

## Программный модуль «Кристалл» в 2023 году.

Бендерской Л.А., Горячев А.В., Горячев П.А., Горячев Д.А., Любимов Д.А. (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» )  
Рыбаков А.А. (МСЦ РАН)

Десятый юбилейный профессиональный слёт разработчиков отечественных CFD кодов «Отечественные CFD коды – 2023» (CFD Weekend-2023), Россия, 125047, г. Москва, площадь Миусская, 4, 09–10 декабря 2023 г.



10.12.2023

# Риски обледенения летательного аппарата

## Лопастей рулевого винта

Падение тяги несущего винта, угроза падения вертолёт.

## Лопастей несущего винта

Ухудшение управляемости, угроза аварийной ситуации.



## Элементы воздухозаборного устройства, защитное устройство

Повреждение двигателя льдом, снижение мощности, повышение вибраций, повышение температуры газа за турбиной снижение газодинамической устойчивости двигателя.

## Наращение льда на фюзеляже

Критическое повышение массы вертолёт, угроза аварийной ситуации.

**Вывод:** необходимость разработки методов расчёта процесса нарастания и срыва льда для организации эффективной защиты авиационной техники от обледенения

\* <https://wikimedioc.com/album/Mil%20Mi-8%20in%20Russian%20service>

# Цель разработки ПМ «Кристалл» \*, \*\*

## Компьютерное моделирование процессов обледенения

- Нарастание льда в условиях «классического» обледенения
- Обледенение в условиях крупных переохлажденных капель
- Обледенение в условиях ледяных кристаллов
- Моделирование работы тепловых противообледенительных систем

Компьютерное моделирование позволяет:

- сократить процесс сертификации за счет уменьшения количества испытаний в аэродинамических трубах;
- предсказать результаты обледенения в естественных условиях обледенения;
- повысить уровень безопасности авиационной техники

\* Программный модуль расчёта процесса обледенения элементов авиационных силовых установок («КРИСТАЛЛ»). Авторы: Горячев А.В., Горячев П.А., Рыбаков А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615575. Дата регистрации: 26.05.2020.

\*\* Программный модуль компьютерного моделирования процесса обледенения элементов авиационных силовых установок («КРИСТАЛЛ 2023»). Авторы: Горячев А.В., Горячев П.А., Рыбаков А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666962 . Дата регистрации: 08.08.2023

## Существующие программные комплексы

- Программный комплекс Fensap Ice (Канада)
- Программный комплекс Lewice (США)
- Программный модуль Кристалл\* (Россия)
- Программный комплекс FlowVision (Россия)



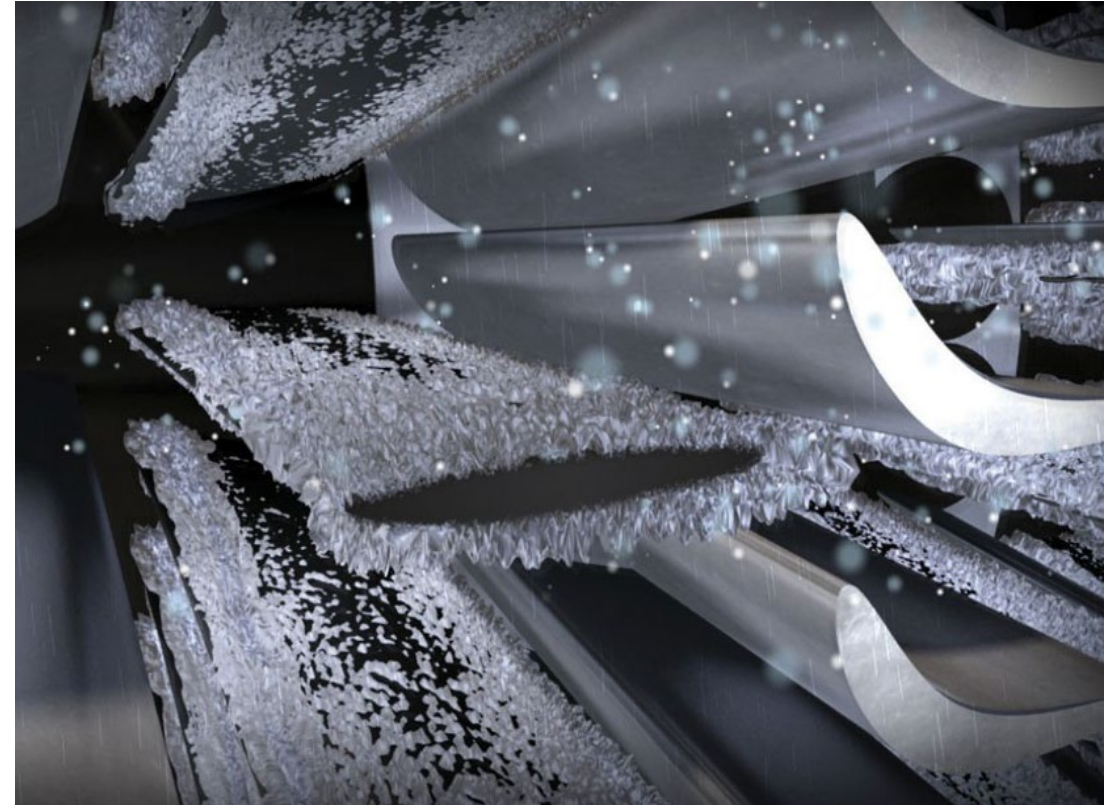
# Программный модуль «Кристалл»\*, \*\*

## Отличительные особенности

- В основу термодинамической модели положена модифицированная модель течения жидких водяных плёнок SWIM;
- Продвинутый итеративный алгоритм расчета формы ледяного нароста;
- Многослойная структура ледяного нароста;
- Моделирование обледенения в условиях ледяных кристаллов;
- Моделирование работы электротепловой противообледенительной системы;
- Распараллеливание по OpenMP и MPI.

Математическая модель, лежащая в основе «Кристалл», основана на решении системы уравнений массового и теплового баланса на поверхности тела.

Система уравнений сформирована и скорректирована на основе многолетнего опыта ученых ЦИАМ, полученного в экспериментальных работах по исследованию процесса обледенения силовых установок и элементов планера



\*Программный модуль расчёта процесса обледенения элементов авиационных силовых установок («КРИСТАЛЛ»). Авторы: Горячев А.В., Горячев П.А., Рыбаков А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615575. Дата регистрации: 26.05.2020.

\*\* Программный модуль компьютерного моделирования процесса обледенения элементов авиационных силовых установок («КРИСТАЛЛ 2023»). Авторы: Горячев А.В., Горячев П.А., Рыбаков А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666962 . Дата регистрации: 08.08.2023.

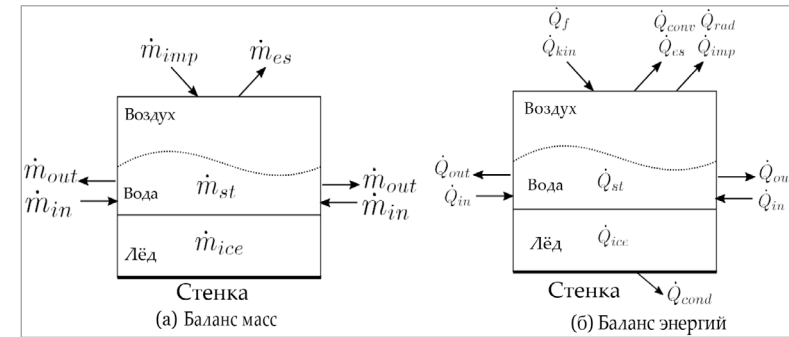
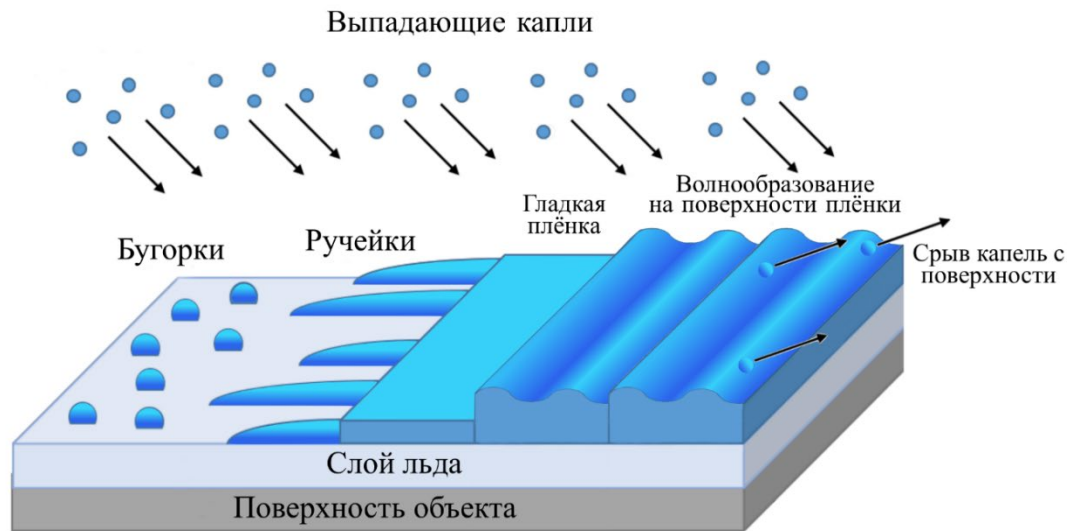
## Особенности расчёта процесса обледенения

1. **Моделирование внешнего 3-х фазного, 2-х компонентного потока (внешний двухфазный поток, выпадение частиц на поверхность)**
2. **Моделирование 3-х фазной, 2-х компонентной среды с фазовыми переходами на поверхности тела/льда (течение/замерзание воды на поверхности)**
3. **Корректное моделирование геометрических макро и микро форм, образующихся на поверхности льда в процессе его формирования**
4. **Корректное моделирование местного коэффициента теплоотдачи с учётом макро и микроструктуры поверхности тела/льда (учёт шероховатости)**
5. **Частичный срыв капель с поверхности, унос во внешний поток и частичное вторичное выпадение на тело/лёд (иное физическое состояние срывающихся/выпадающих капель)**
6. **Корректное перестроение сеток в соответствии с ростом/плавлением льда**

# Математическая модель обледенения в программном модуле Кристалл\*

В основу термодинамической модели положена модифицированная модель течения жидких водяных плёнок SWIM (Shallow Water Icing Model)\*\*.

Модель учитывает формы течения воды на поверхности льда в процессе его формирования, изложенные в работе\*\*\*.



Схемы массового и энергетического балансов для ячейки

Уравнение сохранения масс:

$$\rho_w \left[ \frac{\partial h_w}{\partial t} + \text{div}(\bar{u}h_w) \right] = \dot{m}_{imp} - \dot{m}_{ice\,surf} - \dot{m}_{es}$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho_w \left[ \frac{\partial h_w C_{p,w} \bar{T}}{\partial t} + \text{div}(\bar{u}h_w C_{p,w} \bar{T}) \right] = \dot{Q}_{kin} + \dot{Q}_{ice\,surf} - \dot{Q}_{imp} - \dot{Q}_{es} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{heat\,surf}$$

$$\dot{Q}_{ice\,surf} = \dot{m}_{ice\,surf} \cdot L_{fus}$$

\*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615575. Дата регистрации: 26.05.2020.

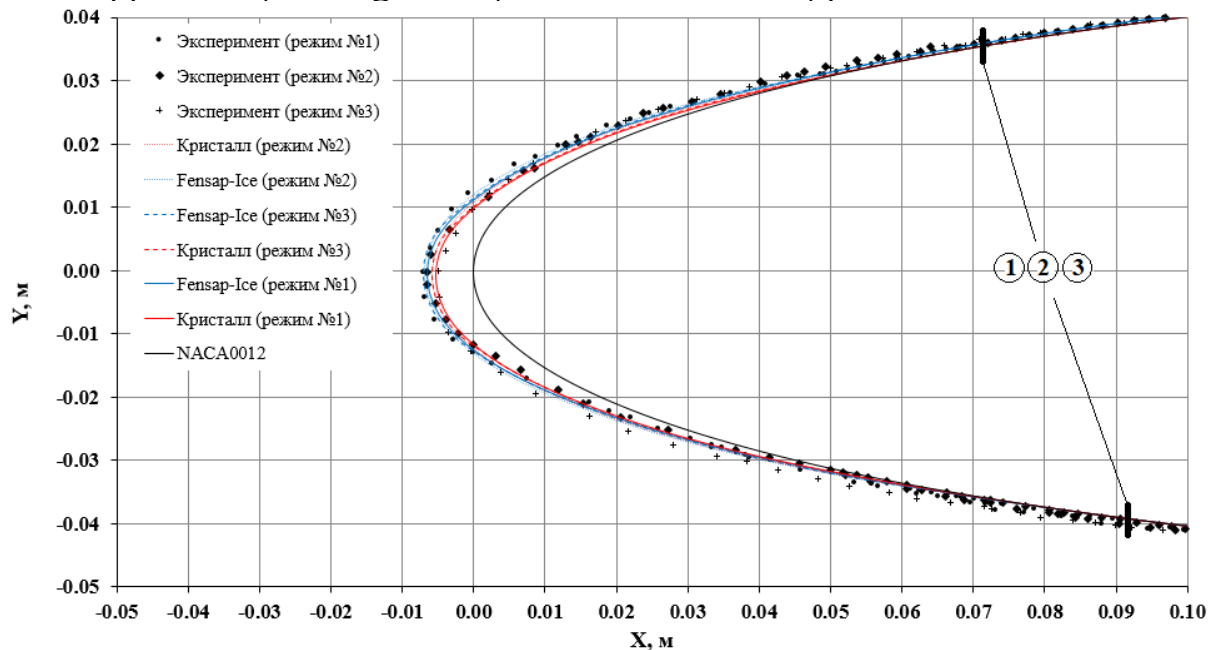
\*\*Shallow Water Icing Model (Y. Bourgault, H. Beaugendre, and W. G. Habashi, "Development of a shallow-water icing model in FENSAP-ICE", *Journal of Aircraft*, vol. 37, no. 4)

\*\*\* Groce G., De Candido E., Habashi W.G., Munzar J., Aube M.S., Baruzzi G.S., Aliaga C., "FENSAP-ICE: Analytical Model for Spatial and Temporal Evolution of In-Flight Icing Roughness," *International Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 4, July-August, 2010, pp. 1283-1289.

# Расчёт процесса обледенения в атмосферных условиях крупных переохлаждённых капель

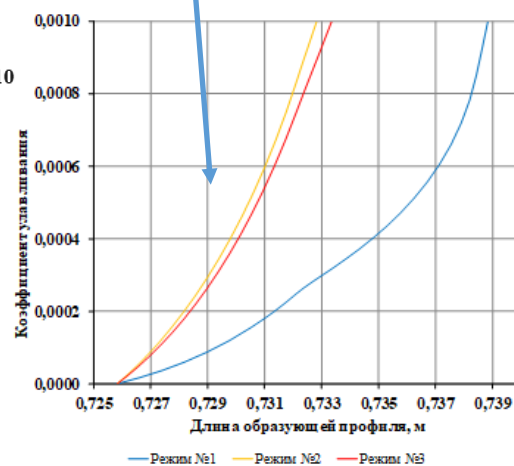
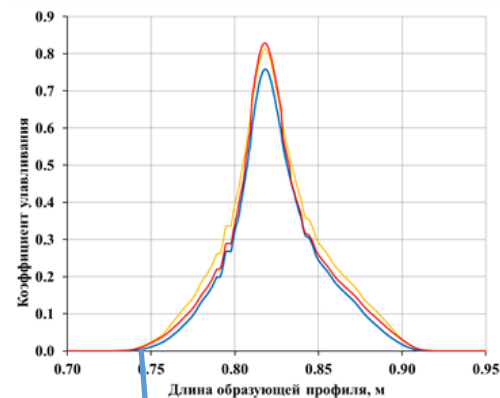
# Влияние размера капель на форму льда, SLD, MVD= 40-180 мкм

Appendix O, frizzing drizzle, MVD= 40÷180 мкм, режим rime ice



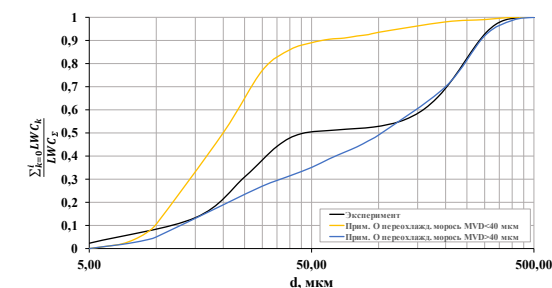
№ режима	LWC, г/м <sup>3</sup>	MVD, мкм	OAT, °C	Высота, м	Скорость, м/с	Угол атаки, °	Продолжительность, мин
1	0,3	40	-25	0	63	2	7,5
2	0,3	180	-25	0	63	2	7,5
3	0,3	104	-25	0	63	2	7,5

Испытания на профиле NASA0012\*

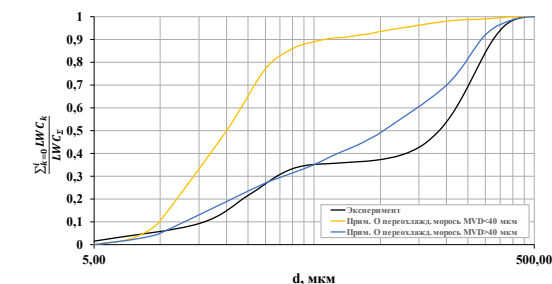


Распределение капель по размерам

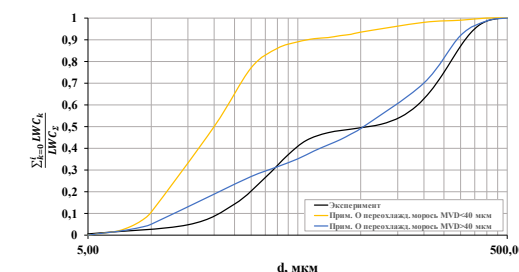
Режим №1



Режим №2



Режим №3



\*Ice Genesis Icing Database <https://icing-database.eu/index.php>

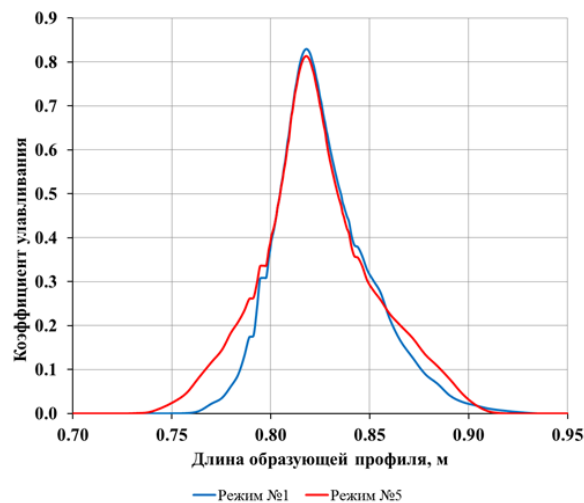
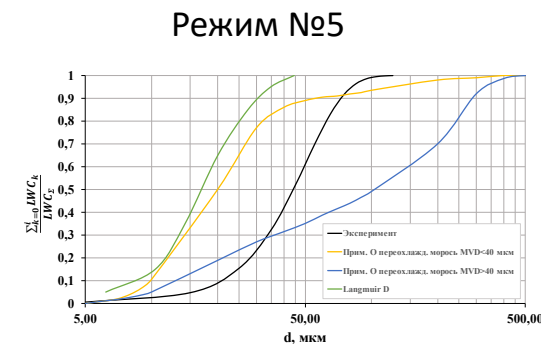
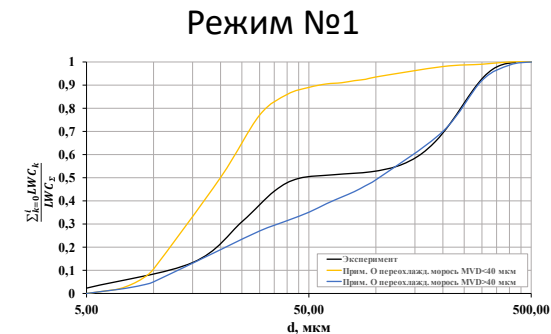
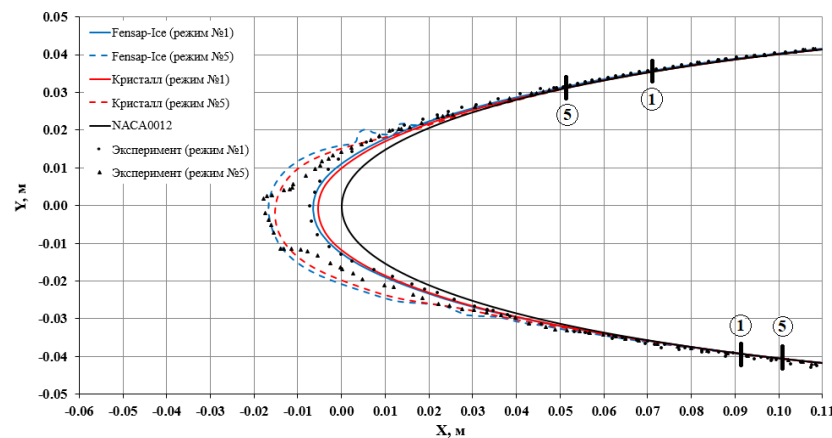
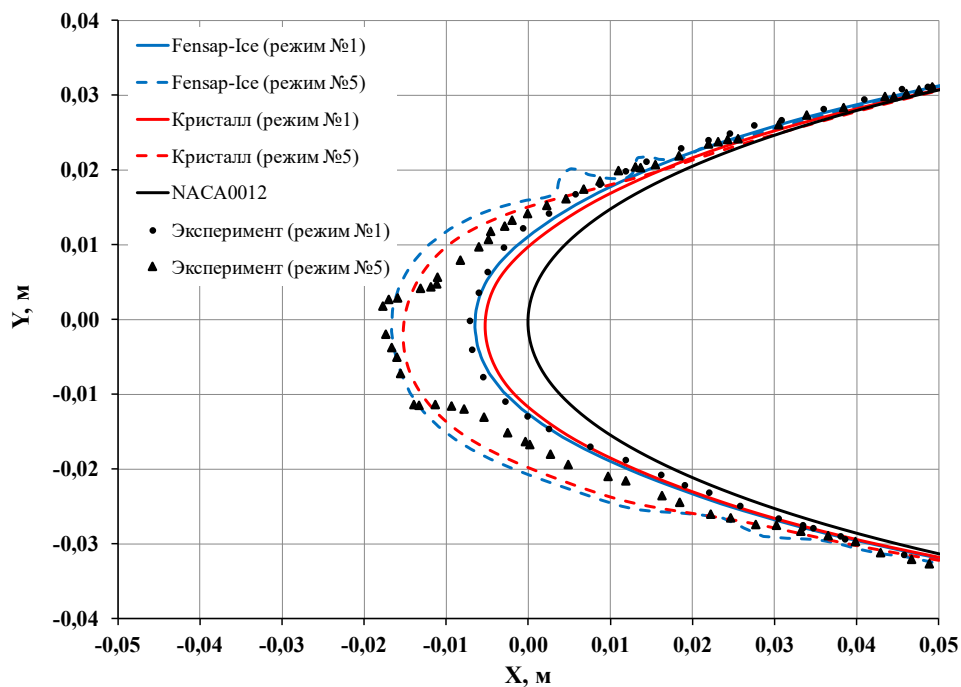


# Влияние скорости потока на форму льда, SLD, MVD= 40 мкм

Appendix O, frizzling drizzle, MVD= 40 мкм, режимы rime ice, glaze ice

Испытания на профиле NACA0012\*

Распределение капель по размерам

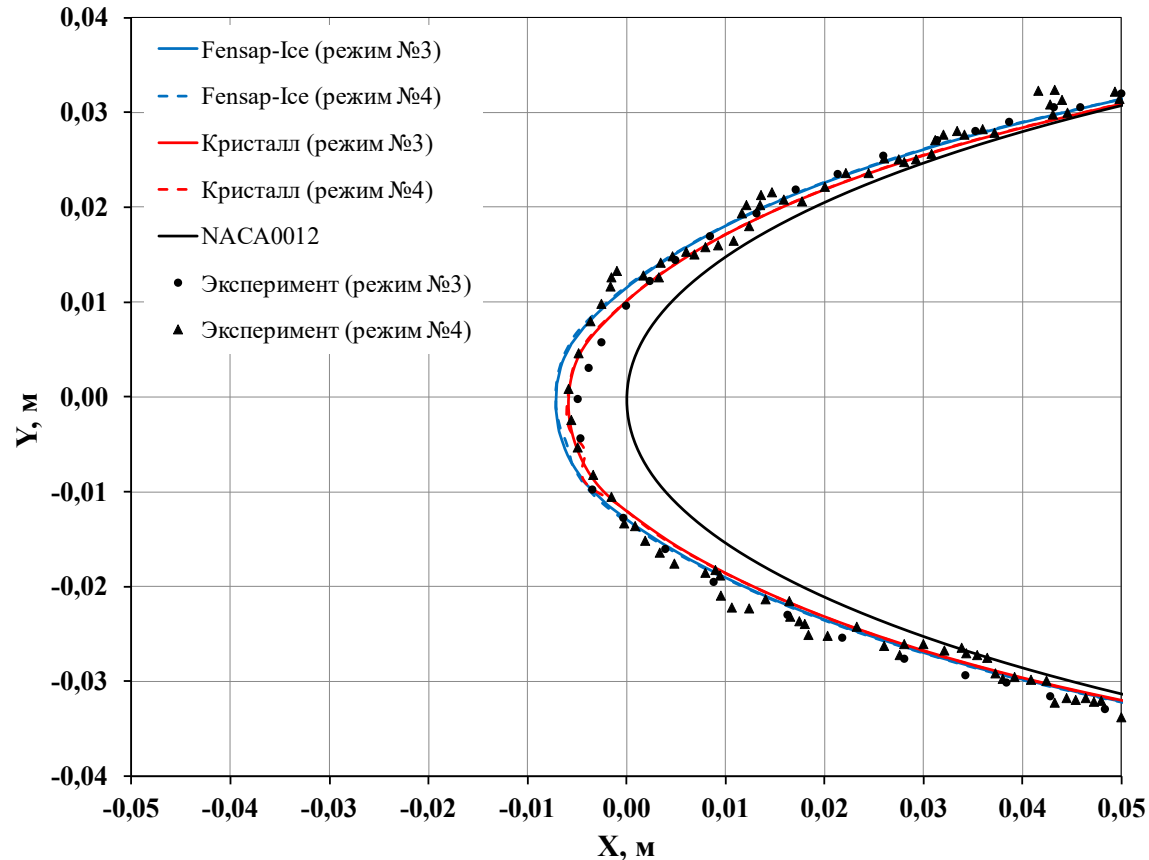


№ режима	LWC, г/м <sup>3</sup>	MVD, мкм	OAT, °C	Высота, м	Скорость, м/с	Угол атаки, °	Продолжительность, мин
1	0,3	40	-25	0	63	2	7,5
5	0,3	40	-25	0	158	2	7,5

\*Ice Genesis Icing Database <https://icing-database.eu/index.php>

# Влияние температуры потока на форму льда, SLD, MVD= 104 мкм

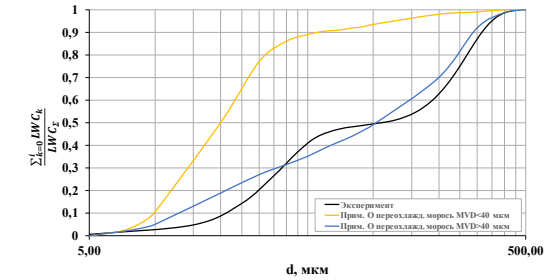
Appendix O, frizzing drizzle, MVD= 104 мкм, режимы rime ice, glaze ice



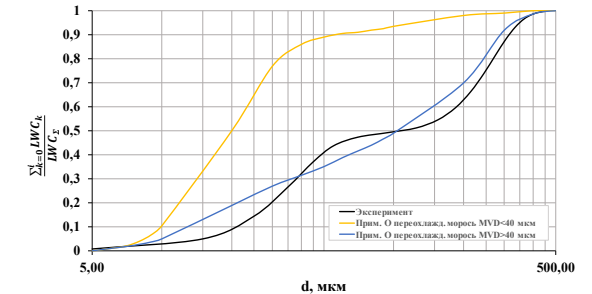
Испытания на профиле NASA0012\*

Распределение капель по размерам

Режим №3



Режим №4

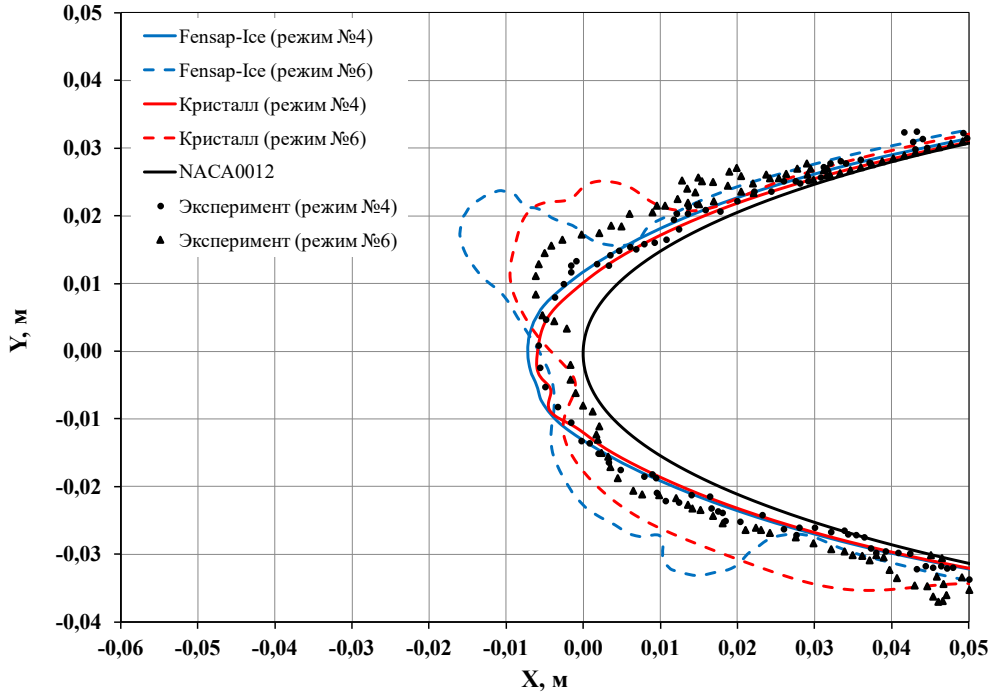


\*Ice Genesis Icing Database <https://icing-database.eu/index.php>

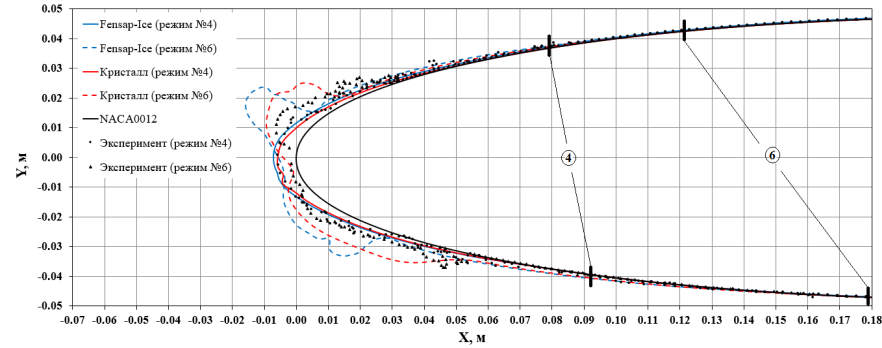
№ режима	LWC, г/м <sup>3</sup>	MVD, мкм	OAT, °C	Высота, м	Скорость, м/с	Угол атаки, °	Продолжительность, мин
3	0,3	104	-25	0	63	2	7,5
4	0,3	104	-10	0	65	2	7,5

# Влияние скорости потока на форму льда, SLD, MVD= 104 мкм (glaze ice)

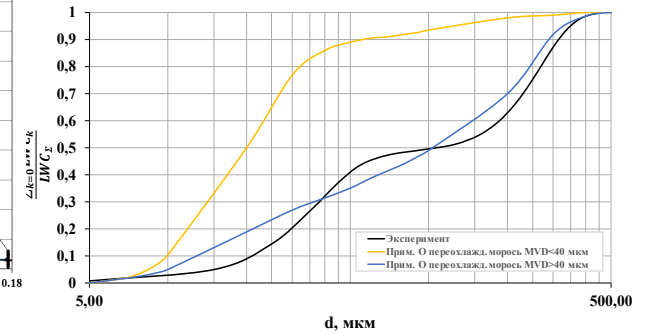
Appendix O, frizzling drizzle, MVD= 104 мкм, режим glaze ice



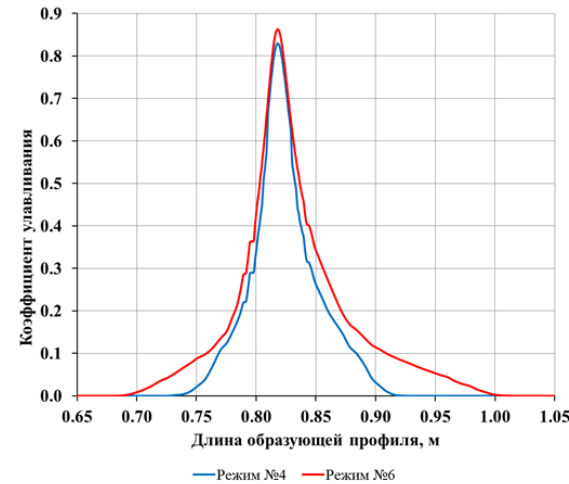
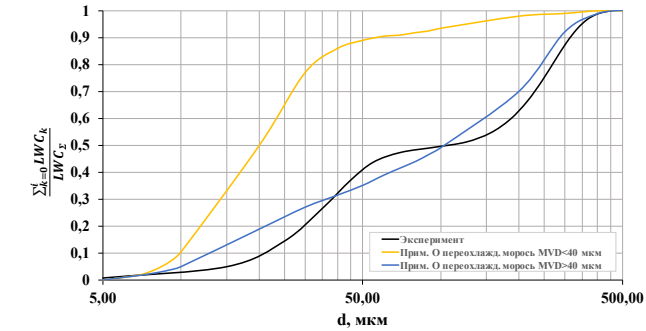
Испытания на профиле NACA0012\*



Распределение капель по размерам  
Режим №4



Режим №6



№ режима	LWC, г/м <sup>3</sup>	MVD, мкм	OAT, °C	Высота, м	Скорость, м/с	Угол атаки, °	Продолжительность, мин
4	0,3	104	-10	0	65	2	7,5
6	0,3	104	-10	0	163	2	7,5

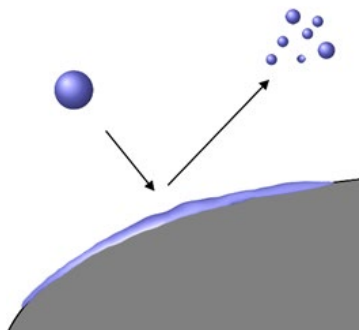
\*Ice Genesis Icing Database <https://icing-database.eu/index.php>

# Развитие модели SLD. Разбрызгивание капель

Модель Саменфинк

Учитывает наличие плёнки воды на поверхности льда

$$\frac{m_s}{m_0} = f_{m_{sp}}$$

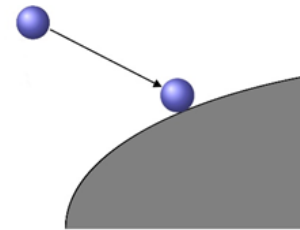


выпадение на смоченную поверхность

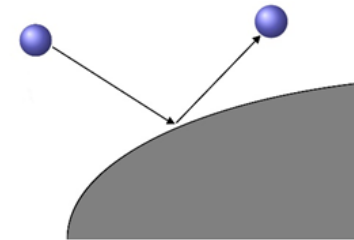
Модель Трухильо

Получено для сухой поверхности

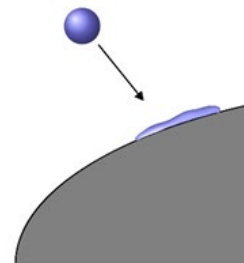
$$\frac{m_s}{m_0} = \varphi(K_y)$$



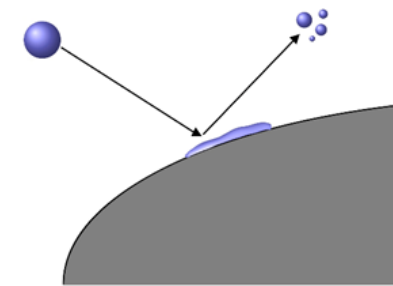
прилипание,  
 $We_n \leq 2$



отскок,  
 $2 < We_n \leq 10$



растекание,  
 $10 < We_n \leq 1320La^{-0,183}$



разбрызгивание,  
 $We_n \geq 1320La^{-0,183}$






# Развитие модели SLD. Разбрызгивание капель

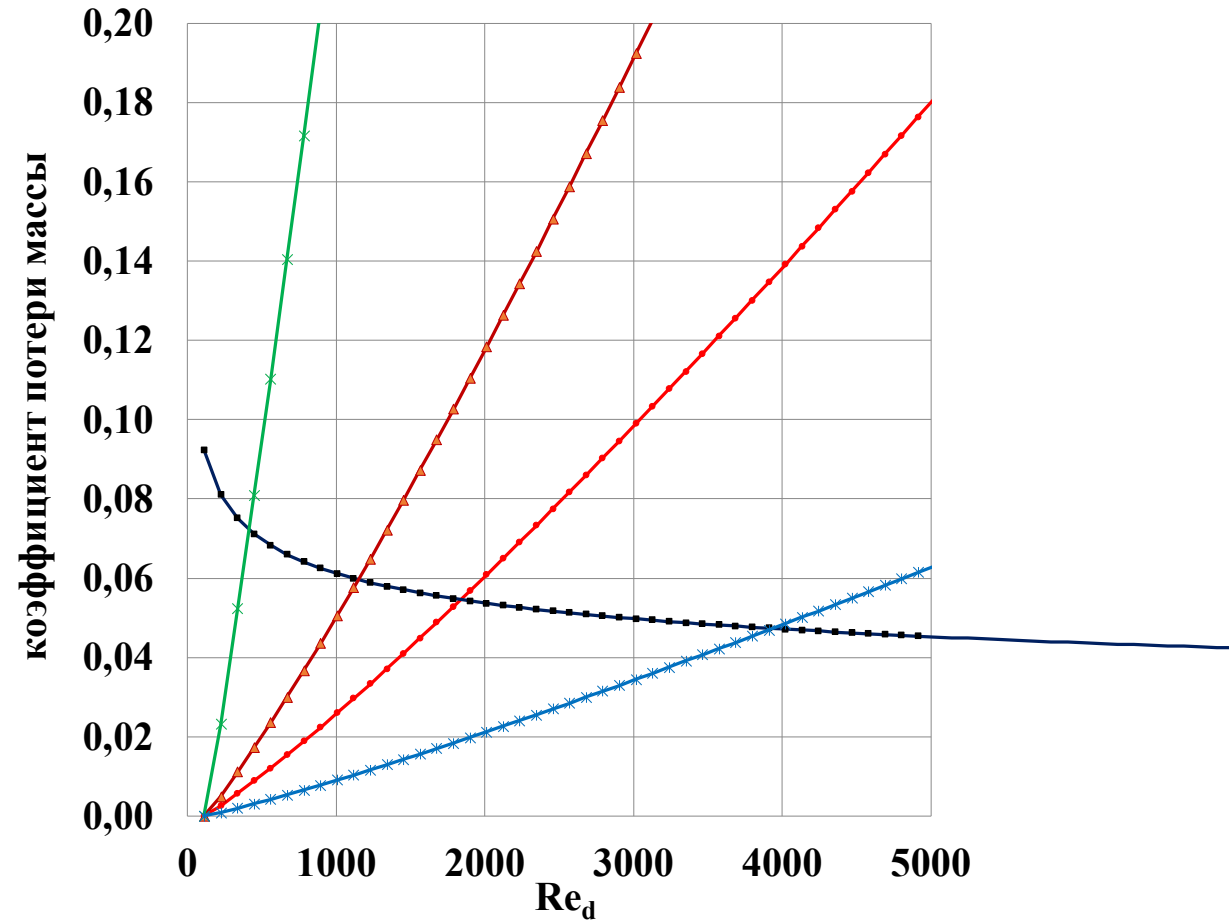
Комбинация моделей Саменфинк и Трухильо

$$\frac{m_s}{m_0} = \min(f_{m_{sp}}, \varphi(K_y))$$

Модель Саменфинк позволяет моделировать выпадение на смоченную поверхность при малых  $Re_d$

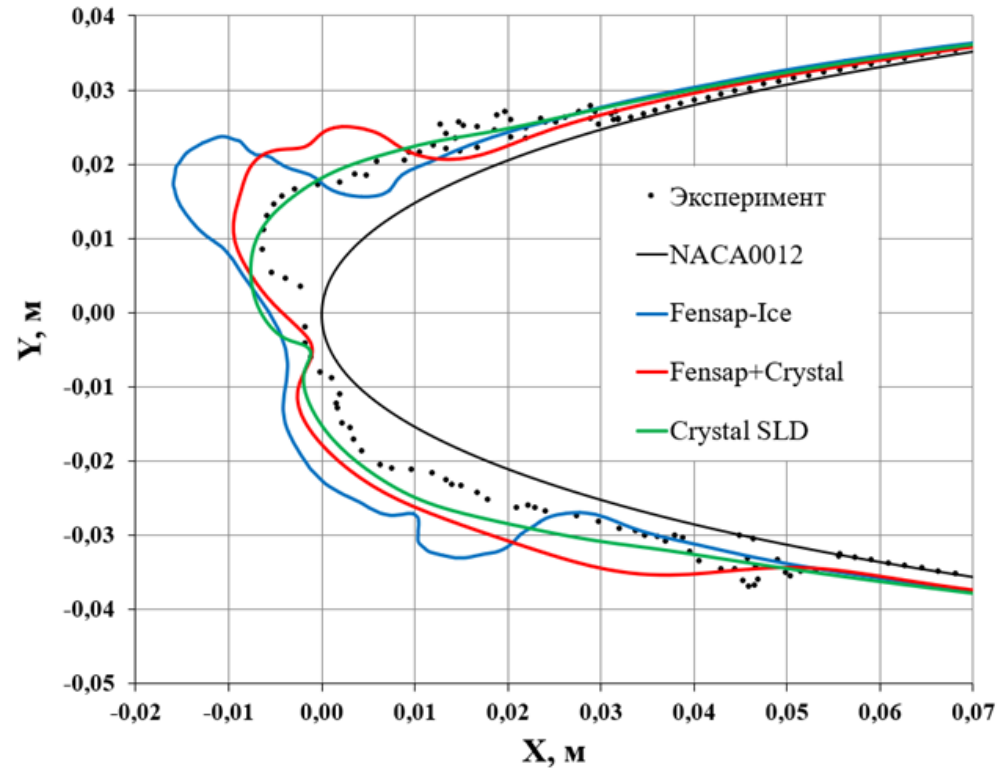
Модель Трухильо позволяет моделировать выпадение на сухие поверхности при повышенных  $Re_d$

	Саменфинк, V=100 м/с h пленки=100мкм
	Трухильо V=100м/с
	Саменфинк, V=100 м/с h пленки=50мкм
	Саменфинк, V=100 м/с h пленки=10мкм
	Саменфинк. V=100 м/с h пленки=300мкм



# Валидация модели SLD для режима glaze ice

Результаты расчёта по обновлённой модели SLD, режим №6, glaze ice



№ режима	LWC, г/м <sup>3</sup>	MVD, мкм	OAT, °C	Высота, м	Скорость, м/с	Угол атаки, °	Продолжительность, мин
6	0,3	104	-10	0	163	2	7,5

## Выводы

1. Предложена и реализована в ПМ «Кристалл» модель расчёта обледенения в условиях крупных переохлаждённых капель SLD.
2. Выполнена верификация полученных данных на результатах расчёта ПК Fensap-Ice, а также, валидация на результатах экспериментов, выполненных в условиях SLD. Предложенная программа, использующая модель SLD, позволила смоделировать ледяной нарост рогаобразной формы, характерный для режима “glaze ice”, при этом полученная форма ледяного нароста более соответствует экспериментальным данным по толщине льда, локализации “рогов”, толщине льда в районе передней критической точки. Это достигается путём более корректного моделирования разбрызгивания капель предусматривающего увеличение уноса во внешний воздушный поток части воды, выпадающей на поверхность.
3. Толщина льда в области “рогов”, полученная в коммерческом ПК Fensap-Ice, на 12 мм превышает экспериментальные значения, в то время как предложенная модель даёт погрешность порядка  $\pm 1$  мм.
4. В районе передней критической точки предложенная программа даёт точное значение толщины льда, в то время как расчёты по коммерческому ПК Fensap-Ice дают завышенные на 3 мм величины толщины льда.
5. Некоторым недостатком предложенной программы является повышенная (на 3-6 мм) относительно экспериментальных значений толщина льда в обе стороны от передней критической точки. Это свидетельствует о повышенном растекании плёнки воды связано в указанной области, то, по-видимому, связано с пониженной величиной коэффициента теплоотдачи в указанной области.
6. В дальнейшем рекомендуется выполнение доработки программы расчёта коэффициента теплоотдачи, однако, несмотря на данный недостаток, предложенная программа даёт величины толщин льда более близкие к экспериментальным значениям по сравнению с ПК Fensap-Ice.

## Расчёт процесса обледенения в атмосферных условиях ледяных кристаллов



# Риски условий ледяных кристаллов

Падение мощности двигателя, как следствие: помпаж, остановка двигателя, срыв пламени.

Повреждения лопаток – загиб кромки, отрывы.

Обледенение может встречаться глубоко в двигателе, где температура поверхностей выше точки замерзания.

Современные средства установленные на самолёте (например, локаторы), не позволяют надёжно определить атмосферные зоны повышенной концентрации ледяных кристаллов

## Инциденты с самолётами В-787-8 \*, \*\*

- Неконтролируемая потеря тяги.
- Повреждения лопаток компрессора

## Результат

- Запрет эксплуатации В-747-8 и В-787 в зонах умеренного и сильного обледенения;
- Обход зон обледенения на расстоянии 93 км или снижение менее чем на 9 км;
- Замена В-787 на В-767 (двигатель CF6) на «опасных» линиях



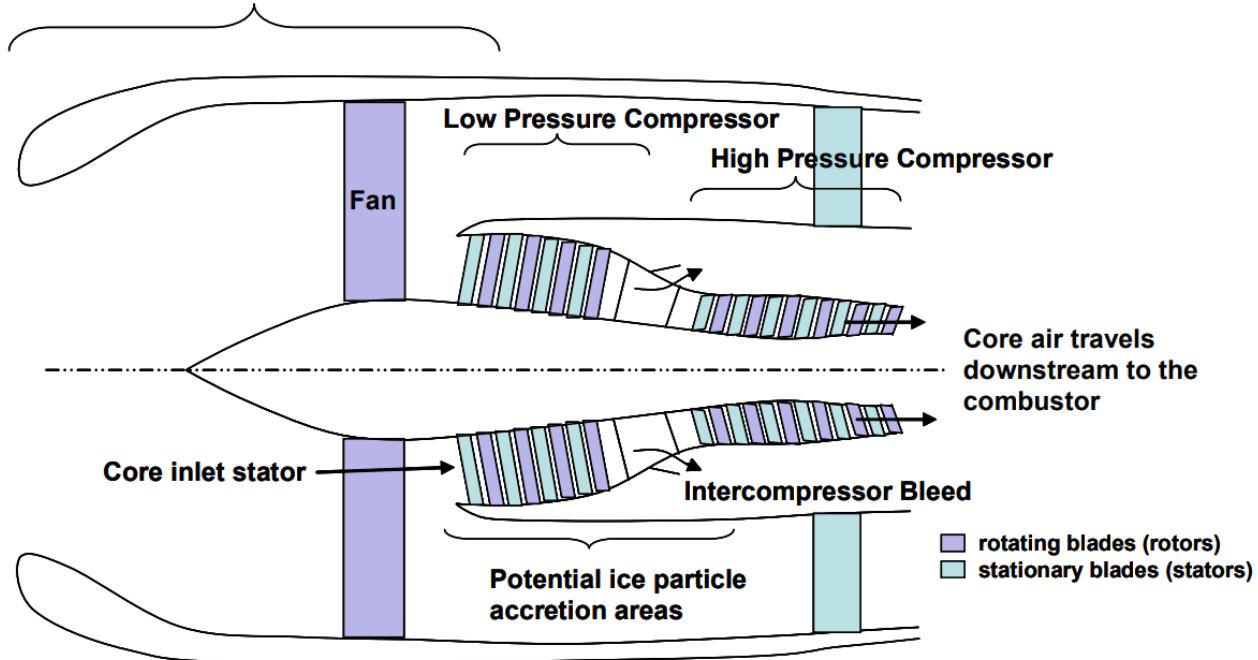
Ограничения сняты после доработок в конструкции и программном обеспечении

\*Jeanne G. Mason, J. Walter Strapp, Philip Chow. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9 - 12 January 2006, Reno, Nevada

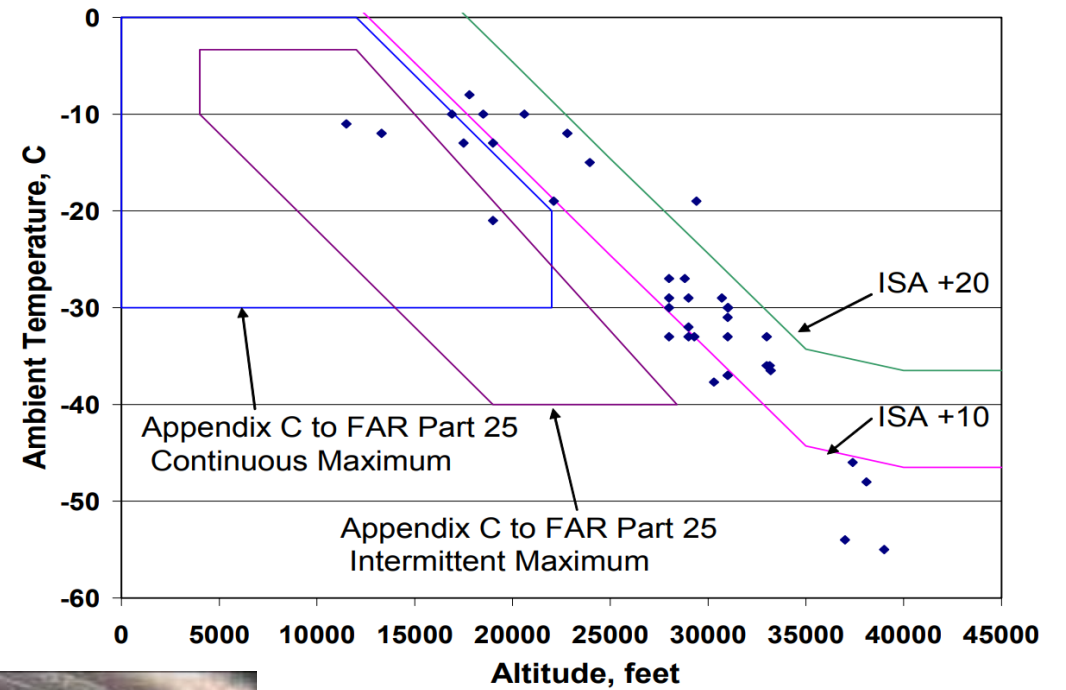
\*\* Jeanne Mason. The Ice Crystal Weather Threat to Engines, Boeing Commercial Airplanes, 2007.

# Зоны потенциального нарастания льда при различных типах обледенения

Supercooled liquid water accretion areas  
(inlet, spinner, fan and first stages of the core)



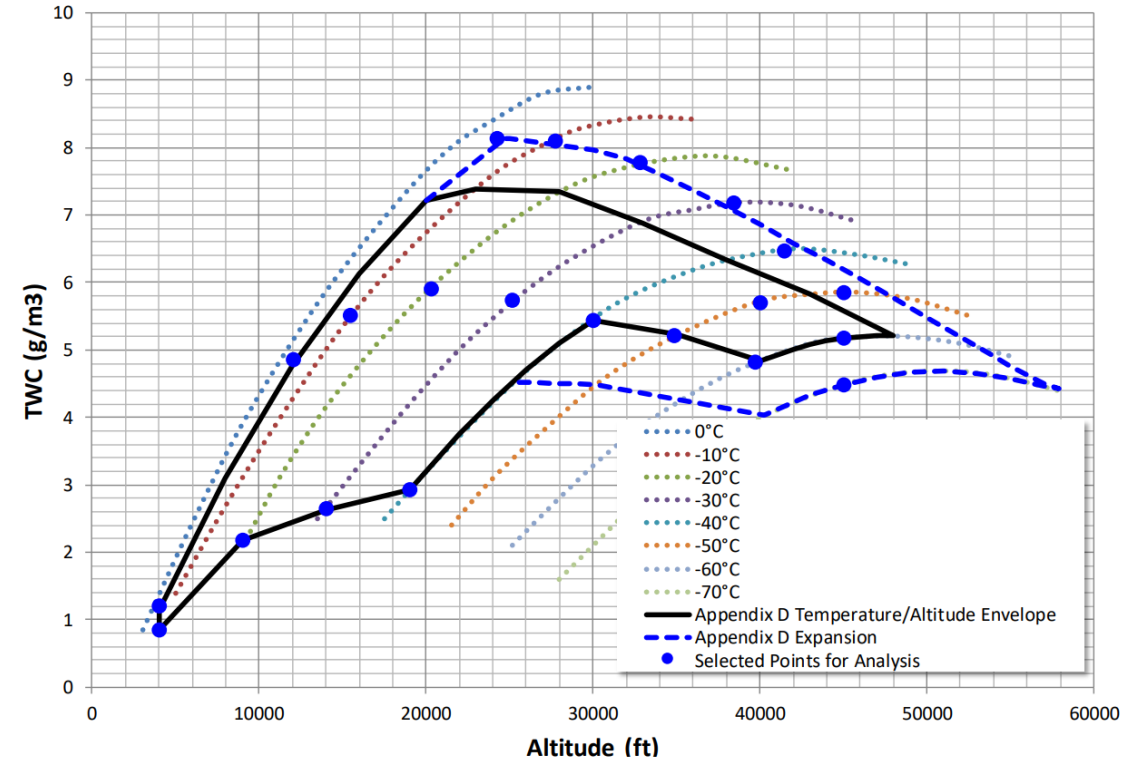
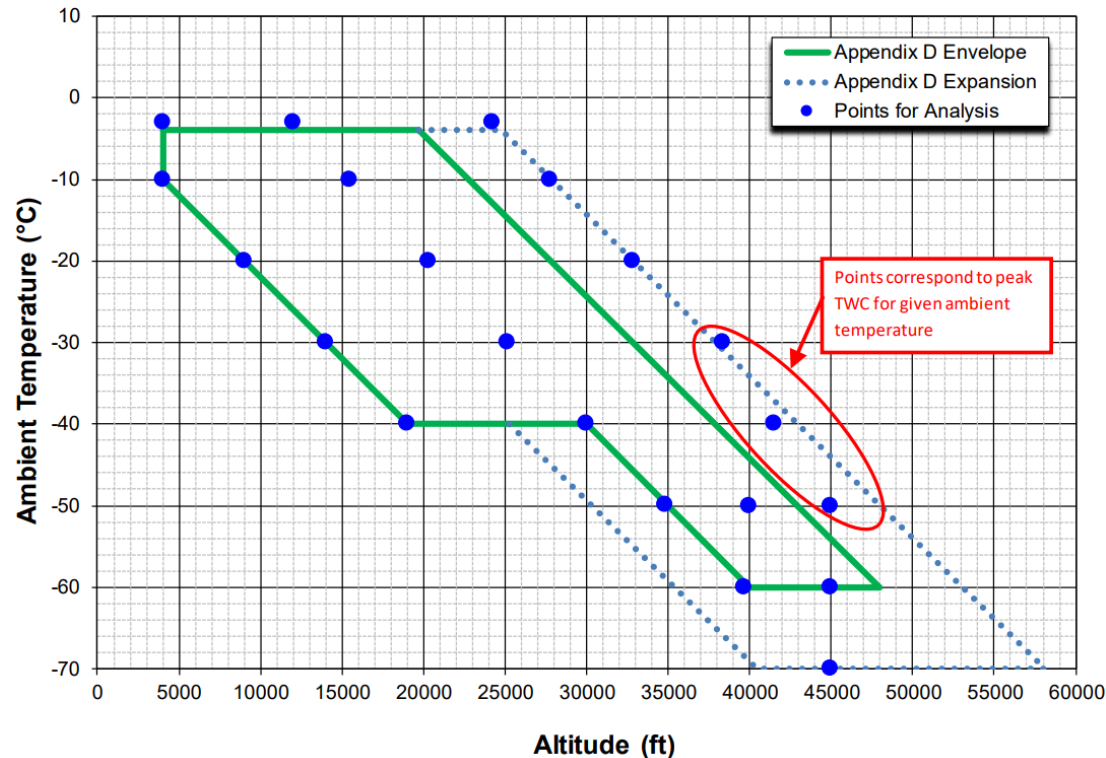
Атмосферные условия, в которых проявлялось влияние ЛК на двигатель



Повреждения лопаток компрессора двигателя

\*Jeanne G. Mason, J. Walter Strapp, Philip Chow. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9 - 12 January 2006, Reno, Nevada

# Области для выполнения анализов (нормированная и рекомендуемая)



## Выводы:

1. Невозможность охвата всей области обледенения путём стендовых испытаний. Отсутствие стендовой базы и высокая стоимость испытаний.
2. Необходимость использования расчётно-аналитических методов и модельных испытаний наряду со стендовыми и лётными испытаниями

\*AIA/EIWG Subcommittee on Engine Probe Icing: A Process for Evaluating the Performance of Temperature Probes, Combined Temperature and Pressure Probes, and Static Pressure Probes in Icing Conditions. 6 October 2017.

# Алгоритм обеспечения эффективности защиты от воздействия ледяных кристаллов

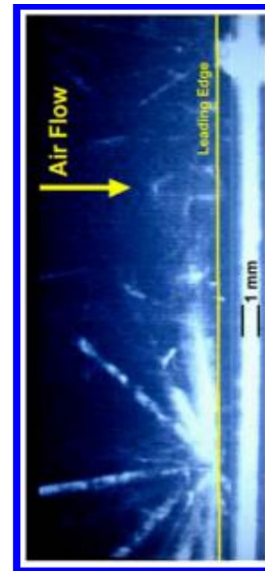
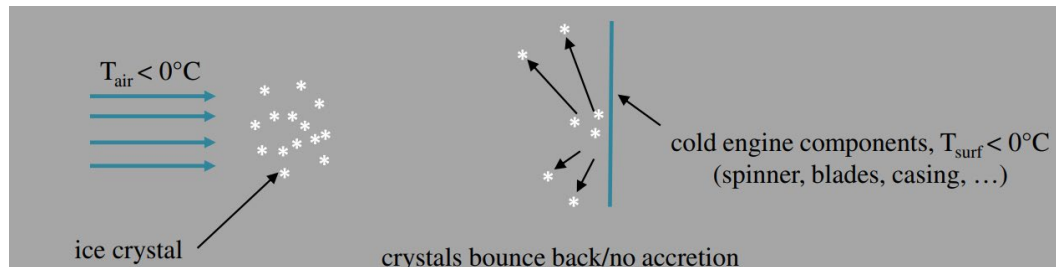
- Расчётно-аналитическое исследование с целью выявления уязвимости двигателя и определения критических точек. Валидация моделей на имеющемся экспериментальном материале.
- Оценка критичности воздействия и необходимости разработки дополнительных методов защиты от обледенения.
- Разработка дополнительных методов защиты и внедрение их на двигателе (в случае необходимости).
- Разработка методов подтверждения эффективности ПОС:
  - расчётно-аналитические,
  - модельные испытания,
  - стендовые испытания,
  - лётные испытания.
- Выполнение подтверждения с использованием выбранного метода или комбинации методов.
- Дополнительная валидация модели и дополнительная проверка эффективности во всей области эксплуатации.
- Дополнительная доработка эффективности ПОС (в случае необходимости).

# Особенности формирования льда в условиях ледяных кристаллов

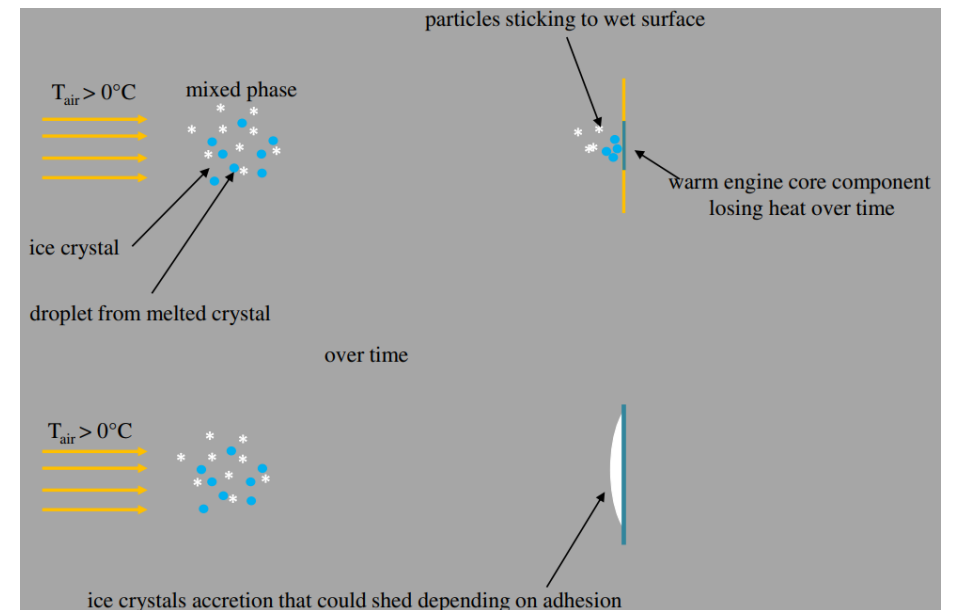
## Теплообмен между частицами, поверхностями двигателя и воздушным потоком

Моделирование отскока, прилипания кристаллов и эрозии льда с использованием корреляционных зависимостей, полученных экспериментальным путём

- Отскок частицы,
- Дробление частицы,
- Улавливание частицы,
- Эрозия образующегося льда.



### Моделирование охлаждения поверхностей двигателя



## Влияние температуры воздуха и температуры влажного термометра

Процесс льдообразования протекает в диапазоне температур влажного термометра:  **$T_{\text{влажн. термом}} = 0 \div 3,5^{\circ}\text{C}$**  (для сухих кристаллов),

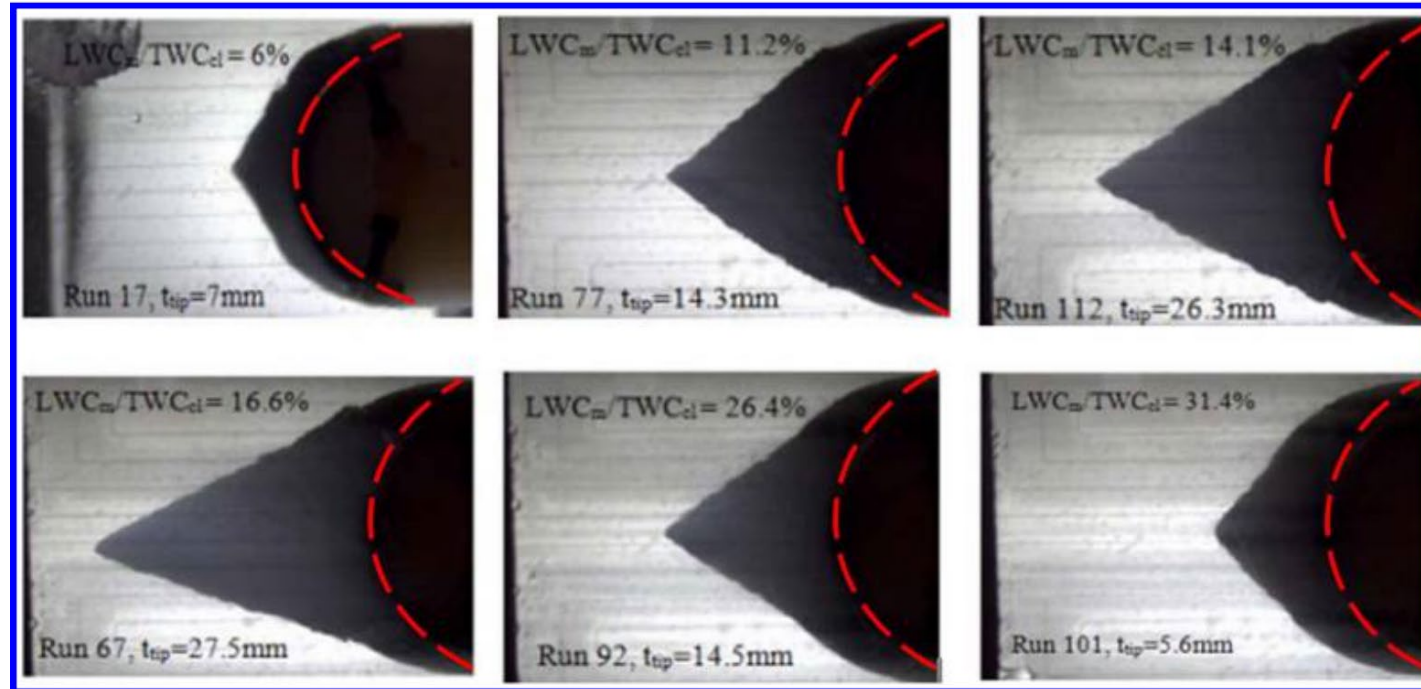
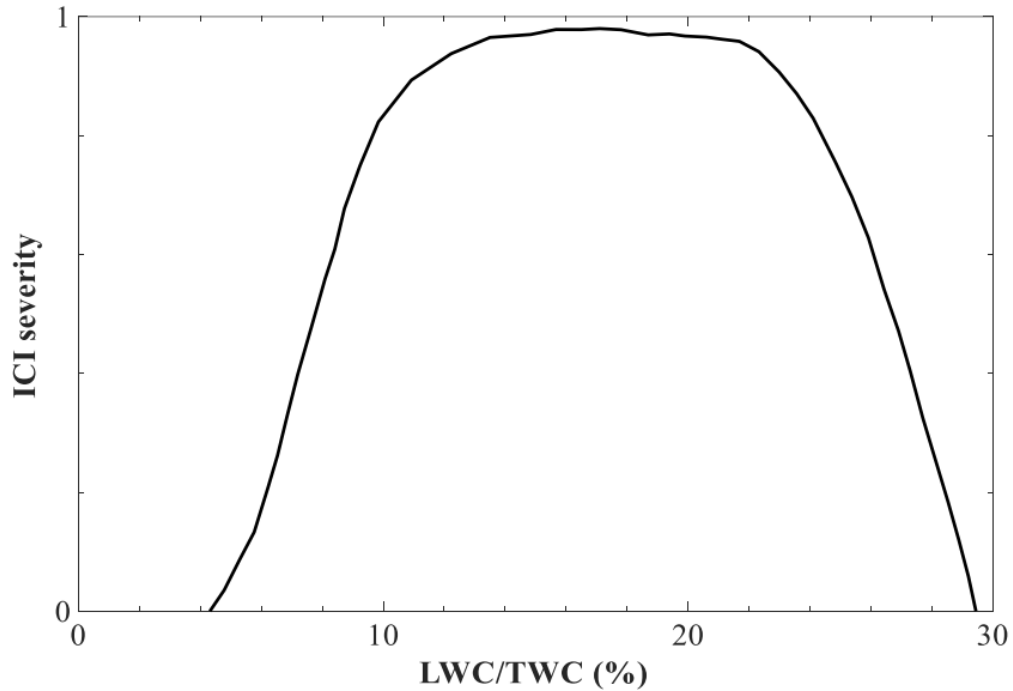
При наличии в потоке жидкой воды возможно льдообразование при  **$T_{\text{влажн. термом}} = 0^{\circ}\text{C}$**

На теплообменные процессы, протекающие на поверхности частицы в смешанной фазе, температура влажного термометра оказывает большее влияние, чем температура воздушного потока.

\* Edem Tetteh, Eric Loth, Martin O. Neuteboom, John Fisher. In-Flight Gas Turbine Engine Icing: Review // AIAA JOURNAL Vol. 60, No. 10, October 2022.

# Особенности формирования льда в условиях ледяных кристаллов

## Влияние соотношения жидкой воды и кристаллов



- степень обледенения в условиях кристаллов зависит от соотношения масс жидкой воды и кристаллов.
- «окно» льдообразования является самым высоким в пределах 10-25%

# Особенности формирования льда в условиях ледяных кристаллов

## Влияние весового содержания воды и кристаллов по отношению к воздуху

Условие возникновения обледенения:  $IWAR$

$$IWAR = \frac{G_{ice}}{G_{air}} = \frac{TWC \cdot Q_{air}}{G_{air}} > 0,002$$

где

$G_{ice}$  - массовый расход кристаллов,

$G_{air}$  - массовый расход воздуха через двигатель,

$TWC$  - полное массовое содержание воды в объёме воздуха,

$Q_{air}$  - объёмный расход воздуха через двигатель,

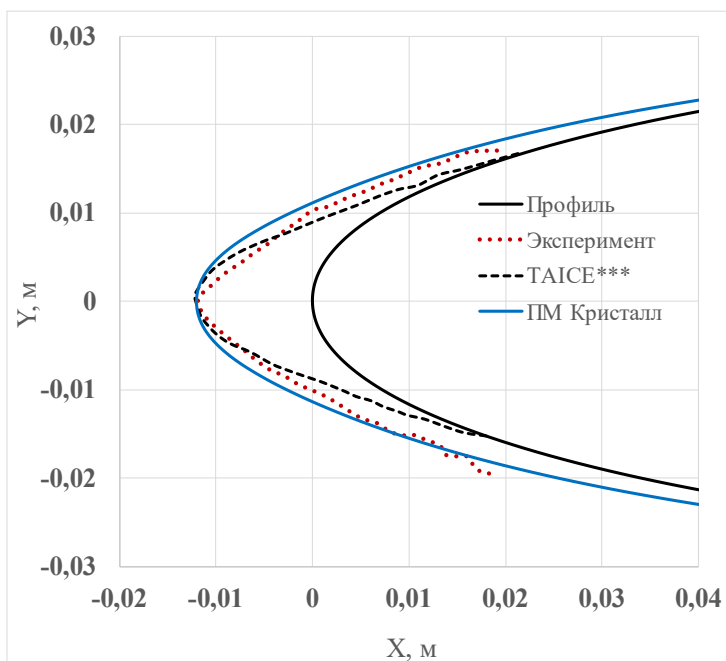
Ниже указанного порогового значения обледенения не наблюдается

# Результаты расчётов по предлагаемой модели

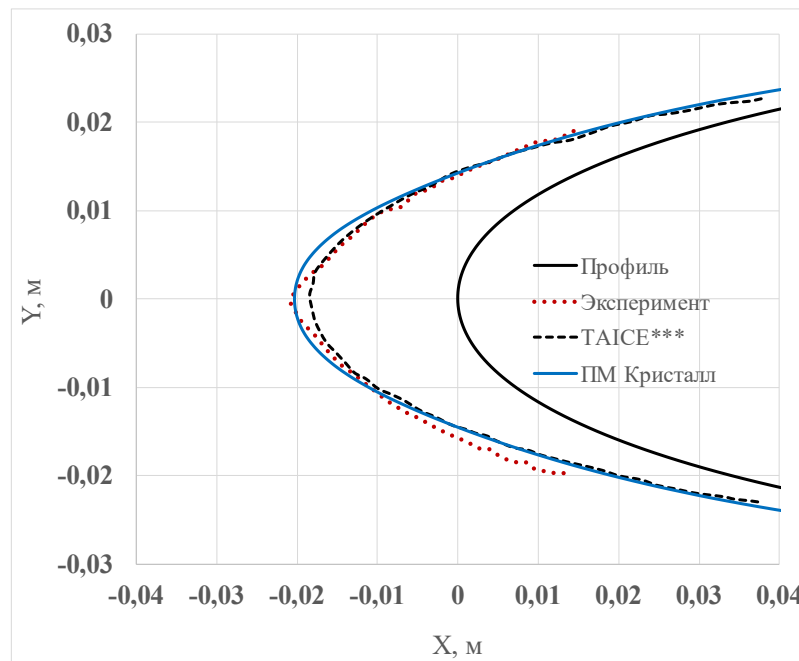
№	U	T	P	IWC	LWC	MVD лед. крист	MVD капли
	м/с	°С	Па	г/м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>	мкм	мкм
1	40	0	101,325	10,6	1.45	130	80
3	40	0	101,325	8,7	3.4	130	80
5	40	0	101,325	3,8	3,4	130	80

профиль NACA 0012, хорда 0.5 м \*, \*\*

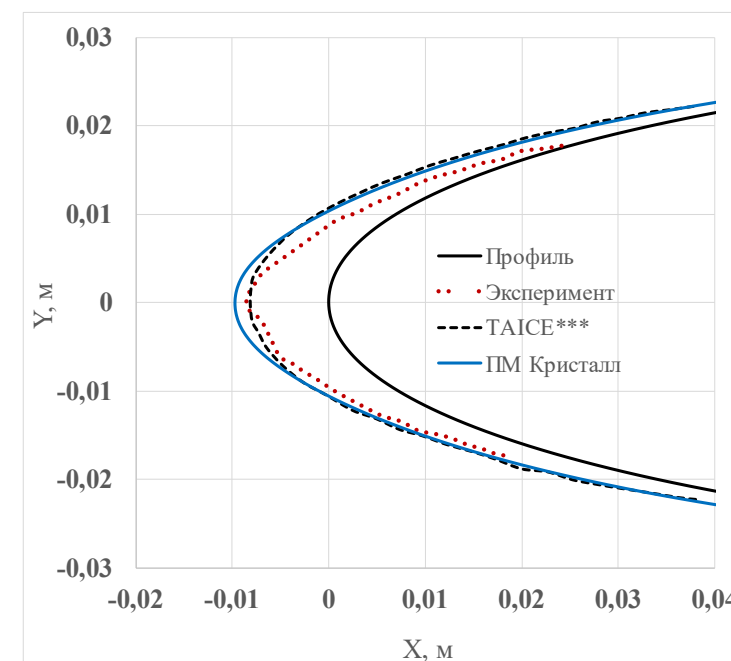
Режим № 1



Режим № 3



Режим № 5



\*Bansmer, S. and Baumert, A. From high altitude clouds to an icing wind tunnel: En route to understand ice crystal icing, 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS), 2017, Milano, Italy

\*\* Baumert, A., Trontine, P., Bansmer, S. and Villedieu, P. Experimental and numerical investigations on aircraft icing at mixed phase icing conditions. Progress in Aerospace Sciences, 2017.

\*\*\* E. Ayan, S. Ogzen, In-Flight Ice Accretion Simulation in Mixed Phase Conditions, Aeronaut. J. 122 (1249) (Mar. 2018) 409–441.

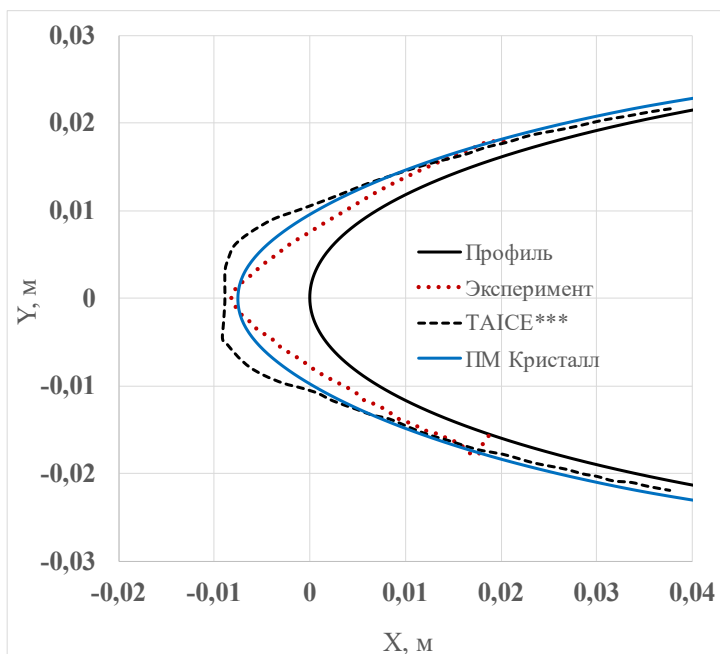


# Результаты расчётов по предлагаемой модели

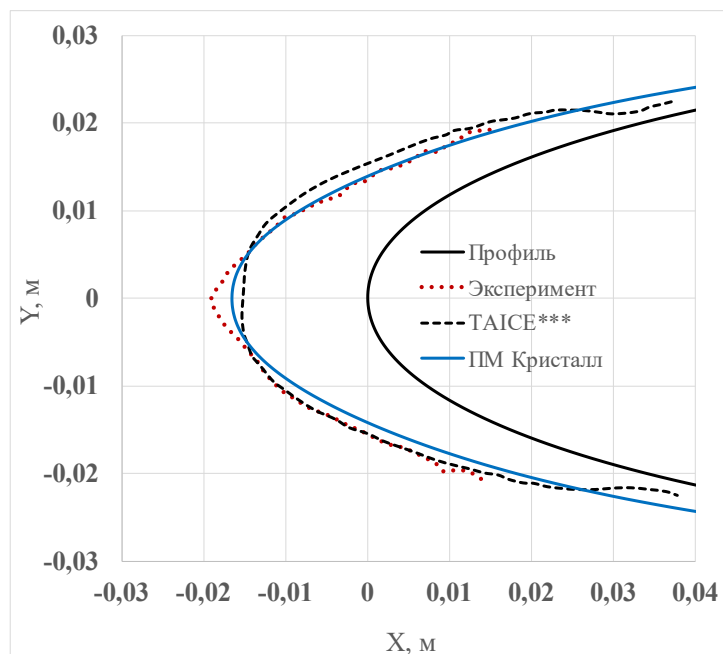
№	U	T	P	IWC	LWC	MVD лед. крист	MVD капли
	м/с	°С	Па	г/м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>	мкм	мкм
8	40	-5	101,325	10,6	1.45	130	80
10	40	-5	101,325	8,7	3.4	130	80
12	40	-5	101,325	3,8	3,4	130	80

профиль NACA 0012, хорда 0.5 м \*, \*\*

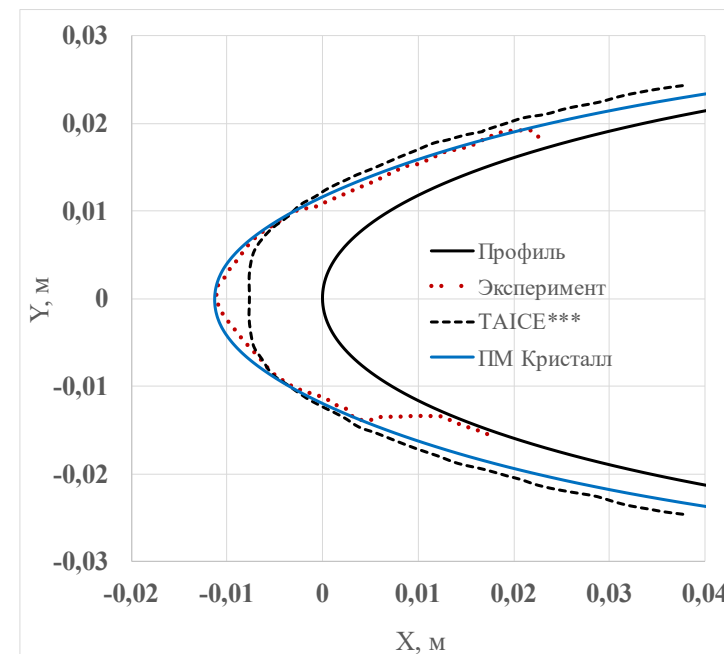
Режим № 8



Режим № 10



Режим № 12



\*Bansmer, S. and Baumert, A. From high altitude clouds to an icing wind tunnel: En route to understand ice crystal icing, 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS), 2017, Milano, Italy

\*\* Baumert, A., Trontine, P., Bansmer, S. and Villedieu, P. Experimental and numerical investigations on aircraft icing at mixed phase icing conditions. Progress in Aerospace Sciences, 2017.

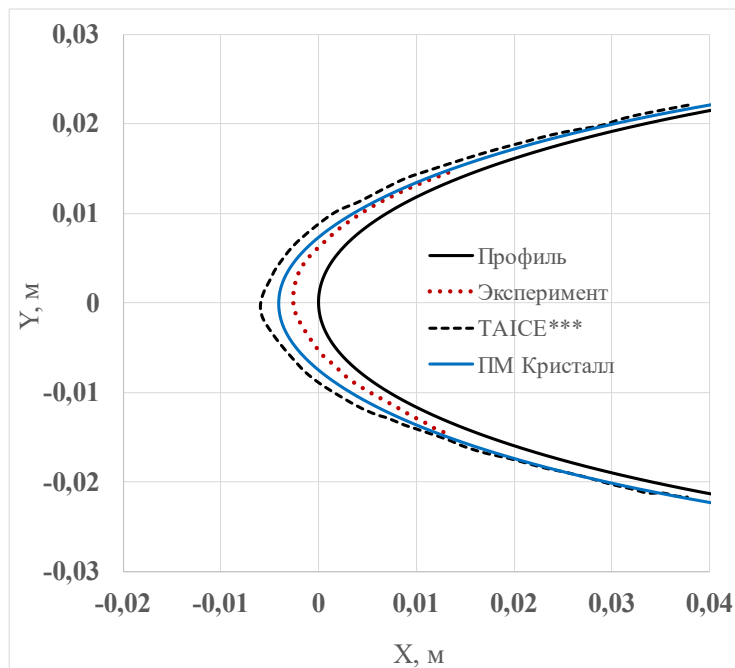
\*\*\* E. Ayan, S. Ogzen, In-Flight Ice Accretion Simulation in Mixed Phase Conditions, Aeronaut. J. 122 (1249) (Mar. 2018) 409–441.

# Результаты расчётов по предлагаемой модели

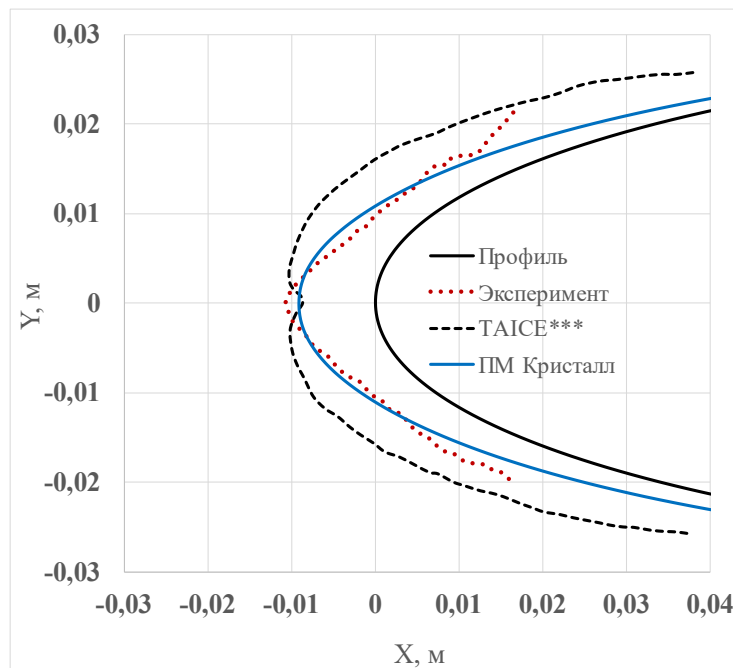
№	U	T	P	IWC	LWC	MVD лед. крист	MVD капли
	м/с	°C	Па	г/м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>	мкм	мкм
15	40	-15	101,325	10,6	1.45	130	80
16	40	-15	101,325	8,7	3.4	130	80

профиль NACA 0012, хорда 0.5 м \*, \*\*

Режим № 15



Режим № 16



\*Bansmer, S. and Baumert, A. From high altitude clouds to an icing wind tunnel: En route to understand ice crystal icing, 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS), 2017, Milano, Italy

\*\* Baumert, A., Trontine, P., Bansmer, S. and Villedieu, P. Experimental and numerical investigations on aircraft icing at mixed phase icing conditions. Progress in Aerospace Sciences, 2017.

\*\*\* E. Ayan, S. Ogzen, In-Flight Ice Accretion Simulation in Mixed Phase Conditions, Aeronaut. J. 122 (1249) (Mar. 2018) 409–441.

## Выводы

Представлено новые функциональные возможности программного модуля (ПМ) «Кристалл», предназначенного для расчёта процесса обледенения элементов авиационной техники в трёхмерном приближении. Новые функциональные возможности ПМ «Кристалл» следующие:

1. Доработана модель обледенения в условиях крупных переохлаждённых капель,
2. Доработана модель обледенения в условиях ледяных кристаллов, и позволяющая выполнять расчёты процесса обледенения при положительных температурах потока.
3. Выполненное сравнение с экспериментальными данными и с результатами, полученными с использованием иных расчётных комплексов (Ansys Fensap-Ice, FlowVision), показало преимущества разработанного ПМ в отношении предсказания массы, формы, локализации ледяных наростов и возможности их самопроизвольного удаления с поверхности объекта.



Центральный институт авиационного  
моторостроения имени П.И. Баранова

**Спасибо за внимание!**

111116, Россия, Москва,  
ул. Авиамоторная, 2  
[www.ciam.ru](http://www.ciam.ru)

**Тел.:** +7 (499) 763 57 47  
**E-mail:** [info@ciam.ru](mailto:info@ciam.ru)