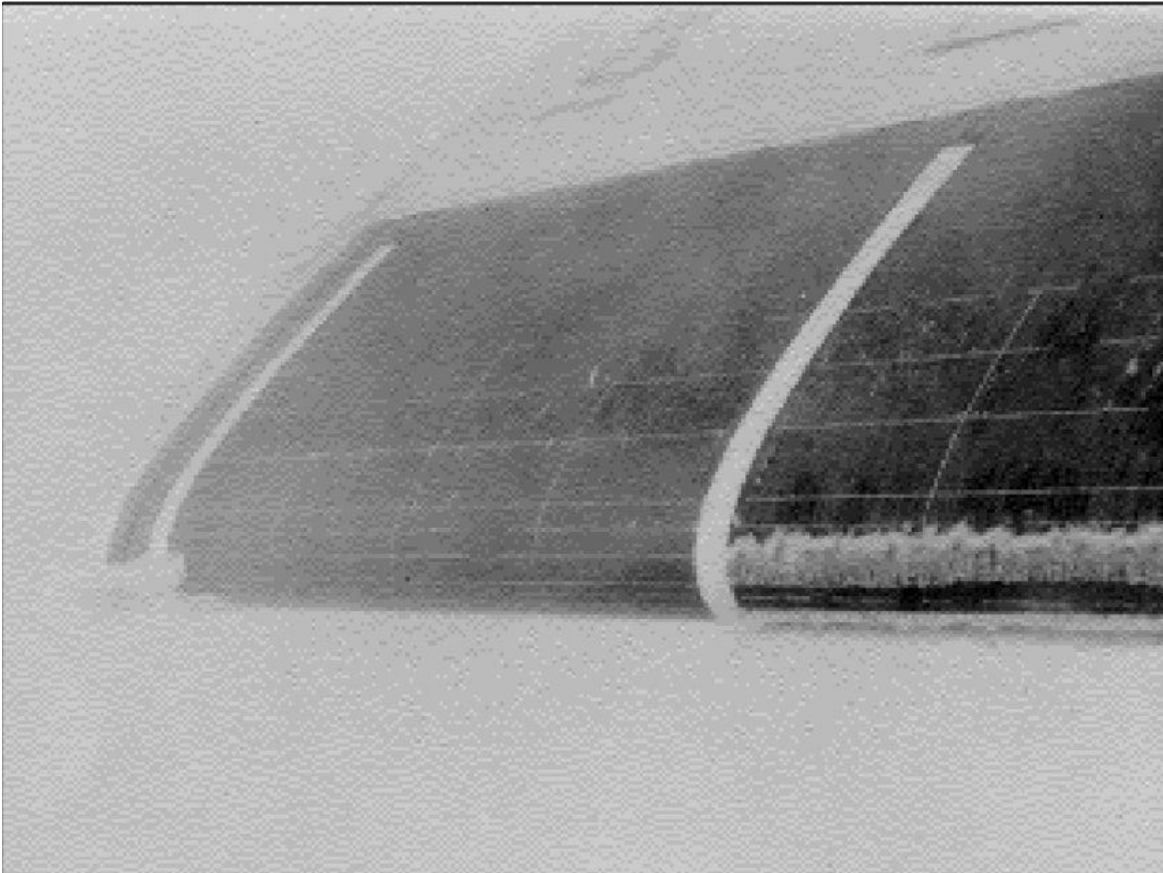


IceVision - численное моделирование процессов обледенения самолётов



А.А. Аксёнов, П.М. Бывальцев
(ООО «ТЕСИС», г. Москва),
С.В. Жлуктов, К.Э. Сорокин
(ООО «ВИП» г. Москва),
А.А. Бабулин, В.И. Шевяков
(Филиал ПАО «Корпорация
«Иркут», «Региональные
самолёты», г. Москва)

Аэродинамические характеристики ВС в условиях обледенения

Причина обледенения поверхности ВС в полёте – наличие в воздухе переохлаждённых капель воды и ледяных кристаллов.

Обледенение несущих поверхностей – снижение несущих свойств и эффективности органов управления, увеличение сопротивления. Обледенение воздухозаборника двигателя – нарушение работы двигателя из-за неравномерности потока на входе или попадания кусков льда в двигатель.



Требования по обледенению – правила летной годности CS-25, приложения С и О

Согласно CS-25, необходимо исследовать следующие режимы отложения льда:

- «обледенение на взлёте» - происходящее между отрывом от земли и высотой 400 ft (122 м);
- «обледенение в конце взлёта» («лёд набора высоты») – между высотой 400 и 1500 ft;
- «обледенение при полёте по маршруту»;
- «обледенение при полёте в зоне ожидания»;
- «обледенение при посадке»;

При демонстрации соответствия сертификационным требованиям для какого-либо этапа полёта соискателем могут быть выбраны отложения льда, наиболее критичные для данного этапа.

Приложения С и О к CS-25

Приложение С:

Размер жидких капель определяется значением среднеарифметического диаметра (MAD) в соответствии с рекомендациями Авиационных правил равным:

- 20 мкм (*мелкие капли*)

Приложение О (Европейские требования, пока не гармонизированы с международными)

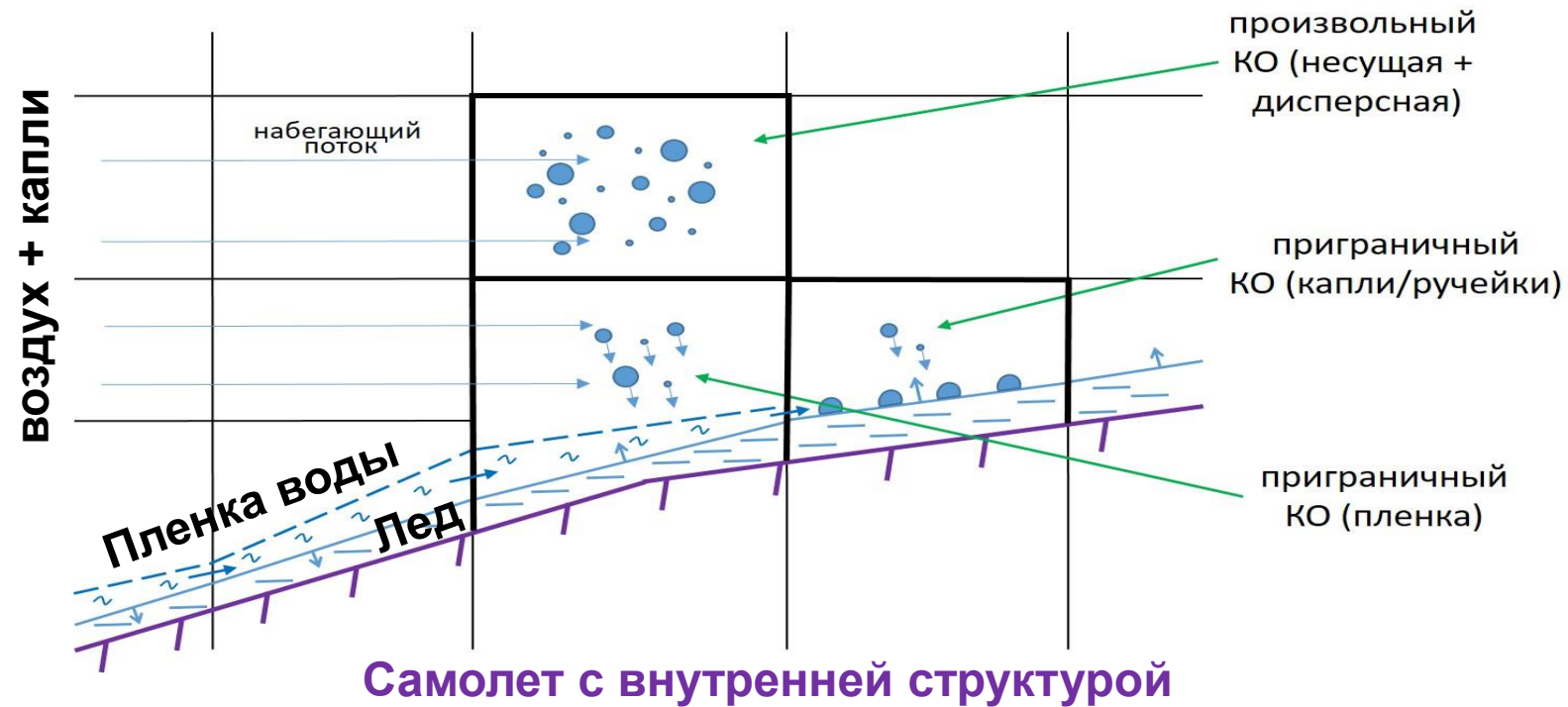
Размер жидких капель здесь определяется значением среднего объемного диаметра (MVD) и имеет порядок

- 106 мкм для условий крупной мороси
- 526 мкм для условий крупного дождя

- **Требования накладывают широкий диапазон параметров (водность, температура, скорость самолета и время полета)**
- **Задача – выбрать для конкретного самолета параметры, при которых обледенение критическое с точки зрения:**
 - **C_x , C_y – аэродинамических характеристик**
 - **Массы льда**
 - **Экспертной оценки**
- **Проведение расчетов с помощью валидированных программ – получение форм льда.**
- **Сертификационные полеты с имитаторами форм льда**

Моделирование обледенения

Физическая модель процесса обледенения



Современное состояние моделей обледенения

- **2-фазный поток: расчет в приближении Эйлера**
- **Инерционное осаждение капель**
- **Теплообмен на контактной границе**
- **Модель движения пленки воды**
- **Теплообмен во льду и корпусе самолета**
- **Расчетная область – только воздушная фаза, расчетная сетка отслеживает положение льда, лед задается как модель теплообмена между воздухом и корпусом**

Современное состояние ПО

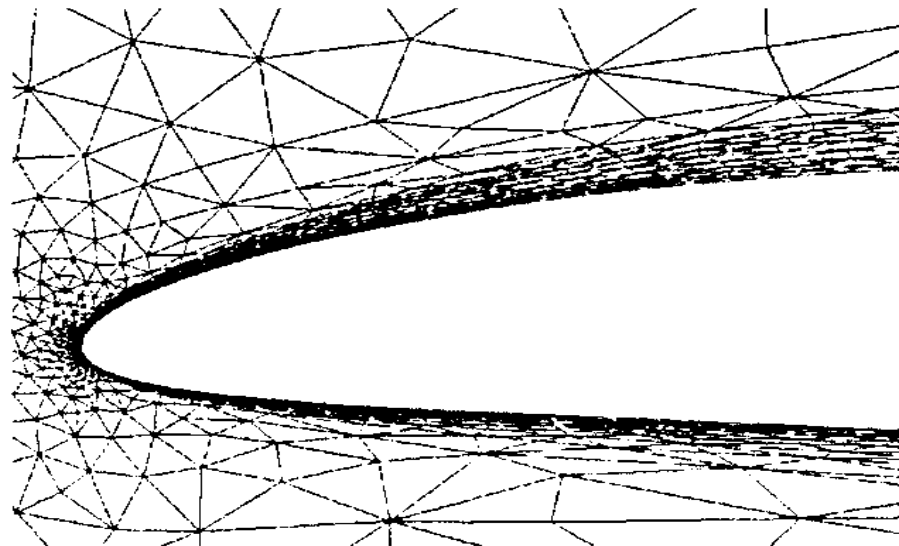
Коммерческий зарубежный софт

- LEWICE (2D)
- ANSYS FENSAP-ICE (3D)
- Star-CCM+

Авторские программы

- Левченко В.С.(ЦАГИ)
- Алексеенко С., Приходько А.
(Днепропетровский национальный университет)

- Лагранжева сетка, отслеживающая лед=> При сложных формах льда генератор расчетной сетки работает нестабильно
- Простые модели теплообмена во льду (рост льда = изменение геометрии крыла)
- Нет возможности посчитать работу противообледенительной системы



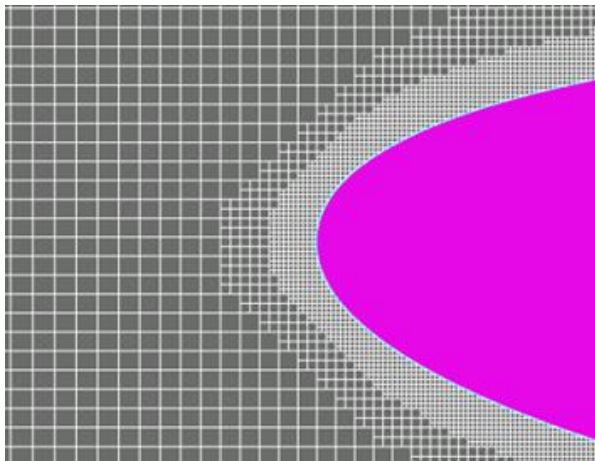
Модель IceVision ПК FlowVision

МОДЕЛЬ обледенения Ice-Vision

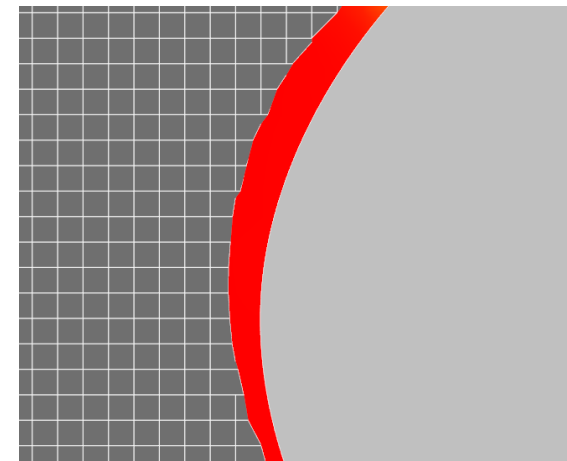
- ❑ Три фазы :
 - воздух с каплями
 - лед
 - структура самолета
- ❑ Своя временная шкала:
 - Воздух : секунды
 - Пленка / лед : минуты
- ❑ Мокрый режим: температура капель ~ 0 до -10 (с°)
- ❑ Сухой режим: температура капель ~ -10 до -20 (с°)
- ❑ Рост льда: метод VOF

Особенности модели IceVision

Автоматический генератор сетки
SGGR для любых геометрий



Моделирование фазы льда
при помощи метода VOF

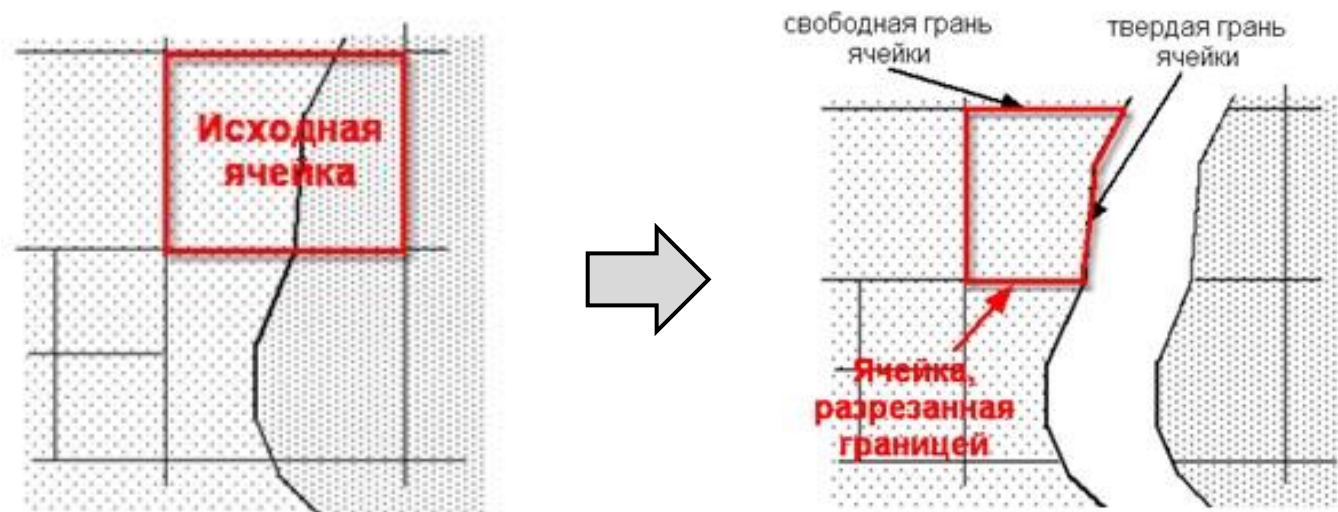


Позволяет решать задачи:

- Обледенения 3D модели самолета
- Генерации произвольной формы льда

Метод генерации сетки SGGR

- SGGR – подсеточное разрешение геометрии
- Метод конечных объемов
- Второй порядок точности
- Локальная динамическая адаптация сетки



Модель IceVision

**Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics, 1981, vol. 39, pp. 201-225*

Модель VOF – расчет свободной поверхности

VoF – относительный объем жидкости в ячейке

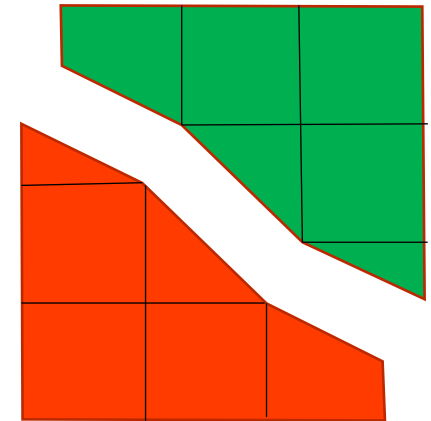
- При $\text{VoF} < \text{eps}$ ячейка – газовая (GAS)
- При $\text{VoF} > 1 - \text{eps}$ ячейка – жидкостная (FLUID)
- При $\text{eps} < \text{VoF} < 1 - \text{eps}$ ячейка – поверхностная (SURF)

$$\text{eps} = 10^{-2} \dots 10^{-5}$$

Реконструкция

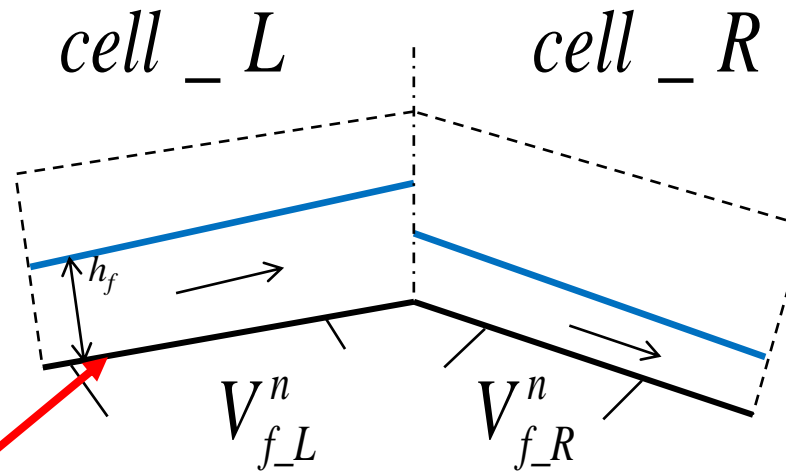
0.25	0	0
1 ^u	0.5	0
1	1	0.75

Генерация сетки



Метод VOF в FlowVision сильно отличается от оригинального *Hirt's VOF!

Модель пленки



Твердая поверхность либо
поверхность льда,
реконструированная методом
VOF

Поток пленки воды (UPWIND)

$$F_{side} = \begin{cases} (V_{f-L}^n \cdot h_{f-L} \cdot L_{side}) / \Omega_{cell}, & V_{f-L}^n > 0 \\ (V_{f-R}^n \cdot h_{f-R} \cdot L_{side}) / \Omega_{cell}, & V_{f-R}^n > 0 \end{cases}$$

иначе: СРЫВ пленки

Модель IceVision

Уравнения	Воздух	Капли воды	Лед	Пленка воды
Уравнение движения	Навье-Стокса	+	-	+
Уравнение энергии	+	+	+	+
Уравнение массопереноса	Концентрация паров	Испарение-конденсация	Испарение-конденсация	Испарение-конденсация
Турбулентность	RANS	+	+	+

Модель IceVision: Движение воздуха

Закон сохранения массы

$$\phi_c = 1 - \phi_d, \quad \frac{\partial(\phi_c \rho_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c) = 0$$

Учет вытеснения каплями

Закон сохранения импульса

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c \otimes \mathbf{V}_c) = -\phi_c \nabla p + \nabla \cdot (\phi_c \hat{\boldsymbol{\tau}}) - Q_V$$

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = (\mu + \mu_t) \left(2\hat{S} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}_c) \hat{\mathbf{I}} \right), \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_{c,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{c,j}}{\partial x_i} \right)$$

Обмен импульсом с каплями

Закон сохранения энергии

$$h_{subst}(T) = h_{subst,0}(298.15) + \int_{298.15}^T C_{p,subst}(T) dT$$

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c h_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c h_c) = -\nabla \cdot (\phi_c J_q^{eff}) + \frac{d}{dt} (\phi_c p) + \phi_c (\hat{\boldsymbol{\tau}} : \hat{S} + \rho \varepsilon) - Q_T$$

$$J_q^{eff} = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h_c + h_c \left(\frac{\lambda}{C_p} (1 - Le) + \frac{\mu_t}{Pr_t} (1 - Le_t) \right)$$

Теплообмен с каплями

Турбулентность

Модели RANS – к-е, SA, SST + пристеночные функции

Модель IceVision: Движение капель воды

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{V}_d n_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla n_d \right) = 0$$

n_d - спектр частиц по размерам

Закон сохранения импульса

$$\frac{\partial (n_d V_d)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\left(\mathbf{V}_d n_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla n_d \right) \otimes \mathbf{V}_d \right) = -n_d \frac{1}{\rho_d} \nabla p + \frac{1}{M_d} Q_V$$

← **Обмен импульсом с воздухом**

$$Q_V = n_d \rho_c \frac{1}{2} C_D \pi d^2 |\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d); C_D = \frac{21.12}{Re_d} + 6.3 Re_d^{-0.5} + 0.25$$

Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial (n_d T_d)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{V}_d n_d T_d - \frac{v_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla (n_d T_d) \right) = \frac{1}{C_{p,d}(T_d) M_d} Q_T$$

← **Теплообмен с воздухом**

$$Q_T = n_d \pi d^2 Nu_d \frac{\lambda_c}{d} (T_c - T_d); Nu_d = 2 + 0.55 Re_d^{1/2} Pr_c^{1/3}$$

Модель IceVision: Рост льда

**Закон сохранения
массы:**

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \dot{m}_{ice}$$

**Закон
сохранения
энергии**

$$\rho_I \frac{\partial h_I}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\lambda_I}{C_{p,I}} \nabla h_I \right)$$

**Тепловой
баланс на
поверхности
льда *)**

$$\begin{aligned} & (h_d - h_f) \dot{m}_d + (\lambda_{gas} + \lambda_{gas,t}) \frac{T_{c,gas} - T_{f,0}}{y_{c,gas}} - \dot{m}_{evap(subl)} \Delta h_{evap} \\ & = \lambda_{ice} \frac{T_{f,0} - T_{c,ice}}{y_{c,ice}} - \dot{m}_{ice} \Delta h_{fusion} \end{aligned}$$

*) Messinger B.L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed // J. of the Aeron. Sciences, 1953, vol. 20, No. 1, pp. 29-42

Модель IceVision: Движение пленки воды

Приближения *) :

- пленка имеет однородную температуру, равную температуре плавления льда
- пленка находится в квазиравновесном состоянии

Закон сохранения
массы

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta\tau_f} + \sum_{sides} F_{side} = \frac{S_{base}}{\Omega_{cell}\rho_d} \dot{m}_{film}$$

- выпадение воды из воздуха $\dot{m}_d = \rho_d \mathbf{V}_d^n S_{base}$
- сохранение массы пленки $\dot{m}_{film} = \dot{m}_d - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{evap}$
- скорость движения пленки $\mathbf{V}_f = \frac{h_f}{2\mu_d} \boldsymbol{\tau}_w$

**Bourgault Y., Beaugendre H., Habashi W.G. Development of a Shallow-Water Icing Model in FENSAP-ICE // Journal Of Aircraft, 2000, vol. 37, No. 4, pp.640-646*

Модель IceVision: Модель испарения пленки и возгонки льда

- Модель испарения *)**

$$\dot{m}_{evap(subl)} = St_{vap} \rho_c |V_c| \frac{(Y_{vap,w} - Y_{vap,c})}{(1 - Y_{vap,w})}$$

$$St = \left(\frac{C_f}{2} \right) / \left(Sc_t + \sqrt{\frac{C_f}{2}} \frac{Sc^{0,8}}{1,92} \left[\frac{u_\tau \cdot a_h \cdot h_s}{\nu_{gas,c}} \right]^{0,45} \right) \quad \text{где } Sc = \frac{\mu}{\rho D}; \quad Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$$

$$Y_{vap,w} = \frac{\rho_{vap,w}}{\rho_w} = \frac{p_{vap,sat}(T_w) m_{vap}}{p m_w} \quad \text{Молярная концентрация пара}$$

**) Tran P., Brahim M.T., Tezok F., Paraschivolu I. Numerical simulation of ice accretion on multiple element configurations // AIAA Meeting, 1996, AIAA Paper 96-0869*

- Учет шероховатости**

$$\mu_t \rightarrow \mu_{eff} = \mu + a_h \rho u_\tau h_s$$

h_s - песчаная шероховатость по эмпирической модели **)

$a_h = F(y_{max}^+, T_{total}, V^\infty, MVD, LWC)$ - функция, подобранная нами эмпирически

***) Shin, Bond. Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil // Symposium on Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows, 1992]*

В чем преимущество IceVision?



- В отличие от Ansys/StarCCM+ и им подобным, IceVision позволяет решать 3D задачи робастно и без сбоев.
- Процесс решения не зависит от формы ледяных наростов – они могут быть любыми
- Нет ограничений на время обледенения. Не нужно подбирать количество итераций решения ур Н-С и деформации крыла
- Есть возможность моделировать процесс подогрева и плавления льда, то есть моделировать ПОС. В недалеком будущем появится расчет прочности льда и его унос при подогреве.
- В Ansys/StarCCM+, чтобы добиться устойчивости счета, приходится заглублять форму льда для гладкой перестройки сетки. В IceVision закругления сетки не требуется. Наоборот, чем мельче сетка, тем лучше.

Немного о терминах

MWD, MAD – средние диаметры капель

LWC – водность – количество г капель в м³ (плотность капель)

Определения MVD и MAD

median volumetric diameter (MVD) - The droplet diameter which divides the total water volume present in the droplet distribution in half, i.e., half the water volume will be in larger drops and half the volume in smaller drops. The value is obtained by actual drop size measurements.

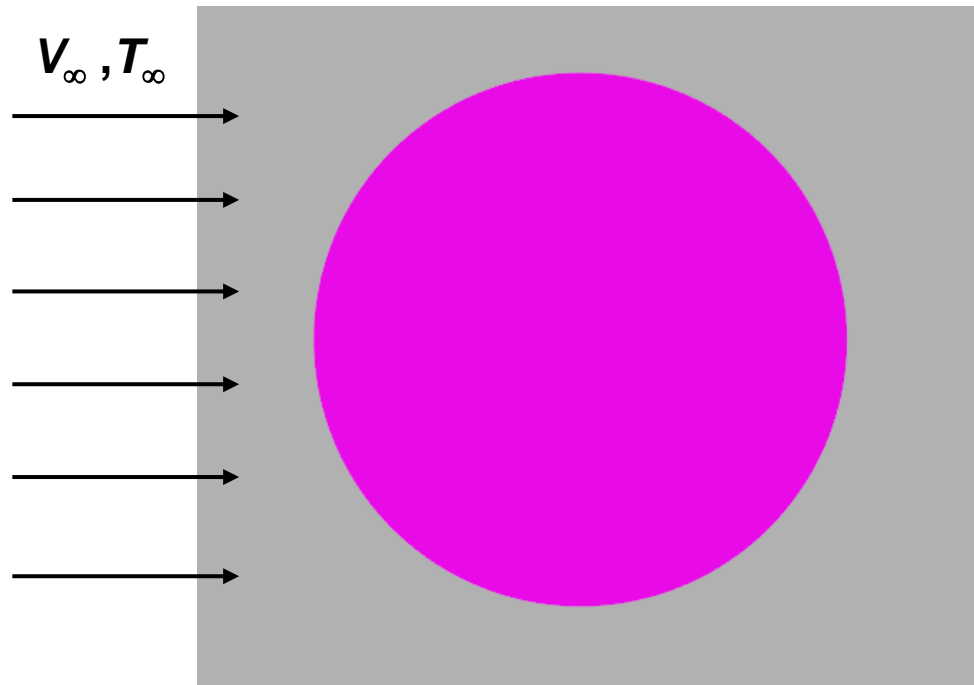
$$\frac{\frac{\pi}{6} \rho_w \sum_{i=1}^K n_i (D_i) D_i^3}{\frac{\pi}{6} \rho_w \sum_{i=1}^N n_i (D_i) D_i^3} = 0.5 \quad \begin{array}{l} D_K = \text{the diameter of group } K, \text{ is equal to the MVD } (D_{MVD}) \\ \rho_w = \text{density of water, } kg/m^3 \end{array}$$

Среднеарифметический диаметр, MAD:

$$MAD = D_{ар} = \frac{\sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} N_i D_i}{\sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} N_i}; \quad \text{где } N_i \text{ -- количество капель диаметром } D_i$$

Валидация IceVision: цилиндр, NACA0012

ЦИЛИНДР: постановка задачи



Объект – цилиндр, обтекается воздухом:

- $T_{\infty} = 253.15 / 265.15$ [K]
- $V_{\infty} = 70$ [m/s]

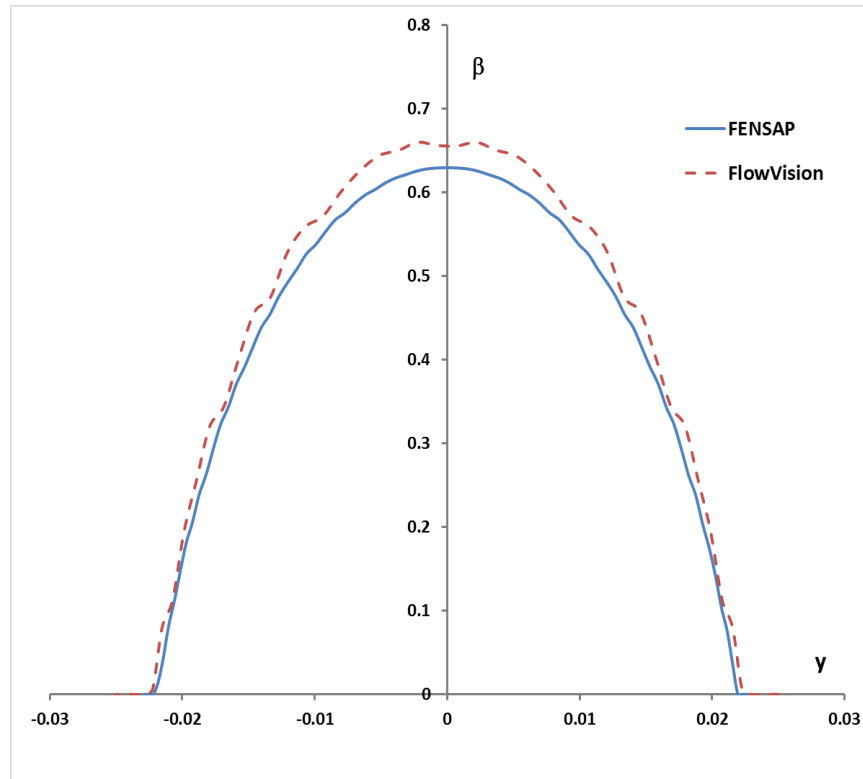
содержащим сферические капли воды:

- $MVD = 20$ [μm]
- $LWC = 0.5$ [g/m^3]

Задача – При заданных условиях выполнить расчет локального коэффициента захвата каплей воды и определить форму ледяного нароста

ВАЛИДАЦИЯ IceVision: ЦИЛИНДР

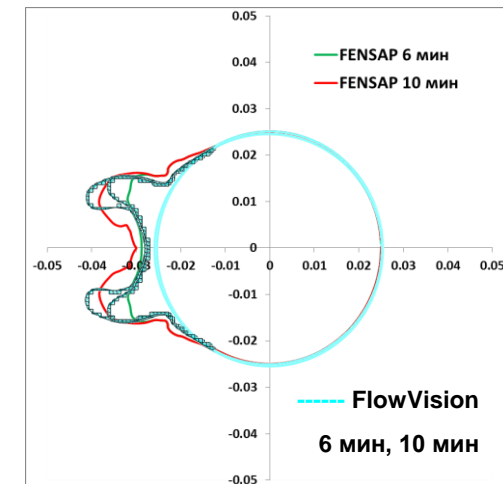
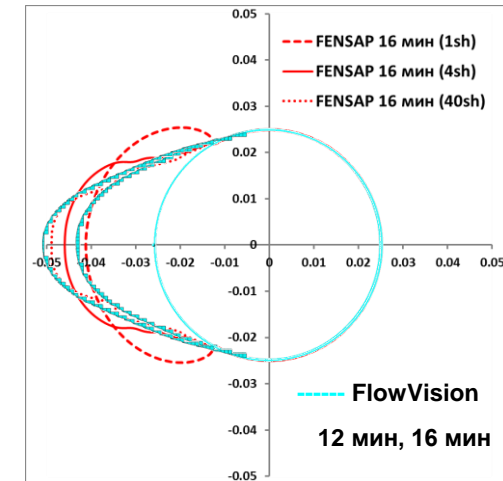
ЦИЛИНДР: результаты



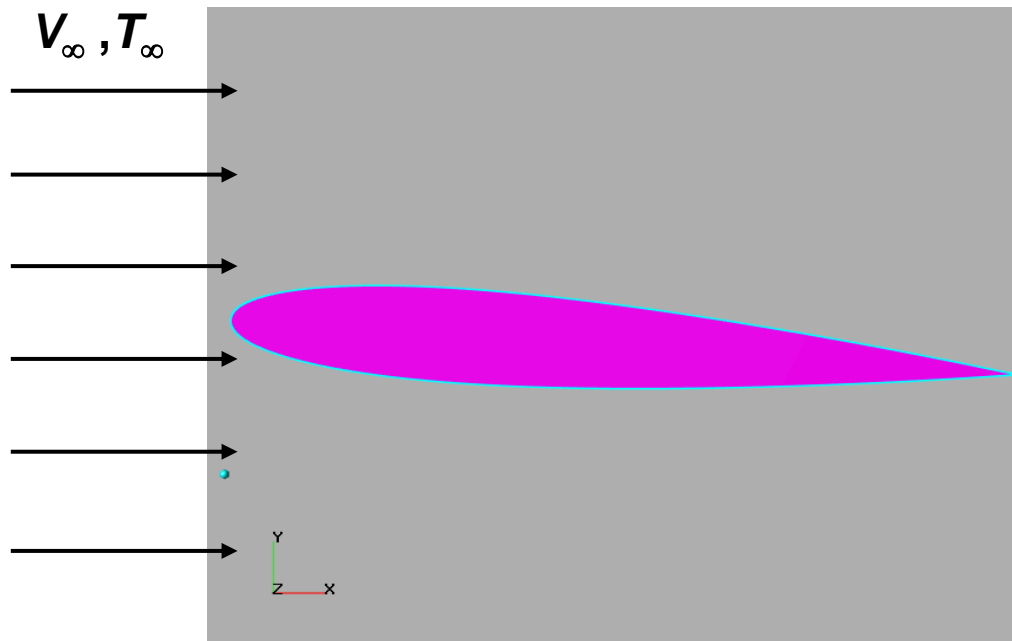
локальный коэффициент
захвата капель β

**ЛЕД
СУХОЙ
РЕЖИМ**

**ЛЕД
МОКРЫЙ
РЕЖИМ**



NASA0012: постановка задачи

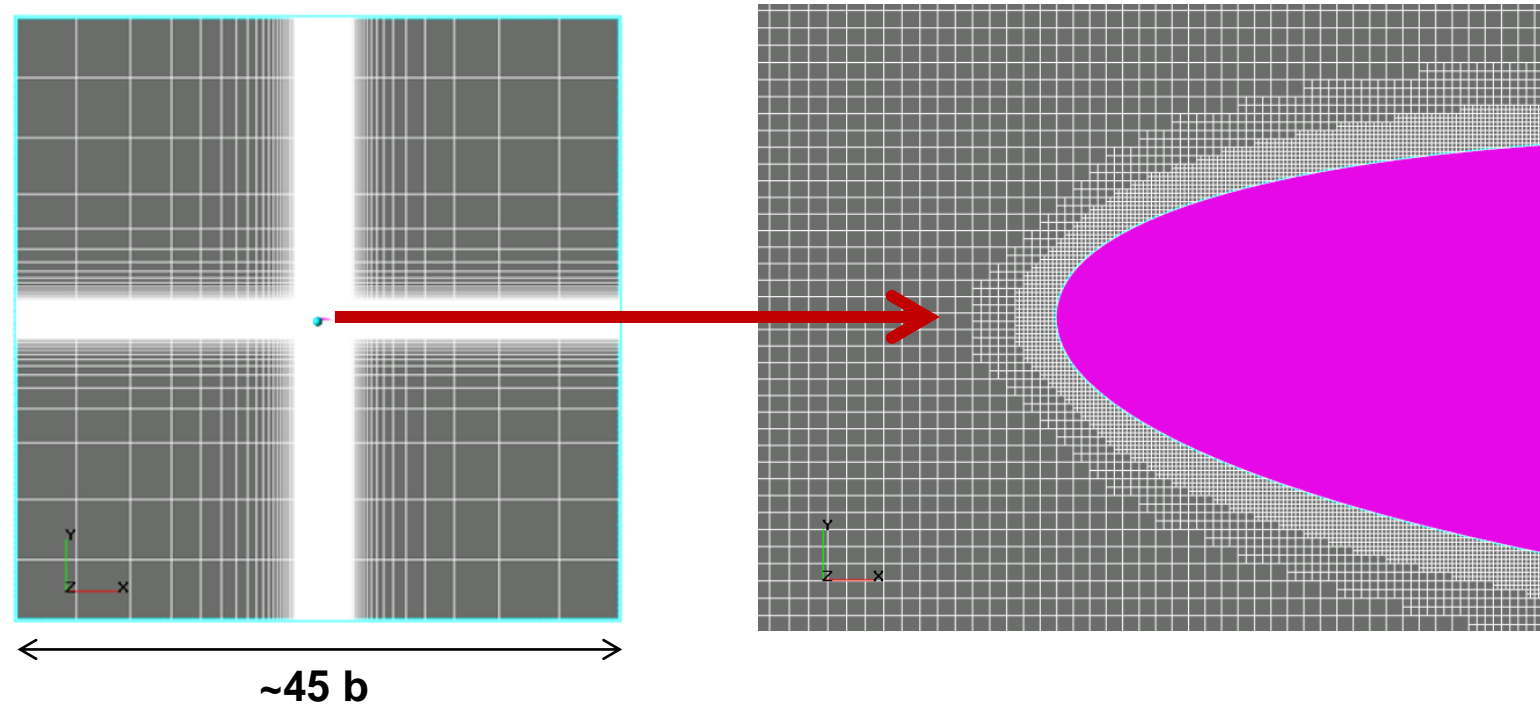


Профиль NASA0012

- **Объект** – профиль NASA0012, обтекается воздухом под углом атаки 4° :
 - $T_\infty = 256.49$ [K]
 - $V_\infty = 102.8$ [m/s]
 содержащим сферические капли воды:
 - $MVD = 20$ [μm]
 - $LWC = 0.5$ [g/m^3]

- **Задача** – При заданных условиях выполнить расчет локального коэффициента захвата капель воды и определить форму ледяного нароста

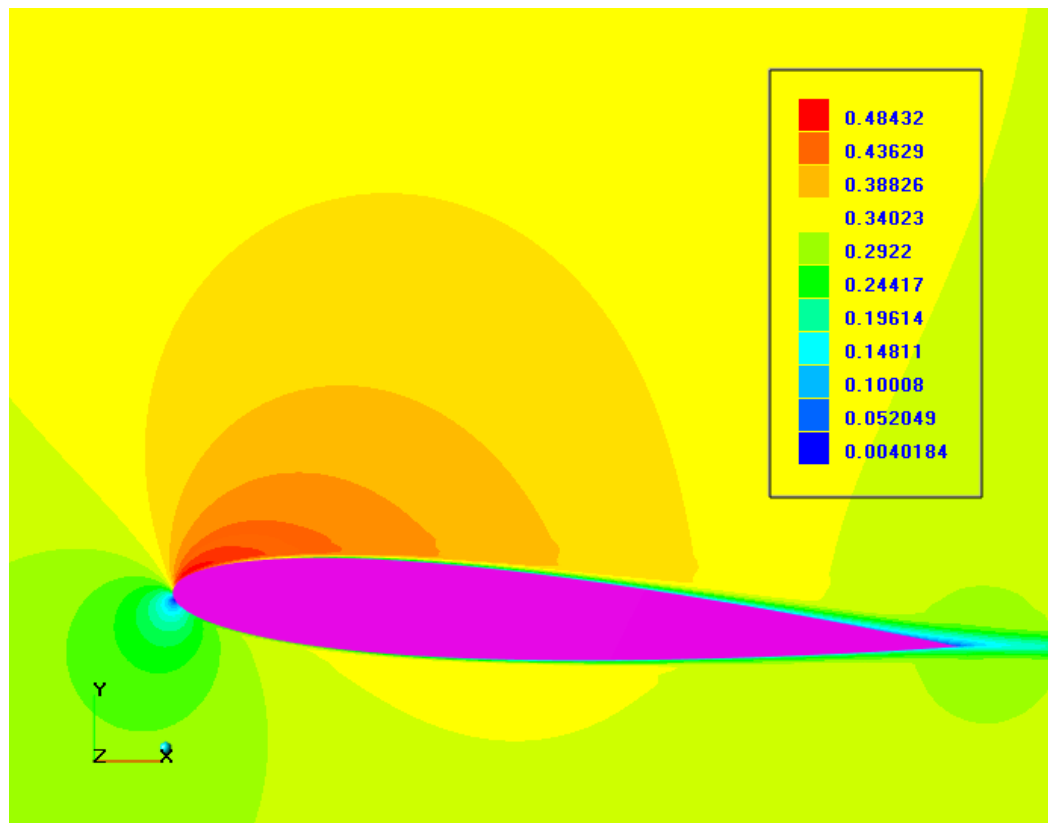
NASA0012: расчетная область, сетка



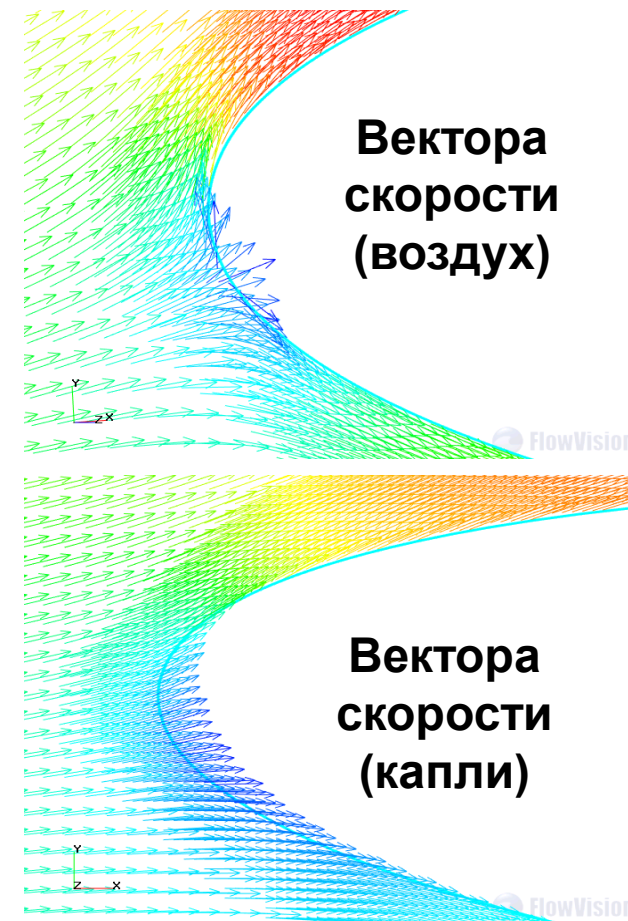
Сгущение + локальная адаптация :

$$Y_+ \approx 50$$

НАСА0012: аэродинамика



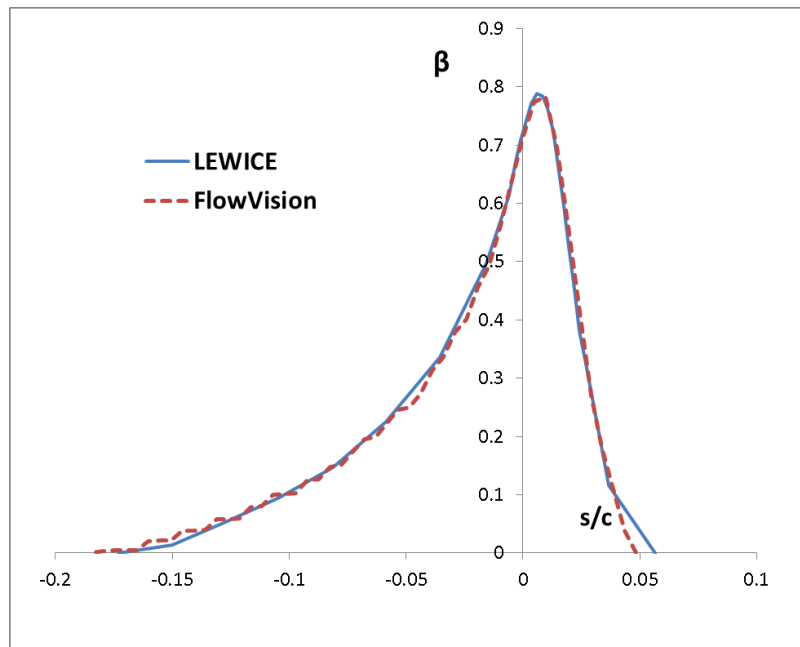
число Маха



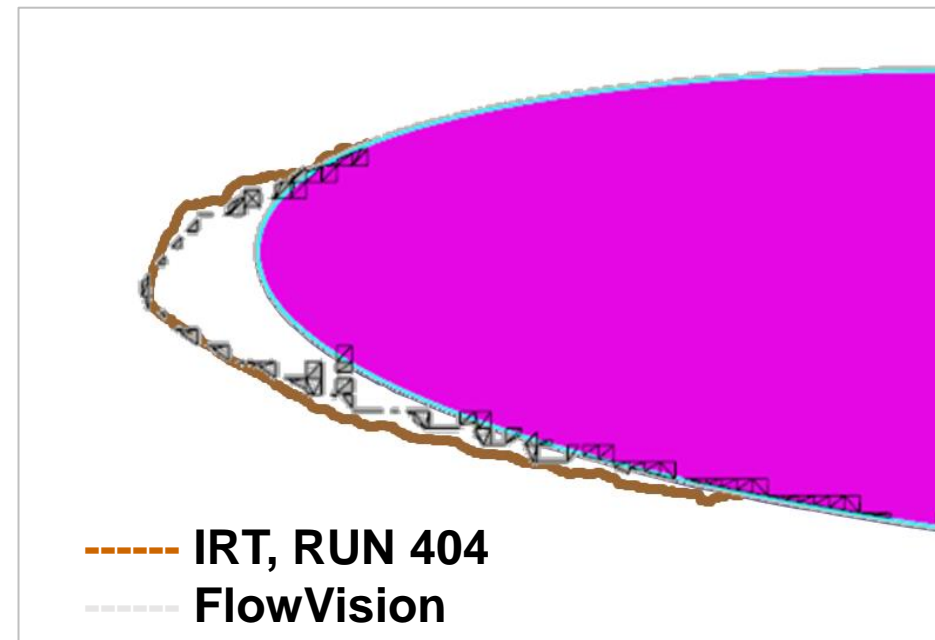
ВАЛИДАЦИЯ IceVision: NASA0012

**Wright W.B., Rutkowski A. Validation Results for LEWICE
2.0 and CD-ROM, January 1999*

НАСА0012: результаты

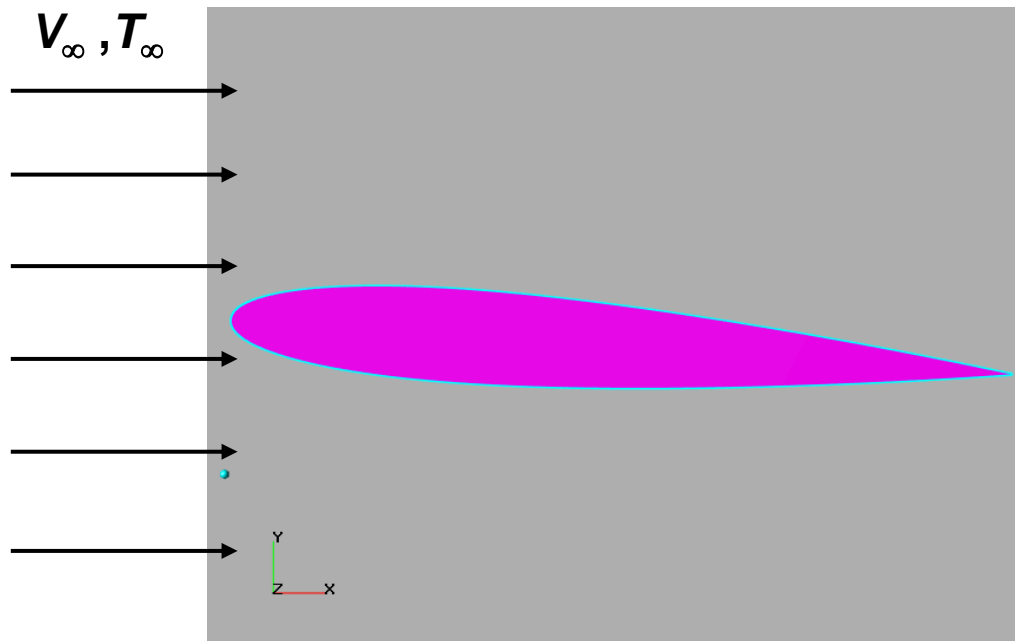


Локальный коэффициент захвата β в зависимости от дуговой координаты



Лед, эксперимент *NASA
Glenn Icing Research Tunnel

NACA0012: RUN 403, RUN 308



Геометрия профиля

RUN 403: профиль NACA0012 обтекается воздухом под углом атаки 4° :

- $T_\infty = 262.04$ [K]
- $P_\infty = 100$ [kPa]
- $V_\infty = 102.8$ [m/s]

содержащим сферические капли воды:

- $MVD = 20$ [μm]
- $LWC = 0.55$ [g/m^3]

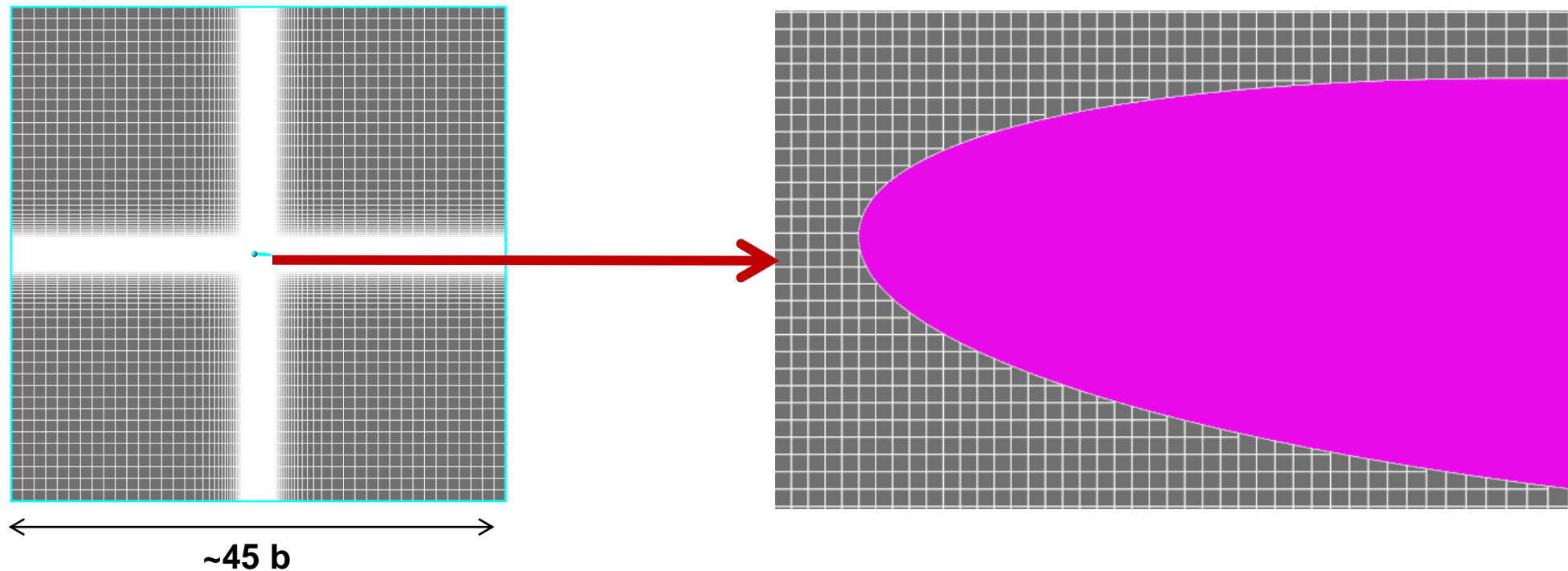
RUN 308: профиль NACA0012 обтекается воздухом под углом атаки 4° :

- $T_\infty = 262.04$ [K]
- $P_\infty = 90.76$ [kPa]
- $V_\infty = 102.8$ [m/s]

содержащим сферические капли воды:

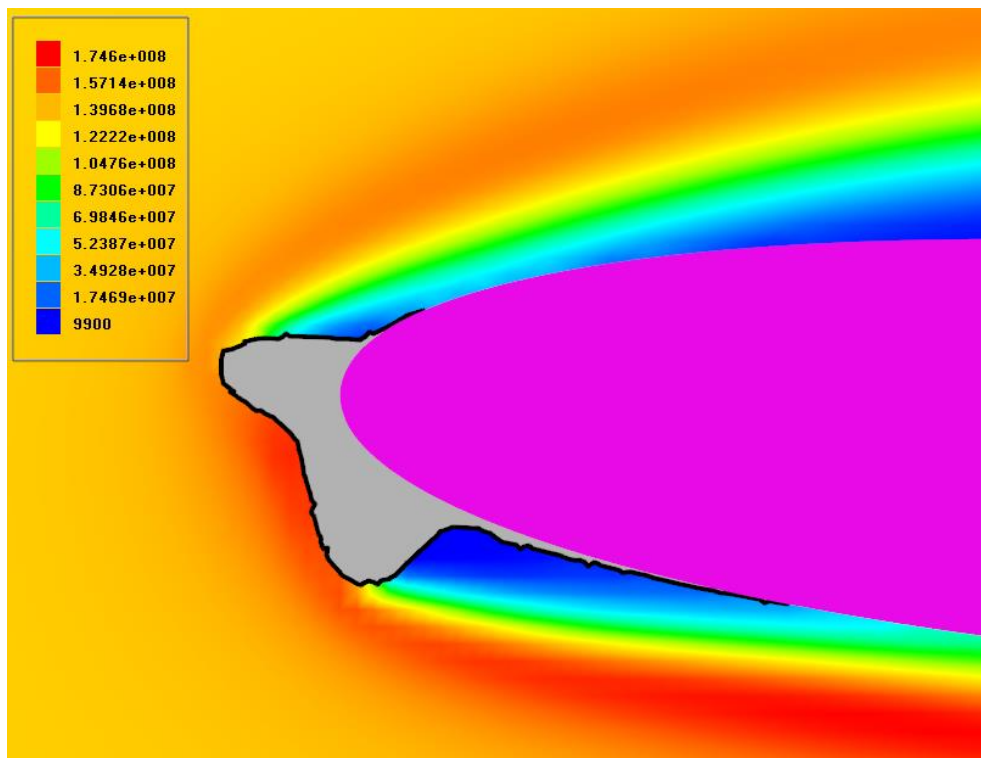
- $MVD = 20$ [μm]
- $LWC = 1$ [g/m^3]

NASA0012, RUN 403, RUN 308: расчетная область, сетка

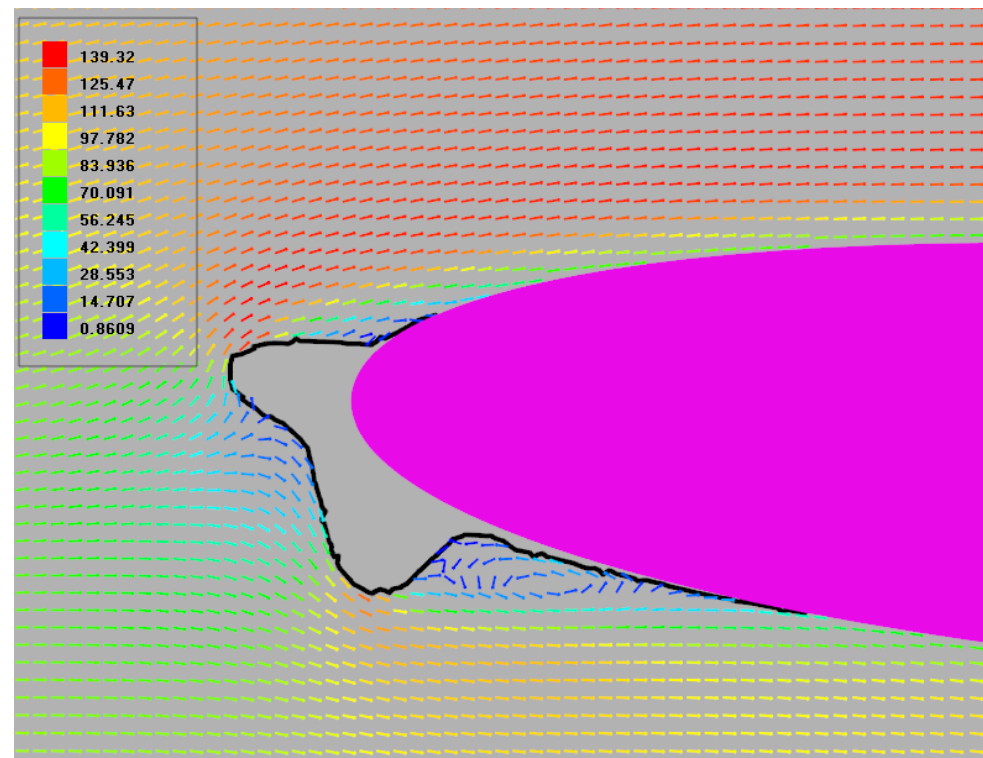


$Y_+ \approx 620$

NASA0012, RUN 403, ~500 с : аэродинамика

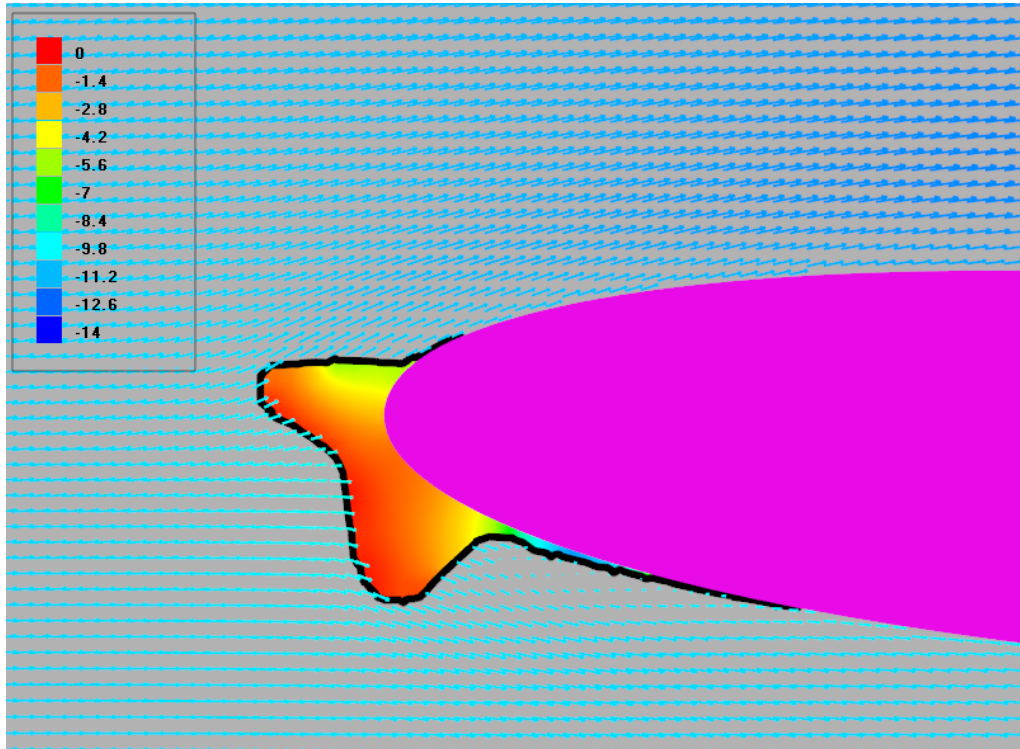


Концентрация (капли)

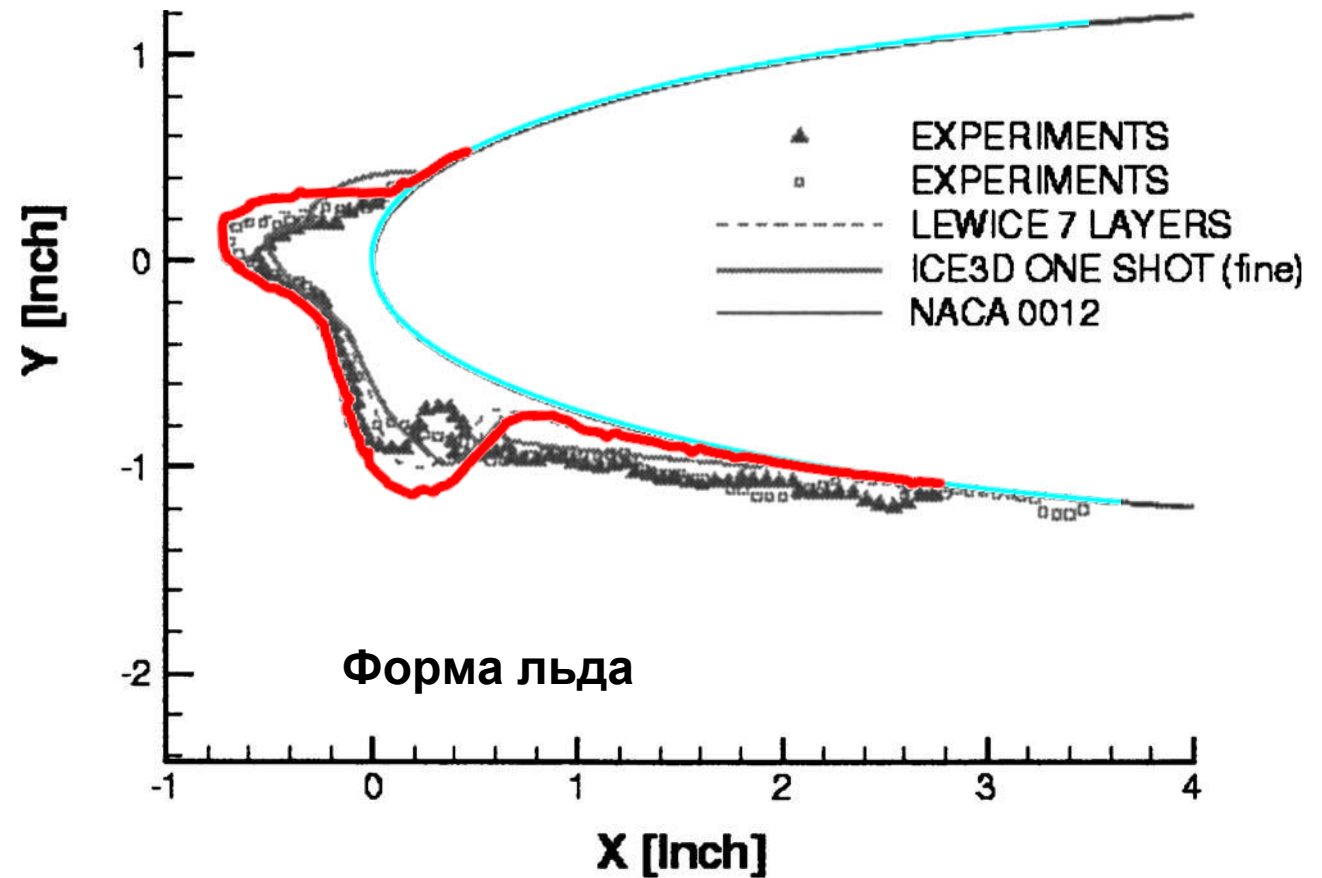


Скорость (воздух)

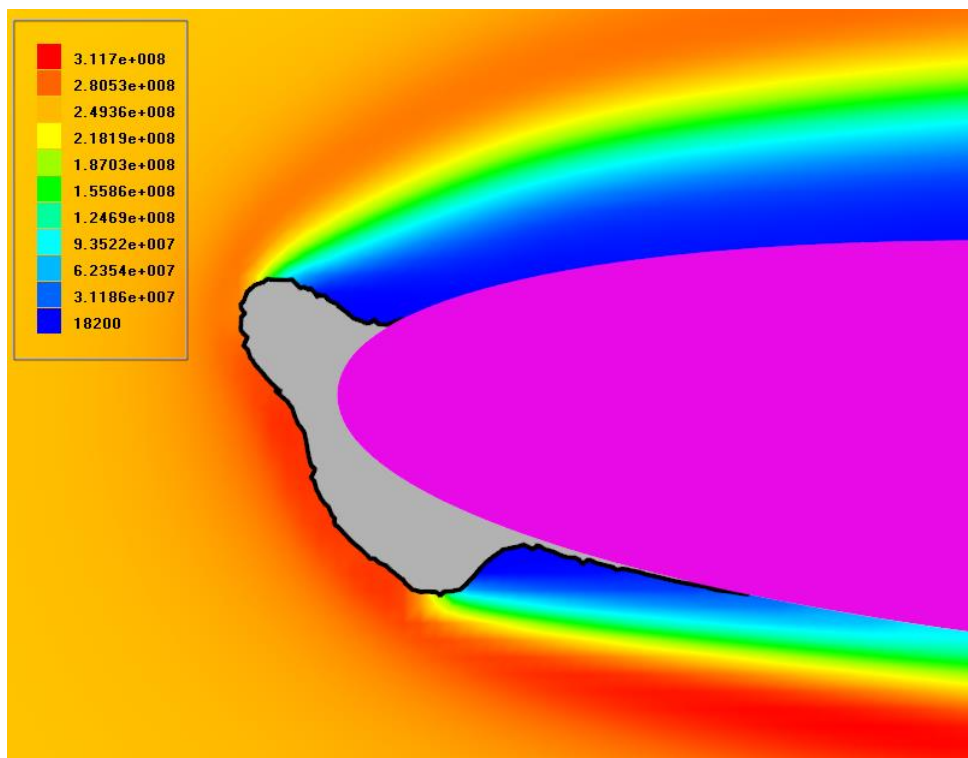
NASA0012, RUN 403, ~500 с : температура, ЛЕД



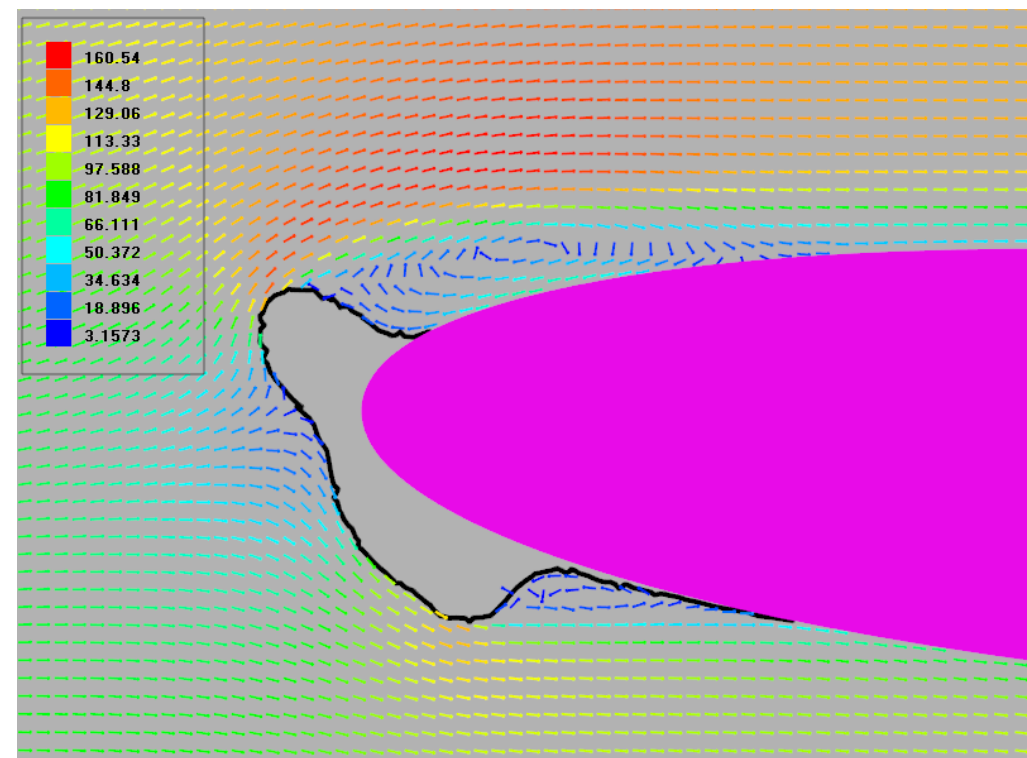
Скорость капель (раскрашена температурой) + температура льда



NASA0012, RUN 308, ~300 с : аэродинамика

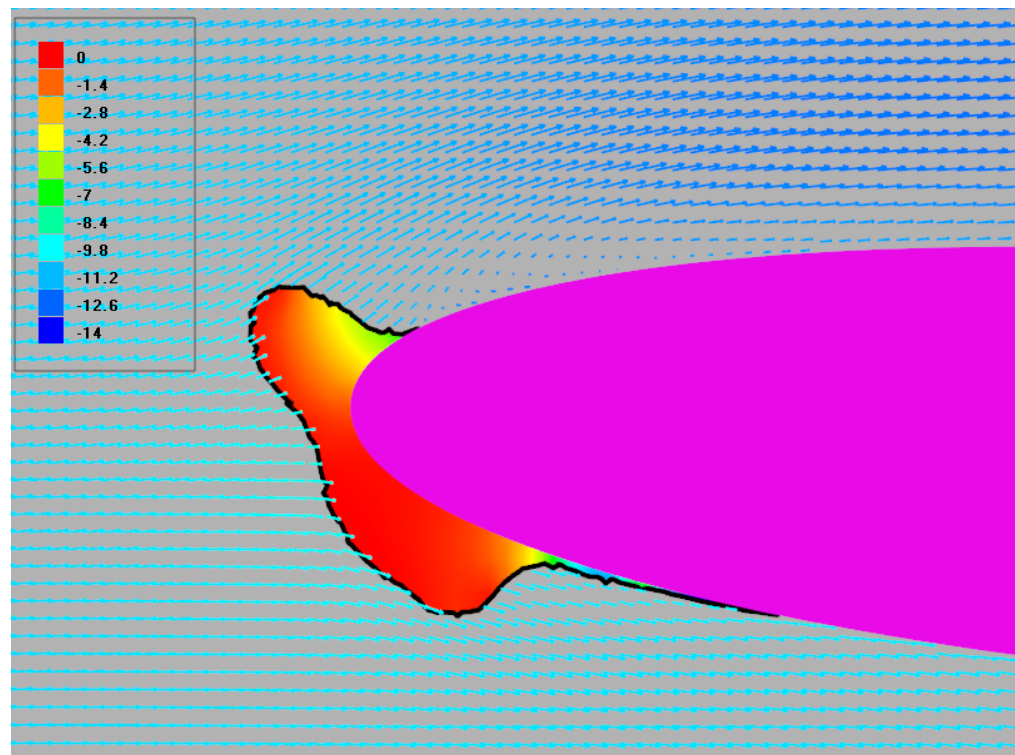


Концентрация (капли)

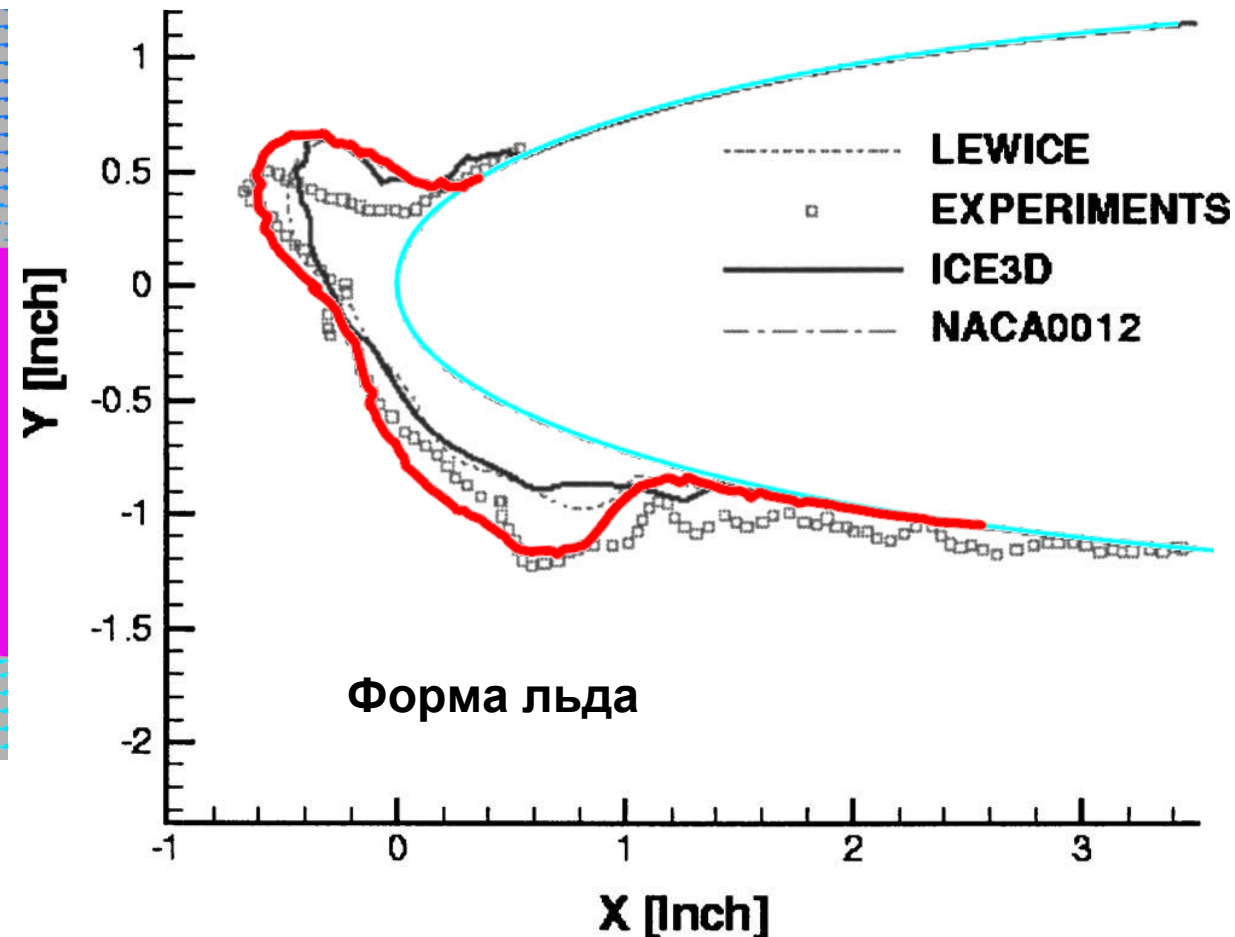


Скорость (воздух)

NASA0012, RUN 308, ~300 с : температура, ЛЕД

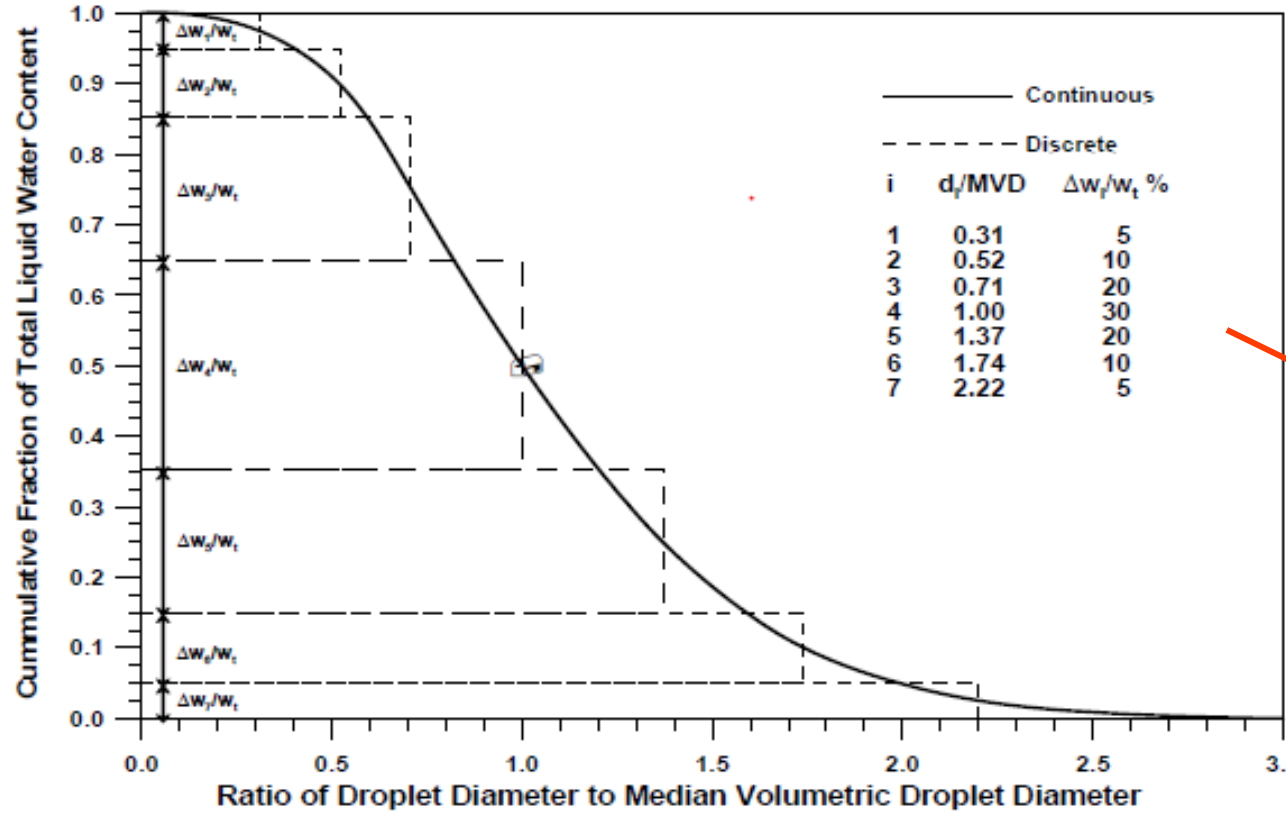


Скорость капель (раскрашена температурой) + температура льда

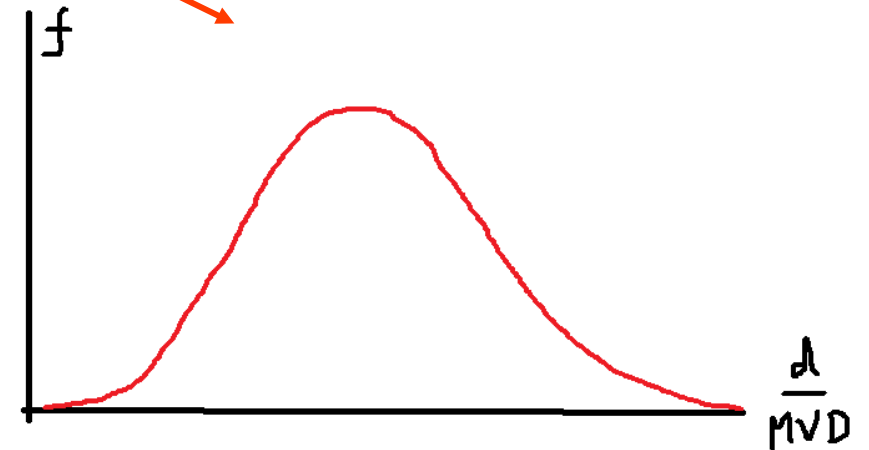


Моно или полидисперсность?

Безразмерное распределение капель по Langmuir "D" (применяемое чаще всего)

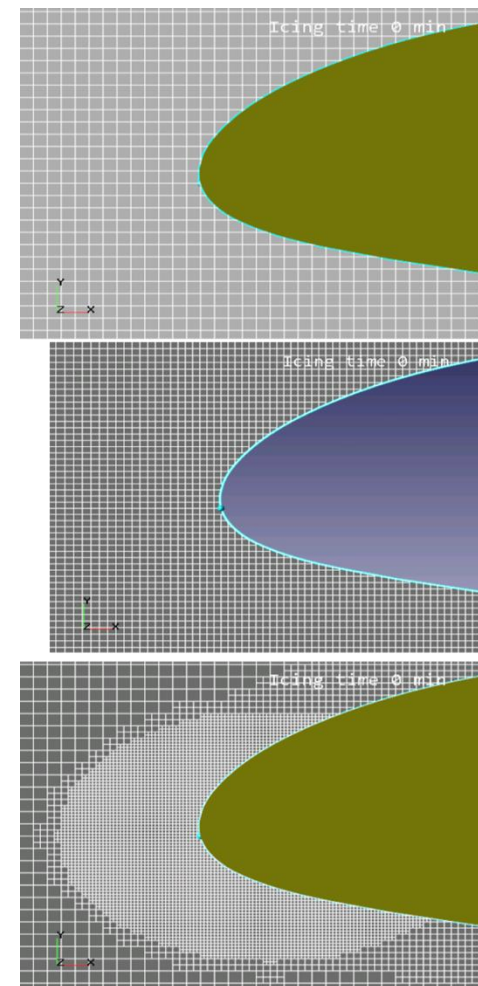
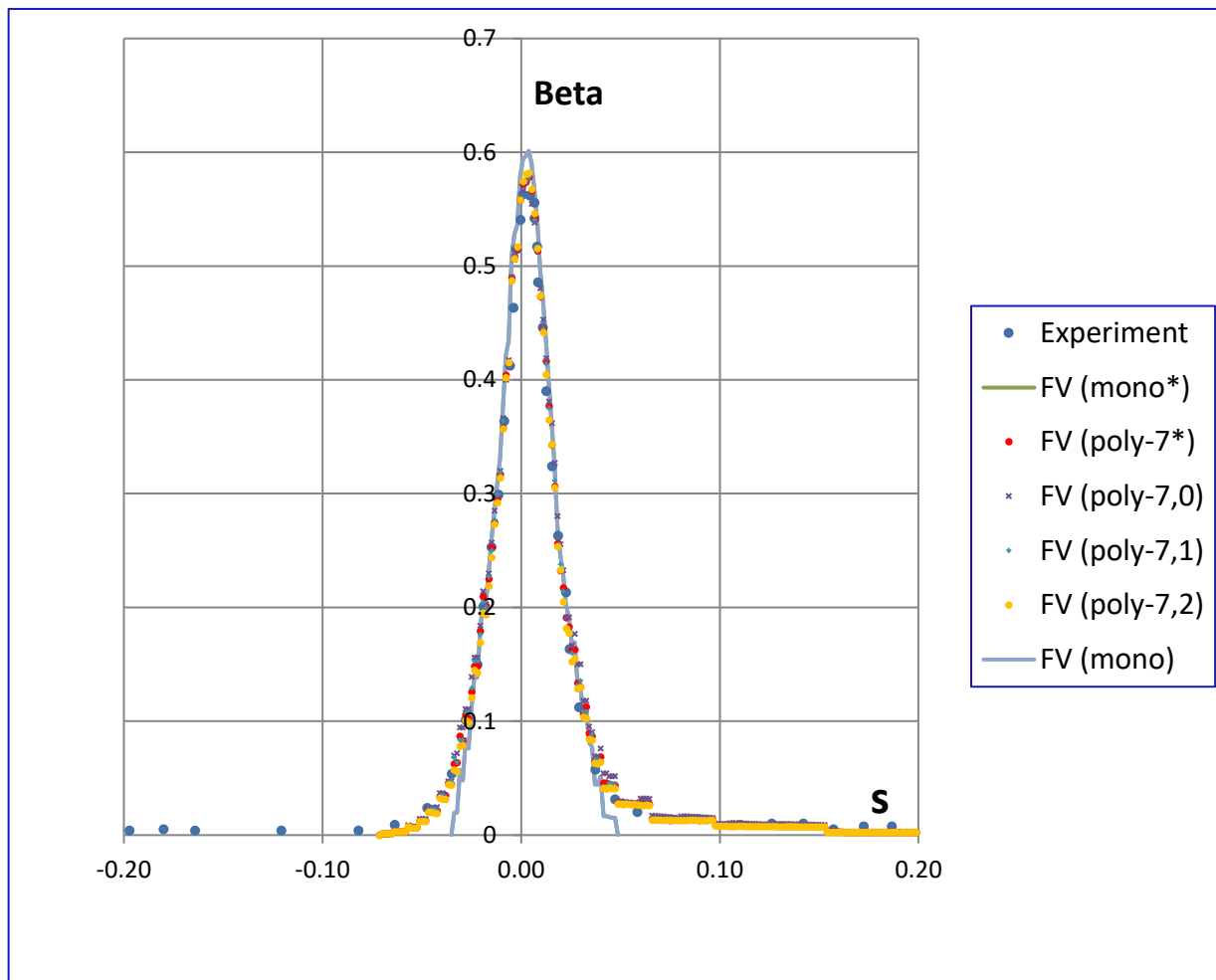


Для тех, кто проходил теорфиз –
производная этой функции по диаметру
== плотность вероятности количества
частиц от диаметра



Сравнение результатов по коэффициенту захвата капель, полученных по предыдущей и настоящей версиям FlowVision

Профиль NACA 23012, эксперимент из (*), MVD=20 мкм, расчет с моно- и полидисперсными составами капель



Расчетные сетки, примененные в моделировании обтекания

(*) M.Papadakis, A.Rachman, S-C. Wong et al. "Experimental Study of Supercooled Large Drop Impingement on Ice Shapes". DOT/FAA/AR-08/13, 2008.

Наросты льда на профиле крыла в сечении 0.5 от полуразмаха, полученные с моно- и полидисперсным составами капель в 2D постановке

MVD=38.6 мкм, спектр размеров капель по Langmuir "D"



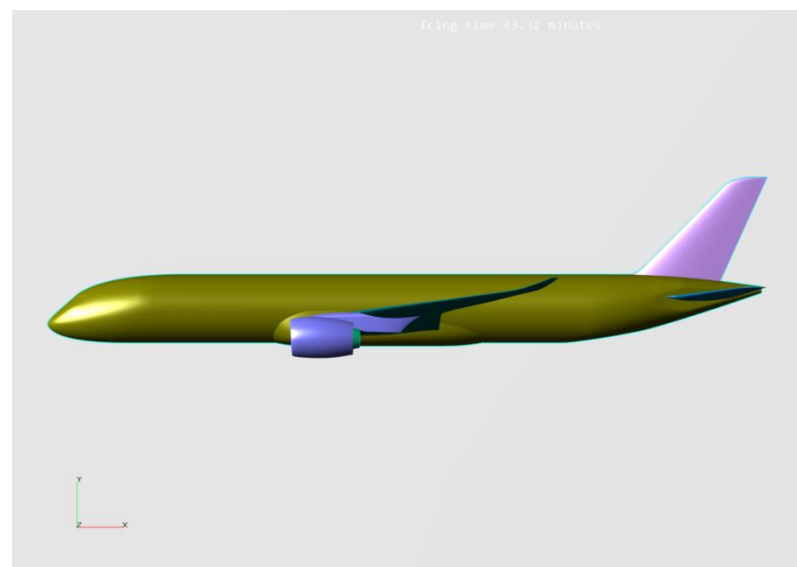
Наросты льда на профиле крыла в сечении 0.9 от полуразмаха, полученные с моно- и полидисперсным составами капель в 2D постановке

MVD=38.6 мкм, спектр размеров капель по Langmuir "D"



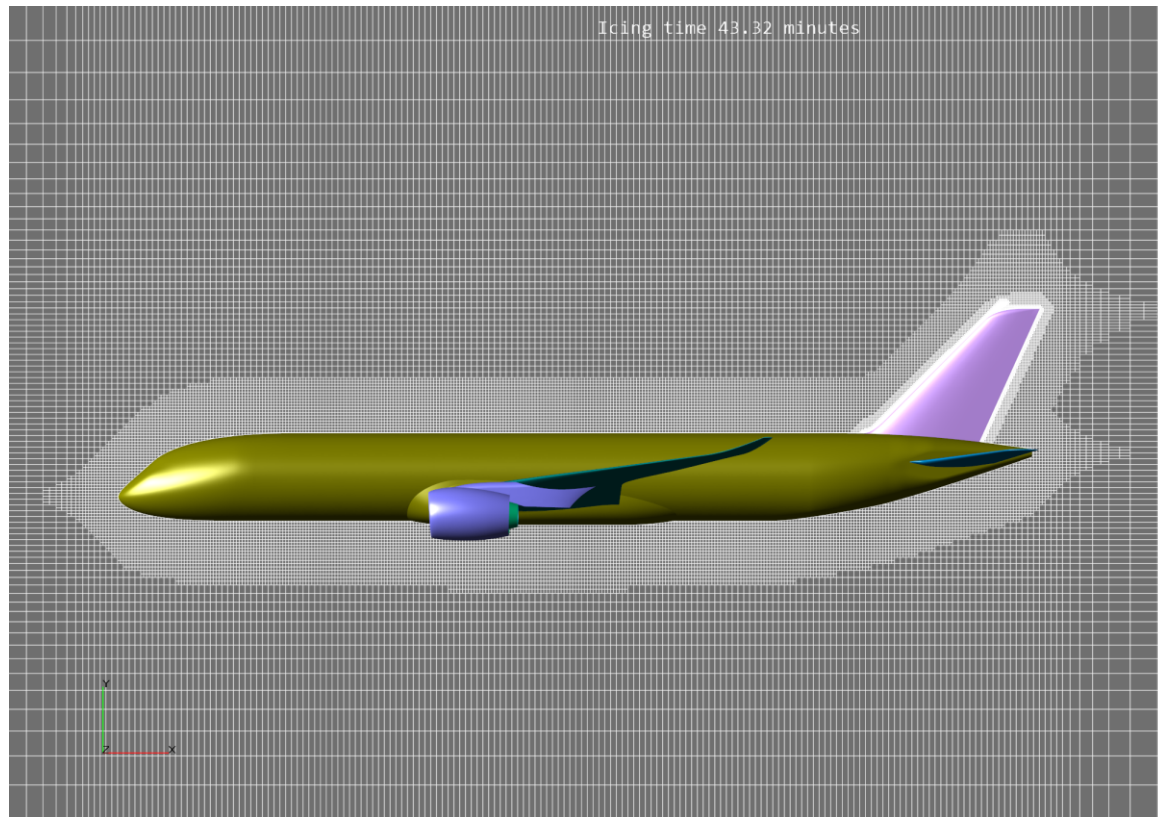
Обледенение пассажирских самолетов

САМОЛЕТ 3D : постановка задачи



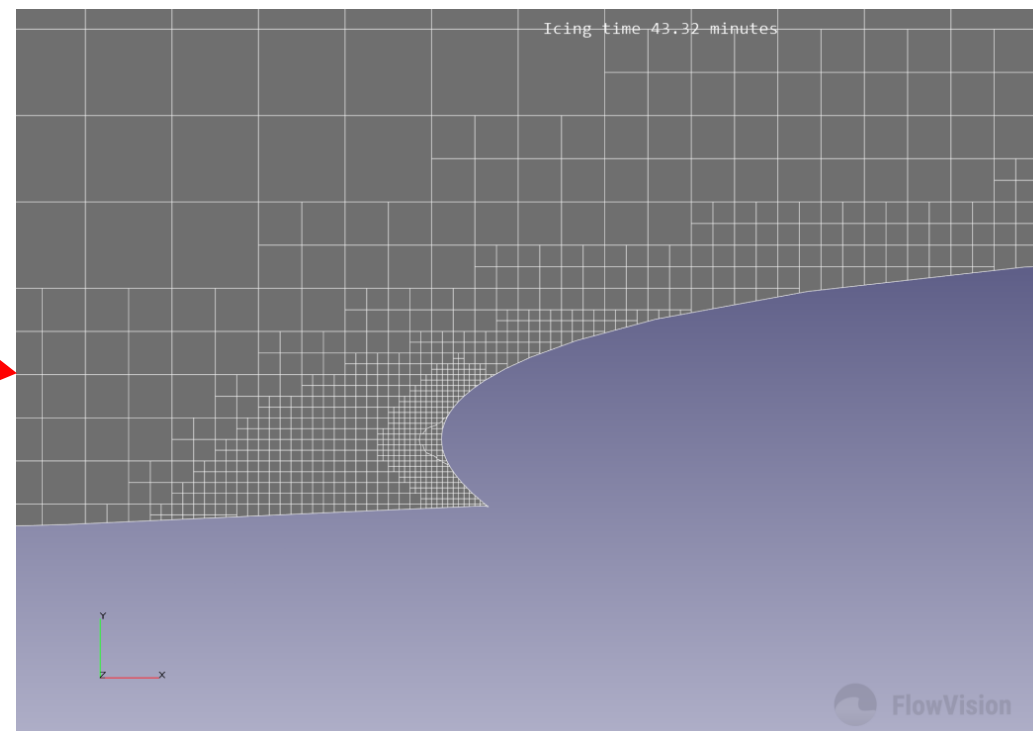
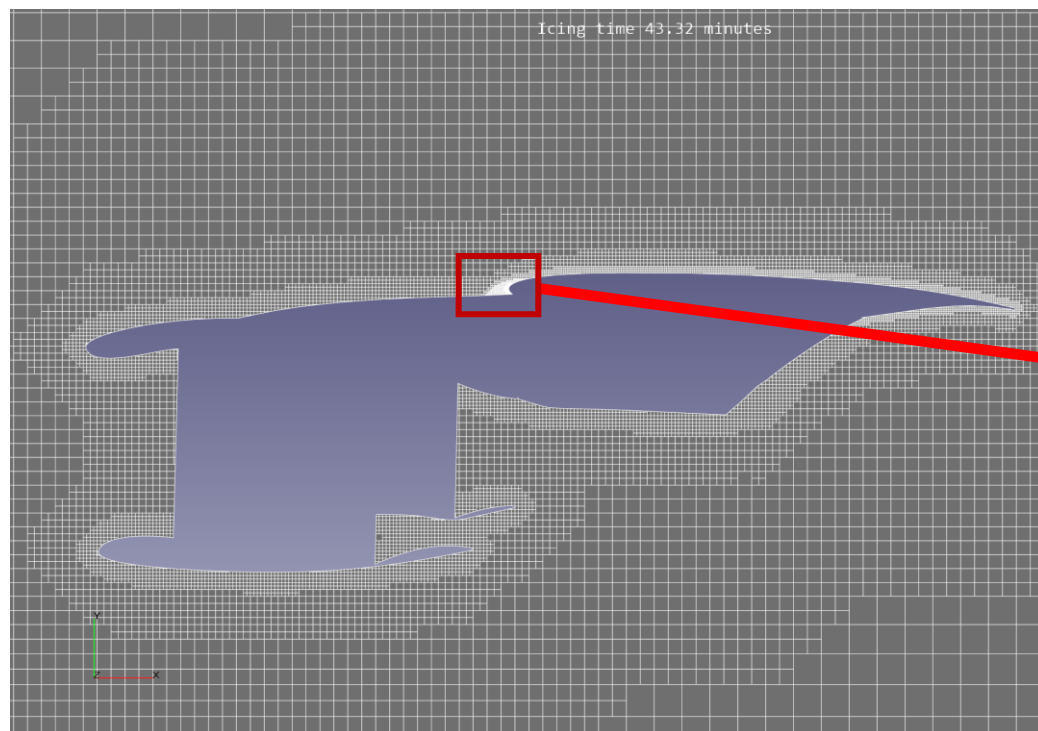
Моделируемый режим полета						
Число Маха M	Угол атаки α [°]	Высота H[м]	Время полёта [мин]	Температура набегающего потока T[С°]	Средний диаметр капель D[мкм]	Водность потока LWC[г/м³]
0.6	3	6100	45	-10	15	0.6

САМОЛЕТ 3D : расчетная сетка

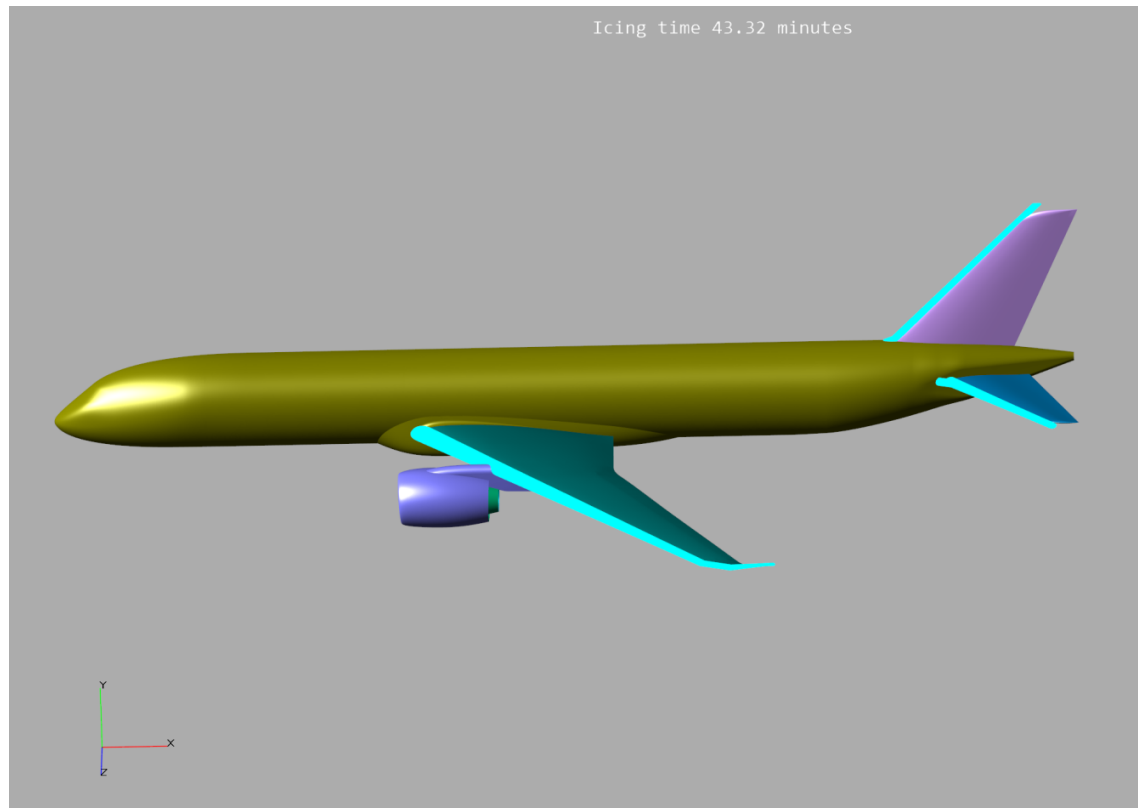


- ❑ Адаптация сетки по поверхностям и пространству
- ❑ Конечный размер сетки – 18,4 млн ячеек
- ❑ Наибольшее сгущение узлов сетки в интересующих местах льдообразования :
 - передние кромки крыла
 - передние кромки горизонтального и вертикального оперения

САМОЛЕТ 3D : сетка (мотогондола)

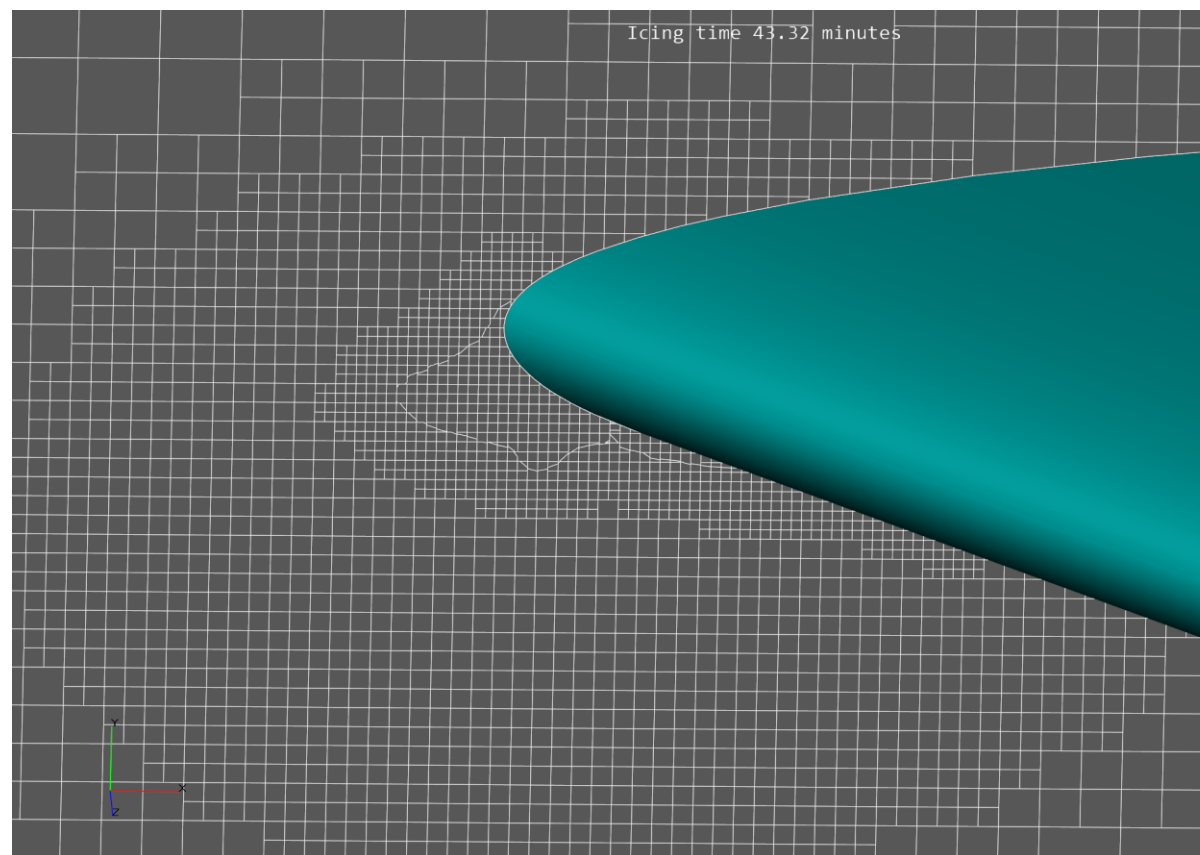


САМОЛЕТ 3D : сетка около поверхностей обледенения



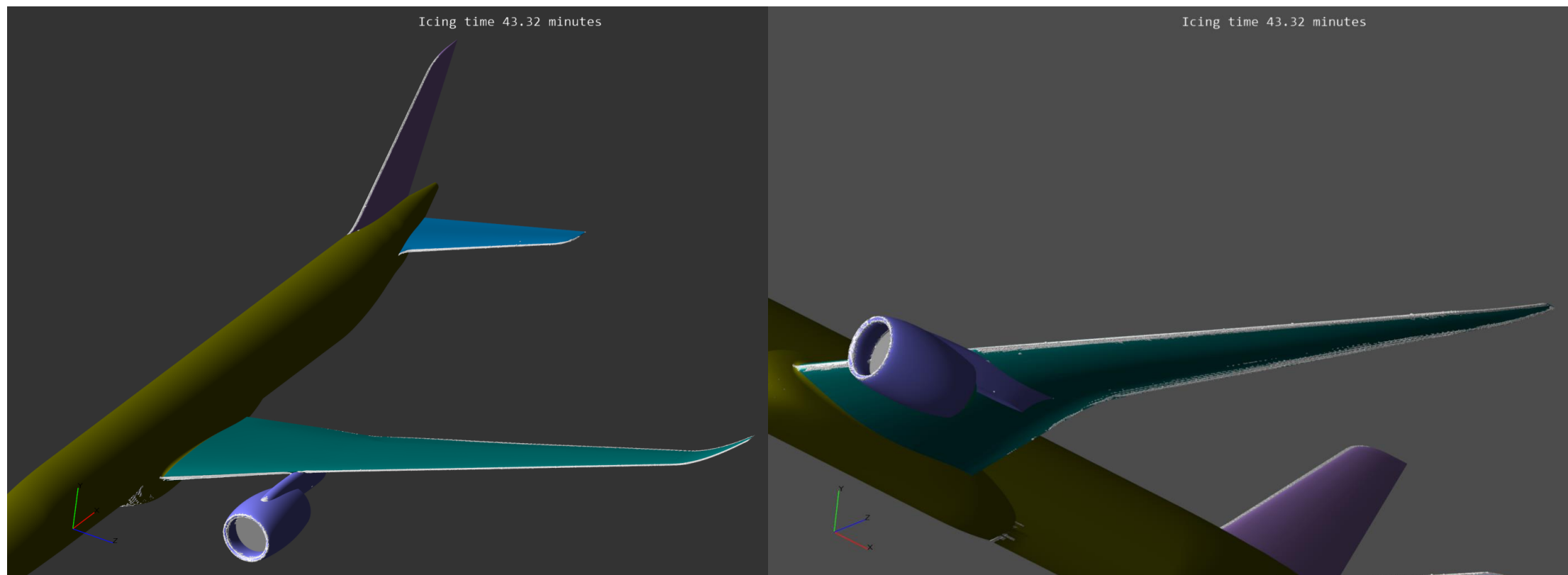
- ❑ Адаптация сетки внутри искусственно построенных цилиндров (помечены голубым цветом) в окрестности передних кромок составных элементов самолета
- ❑ В целях уменьшения размера сетки применялась адаптация, отслеживающая в динамике нарастание льда

САМОЛЕТ 3D : сетка (передняя кромка крыла)



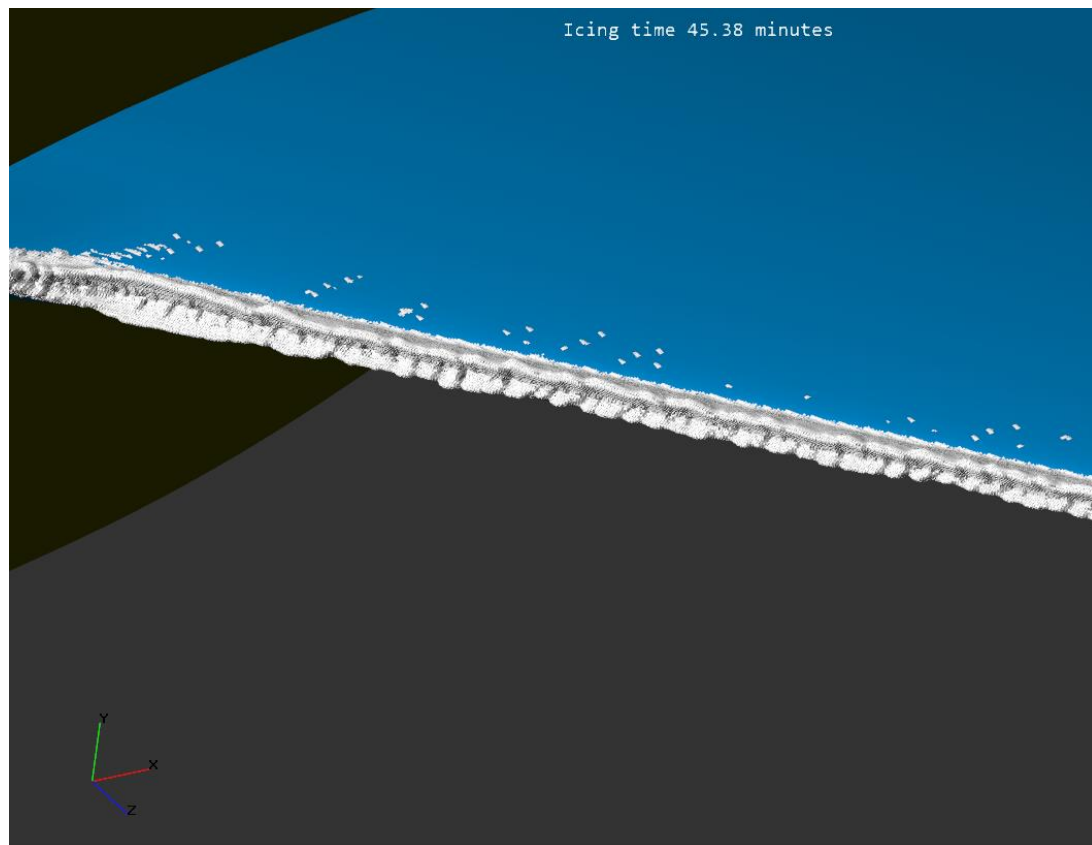
**Форма льда
выделена
белой
линией**

САМОЛЕТ 3D : нарастание льда

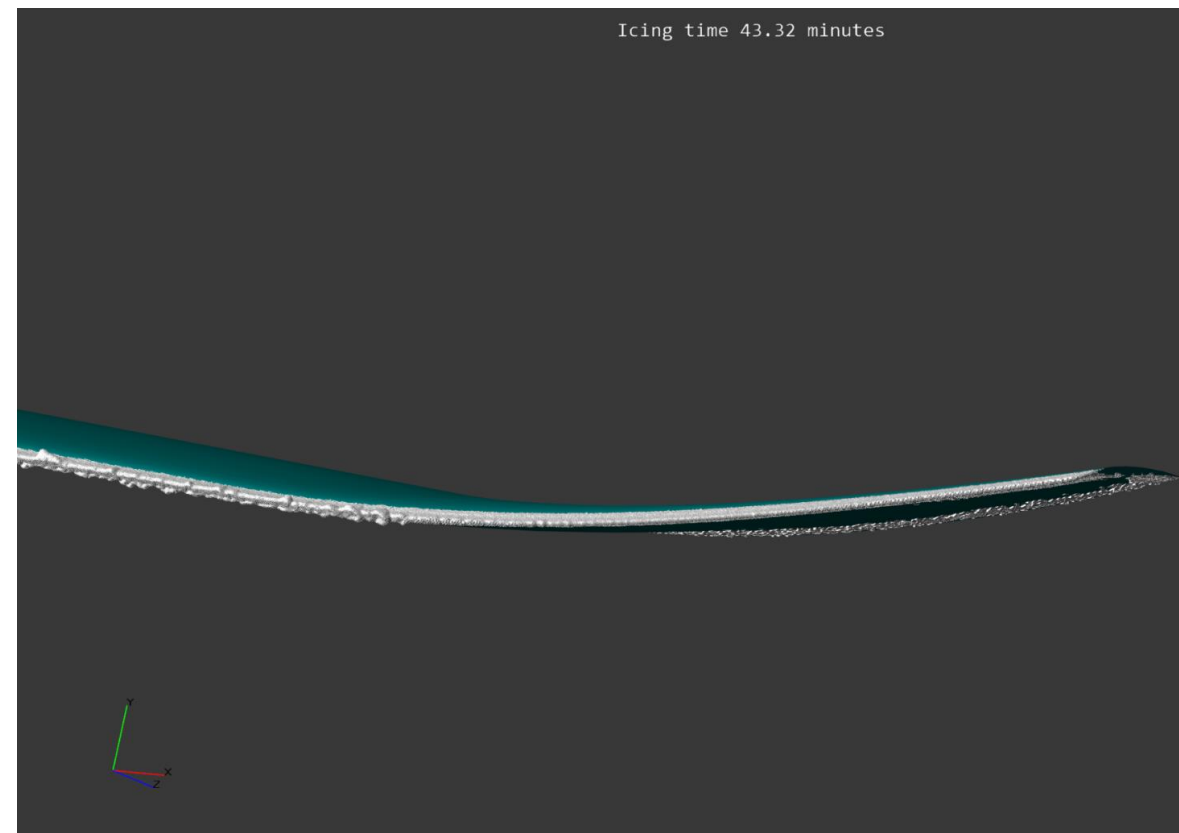


Обледенение пассажирских самолетов

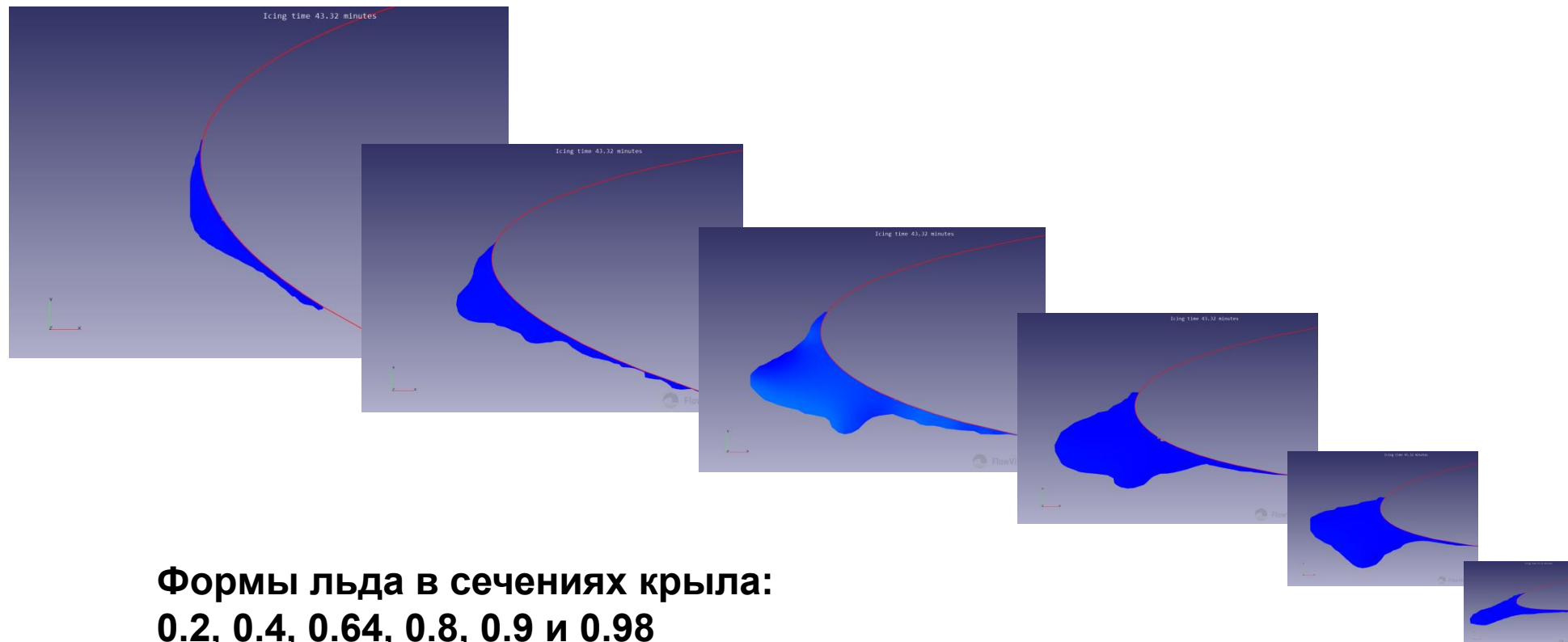
крыло вблизи фюзеляжа



законцовка крыла

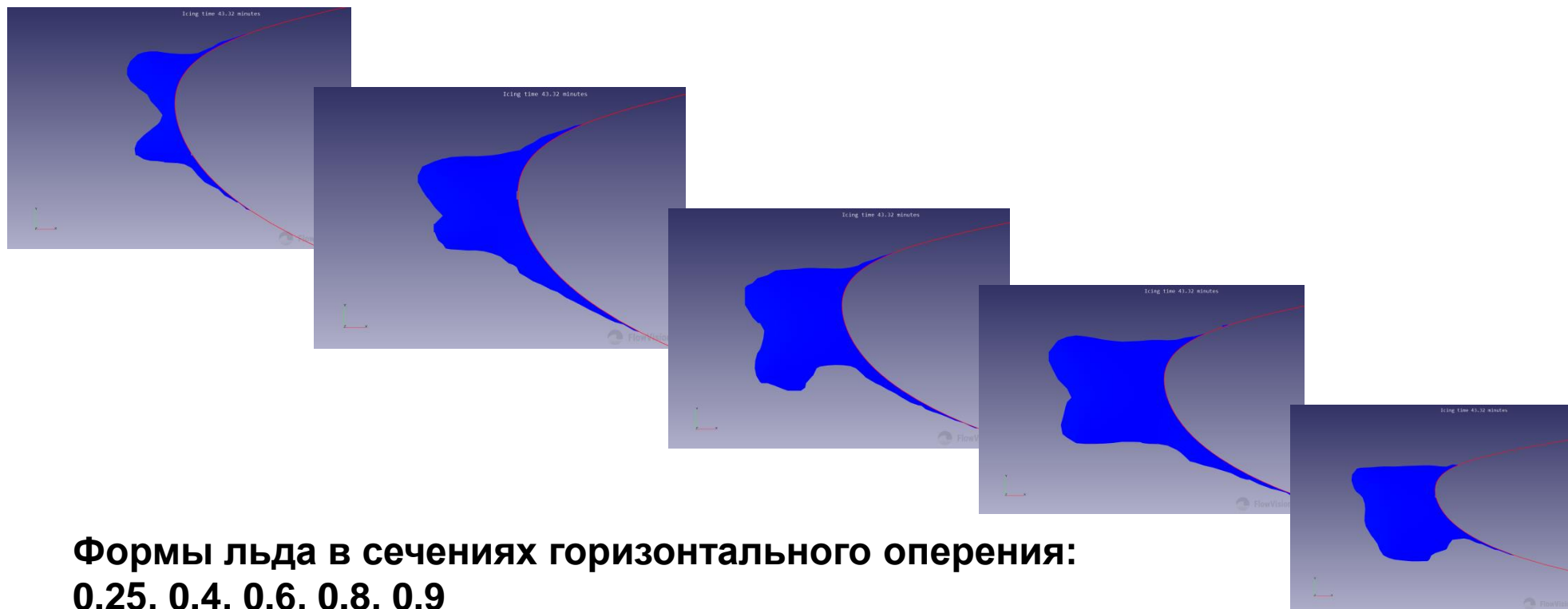


САМОЛЕТ 3D : изменение формы льда вдоль крыла



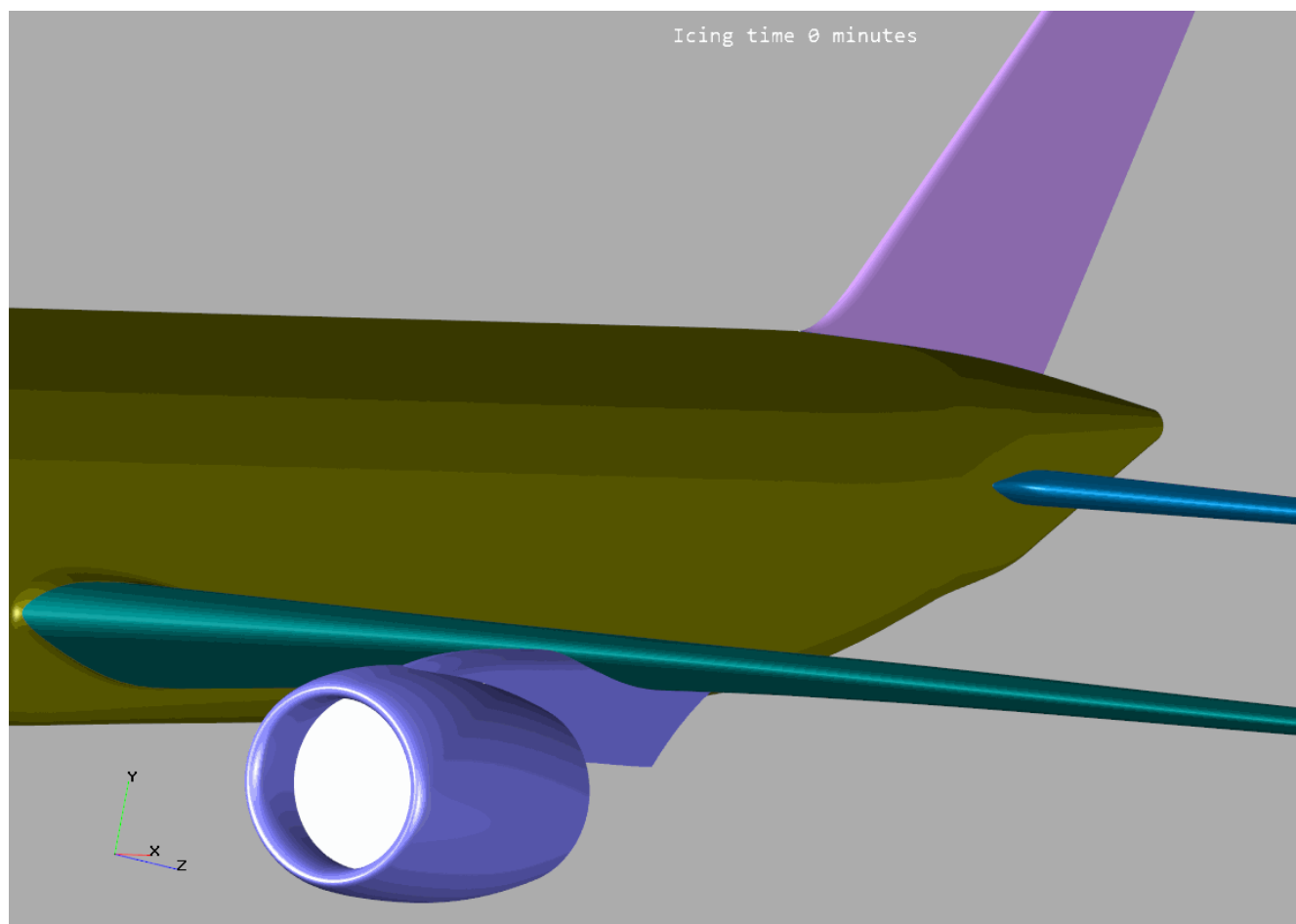
**Формы льда в сечениях крыла:
0.2, 0.4, 0.64, 0.8, 0.9 и 0.98
от полуразмаха крыла**

САМОЛЕТ 3D : изменение формы льда вдоль горизонтального оперения



**Формы льда в сечениях горизонтального оперения:
0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9
от полуразмаха горизонтального оперения**

САМОЛЕТ 3D : ОБЛЕДЕНЕНИЕ



Заключение

- Реализована математическая модель процесса обледенения, включающая в себя сухой и влажный режимы, с учетом фазовых превращений
- Проведена всесторонняя валидация модели
- Выполнен расчеты обледенения транспортного самолета

Спасибо за внимание!