЁННЫМИ КАПЛЯМИ

Амелюшкин И. А., Миллер А. Б., Стасенко А. Л.

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского
140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1, Российская Федерация*

Аннотация

Цель исследования – математическое моделирование геометрических свойств льдофобной поверхности, обеспечивающей антиобледенительный эффект.

Процедура и методы. Использованы численные расчёты движения капель в окрестности моделирующего переднюю кромку крыла цилиндра на основании опубликованных ранее математических моделей физических процессов.

Результаты. В приложении к проблеме обледенения летательных аппаратов получены оценки конфигурации рельефа гидрофобных покрытий твёрдого тела в переохлаждённом воздушно-капельном потоке, при которых капли жидкости не примерзают к обтекаемому телу при столкновениях с его поверхностью.

Теоретическая и/или практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при создании рельефа гидрофобного покрытия под конкретный диапазон условий полёта летательного аппарата.

Ключевые слова: метастабильные капли, гидрофобные покрытия, обледенение

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13024.

ESTIMATION OF THE ROUGHNESS PERIOD OF ANTI-ICE BODY COATINGS IN AIR FLOW WITH SUPERCOOLED DROPLETS

I. Amelyushkin, A. Miller, A. Stasenko

*Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky
ul. Zhukovskogo 1, 140180 Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation*

Abstract

Aim. Geometric properties of ice-phobic surfaces are mathematically simulated to provide the anti-icing effect.

Methodology. Numerical calculations of droplet motion in the vicinity of a cylinder simulating the leading edge of a wing relies on the use of previously published mathematical models of physical processes.

Results. As applied to the problem of icing of aircrafts, the relief configuration of hydrophobic coatings of a solid is estimated in air flow with supercooled droplets, in which liquid drops do not freeze to the streamlined body as a result of collisions with its surface.

Research implications. The results of the study can be used to produce a relief of a hydrophobic coating for a specific range of flying vehicle flight conditions.

Keywords: metastable droplets, hydrophobic coatings, ice accretion.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Scientific Project No. 19-29-13024).

Введение

Использование гидрофобных покрытий представляет интерес в широкой области технических приложений [5; 6], в частности, в задачах противодействия обледенению летательных аппаратов [1]. Такие покрытия, как правило, эффективны при незначительных отношениях сил инерции к силам поверхностного натяжения жидкости при взаимодействии с рельефным покрытием обтекаемого тела. Однако, при превышении поверхностной плотности кинетической энергии капли некоего критического значения льдофобные свойства приводят к отрицательным эффектам ввиду проникновения переохлаждённой капли в углубления и отвердевания в них.

Постановка задачи

В принципе, исход столкновения капли с поверхностью твёрдого тела зависит от многих параметров, характеризующих геометрические и физико-механические свойства капли, несущего её газа и условия полёта. Таким образом, одна из важнейших характеристик рассматриваемой проблемы – нормальная компонента скорости V_{in} соударения капли с поверхностью является функцией многих переменных:

$$V_{in} = V_{in}(a, R, L; \rho_l, \sigma_l, \mu_l; \mu_g, \rho_g, V_{\infty}, \alpha).$$

Здесь индекс n означает normal – по нормали, i – incident – падающий; a – радиус невозмущённой шаровой капли, R – характерный размер обтекаемого тела со скоростью V_{∞} («на бесконечности»), L – период шероховатости его поверхности, ρ_l, σ_l, μ_l – плотность, коэффициент поверхностного натяжения и динамическая вязкость, соответственно; α – угол падения капли; индексы l и g относятся к жидкости и к газу, ∞ – означает большое удаление (значительно превышающее R) от обтекаемого тела (рис. 1). Использование безразмерных критериев и накопленный опыт численных исследований позволяют сделать более «компактным» описание исследуемых процессов. Для того, чтобы элементы капли, деформирующейся при ударе, не проникали в углубления (или в поры) гидрофобного покрытия, необходимо превышение давления сил поверхностного натяжения над характерным значением скоростного напора жидкости в капле, то есть выполнение неравенства: $\sigma_l / (L/2) > \rho_l V_{in}^2$.

При этом расстояние между выступами рельефа L предполагается не больше диаметра капли: $L < 2a$. Таким образом, можно сформулировать следующее необходимое условие эффективности гидрофобного покрытия:

Рис. 1 / Fig. 1. Схема взаимодействия переохлаждённых капель с обтекаемым телом / Scheme of interaction of supercooled drops with a streamlined body.

Источник: составлено авторами.

$$L < 2\sigma_l / \rho_l V_{in}^2 = L_{\max} < D. \quad (1)$$

Динамика капли в окрестности обтекаемого тела

Скорость V_i отличается от скорости набегающего потока V_∞ . Это отличие описывается безразмерным числом Стокса

$$Stk_\infty = \frac{2}{9} \frac{\rho_l V_\infty a^2}{\mu_g R}.$$

Динамика частицы (капли) перед столкновением с поверхностью определяется набором сил различной физической природы: аэродинамического сопротивления, Магнуса, Сэффмана, веса частицы, силы Архимеда, Бассе. Кроме того, возможно влияние силы инерции присоединённой массы несущей частицы среды, экранного эффекта, электромагнитных и поверхностных эффектов, связанных с силами Ван-дер-Ваальса. Эти силы были учтены, например, в приложении к проблемам обледенения [2] и к задачам панорамной диагностики потоков [3].

Соударение капли с поверхностью

Перечисленные силы приводят к отличию скорости V частицы в момент столкновения с обтекаемым телом от V_∞ . Многочисленные расчёты, проведённые в широкой области параметров, характерных для лётных условий и наземных экспериментов в аэродинамических трубах, показали, что связь скорости V_{in} удара капель о поверхность обтекаемого потока со скоростью V_∞ тела, может быть аппроксимирована соотношением (рис. 2):

$$V_{in}^{\max} / V_\infty \cong \exp(-1/4Stk_\infty). \quad (2)$$

Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость максимального значения нормальной (кривая 1), касательной (кривая 2) компонент скорости и её модуля (кривая 3) удара капли об обтекаемое тело от значения числа Стокса Stk_∞ при стоксовом режиме обтекания; кривая 4 – аппроксимация (2) кривой 1; кривые 5, 6, 7 – зависимости максимального значения скорости удара капель по нормали, по касательной и модуля скорости, соответственно, при коэффициенте сопротивления, использованном в работах [2–4]. Индекс k принимает вид in (incident normal), it (incident tangential) / Dependence of the maximum value of the normal (curve 1), tangent (curve 2) components of the velocity and its modulus (curve 3) of the droplet impact on the streamlined body on the value of the Stokes number Stk_∞ in the Stokes flow regime; curve 4 – approximation (2) of curve 1; curves 5, 6, 7 – dependences of the maximum value of the drop impact velocity along the normal, tangential direction and the velocity modulus, respectively, with the drag coefficient used in [2–4]. Index k takes the form in (incident normal), it (incident tangential).

Источник: составлено авторами.

Заметим, что максимальное значение нормальной компоненты скорости наблюдается на линии растекания. Разумеется, максимальные значения этих компонент скорости достигаются в различных точках поверхности обтекаемого тела.

Подставляя (2) в (1), можно предложить следующую обобщённую интерполяцию периода неровностей гидрофобного покрытия:

$$\frac{L_{\max}}{D} = 2 \frac{4Stk_\infty \sqrt{e}}{We_\infty}, \quad We_\infty = D\rho_l V_\infty^2 / \sigma_l. \quad (3)$$

Здесь We_∞ – число Вебера, рассчитанное по скорости полёта летательного аппарата V_∞ , e – основание натуральных логарифмов. В принципе, в определении «ударного» числа Вебера должна присутствовать V_{in} ; однако, поскольку предполагается однозначная связь $V_{in}(V_\infty)$ типа (2), отражающая предысторию движения капли до столкновения, здесь использована скорость «на бесконечности».

Визуализация результатов и их обсуждение

Рассмотрим следующий диапазон определяющих величин: радиус кривизны обтекаемого тела R от 5 мм (характерный размер датчика скоростного напора) до 1 м, скорость обтекания $V_\infty = 1 \div 200$ м/с, радиус капель $a = 10$ нм $\div$ 1 мм. При этих параметрах число Вебера We_∞ лежит в пределах от $2,7 \cdot 10^{-4}$ до 10^6 , а число Стокса Stk_∞ от 10^{-9} до $5 \cdot 10^5$. На рис. 3 показаны оценки максимального значения периода шероховатости в зависимости от этих чисел.

В области параметров правее крайней справа ($We_\infty \gg 1$) линии капли проникают между неровностями гидрофобного покрытия, либо не долетают до поверхности.

На рис. 4 данные рисунка 3 перестроены в виде, который позволяет определить значение периода шероховатости $L_{\max}$ (в микрометрах) в зависимости от безразмерных параметров – чисел Вебера и Стокса при заданном радиусе капель. Учтено предельное условие (1): $L_{\max} < 2a$. Отметим, что в случае полидисперсного воздушно-капельного потока более мелкие частицы могли бы застрять в углублениях рельефа; но, с другой стороны, у них больше вероятность быть унесёнными газом, не дойдя до поверхности (т. к. их число Стокса мало).

Рис. 3 / Fig. 3. Область значений отношения максимального размера неровностей $L_{\max}$ к диаметру капли D в зависимости от чисел Стокса и Вебера. Параметром является $\lg(L_{\max}/D)$ / Range of values of the ratio of the maximum relief size $L_{\max}$ to the droplet diameter D depending on the Stokes and Weber numbers. The parameter is $\lg(L_{\max}/D)$.

Источник: составлено авторами.

Заметим, что формула (3) получена в пренебрежении силами вязкости внутри капли, однако при рассмотренных параметрах эти силы могут быть сравнимы с силами поверхностного натяжения – так, например (кресты $\times$ на рис. 3 и на рис. 4), при $a = 20$ мкм (типичный размер капель при обледенении, например, [7]), скорости обтекания $V_\infty = 100$ м/с и радиусе передней кромки крыла $R = 0,1$ м имеем следующее значение отношение сил вязкости к силам поверх-

ностного натяжения $\frac{\mu_l V_\infty}{\sigma_l} \approx 1,3 = \text{Ca}$ – число капиллярности. Поэтому получен-

ная формула (3) даёт оценку минимального значения для максимального периода шероховатости.

В рассмотренном примере $D/L_{\max} \approx 2600$, $(\lg[D/L_{\max}] \approx 3,4)$, $L_{\max} \approx 15$ нм (кресты ✕ на рис. 3 и 4).

Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость максимального расстояния между выступами от чисел Вебера, Стокса и радиуса капли a / Dependence of the maximum distance between the protrusions on the Weber and Stokes numbers and the radius of the drop a .

Источник: составлено авторами.

Отметим, что описанная выше аэрогидродинамика капли, сталкивающейся с твёрдым телом, осложнена рядом физических процессов. Так, соударение деформирующейся переохлаждённой капли с поверхностью и прохождение волны сжатия в её объёме сопровождается взаимодействием нанокристаллов, образующихся в начальной стадии отвердевания. Характерное время поворота молекул воды на угол, необходимый для возникновения упорядоченной структуры (например, 90°), составляет величину порядка 10^{-12} с. В свою очередь, этот процесс должен сопровождаться выделением фазовой теплоты кристаллизации, которая, в принципе, будет нагревать отвердевающую каплю. Удаление этой теплоты происходит по некоторым каналам: теплопроводностью к поверхности капли с последующей теплопередачей в воздух и твёрдое тело; испарением с внешней поверхности капли; и, возможно, излучением. Реализуемость и численные оценки последнего процесса исследованы при кристаллизации различных растворов

[8]. Оценки потока тепла на межфазной границе получены в [9]. Потеря массы капли на испарение (при отвердевании всего её объёма) может быть оценена сверху отношением удельных теплот кристаллизации и конденсации:

$$\Delta m_{\text{vap}} / \Delta m_{\text{res}} \approx L_{\text{solid}} / L_{\text{vap}} \approx 0,14.$$

Здесь Δm_{res} – масса капли, которая остаётся на поверхности после разбрызгивания [10]. Теплопередача в воздух и в твёрдое тело берёт на себя часть выделяющейся теплоты фазового перехода, так что разумная оценка доли массы, теряемой при испарении, по-видимому, составит порядка 10 %.

С точки зрения гидромеханики капли, для которой основным масштабом времени является отношение её диаметра к скорости звука в воде ($\sim 10^{-8} - 10^{-6}$ с для капли от 10 мкм до 1 мм), наиболее важным является рост эффективной вязкости жидкости, связанный с возникновением и ростом нанозародышей кристаллизации. Зависимость этого коэффициента переноса суспензии от относительного объёма диспергированной фазы описывается классической формулой Эйнштейна и подтверждена во многих областях науки [11]. Ясно, что эффективная теплопроводность суспензии также зависит от относительного объёма кристаллической фазы. Таким образом, процессы переноса должны существенно влиять на механику и тепломассообмен капли. Важно также отличие динамического угла смачивания от статического [12; 13]. Таким образом, мы имеем дело с трёхмерной трёхфазной нестационарной динамикой деформируемой дробящейся и отвердевающей капли, взаимодействующей с рельефной поверхностью твёрдого тела.

Заключение

Получены значения наименьшего периода рельефа покрытия поверхности обтекаемого тела, при котором капли жидкости заданных размера и скорости при соударении не прилипают к телу, в широкой области значений параметров потока: чисел Стокса, Вебера и размеров капель. Полученные оценки противобледенительных свойств покрытий могут быть использованы при их проектировании и производстве.

Статья поступила в редакцию 07.12.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anti-icing superhydrophobic coatings / Cao L., Jones A. K., Sikka V. K., Wu J., Gao D. // *Langmuir*. 2009. Vol. 25. Iss. 21. P. 12444–12448. DOI: 10.1021/la902882b/
2. Амелюшкин И. А., Гринац Э. С., Стасенко А. Л. Кинетика молекулярных кластеров и гидротермодинамика капель при обледенении летательных аппаратов // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2012. № 2. С. 152–161.
3. Стасенко А. Л., Толстых А. И., Широбоков Д. А. К моделированию оледенения самолёта: Динамика капель и поверхность смачивания // *Математическое моделирование*. 2001. Т. 13. № 6. С. 81–86.
4. Неравновесный аэрозольный поток в сверхзвуковой аэродинамической трубе /

- Амелюшкин И. А., Ганиев Ю. Х., Гобызов О. А., Липницкий Ю. М., Ложкин Ю. А., Филиппов С. Е. // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 48. № 1. С. 53–71.
5. 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. Iss. 4. P. 711–720. DOI: 10.1007/s13272-018-0314-3.
 6. Aboud D. G. K., Kietzig A. M. On the oblique impact dynamics of drops on superhydrophobic surfaces. Part II: Restitution coefficient and contact time // *Langmuir*. 2018. Vol. 34. Iss. 34. P. 9889–9896. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01233.
 7. Hansman R. J., Jr. The influence of ice accretion physics on the forecasting of aircraft icing conditions [Электронный ресурс]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19900011612/downloads/19900011612.pdf> (дата обращения: 30.10.2020).
 8. Татарченко В. А. Инфракрасное характеристическое излучение фазовых переходов первого рода и его связь с оптикой атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23. № 3. С. 169–175.
 9. Модели процессов, сопровождающих кристаллизацию переохлажденных капель / Амелюшкин И. А., Кудров М. А., Морозов А. О., Стасенко А. Л., Щеглов А. С. // Труды Института системного программирования РАН. 2020. Т. 32. № 4. С. 235–244. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-17.
 10. Berthoumieu P. Experimental study of supercooled large droplets impact in icing wind tunnel // 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference 25–28 June, New Orleans, Louisiana. AIAA. 2012. No. 2012–3130. 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-3130.
 11. Mader H. M., Llewellyn E. W., Mueller S. P. The rheology of two-phase magmas: a review and analysis // *Journal of Volcanology and geothermal Research*. 2013. Vol. 257. P. 135–158. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.02.014.
 12. Пухначев В. В., Солонииков В. А. К вопросу о динамическом краевом угле // *Прикладная математика и механика*. 1982. Т. 46. № 6. С. 961–971.
 13. Экспериментальные и теоретические исследования процессов обледенения наномодифицированных супергидрофобных и обычных поверхностей / Гринац Э. С., Миллер А. Б., Потапов Ю. Ф., Стасенко А. Л. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2013. № 3. С. 84–92.

REFERENCES

1. Cao L., Jones A. K., Sikka V. K., Wu J., Gao D. Anti-icing superhydrophobic coatings. In: *Langmuir*, 2009, vol. 25, iss. 21, pp. 12444–12448. DOI: 10.1021/la902882b/
2. Amelyushkin I. A., Grinats E. S., Stasenko A. L. [Kinetics of molecular clusters and hydrothermodynamics of drops in a problem of aircraft ice accretion]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics], 2012, no. 2, pp. 152–161.
3. Stasenko A. L., Tolstykh A. I., Shirobokov D. A. [The icing process of an aircraft: drop dynamics and wetted surface]. In: *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Models], 2001, vol. 13, no. 6, pp. 81–86.
4. Amelyushkin I. A., Ganiev Yu. Kh., Gobysov O. A., Lipnitskii Yu. M., Lozhkin Yu. A., Filippov S. E. [Non-equilibrium aerosol flow in a supersonic wind tunnel]. In: *Uchenye zapiski TSAGI* [TsAGI Science Journal], 2017. vol. 48, no. 1, pp. 53–71.
5. Amelyushkin I. A., Stasenko A. L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud. In: *CEAS Aeronautics Journal*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 711–720. DOI: 10.1007/s13272-018-0314-3.

6. Aboud D. G. K., Kietzig A. M. On the oblique impact dynamics of drops on superhydrophobic surfaces. Part II: Restitution coefficient and contact time. In: *Langmuir*, 2018, vol. 34, iss. 34, pp. 9889–9896. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01233.
7. Hansman R. J., Jr. The influence of ice accretion physics on the forecasting of aircraft icing conditions. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19900011612/downloads/19900011612.pdf> (accessed: 30.10.2020).
8. Tatarchenko V. A. [Infrared characteristic radiation of the first order phase transitions and its connection with optics of the atmosphere]. In: *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2010, vol. 23, no. 3, pp. 169–175.
9. Amelyushkin I. A., Kudrov M. A., Morozov A. O., Stasenko A. L., Shcheglov A. S. [Models of processes accompanying crystallization of supercooled droplets]. In: *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2020, vol. 32, no. 4, pp. 235–244. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-17.
10. Berthoumieu P. Experimental study of supercooled large droplets impact in icing wind tunnel. In: *4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference 25–28 June, New Orleans, Louisiana*. AIAA, 2012, no. 2012–3130, 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-3130.
11. Mader H. M., Llewellyn E. W., Mueller S. P. The rheology of two-phase magmas: a review and analysis. In: *Journal of Volcanology and geothermal Research*, 2013, vol. 257, pp. 135–158. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.02.014.
12. Pukhnachev V. V., Solonikov V. A. [To the question about dynamic edge corner]. In: *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1982, vol. 46, no. 6, pp. 961–971.
13. Grinats E. S., Miller A. B., Potapov Yu. F., Stasenko A. L. [Experimental and theoretical investigations of the ordinary and nano modified superhydrophobic surfaces icing processes]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics], 2013, no. 3, pp. 84–92.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Амелюшкин Иван Алексеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отделения исследования аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского;
e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru;

Миллер Алексей Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отдела отделения исследования аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского;
e-mail: ABMiller@yandex.ru;

Стасенко Альберт Леонидович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения исследования аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского;
e-mail: Stasenko@serpantin.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan A. Amelyushkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Aerothermodynamics Research of Hypersonic Aircraft and Rocket and Space Technology Objects, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky;
e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru;

Aleksey B. Miller – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Departmental Head, Department of Aerothermodynamics Research of Hypersonic Aircraft and Rocket and Space Technology Objects, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky;
e-mail: ABMiller@yandex.ru;

Albert L. Stasenko – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Leading Researcher, Department of Aerothermodynamics Research of Hypersonic Aircraft and Rocket and Space Technology Objects, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky;
e-mail: Stasenko@serpantin.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Амелюшкин И. А., Миллер А. Б., Стасенко А. Л. Оценка периода шероховатости противообледенительных покрытий тела в потоке воздуха с переохлаждёнными каплями // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2021. № 1. С. 54–63.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63

FOR CITATION

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

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63