

03

Экспериментальное исследование процесса замерзания переохлажденной поверхностной капли

© С.В. Алексеевко², С. Mendig¹, М. Schulz¹, М. Sinapius¹,
А.А. Приходько²

¹ Technical University of Braunschweig, 38106 Braunschweig, Germany

² Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,
Днепропетровск, Украина
E-mail: paadr@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2015 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса замерзания неподвижной водяной переохлажденной капли, находящейся на алюминиевой пластине. Исследования проведены с использованием высокоскоростной фотокамеры. Процесс замерзания переохлажденной воды, содержащейся в поверхностной капле, происходит в несколько этапов: предварительный разогрев воды и зарождение микрочастиц льда, относительно быстрое образование структуры лед–жидкость с переходом в состояние термодинамического равновесия около температуры затвердевания и более медленный процесс полного замерзания капли. Оценены скорость и время прохождения каждого из этапов, а также время задержки от момента воздействия на переохлажденную каплю до начала замерзания. Проведено сравнение процессов затвердевания переохлажденной и непереохлажденной капли.

Обледенение летательных аппаратов в полете — всемирно признанная серьезная проблема безопасности. Проблема по-прежнему не теряет своей актуальности, поскольку, несмотря на проведенные исследования, ежегодно все еще продолжают происходить несчастные случаи, связанные с обледенением. Общеизвестно, что обледенение происходит преимущественно из-за столкновения элементов летательных аппаратов с переохлажденными водяными капельками, находящимися в атмосфере. Для обеспечения безопасности полетов для каждого типа летательного аппарата разрабатывается система защиты от обледенения и проводится сертификация этого летательного аппарата для полета в условиях обледенения. При решении таких задач помимо летных

испытаний и наземных экспериментов, проводимых в охлаждаемых высокоскоростных аэродинамических трубах (как первые, так и вторые имеют ряд ограничений и недостатков), благодаря развитию вычислительной техники методы численного моделирования становятся эффективными инструментами исследования. В большинстве случаев известные математические модели, описывающие процесс нарастания льда [1–5], основаны на гипотезе Messinger [6], где перемещение жидкости по поверхности моделируется, не принимая в расчет изменения ее агрегатного состояния, столкновения переохлажденных капелек с поверхностью лед–вода и их последующее разбрызгивание. Результаты математического моделирования с помощью существующих методик хорошо согласуются лишь с экспериментальными данными для рыхлого льда, когда влетающие переохлажденные капельки замерзают практически сразу после столкновения, и удовлетворительно для некоторых режимов с образованием стекловидного льда. Несоответствия имеют место, поскольку такая постановка задачи не учитывает особенности процессов взаимодействия переохлажденных капелек с обтекаемой поверхностью, а также то, что капли, сталкивающиеся с поверхностью, отскакивающие от поверхности и находящиеся на ней, могут иметь различную геометрическую форму, сложную поверхность, а вода, содержащаяся в каплях, может находиться в различных агрегатных состояниях.

Изучению механизма замерзания переохлажденной жидкости, а также процессов нуклеации, образования дендритов и ледяных структур были посвящены работы [7,8]. В работах [9,10] было показано, что замерзание поверхностной капли, находящейся на поверхности, имеющей отрицательную температуру, происходит со стороны поверхности с образованием фронта фазового перехода. Из-за увеличения объема образующегося льда фронт замерзания имеет вогнутую форму, а на последней стадии замерзания лед выталкивает жидкость все выше и на верхней части капли образуется острая вершина, на которой в ненасыщенной атмосфере начинают расти мелкие кристаллы льда. Математическая модель, описывающая движение фронта фазового перехода и изменение геометрии капли, была рассмотрена в работе [11]. Как было отмечено в [12], процесс замерзания переохлажденной жидкости происходит в два этапа: первоначального быстрого перехода в состояние термодинамического равновесия с образованием структуры лед–вода и последующего более длительного этапа окончательного затвердева-

ния. Изучению первого, относительно быстрого процесса замерзания переохлажденной капли воды, подвешенной в акустическом поле, была посвящена работа [13]. В [14,15] изучался механизм затвердевания переохлажденной капли на супергидрофобной поверхности, где также было отмечено, что процесс затвердевания поверхностной переохлажденной капли воды протекает в два этапа. Однако в целом процесс замерзания малого объема переохлажденной жидкости, содержащейся в поверхностной капле, с реакцией на внешнее воздействие по-прежнему остается не до конца ясным.

Целью представленной работы является детальное изучение процесса замерзания переохлажденной воды, содержащейся в поверхностной капле. Результаты этого исследования помогут более детально изучить сложные физические процессы, происходящие при обледенении летательных аппаратов, и, таким образом, послужить основой к усовершенствованию методик численного моделирования процессов обледенения.

Исследования замерзания переохлажденной поверхностной капли воды были проведены на экспериментальной установке Института адаптроники и функционирования технического университета Брауншвейга (Institute of Adaptronic and Functional Integration of Technical University of Braunschweig). Капля дистиллированной воды, имеющая температуру $\sim 20^\circ\text{C}$, объемом $350\ \mu\text{l}$ помещалась на алюминиевую пластину, имеющую температуру -10°C , размещенную в охлаждаемой камере, находящейся в состоянии температурного равновесия. Размещенная таким образом капля охлаждалась в течение $\sim 5\ \text{min}$, становясь переохлажденной. В дальнейшем происходило либо самопроизвольное замерзание капли, либо замерзание инициировалось сторонним воздействием. Наблюдения за процессом замерзания осуществлялись с помощью высокоскоростной камеры PCO.DIMAX.

Результаты наблюдений позволяют сделать вывод о наличии трех этапов процесса замерзания переохлажденной капли (рис. 1 и 2). На рис. 1 приведены фотографии и для большей наглядности поясняющие схемы, соответствующие первому и второму этапам процесса замерзания, а на рис. 2 — третьему этапу. На первых двух этапах происходит относительно быстрое (в условиях проведенного эксперимента длящееся $\sim 0.05\ \text{s}$) образование структур лед–вода, в результате равномерно распределенных по объему жидкости и визуально различимых в виде распространяющегося со скоростью $\sim 0.1\ \text{m/s}$ „облака“ молочно-белого цвета (рис. 1, *a–c*). На этих этапах капля переходит в состояние тер-

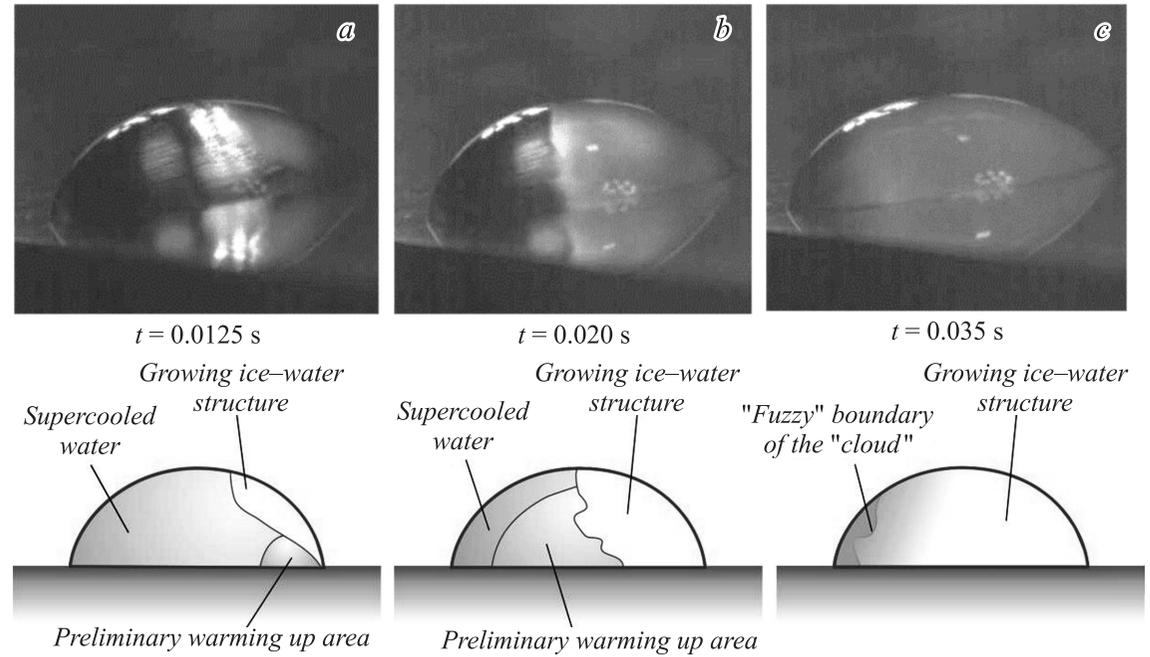


Рис. 1. Самопроизвольный процесс заморозания переохлажденной поверхностной капли: *a–c* — первая и вторая фазы — образование „облачной“, распределенной по объему структуры лед–вода, и предшествующая фаза предварительного разогрева.

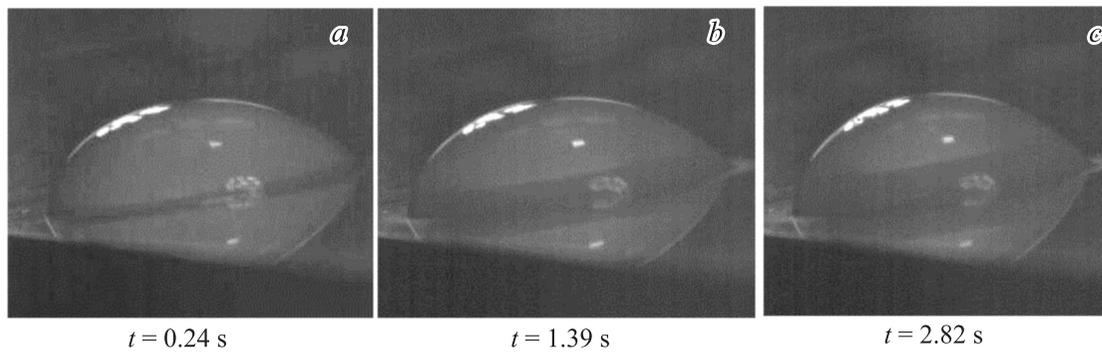


Рис. 2. Самопроизвольный процесс замерзания переохлажденной поверхностной капли: *a–c* — третья фаза, затвердевание капли со стороны пластины, наличие четкой границы раздела фаз.

динамического равновесия около точки фазового перехода, процесс является результатом поглощения тепла при нагреве переохлажденной жидкости, с одной стороны, и замерзания части жидкости в капле — с другой. При этом доля замерзшей жидкости является относительно небольшой (расчеты показывают, что при температуре -1°C эта доля составляет $\sim 1/80$, а при -10°C — $\sim 1/8$). Кроме того, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о существовании первого, предварительного этапа, предшествующего образованию „облачных“ ледяных структур: перед нарастающим „облаком“, имеющим вначале четкую границу, проходит еще одна волна с выраженным фронтом, различимая как изменение оптической плотности и движущаяся со скоростью, вдвое превышающей скорость распространения „облака“. После того как эта область распространяется на весь объем капли, граница „облака“ становится размытой, образование структуры лед–вода происходит практически равномерно по всему оставшемуся объему (рис. 1, с). Можно предположить, что на этом предварительном этапе происходит нагрев переохлажденной воды и зарождение кристаллов льда. При этом, как следует из эксперимента с последующим повторным внешним воздействием на каплю, произведенным по завершении второго этапа, образовавшаяся структура лед–жидкость сохраняет свою подвижность. Также было обнаружено, что в экспериментах, в случае принудительного инициирования процесса замерзания переохлажденной капли, образование первичных ледяных структур начинается с задержкой $\sim 0.018\text{ s}$ после прикосновения к капле и начала ее деформации. На третьем этапе процесса замерзания поверхностной капли, происходит более медленное полное затвердевание образовавшейся на первых двух этапах структуры лед–жидкость. Затвердевание происходит с выраженной границей фазового перехода, движущейся вверх от поверхности пластины со скоростью $\sim 0.25 \cdot 10^{-3}\text{ m/s}$ (рис. 2, а–с). В результате образуется твердая ледяная структура мутно-серого цвета. Примечательно, что, замерзая, капля несколько увеличивается в объеме, а незамерзшая жидкая часть капли при этом удерживается силами поверхностного натяжения. В результате граница фазового перехода по мере своего продвижения становится вогнутой, а верхушка уже замерзшей капли приобретает острую форму.

В экспериментах, когда капля не была переохлаждена (процесс замерзания инициировался сразу после размещения капли на пластине) образовывался прозрачный лед, что позволило рассмотреть и

проанализировать процесс затвердевания капли более детально. Поскольку охлаждение капли происходит посредством теплообмена как с пластиной, так и с окружающим воздухом, имеющими температуру ниже температуры затвердевания, то граница фазового перехода имеет сложную форму. Преимущественно замерзание начиналось со стороны пластины (так как теплообмен с пластиной более интенсивен), при этом фронт фазового перехода, движущийся со стороны пластины, имел несколько вогнутую форму. Однако и по поверхности капли (со стороны окружающего воздуха) также наблюдался нарастающий тонкий слой льда. Полностью замерзнув, как и в случае с переохлажденной каплей, непереохлажденная капля также приобретает острую верхушку. Примечательно, что тонкий слой льда, нарастающий по наружной поверхности капли, в результате увеличения объема замерзающей части капли и последующего на завершающей стадии значительного искривления поверхности растрескивается. Это явление визуально различимо как появление непрозрачной, белого цвета области в районе образовавшейся острой верхушки.

Таким образом, в работе были оценены времена и скорости протекания процессов замерзания переохлажденной воды, содержащейся в поверхностной капле. Было обнаружено, что известному ранее процессу быстрого образования структуры лед–вода предшествует предварительный этап разогрева переохлажденной воды и зарождения кристаллов льда, происходящий со скоростью, вдвое превышающей скорость образования структуры лед–жидкость. Было также установлено, что между механическим воздействием на переохлажденную каплю и началом процесса замерзания капли происходит задержка, и была проведена оценка продолжительности этой задержки. На основании анализа результатов экспериментов с замерзанием непереохлажденной капли был сделан вывод об образовании во время продвижения основного фронта фазового перехода со стороны пластины также тонкого слоя льда на внешней поверхности капли, что, скорее всего, делает невозможным растекание поверхностных капель на втором этапе их замерзания.

Работа была выполнена в рамках проекта SuLaDI (Германия) (обледенение при наличии крупных переохлажденных капелек) и украинской программы стажировок научных и научно-педагогических работников в ведущих зарубежных высших учебных заведениях и научных учреждениях.

Список литературы

- [1] *Wright W.B.* Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6. National Aeronautical and Space Administration (NASA). Contractor Report. May, 1995. 95 p.
- [2] *Gent R. W.* TRAJICE2. A Combined Water Droplet and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoil, Royal Aerospace Establishment (RAE), Farnborough, Hampshire, Technical Report Number TR90054. 1990. 83 p.
- [3] *Guffond D., Hedde T., Henry R.* // Fluid Dynamics Panel (AGARD/FDP) Joint International Conference on Aircraft Flight Safety — Actual Problems of Aircraft Development. Zhukovsky, Russia, 1993. 7 p.
- [4] *Alekseyenko S.V., Prykhodko O.A.* // TsAGI Science J. 2013. V. 44. Iss. 6. P. 761–805.
- [5] *Alekseenko S.V., Prikhod'ko A.A.* // Fluid Dynamics. 2014. V. 49. N 6. P. 715–732.
- [6] *Messinger B.L.* // J. Aeronautical Sci. 1953. V. 20. N 1. P. 29–42.
- [7] *Ouchi K.* Freezing Mechanism of Supercooled Water / Gakugei Faculty, Akita Univ. 1954. P. 43–61.
- [8] *Hallett J.* // J. Atmos. Sci. 1964. V. 21. P. 671–682.
- [9] *Oscar R. Enríquez, Álvaro G. Martín, Koen G. Winkels, Jacco H. Snoeijer* // Phys. Fluids. 2012. V. 24. P. 091 102. DOI: 10.1063/1.4747185
- [10] *Zheyang Jin, Qiaotian Dong, Songyue Jin, Zhigang Yang* // International Conference on Fluid Dynamics and Thermodynamics Technologies (FDTT 2012) IPCSIT. IACSIT Press, Singapore, 2012. V. 33. P. 125–129.
- [11] *Bonomo Melia Elizabeth* // Dickinson College Honors Theses. 2013. Paper 4. 39 p.
- [12] *Tabakova S., Feuillebois F., Radev S.* // First International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Science (22–27 June 2009, Bulgaria, Sozopol). AIP Conference Proceedings 1186. 2009. P. 240–247.
- [13] *Bauerecker Sigurd, Ulbig Peter, Buch Victoria, Vrbka Luboš, Jungwirth Pavel* // J. Phys. Chem. C. 2008. V. 112 (20). P. 7631–7636. DOI: 10.1021/jp711507f
- [14] *Jung S., Tiwari M., Doan N., Poulidakos D.* // Nature Communications. 2012. V. 3. P. 615–623. DOI: 10.1038/ncomms1630
- [15] *Criscione A., Roisman I., Jakirlić S., Tropea C.* // Int. J. Thermal Sci. 2015. V. 92. P. 150–161.