

УДК 532.529.5

**Исследования обледенения в различных условиях****Жбанов В.А.\*, Кашеваров А.В.\*\*, Миллер А.Б.\*\*\*, Потапов Ю.Ф.\*\*\*\*,  
Стасенко А.Л.\*\*\*\*\*, Токарев О.Д.\*\*\*\*\****Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е.  
Жуковского, ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия**\*e-mail: [zhbanov@physics.msu.ru](mailto:zhbanov@physics.msu.ru)**\*\*e-mail: [a.v.kash@yandex.ru](mailto:a.v.kash@yandex.ru)**\*\*\*e-mail: [Aleksei.Miller@tsagi.ru](mailto:Aleksei.Miller@tsagi.ru)**\*\*\*\*e-mail: [iu.potapow@yandex.ru](mailto:iu.potapow@yandex.ru)**\*\*\*\*\*e-mail: [stasenko@serpantin.ru](mailto:stasenko@serpantin.ru)**\*\*\*\*\*e-mail: [olegdt@mail.ru](mailto:olegdt@mail.ru)****Статья поступила 11.03.2019*****Аннотация**

Обсуждаются результаты исследований обледенения летательных аппаратов в условиях жидкокапельных, кристаллических и смешанных облаков, выполненных в ФГУП «ЦАГИ». Дано описание экспериментальных установок для исследований обледенения. Изложены способы создания кристаллов льда в потоке аэрохолодильной трубы. Представлены результаты последних работ ЦАГИ в международных научных проектах, посвященных обледенению. Приведены результаты расчетно-теоретического моделирования обледенения в кристаллических облаках.

**Ключевые слова:** обледенение, переохлажденные капли, кристаллы льда, аэрохолодильные установки.

## Введение

Несмотря на то, что обледенение ЛА интенсивно изучается с 30-х годов прошлого века [1–5], оно остается существенным фактором, влияющим на безопасность полетов. Ряд аварийных ситуаций [6, 7] имел место не только в хорошо известных условиях малых переохлажденных капель, но и в условиях переохлажденных осадков (так называемых больших переохлажденных капель) и кристаллических облаков [8, 9], которые не учитывались в имевшихся на момент инцидентов нормах летной годности по обледенению.

На этом основании были приняты Приложения О к авиационным правилам CS-25 (Европа) и FAR-25 (США), регламентирующие требования летной годности ЛА в условиях больших переохлажденных капель (SLD – Supercooled Large Drops), включая условия замерзающего дождя (freezing rain) и замерзающей мороси (freezing drizzle). Нормированные условия обледенения в кристаллических и смешанных облаках были определены в Приложениях Р к CS-25 и D к FAR-33.

Авиационным регистром Межгосударственного авиационного комитета АР МАК были разработаны и согласуются с промышленностью соответствующие поправки к российским авиационным правилам АП-25. Параллельно с этим идет процесс по уточнению норм летной годности ЛА в условиях падающего снега и метели.

Вопрос сертификации создаваемой в России авиационной техники в соответствии с международными стандартами является крайне актуальным [10]. ФГУП «ЦАГИ» проводит систематические исследования обледенения во всех условиях, создает необходимые для этого экспериментальные установки и численные программы, а также участвует в международных проектах по этой тематике.

### **Экспериментальные установки ЦАГИ**

В настоящий момент ФГУП «ЦАГИ» располагает тремя аэрохолодильными установками – аэрохолодильной трубой сезонного действия АХТ СД, эжекторной установкой сезонного действия ЭУ-1 и всесезонным стендом искусственного обледенения (ВСИО).

АХТ СД является новой установкой, ее строительство было завершено в 2015 году. Она значительно расширяет возможности ЦАГИ в исследованиях обледенения и позволяет, в частности, проводить эксперименты по формам льда, образующихся на моделях крыла самолета и других аэродинамических поверхностях.

АХТ СД имеет закрытую рабочую часть размером  $1 \times 1 \times 3$  м и обеспечивает скорость воздушного потока до 150 м/с, потребляемая мощность вентилятора, создающего поток в аэродинамическом тракте трубы, достигает 1 МВт. Общий вид трубы показан на рис. 1.

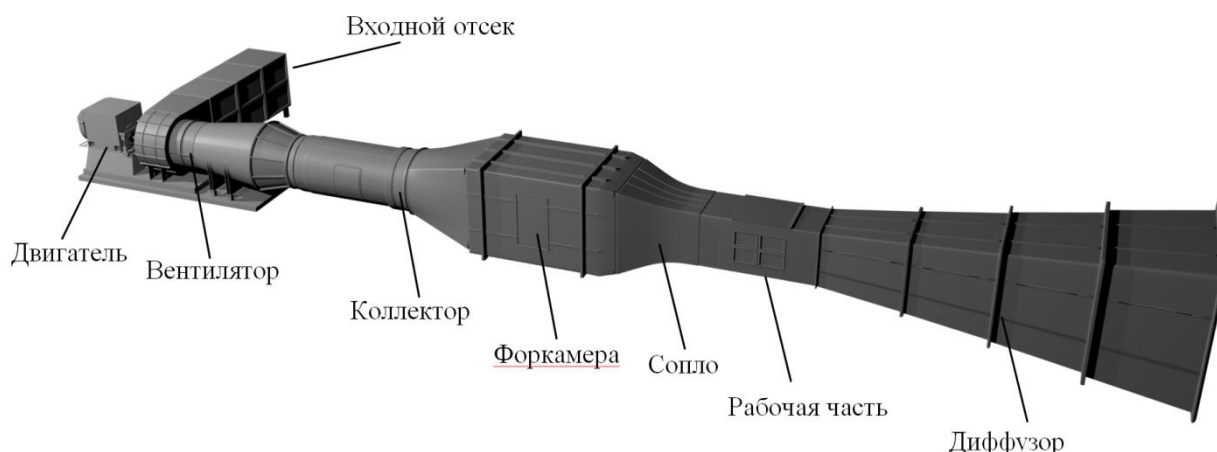


Рис. 1. Общий вид аэрохолодильной трубы сезонного действия АХТ СД

Водность и размер капель могут варьироваться в пределах, соответствующих нормированным условиям обледенения в жидкокапельных облаках (определяемых Приложением С к АП-25). Исследование процессов обледенения на АХТ СД осуществляется в холодное время года с использованием холодного воздуха, засасываемого из атмосферы.

Установка ЭУ-1 и всесезонный стенд искусственного обледенения – малые аэрохолодильные трубы ЦАГИ, которые используются для испытаний бортовых измерителей параметров потока (приемников воздушных давлений, датчиков угла атаки, датчиков вектора скорости и т.п.), малых элементов конструкции ЛА, а также для проведения экономичного физического эксперимента.

Стенд ЭУ-1 состоит из аэродинамического канала с многосопловым эжектором, водораспыливающей системы с вихревыми форсунками, системы подачи и регулирования давления эжектирующего воздуха (рис. 2). Эжектируемый воздух забирается из атмосферы в холодное время года. Общая длина канала трубы

равна 2910 мм, размеры его поперечного сечения  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ . Скорость потока в канале трубы регулируется в диапазоне 10 – 100 м/с за счет изменения давления эжектирующего воздуха. Установка оснащена системой охлаждения потока за счет добавления в него капель жидкого азота. Это позволяет проводить испытания при температуре наружного воздуха до  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждая при этом поток до  $-30 \dots -40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подача кристаллов производится с помощью инъекции через Г-образную трубку или при помощи конвейера.

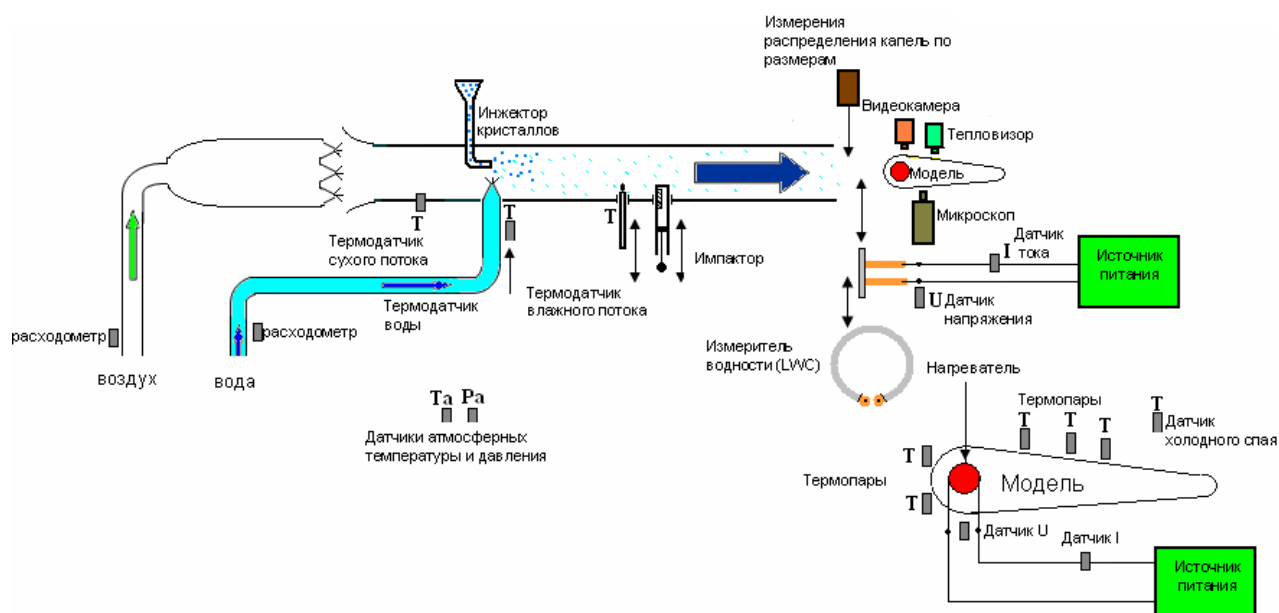


Рис. 2. Структурная схема стенда ЭУ-1 и проводимых на нем измерений

Всесезонный стенд искусственного обледенения представляет собой помещение, в котором установлены аэродинамическая труба вентиляторного типа с разомкнутым контуром, системы инъекции кристаллов и распыла воды, рис. 3. Требуемая для исследований обледенения температура воздуха в камере достигает минус  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  и устанавливается за счет нагнетания в нее холодного воздуха, охлаждаемого в холодильной машине. Истекающая из аэродинамической трубы

струя для улучшения ее смешения с окружающим воздухом разбивается с помощью сеток и обтекателя. Стенд обеспечивает исследование процессов обледенения в лабораторных условиях вне зависимости от погоды. Объем помещения 360 м<sup>3</sup> обеспечивает работу аэродинамической трубы с выходным сечением сопла 250×250 мм<sup>2</sup> при скорости потока до 80 м/с.

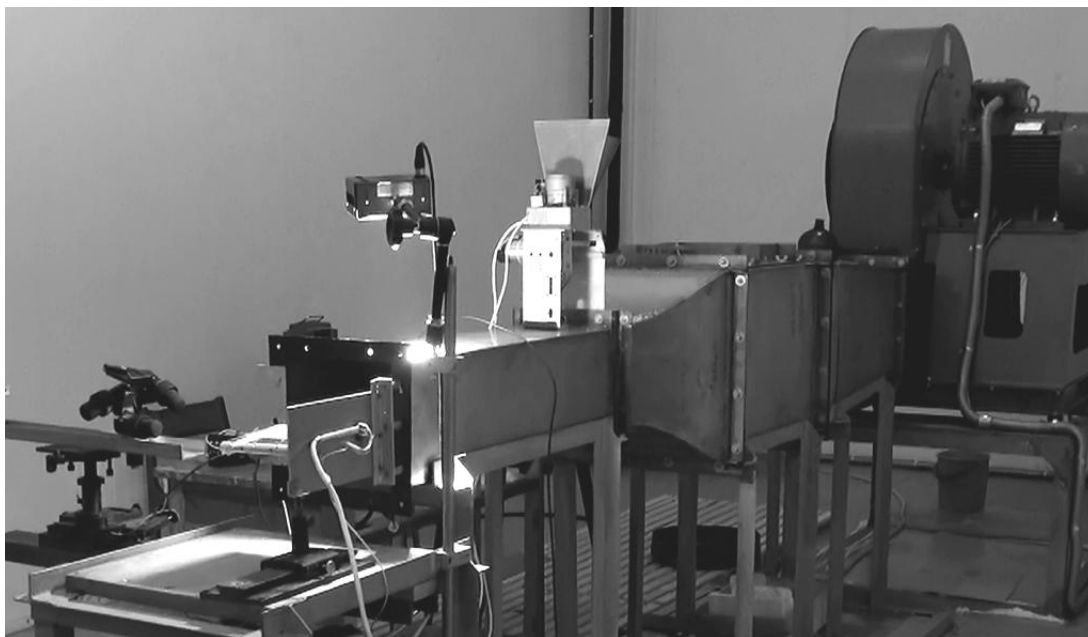


Рис. 3. Всесезонный стенд искусственного обледенения

### **Способы создания условий кристаллического обледенения на экспериментальных установках**

Условия кристаллического обледенения в настоящий момент реализованы на ЭУ-1 и ВСИО. Используется несколько основных методов создания кристаллов в потоке:

1) Строгание предварительно замороженного объема льда. Бруски льда пропускаются через строгальное устройство с быстро вращающимися фрезами, затем кристаллы эжектируются в аэродинамический тракт.

2) Снежные пушки.

3) Замораживание капель в потоке при дополнительной инъекции в него жидкого азота.

4) Сбор и инжектирование свежавыпавшего снега.

В качестве основного используется первый способ, так как он позволяет получить кристаллы неправильной формы в широком диапазоне их размеров. Способы 2) и 3) дают кристаллы сферической формы, которая не характерна для облаков. Поэтому они могут быть использованы в тех случаях, когда возможно доказать, что форма не является определяющим фактором. Способ 4) используется для проверки влияния способа производства кристаллов на конечный результат эксперимента путем сравнения со случаем природных ледяных кристаллов.

Характерный вид полученных первым способом кристаллов в пробе показан на рис. 4. Соответствующее распределение диаметров, полученное в результате обработки ряда фотографий, а также кривая накопления массы для вычисления массового медианного диаметра кристаллов  $D_{50}$ , даны на рис. 5.

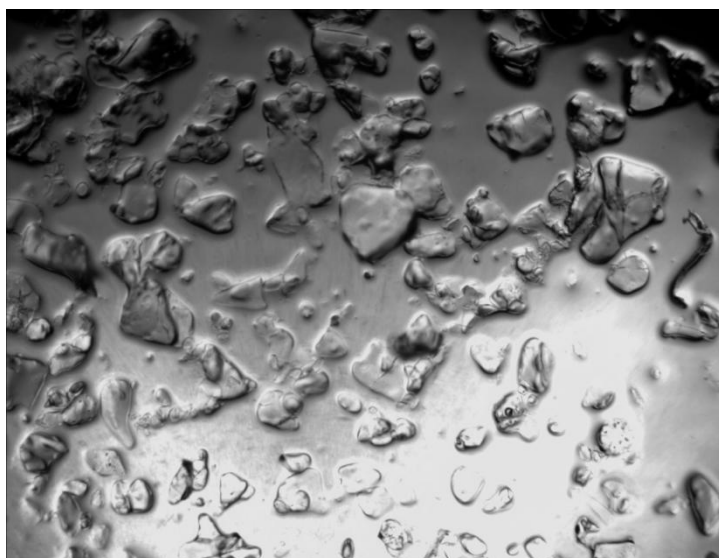


Рис. 4. Характерный тип кристаллов, полученных методом строгания.

Ширина снимка составляет 2.5 мм

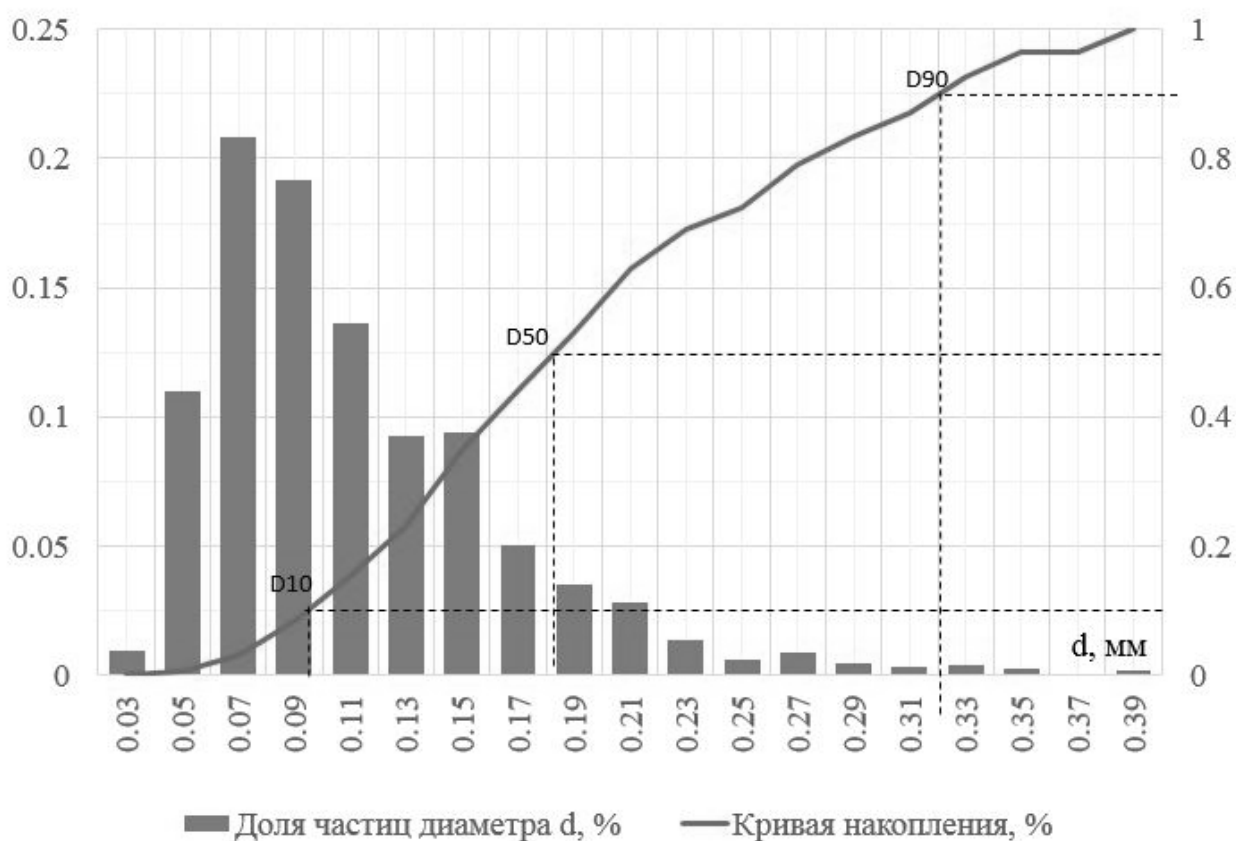


Рис. 5. Распределение диаметров кристаллов рис. 4 и кривая накопления массы



### **Работы, выполняемые ФГУП «ЦАГИ» по тематике обледенения**

ФГУП «ЦАГИ» выполняет работы по тематике обледенения в интересах Российской авиационной промышленности, а также участвует в ряде международных исследовательских проектов.

В рамках проекта ICETRACK программы Clean Sky ряд покрытий был исследован в условиях образования барьерного льда [11]. Были созданы теоретические и численные модели поведения воды на поверхностях с различной смачиваемостью. Проанализировано потенциальное применение льдофобных покрытий в инновационных противообледенительных системах.

В рамках проекта НАС (Ледяные кристаллы на больших высотах) 7-й рамочной программы ЕС изучалась физика обледенения в полностью кристаллических условиях [12]. Были получены и проанализированы экспериментальные результаты по образованию барьерного льда на модели профиля крыла с нагреваемой передней кромкой в условиях натекания кристаллов. Рассмотрены случаи первоначально сухой поверхности и поверхности, по которой текла искусственно созданная жидкая пленка. Во втором варианте моделировались условия аккреции льда, близкие к имеющим место в компрессоре низкого давления ТРДД при полете ЛА в кристаллическом облаке.

Целью работы являлось получение данных по скорости роста льда на модели при различных параметрах потока для валидации численных моделей обледенения в условиях полета. Были изучены зависимости массы образовавшегося барьерного льда от температуры и кристаллической водности (IWC) потока, формы и размеров

натекающих кристаллов, температуры передней кромки профиля и толщины жидкой пленки. Проведены измерения распределений кристаллов в потоке, определены их масс-медианные (MMD) и среднеарифметические диаметры, создана база данных параметров используемых кристаллов. Выполнено сравнение нескольких методов создания кристаллов и их ввода в поток. На рис. 6 показан характерный вид барьерного льда, полученного на поверхности модели.

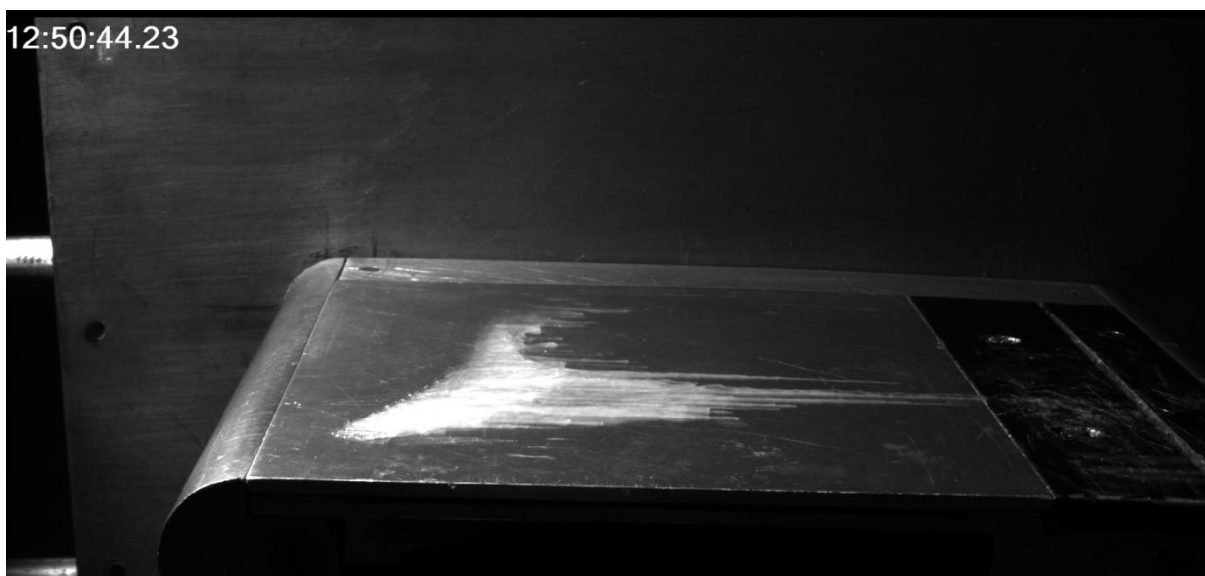


Рис. 6. Барьерный лед на поверхности модели, натекание кристаллов на нагретую переднюю кромку крыла

В ходе выполнения проекта НАИС были разработаны физико-математические модели взаимодействия ледяных кристаллов как с сухими, так и смоченными поверхностями обтекаемых тел (более подробно этот вопрос рассмотрен в [13–17]).

В [18] развита физико-математическая модель взаимодействия ледяных кристаллов с водяной пленкой на аэродинамическом профиле в потоке воздуха для случая, реализованного в эксперименте, когда пленка образовывалась искусственно

путем выдавливания воды через щелевое сопло вдоль передней критической линии профиля. В основе модели лежат уравнения ламинарного пограничного слоя, осредненные по толщине пленки, а именно: уравнения неразрывности, импульса и энергии. Ввиду малой толщины пленки распределения скорости ее течения и температуры воды можно было задать параболическими профилями, которые, как и сами уравнения, содержат такие параметры как напряжение вязкого трения, продольный градиент давления и коэффициент теплоотдачи пленки в набегающий поток, хорошо известные для обтекания кругового цилиндра. Поскольку передняя кромка модели крыла, используемого в эксперименте, представляла собой полуцилиндр, было возможно использовать эти данные. Предполагалось, что диаметр кристаллов достаточно большой (100 мкм), что позволило пренебречь искривлением их траектории и упростить определение плотности потока массы в пленку, что также является входным параметром для расчета.

Предварительные вычисления параметров пленки в рамках разработанной модели показали, что толщина пленки сравнима с характерным размером падающих на нее кристаллов (диаметр 100 мкм). Поэтому предполагалось, что кристаллы внедряются в пленку, изменяя ее вязкость. Система уравнений была дополнена уравнением эволюции концентрации ледяных частиц в пленке. Учтено таяние кристаллов в пленке на основе решения задачи Стефана для кристалла сферической формы. На рис. 7 показан рассчитанный темп нарастания слоя льда по обводу цилиндра для начального расхода воды в пленке 1 г/с.

В [19] рассмотрен режим обледенения профиля в воздушно-кристаллическом потоке без образования пленки. В отличие от [18], на основе метода приближенного конформного отображения было найдено потенциальное поле скоростей воздушного потока вокруг аэродинамического профиля, используемого в эксперименте. Затем рассчитаны траектории движения ледяных частиц и определены зона орошения ими профиля и плотность потока массы на поверхность. Считалось, что частицы представляют собой сфероиды, различным образом ориентированные в потоке. Аэродинамические коэффициенты движущихся сфероидов и шаровых частиц существенно отличаются, что приводит к различиям их траекторий.

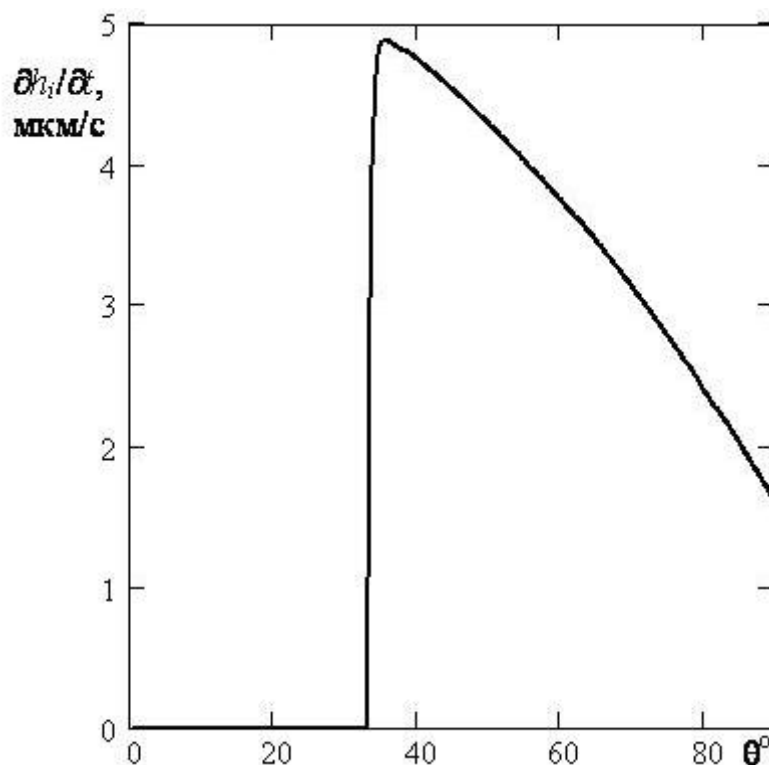


Рис. 7. Темп нарастания слоя льда по обводу цилиндра

При ударе о поверхность кристалл разрушается под действием нормальных и тангенциальных напряжений, и часть его массы остается на поверхности (задача нахождения траекторий сорванной наледи рассмотрена в [20]). Это позволило проследить эволюцию нарастания льда на профиле. Оказалось, что нарастание льда в случае хаотически ориентированных сплюснутых сфероидов с отношением полуосей  $E = 0.1$  происходит медленнее, чем для сферических частиц эквивалентного объема. На рис. 8 представлена эволюция нарастания льда для сплюснутых сфероидов (слева) в сравнении со сферическими частицами (справа).

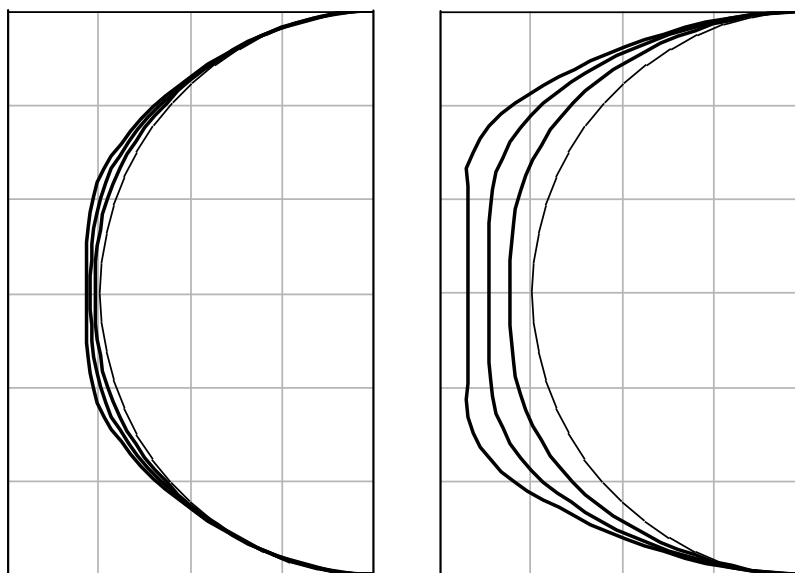


Рис. 8. Нарастание льда на передней кромке профиля со временем.

Шаг по времени 15 с

### Выводы

1. В соответствии с принятыми в ЕС и США нормами по обледенению в условиях переохлажденных осадков, кристаллических и смешанных облаков задача

создания средств наземного эксперимента и численного моделирования для этих условий является крайне актуальной.

2. ФГУП «ЦАГИ» ведет разработки по созданию аэрохолодильных установок и методик экспериментального моделирования для этих условий. В настоящий момент реализована возможность испытаний в условиях жидкокапельных, кристаллических и смешанных облаков.

3. ФГУП «ЦАГИ» разработаны различные методы создания кристаллов в потоке, в рамках участия в международном проекте НАСС проведены эксперименты по аккреции кристаллов на нагретой сухой и смоченной поверхностях.

4. Разработаны физико-математические модели кристаллического обледенения, проведено их сравнение с экспериментальными данными, показавшее хорошее совпадение результатов.

*Работа выполнена при финансировании 7й рамочной программы Европейского союза, соглашение по гранту № nACP2-GA-2012-314314 (НАСС – Кристаллы льда на больших высотах) и была частично поддержана Российским научным фондом, грант № 16-19-10472.*

### **Библиографический список**

1. Mundo Chr., Sommerfeld M., Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup // International Journal Multiphase Flow, 1995, vol. 21, no. 2, pp. 151 – 173.

2. Luxford G., Hammond D., Ivey P. Modelling, imaging and measurement of distortion, drag and break-up of aircraft-icing droplets // 43th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10 – 13 January 2005, Reno, Nevada, AIAA-2005-71, available at: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/946/AIAA-2005-71.pdf?sequence=1>
3. Алексеенко С.В., Приходько А.А. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 6. С. 25 – 57.
4. Gent R.W, Dart N.P, Cansdale J.T. Aircraft icing // Phil. Trans. R. Soc. London, 2000, A 358, pp. 2873 – 2911, doi: 10.1098/rsta.2000.0689.
5. Lozowski E.P., Stallabrass J.R., Hearty P.F. The icing of unheated, non-rotating cylinder. Part 1: A simulation model // Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, vol. 22, pp. 2053 - 2062.
6. Aircraft Accident Report, In-Flight Icing Encounter and Loss of Control // NTSB/AAR96/01, 1994, available at: <https://ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR9601.pdf>
7. Mason J.G., Strap J.W., Chou P. The ice particle threat to engines in flight // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006, AIAA-2006-206.
8. Tan S.C., Papadakis M., Miller D., Bencic T., Tate P., Laun M.C. Experimental study of large droplet splashing and break up // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007, AIAA-2007-904.

9. Miller A.B., Potapov Yu.F., Stasenko A.L. Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flows // 29th Congress Intern. Council Aeronaut. Sci. (ICAS). 2014, Paper 2014\_0576.
10. Amendola A., Mingione G. A European research on aircraft icing certification // Proc. FAA Intern. Conf. on Aircraft Inflight Icing, 1999, DOT/FAA/AR-96/81, II, pp. 447 - 458.
11. Гринац Э.С., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Экспериментальные и теоретические исследования процессов обледенения наномодифицированных супергидрофобных и обычных поверхностей // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2013. № 3. С. 84 – 92.
12. Dezitter F., Grandin A., Brenguier J.L., Hervy F., Schlager H., Villedieu P., Zalamansky G. HAIC (High Altitude Ice Crystals) // 5th AIAA Atmospheric and Space Environments Conf. Aircraft Icing, 2013, AIAA 2013-2674.
13. Hammond D., Quero M., Ivey P., Purvis R., McGregor O., Tan J. Analysis and experimental aspects of the impact of supercooled water droplets into thin water films // 43th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005, AIAA-2005-077.
14. Myers T.G., Charpin J.P.F., Chapman S.J. The flow and solidification of a thin fluid film on an arbitrary three-dimensional surface // Physics of Fluids, 2002, vol. 14, no. 8, pp. 2788 – 2803.
15. Fu P., Farzaneh M., Bouchard G. Modeling a water flow on an icing surface // Proc. 11th Intern. Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2005.



16. Du Y., Gui Y., Xiao C., Yi X. Investigation on heat transfer characteristics of aircraft icing including runback water // International Journal Heat Mass Transfer, 2010, vol. 53, no. 19 – 20, pp. 3702 - 3707.
17. Szilder K., Farzaneh M., Lazowski EP. Analysis of water film flow on an icing surface // Proc. 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2000.
18. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Гидротермодинамика жидкой пленки с кристаллами на поверхности тела в потоке воздуха, содержащем частицы льда // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 2. С. 103 - 114.
19. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Моделирование нарастания льда на поверхности крылового профиля в потоке воздуха, содержащем частицы льда // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 4. С. 80 - 88.
20. Танненберг И.Д., Рамазанов Р.Ф. Валидация решения задачи движения твердого тела в набегающем потоке с использованием программного продукта ЛОГОС // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74873>