

**О сколько нам ошибок трудных
готовит просвещенья дух...**

**Житейская мудрость
разработчиков CFD кодов**

Развитие FlowVision за 2019 отчетный период



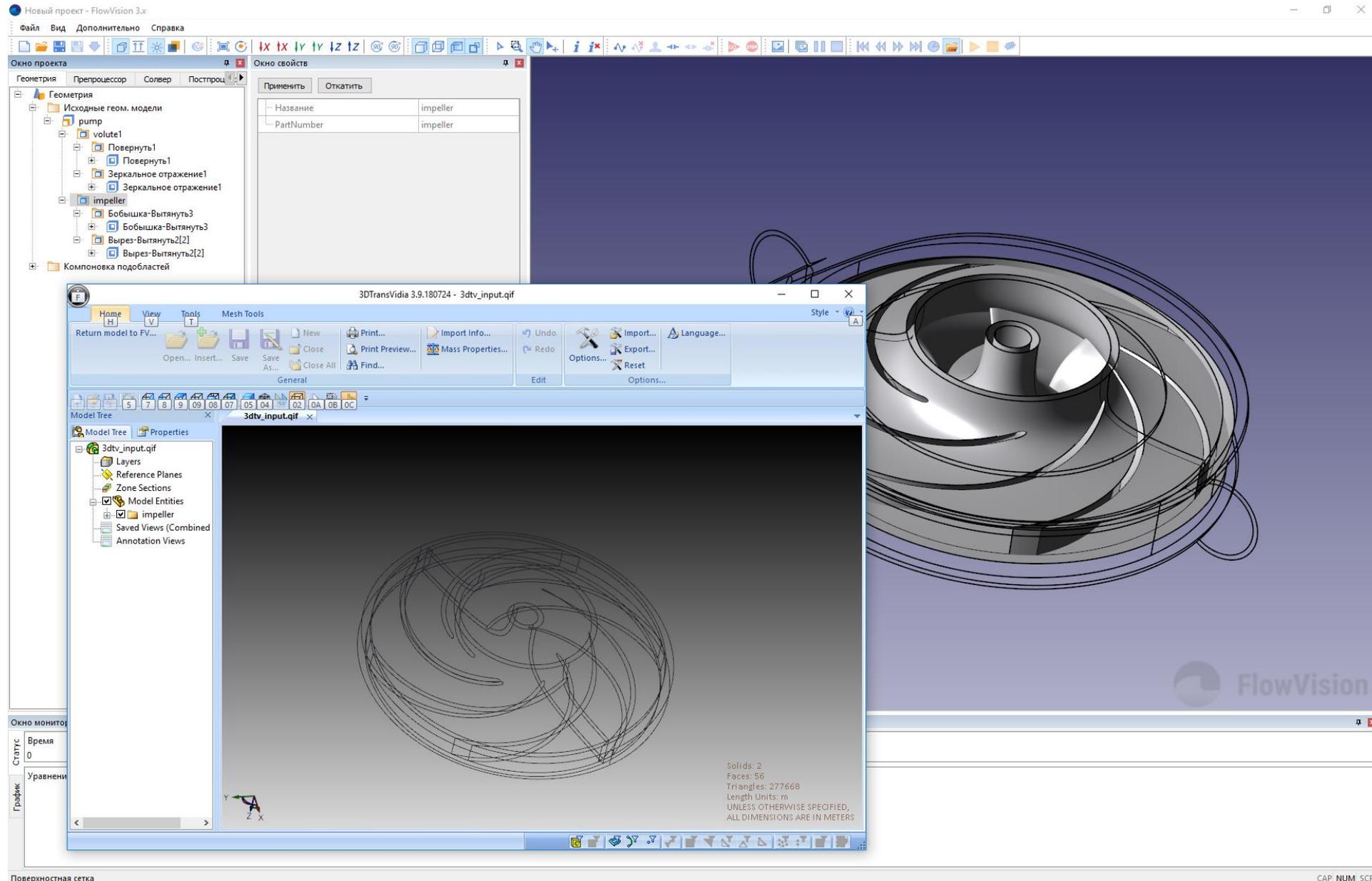
FlowVision

Андрей Аксенов, технический директор ТЕСИС

Всяческая суета

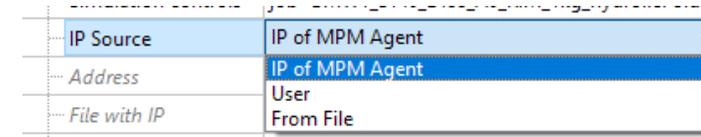
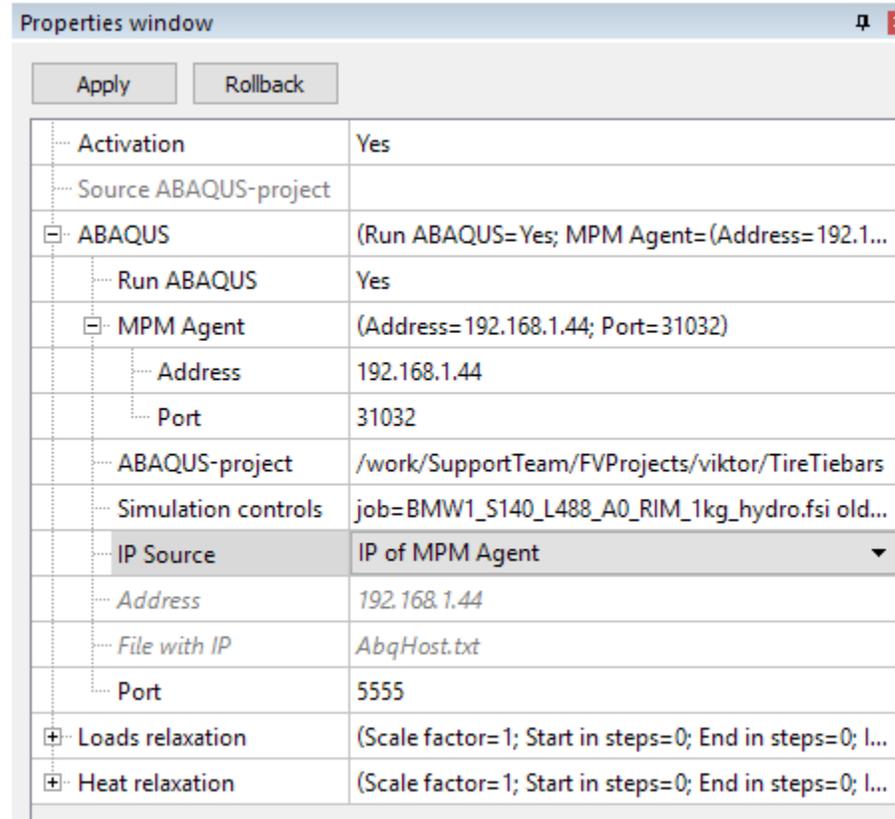
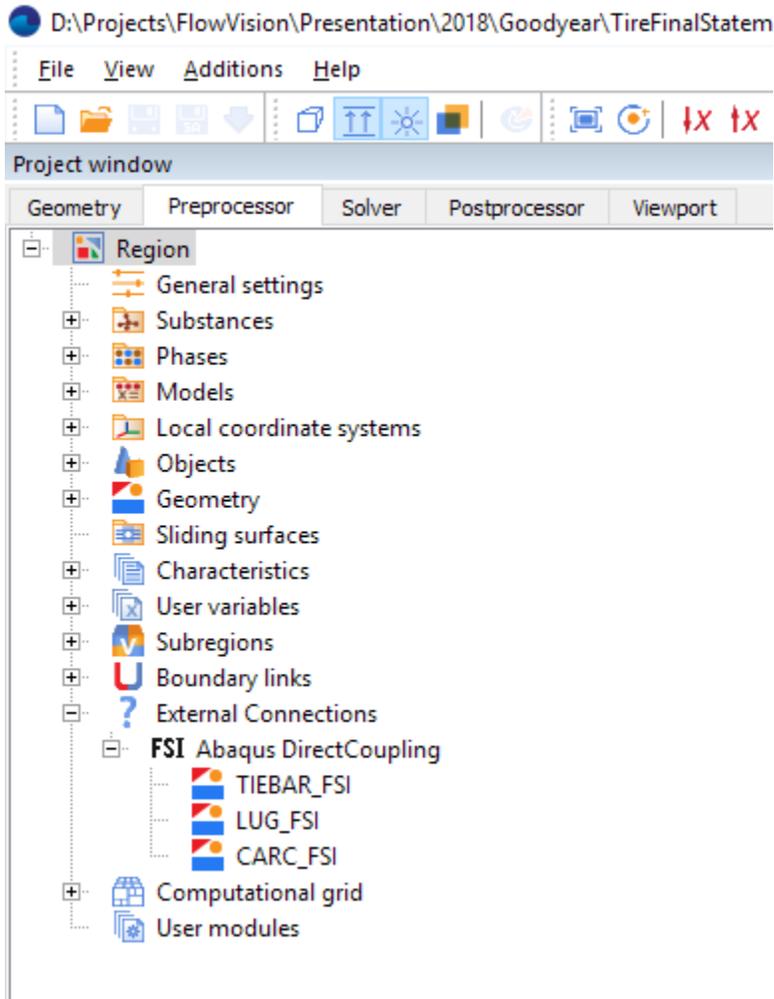


Новая закладка «Геометрия» в FVPPP



Новый FSI интерфейс связи FV с прочностными кодами

Интегрирование MPM в FVPPP



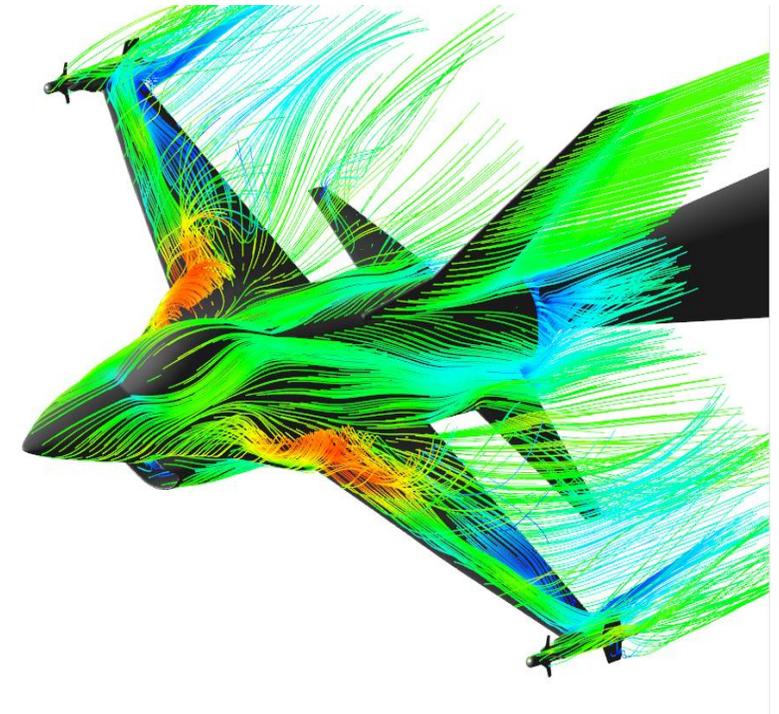
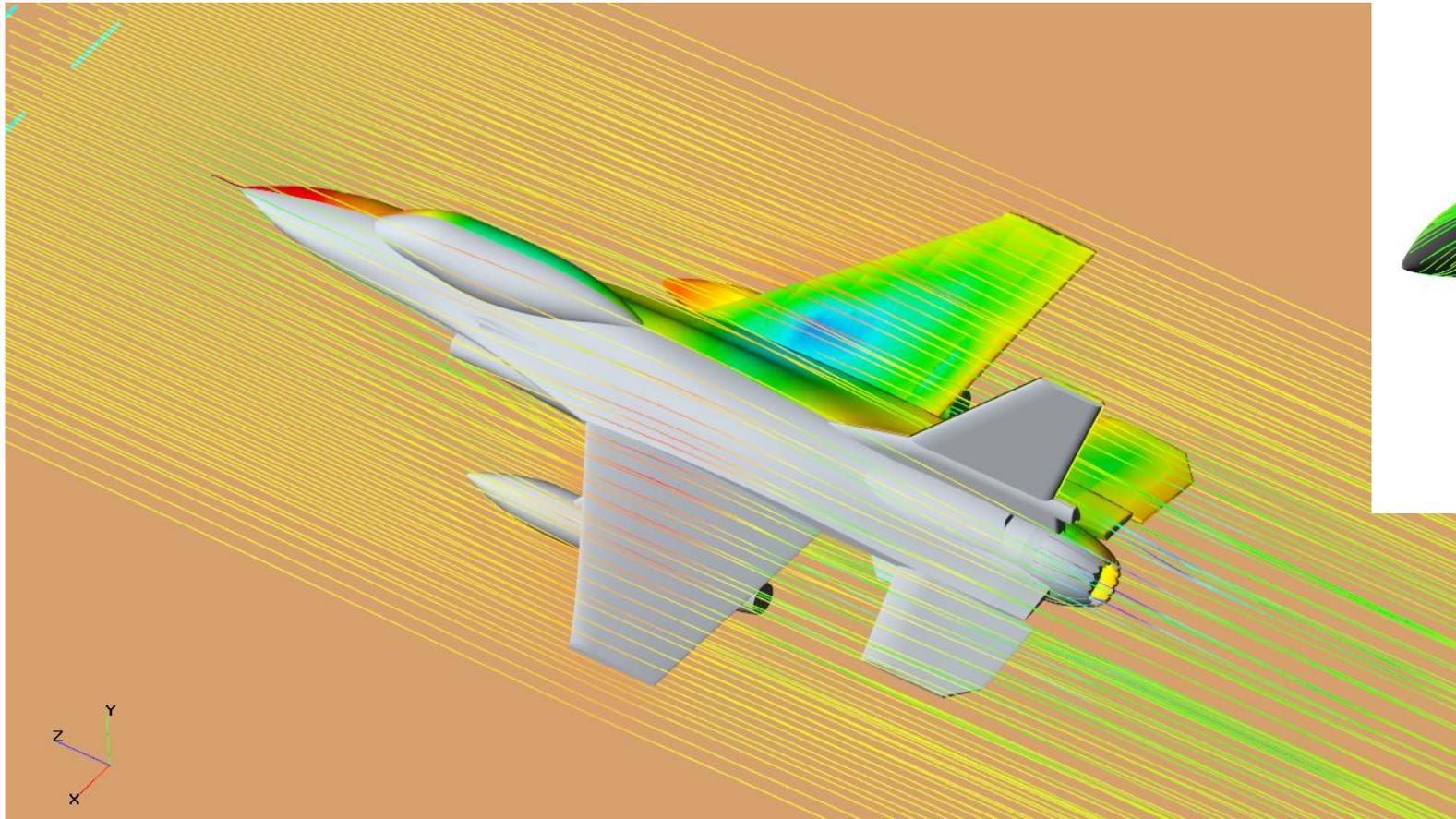
Что такое MBC

- **MBC - Moving Body Controller, Контроллер подвижного тела**
- **приложение, которое поддерживает протокол MBC**
- **Позволяет двигать, деформировать, заменять геометрию подвижного тела, а также передавать температуру и потоки энергии «из тела» во FlowVision**
- **Наполнение смыслом MBC-приложения – за программистом-пользователем.**

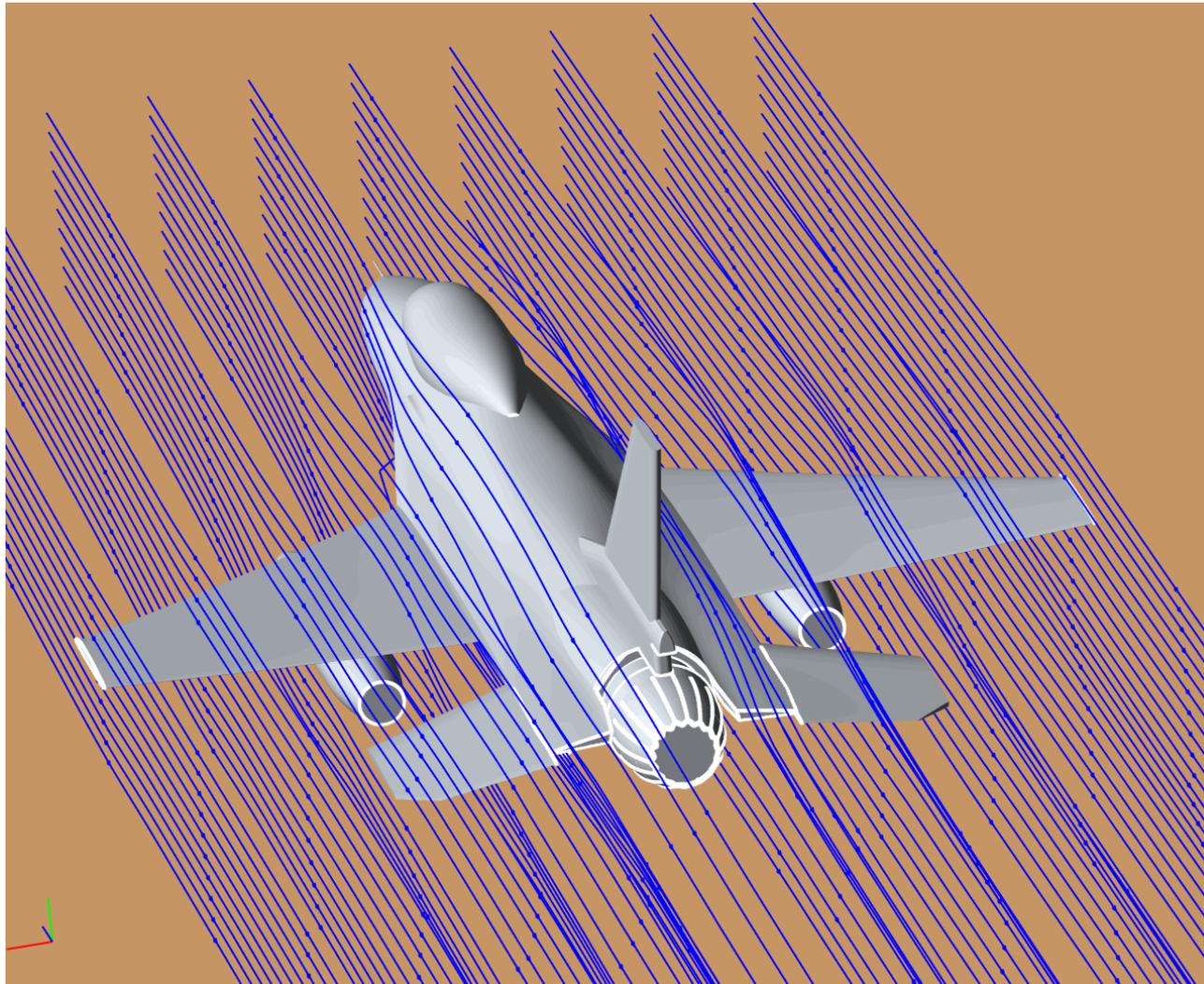


МВС против «Атакующего сокола» F16

Пусть он помашет крыльями!



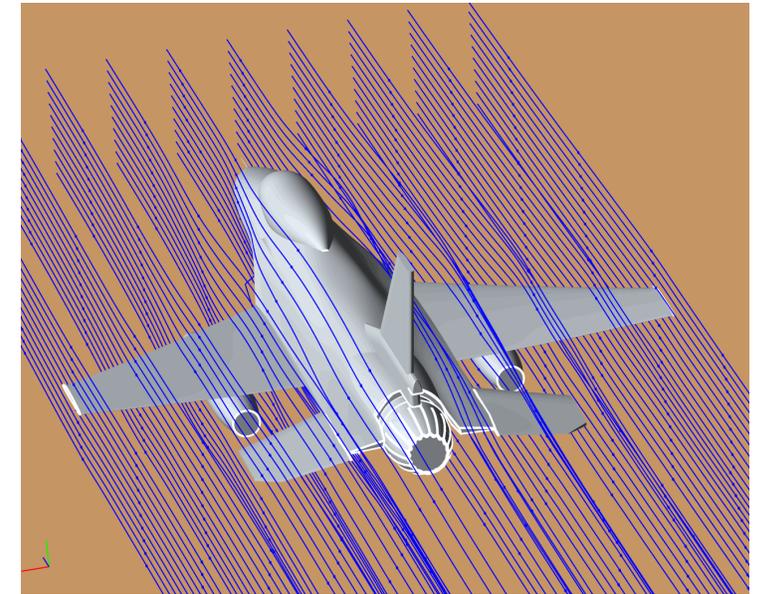
А что если использовать МВС не по назначению...



F16 – основной самолет НАТО



Валидация



Модель магнитной гидродинамики

- Уравнения движения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \qquad \frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\tau}}_{eff} + \mathbf{F}_L \qquad \text{Сила Лоренца} \qquad \mathbf{F}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

- Уравнение энергии

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} (\nabla H - \mathbf{V} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{V})) \right) + Q_{Joule} \qquad \text{Джоулево тепло} \qquad Q_{Joule} = j^2 / \sigma$$

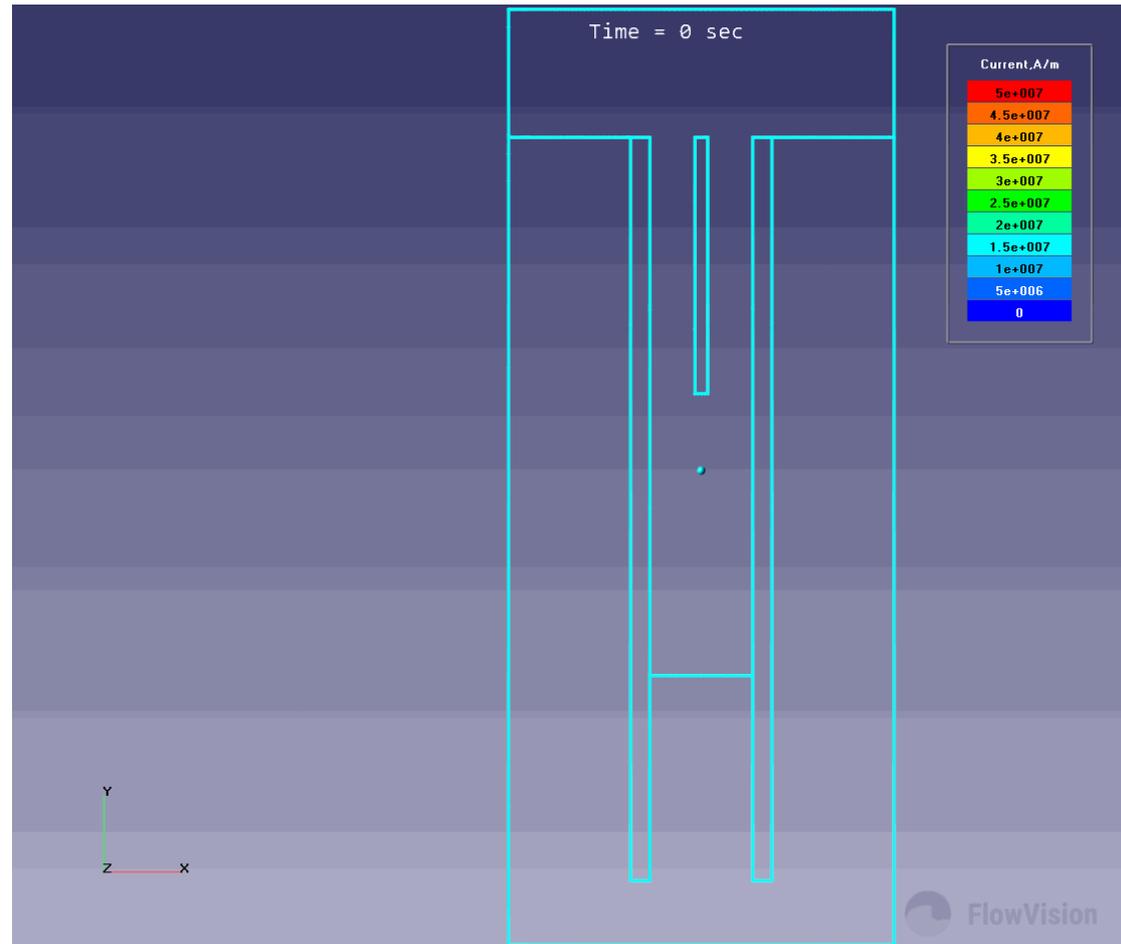
- Стационарные уравнения Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \qquad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} \qquad \mathbf{E} = -\nabla \varphi \qquad \nabla \cdot \sigma \nabla \varphi = \nabla \sigma (\mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{A})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_a \cdot \mathbf{j} \qquad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \qquad \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu_a \cdot (\sigma (\nabla \varphi + \mathbf{V} \times \nabla \times \mathbf{A}))$$



3D тест движения искры в упрощенном искроразряднике



Распределение электрического тока



Суэта вокруг модели обледенения



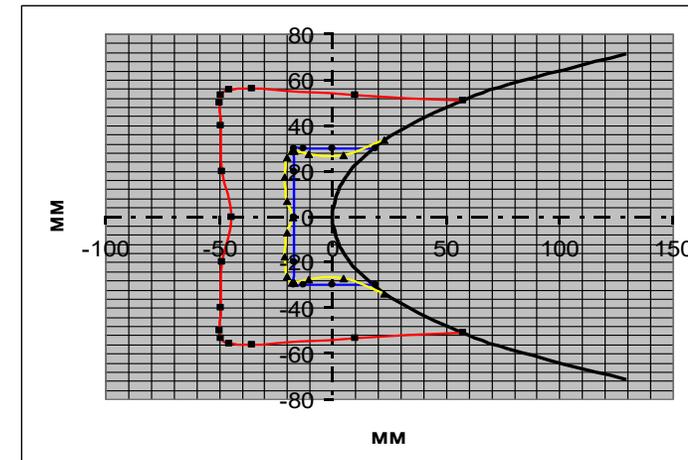
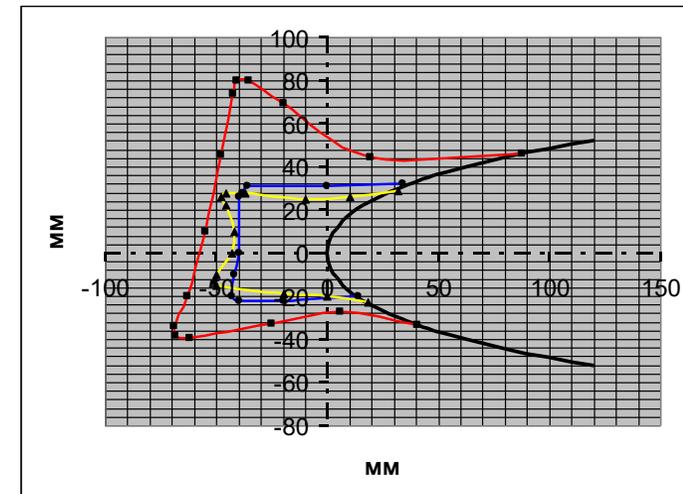
Оценка изменения аэродинамических характеристик ВС в условиях обледенения

Обледенение в полете.



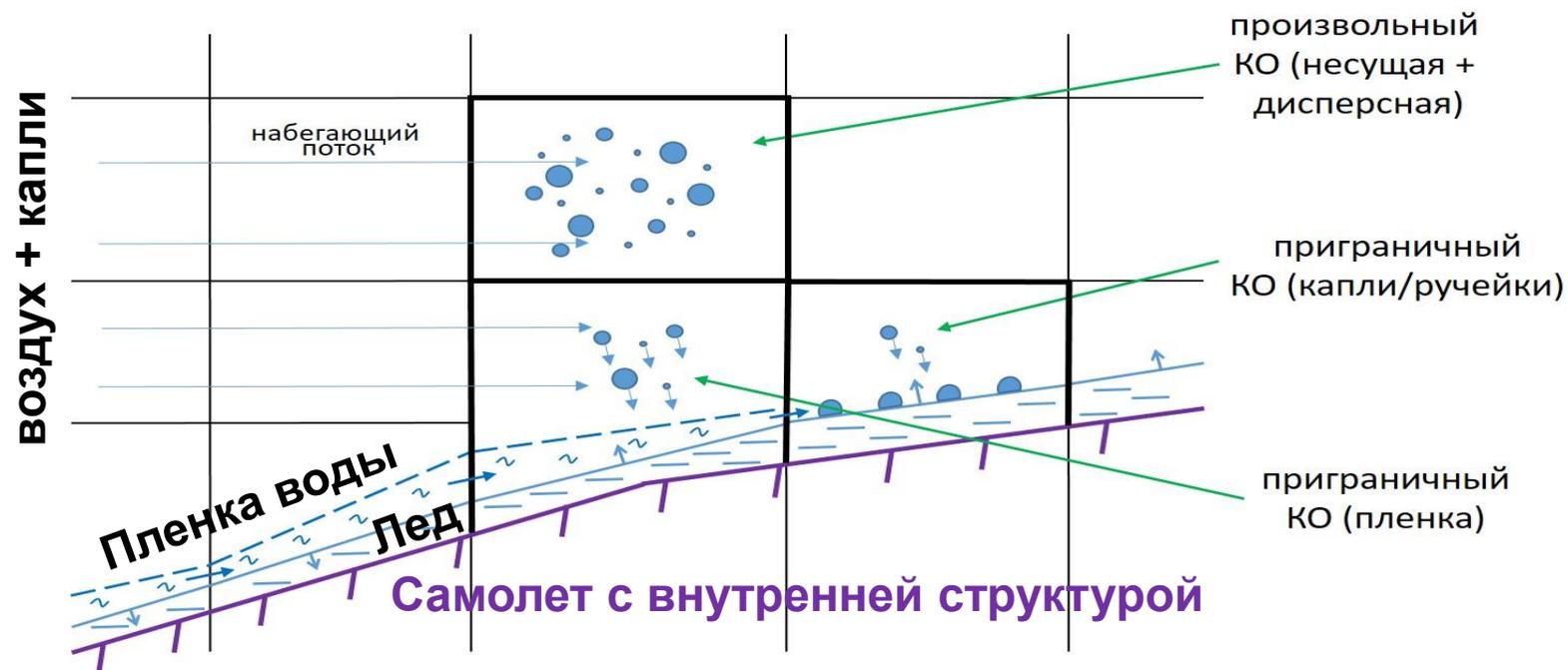
Подтверждение расчетных и экспериментальных форм льда.

полет
расчет для полета
расчет для нормируемых условий



Отсутствует отечественное ПО для расчёта форм ледяных отложений, признанное сертификационными органами!

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 софт

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

Авторские программы

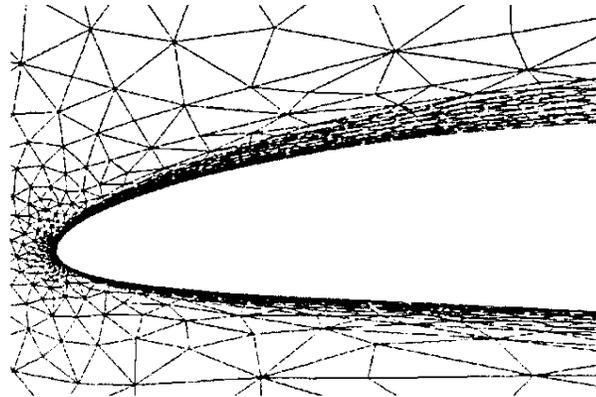
- **Левченко В.С.(ЦАГИ)**
- **Алексеенко С., Приходько А.
(Днепропетровский национальный
университет)**



Современное состояние ПО

ПРОБЛЕМЫ

- **Лагранжева сетка, отслеживающая лед**



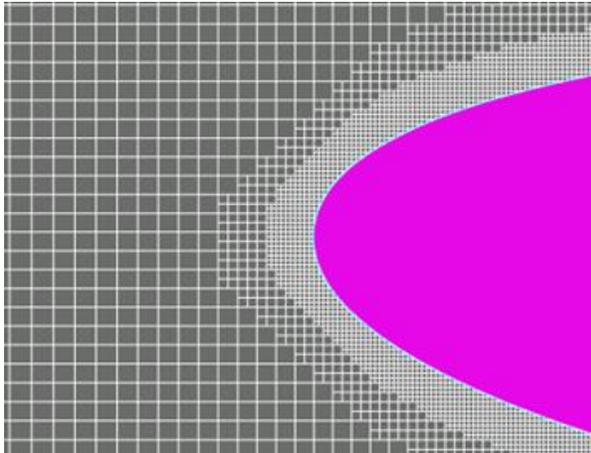
При сложных формах льда генератор расчетной сетки работает нестабильно → «падения»

- **Простые модели теплообмена во льду
(рост льда = изменение геометрии крыла)**

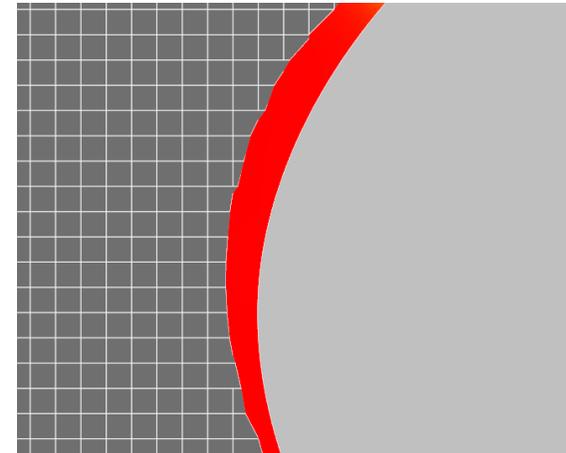


Модель IceVision

Автоматический генератор сетки
SGGR для любых геометрий



Моделирование фазы льда
при помощи метода VOF



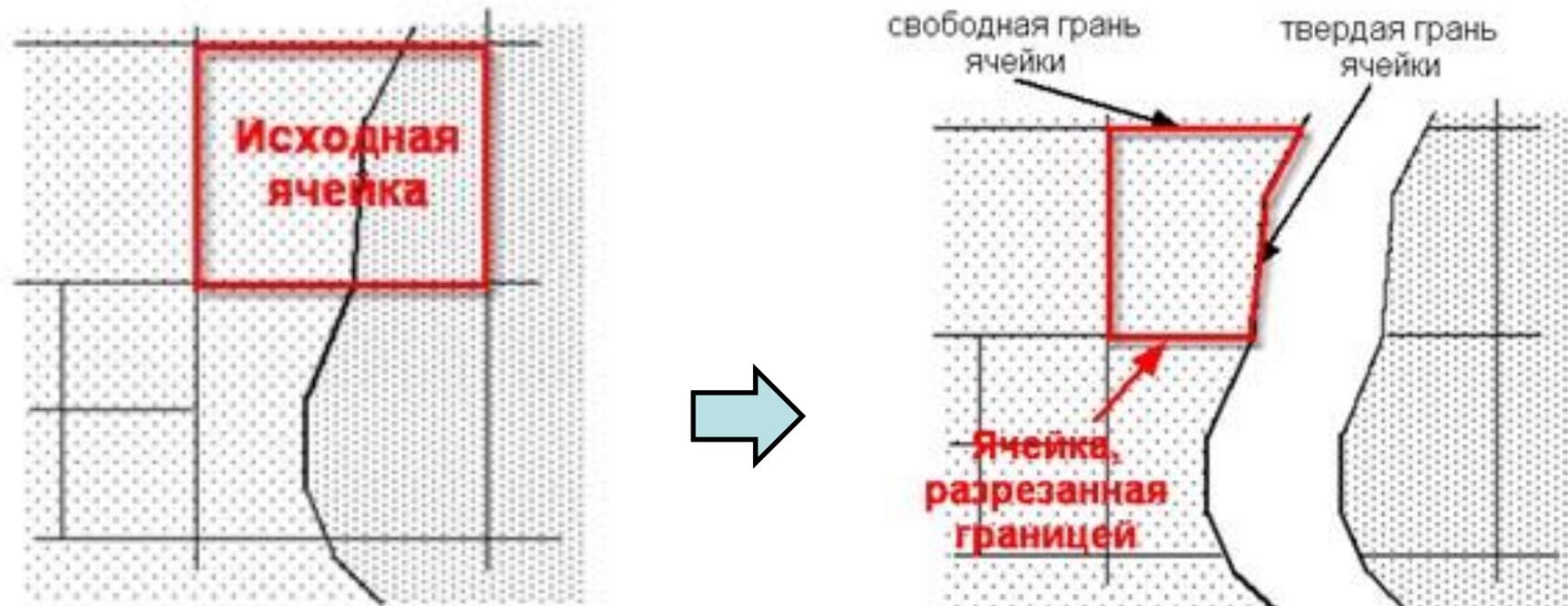
Позволяет решать задачи:

- **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

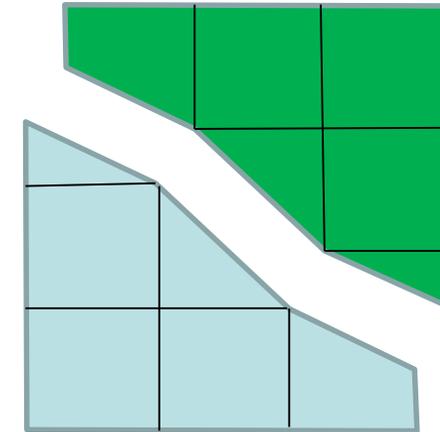


Модель VOF – расчет свободной поверхности

Реконструкция

0.25	0	0
1 ^u	0.5	0
1	1	0.75

Генерация сетки



VoF – относительный объем жидкости в ячейке

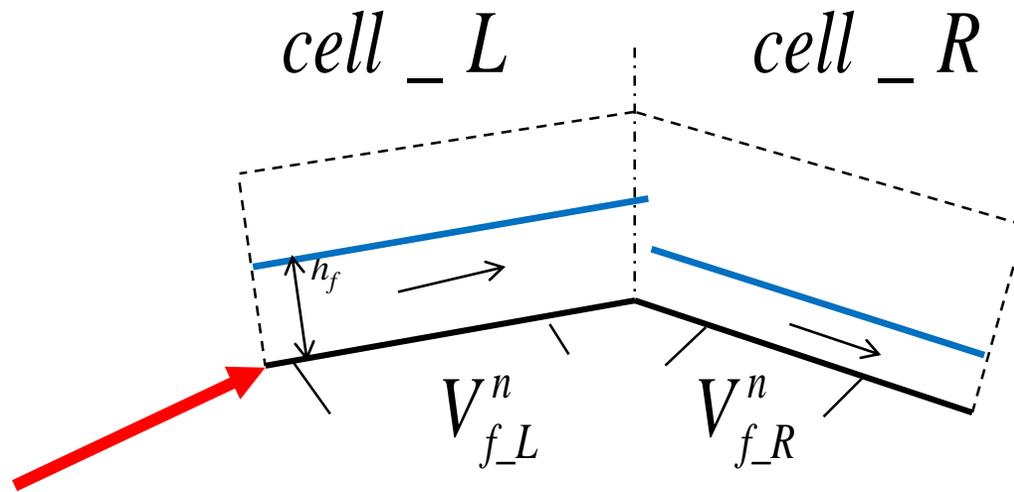
- При $VoF < \epsilon$ ячейка – газовая (GAS)
- При $VoF > 1 - \epsilon$ ячейка – жидкостная (FLUID)
- При $\epsilon < VoF < 1 - \epsilon$ ячейка – поверхностная (SURF)

$$\epsilon = 10^{-2} \dots 10^{-5}$$

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



Модель пленки



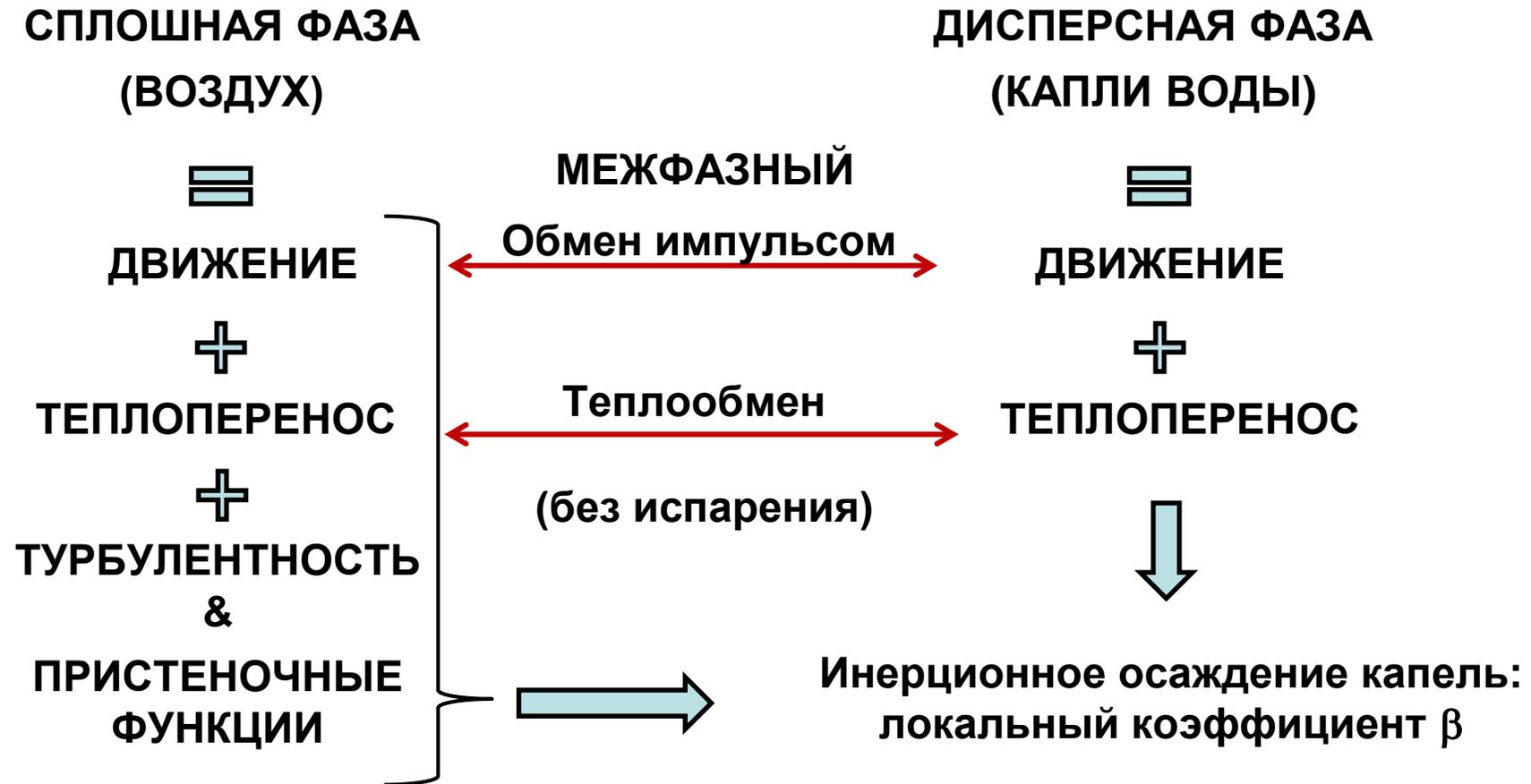
**Твердая поверхность либо
поверхность льда,
реконструированная
методом VOF**

**Поток пленки воды
(UPWIND)**

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



МОДЕЛЬ: 2-х фазный поток (Эйлер-Эйлер)



МОДЕЛЬ: обледенения Ice-Vision

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



Движение воздуха

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

← ДВИЖЕНИЕ →

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

Обмен импульсом

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

← ТЕПЛОПЕРЕНОС →

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

Теплообмен

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

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left(2\hat{S} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{V}_c) \hat{\mathbf{I}} \right), \quad \mathbf{J}_q^{eff} = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h_c + h_c \left(\frac{\lambda}{C_p} (1 - Le) + \frac{\mu_t}{Pr_t} (1 - Le_t) \right)$$

← ТУРБУЛЕНТНОСТЬ →

ВЫСОКОРЕЙНОЛЬДСОВАЯ МОДЕЛЬ:

Модели RANS – k-ε, SA, SST + пристеночные функции

Движение капель воды

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

ДВИЖЕНИЕ

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

Обмен импульсом

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

ТЕПЛОПЕРЕНОС

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

Теплообмен

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

Теплоперенос во льду

Тепловой баланс

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



Рост льда – уравнение для VOF

$$\frac{dF}{dt} + V \cdot \nabla F = \dot{m}_{ice}$$

+ уравнение теплопроводности

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



Движение пленки воды

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

$$\dot{m}_d = \rho_d \mathbf{V}_d^n S_{base} \quad - \text{выпадение воды из воздуха}$$

$$\dot{m}_{film} = \dot{m}_d - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{evap} \quad - \text{Сохранение массы пленки}$$

$$\mathbf{V}_f = \frac{h_f}{2\mu_d} \boldsymbol{\tau}_w \quad - \text{Скорость движения пленки}$$

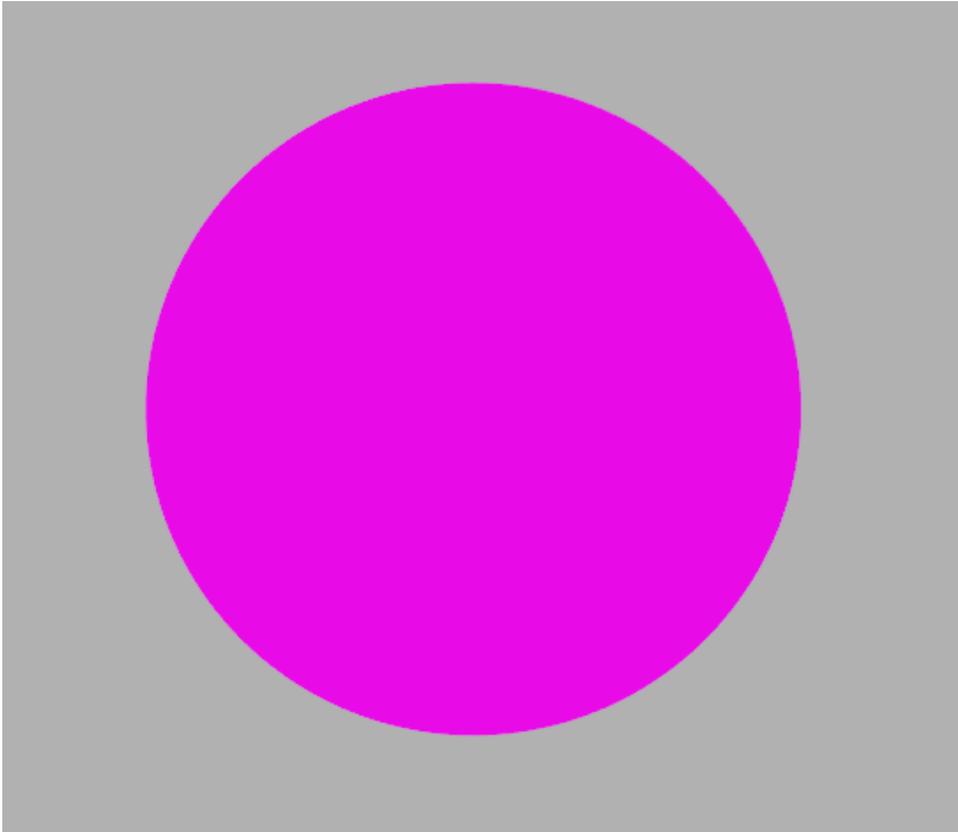
$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta \tau_f} + \sum_{sides} F_{side} = \frac{S_{base}}{\Omega_{cell} \rho_d} \dot{m}_{film} \quad - \text{Уравнение движения пленки}$$

$$\dot{m}_{evap(subl)} \cdot (1 - Y_{vap,w}) = \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{Y_{vap,w} - Y_{vap,c}}{y_{gas,c}} \quad \text{Испарение пленки (или сублимация льда)}$$

$$Y_{vap,w} = \frac{\rho_{vap,w}}{\rho_w} = X_{vap,w} \frac{m_{vap}}{m_w} \quad \text{молярная доля пара} \quad X_{vap,w} = \frac{p_{vap,sat}(T_w)}{p} \quad Y_{vap,c} \quad - \text{Количество пара в воздухе}$$



ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : ЦИЛИНДР



Объект – цилиндр, обтекается воздухом:

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

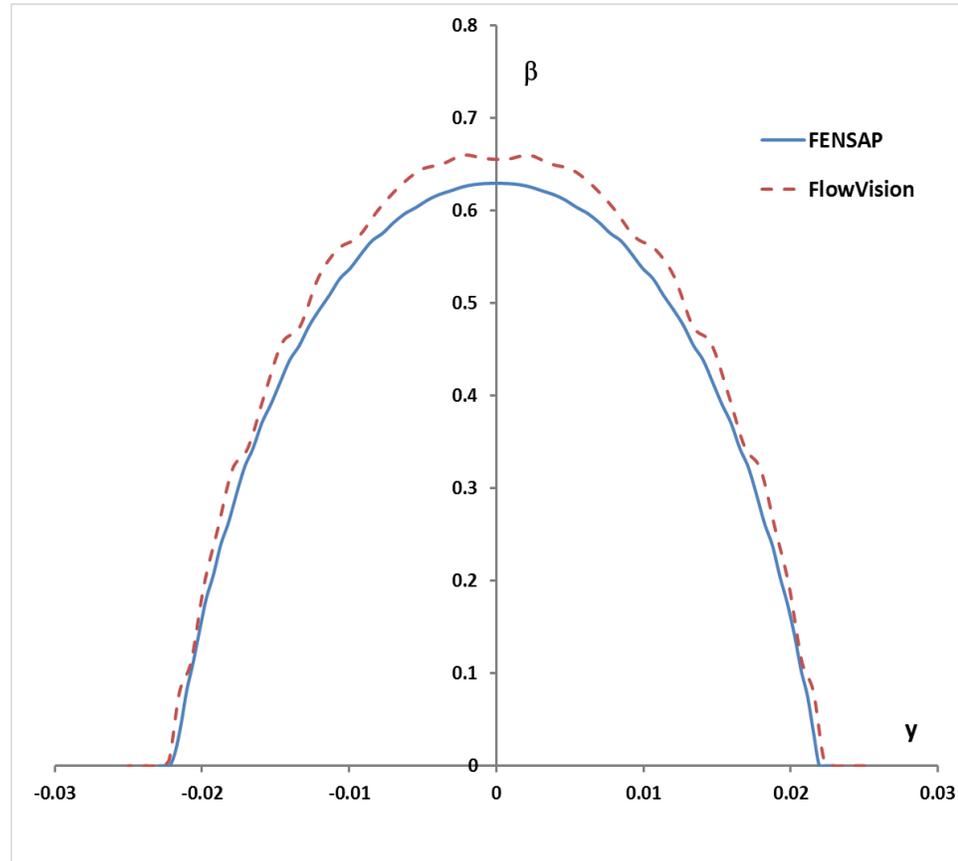
содержащим сферические капли воды:

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

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

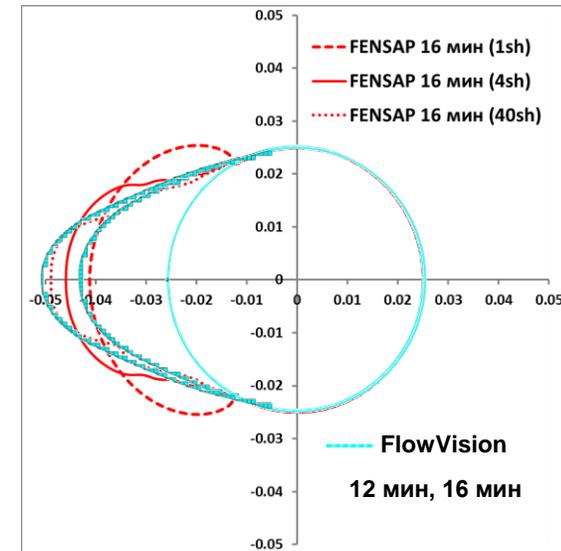


ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : ЦИЛИНДР

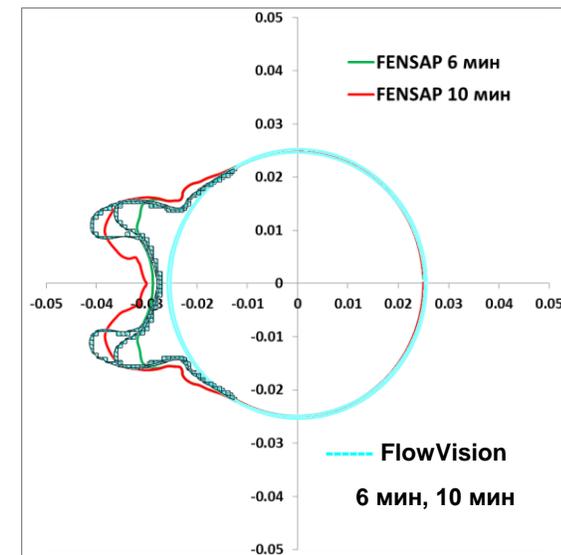


локальный коэффициент захвата капель β

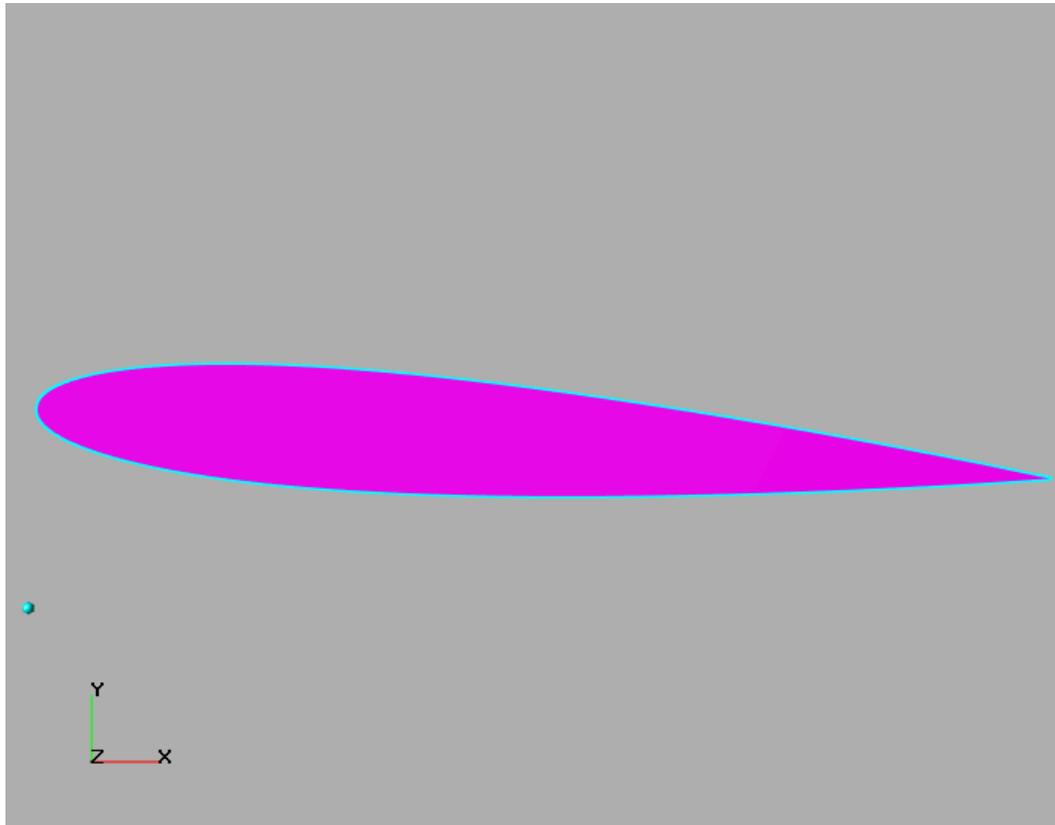
**ЛЕД
СУХОЙ
РЕЖИМ**



**ЛЕД
МОКРЫЙ
РЕЖИМ**



ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : NASA0012



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:

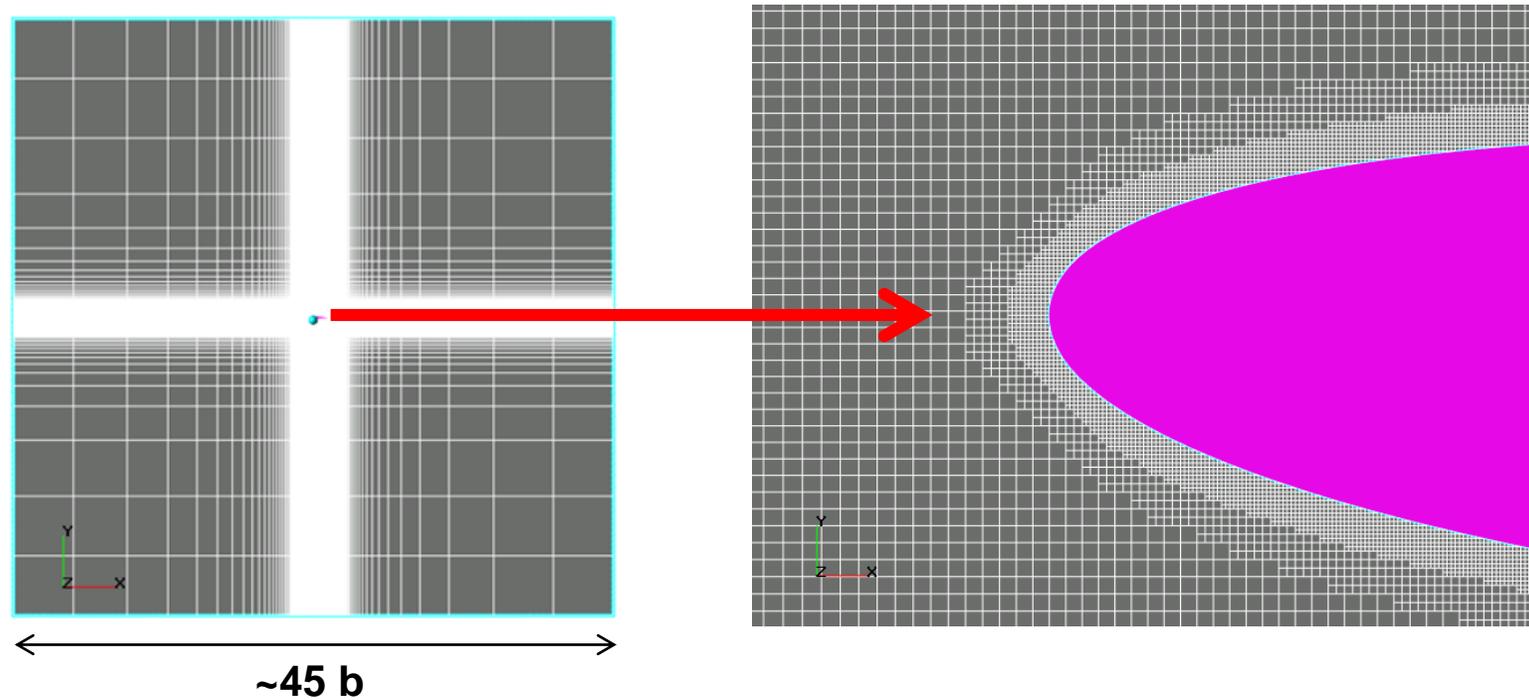
 - $MVD = 20$ [μm]
 - $LWC = 0.5$ [g/m^3]

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



ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : NASA0012

Расчетная область, сетка

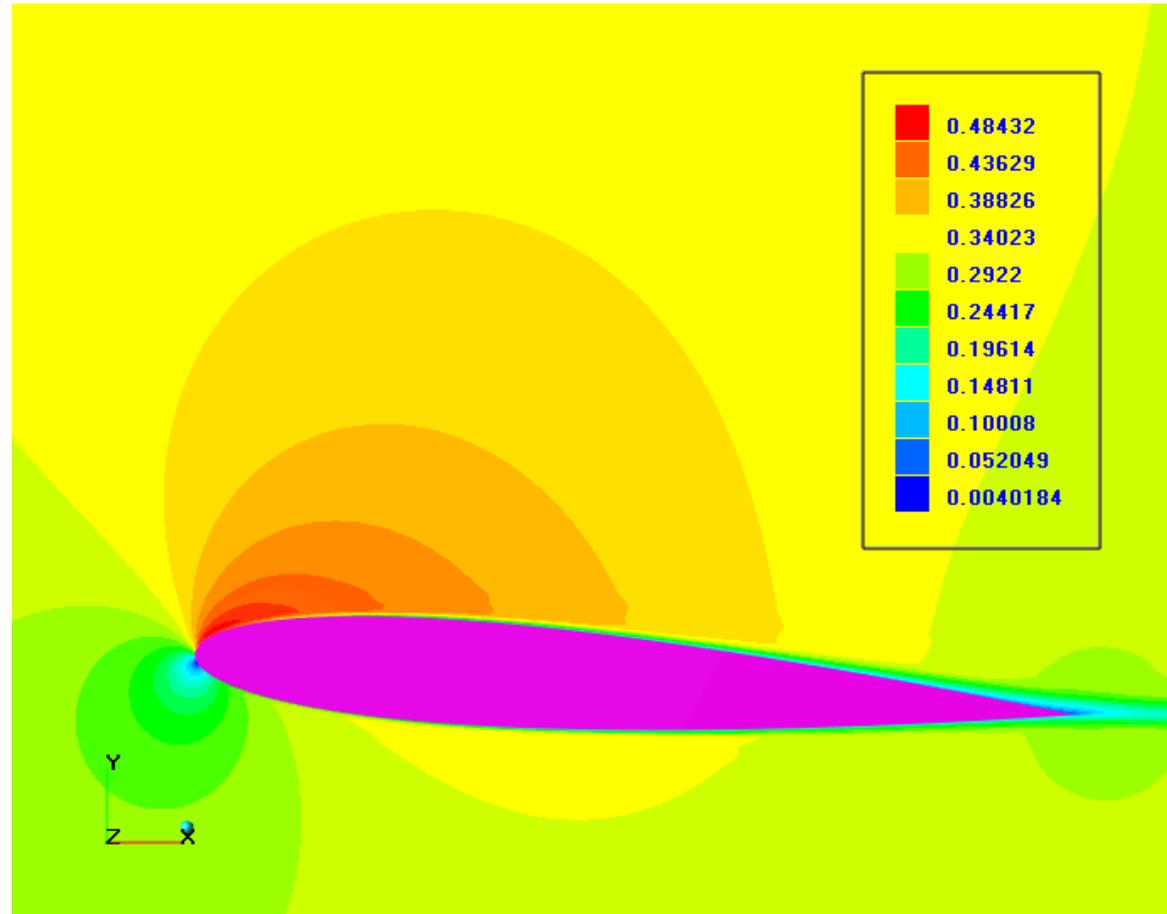


Сгущение + локальная адаптация :

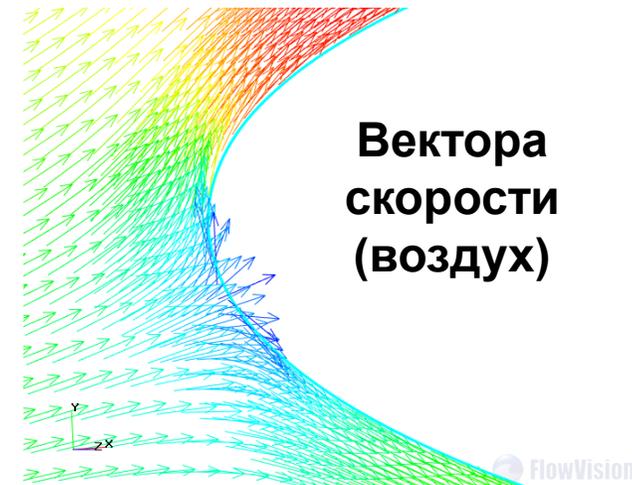
$$Y_+ \approx 50$$



ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : NASA0012



число Маха



Вектора скорости (воздух)

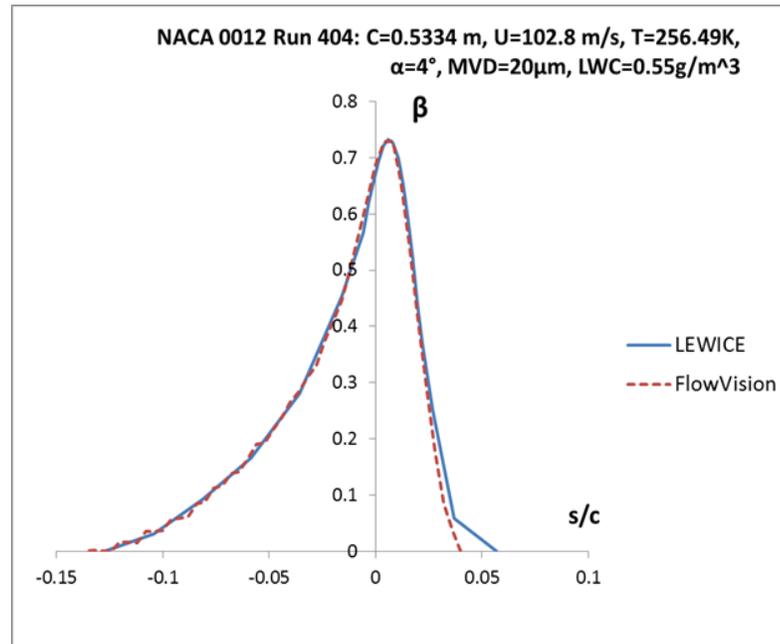


Вектора скорости (капли)



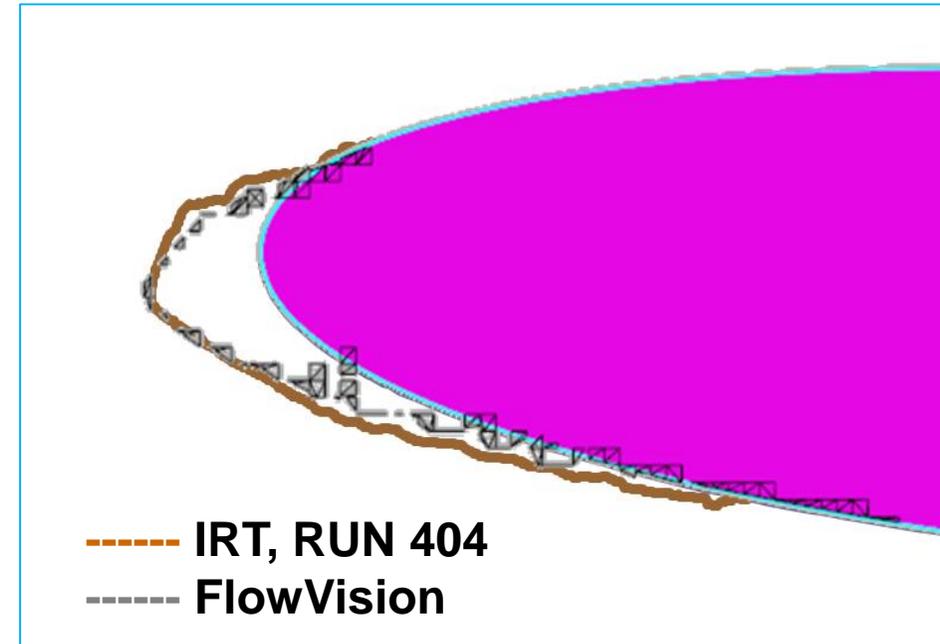
ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : NASA0012

Коэффициент захвата β



в зависимости от дуговой координаты, отсчитываемой от точки торможения потока

Лед

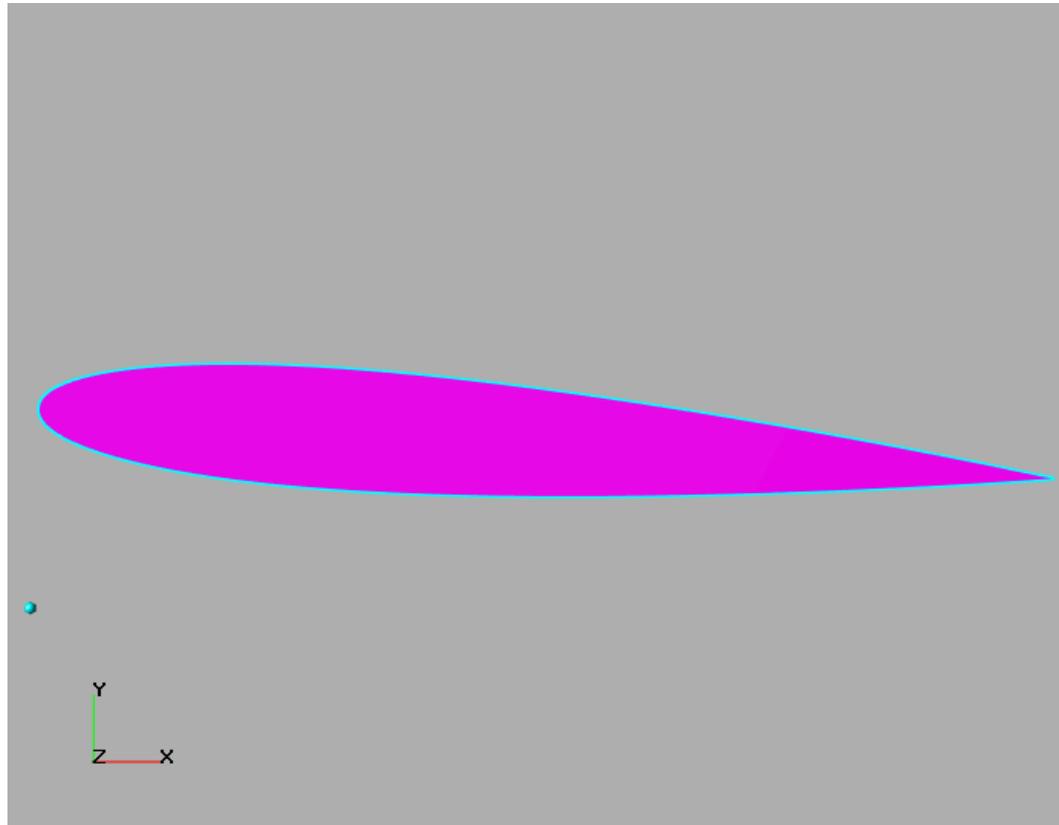


ЭКСПЕРИМЕНТ : NASA Glenn Icing Research Tunnel (IRT)

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



ВАЛИДАЦИЯ Ice-Vision : НАСА0012



Геометрия профиля

RUN 403: профиль НАСА0012 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 НАСА0012 обтекается воздухом под углом атаки 4° :

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

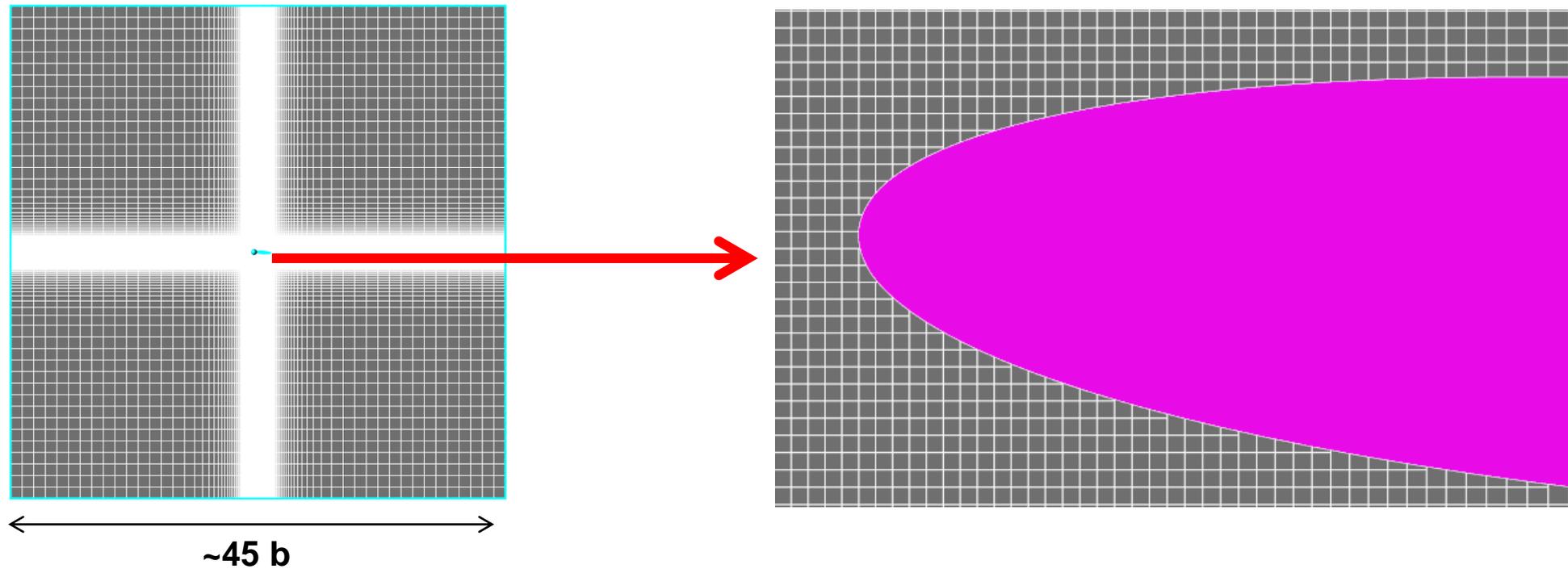
содержащим сферические капли воды:

- $MVD = 20$ [μm]
- $LWC = 1$ [g/m^3]



NACA0012

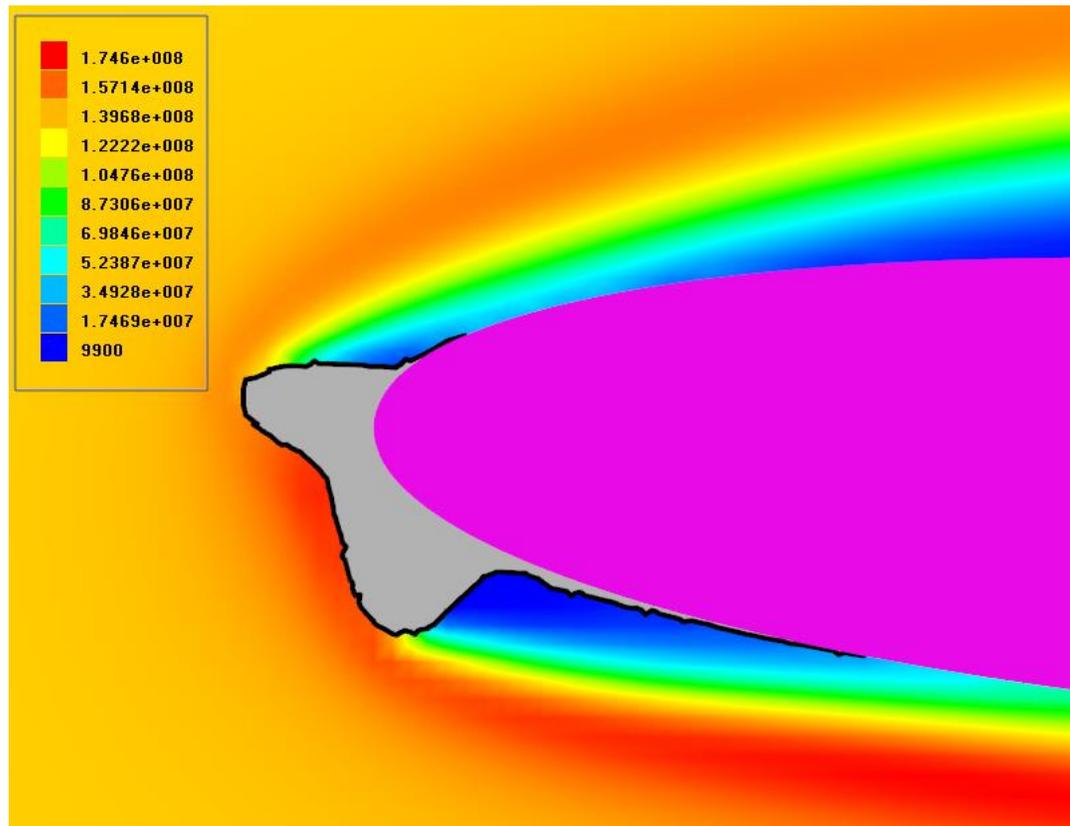
Расчетная область, сетка



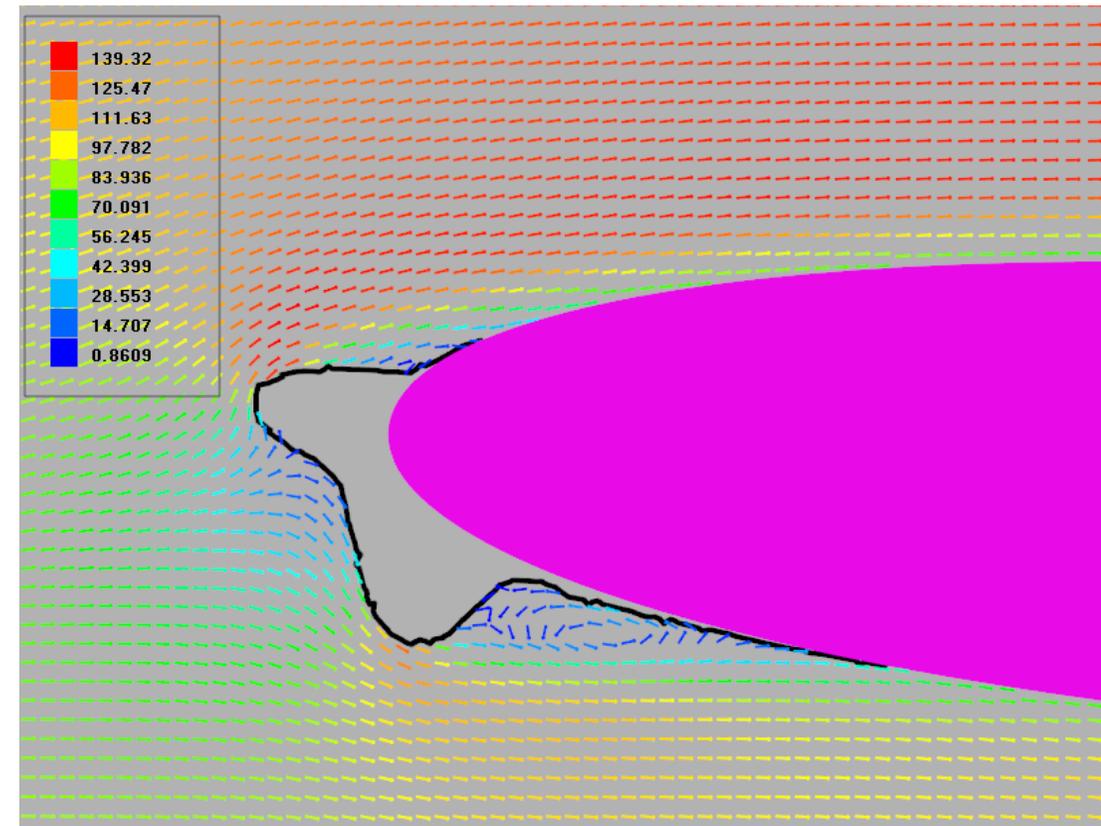
$Y+ \approx 620$



NACA0012, RUN 403, ~500 с (аэродинамика)



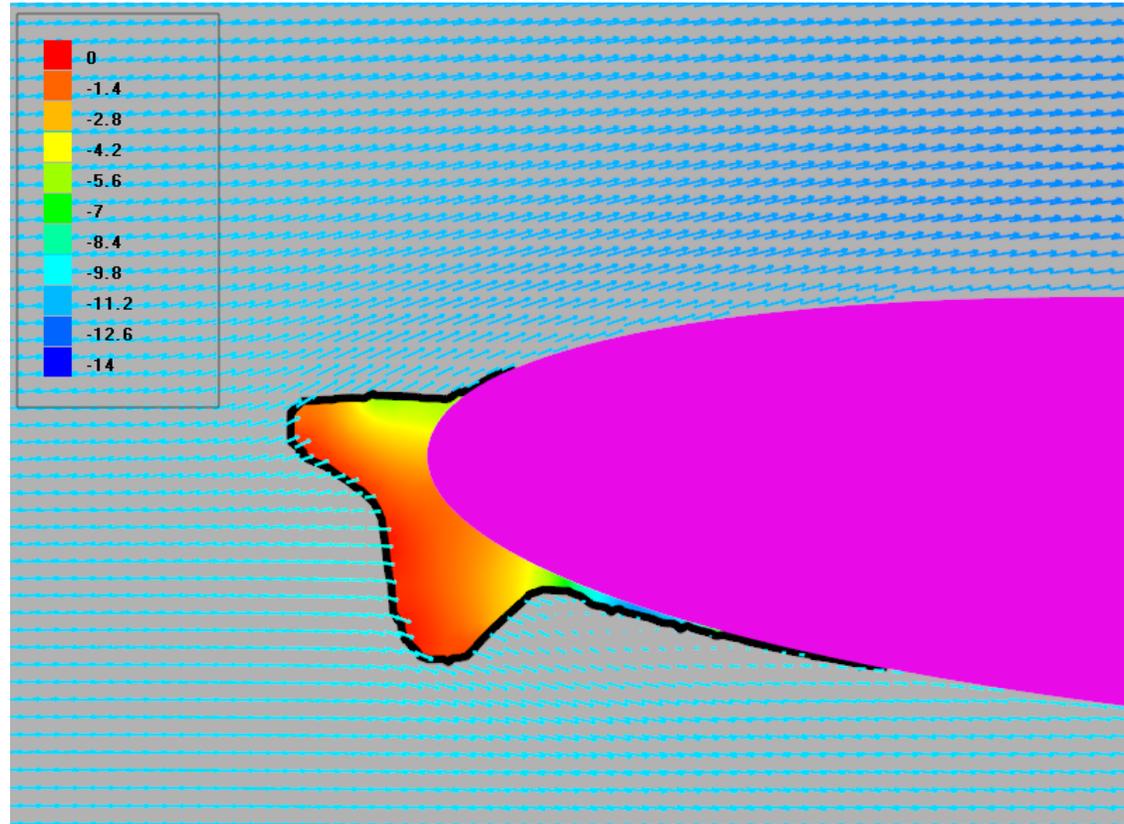
Концентрация (капли)



Скорость (воздух)



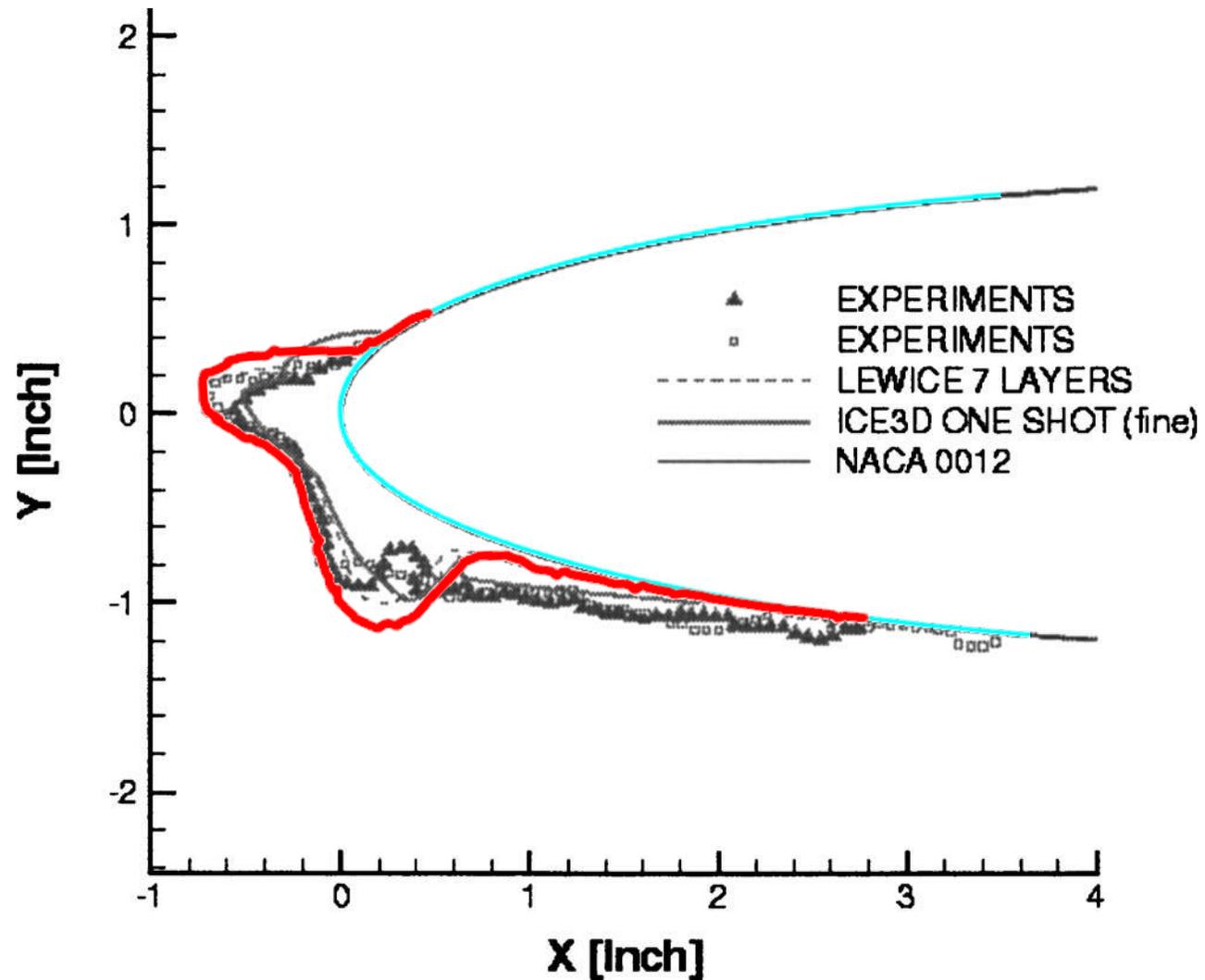
НАСА0012, RUN 403, ~500 с (распределение температуры)



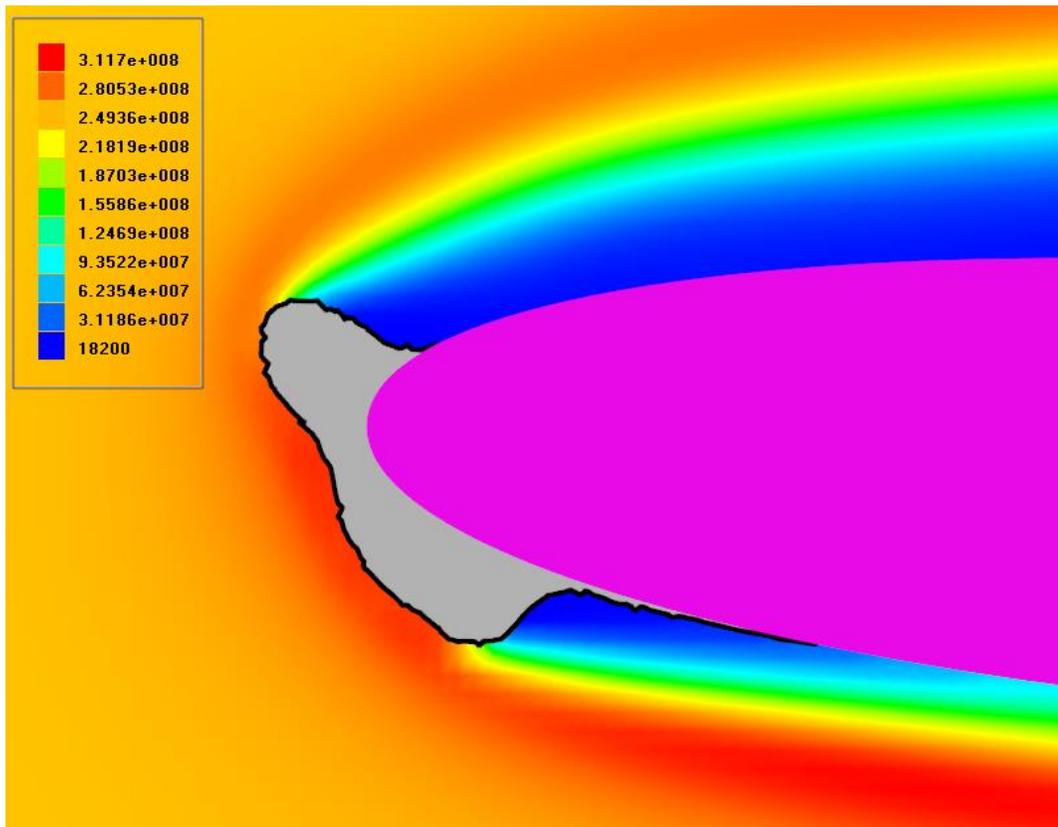
Скорость капель (раскрашена температурой) + температура льда



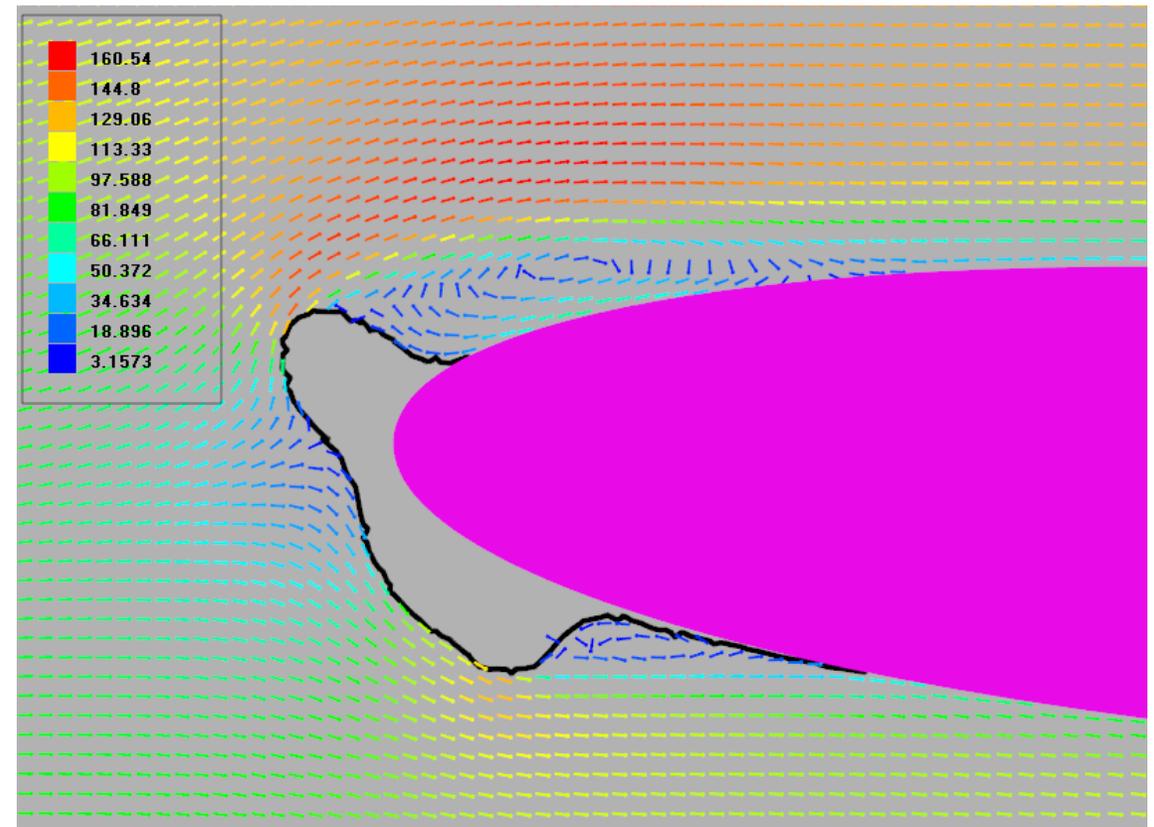
NACA0012, RUN 403, ~500 с (аккреция льда)



NACA0012, RUN 308, ~300 с (аэродинамика)



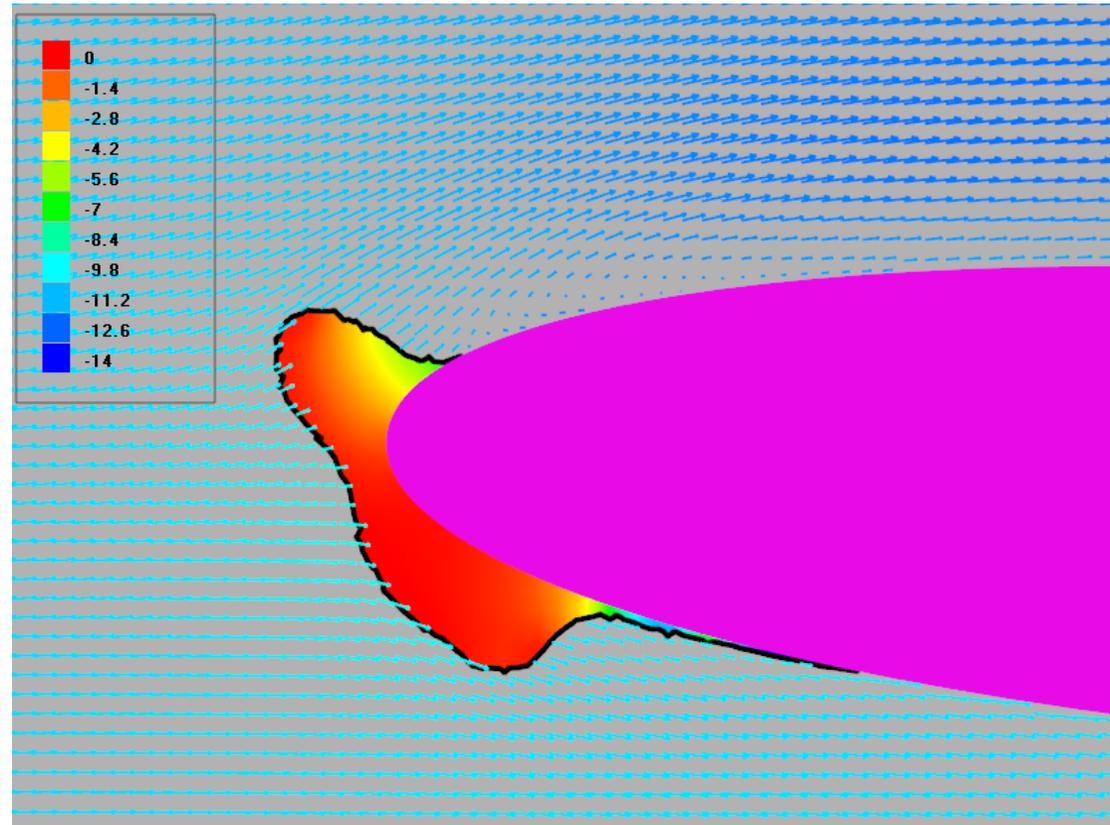
Концентрация (капли)



Скорость (воздух)



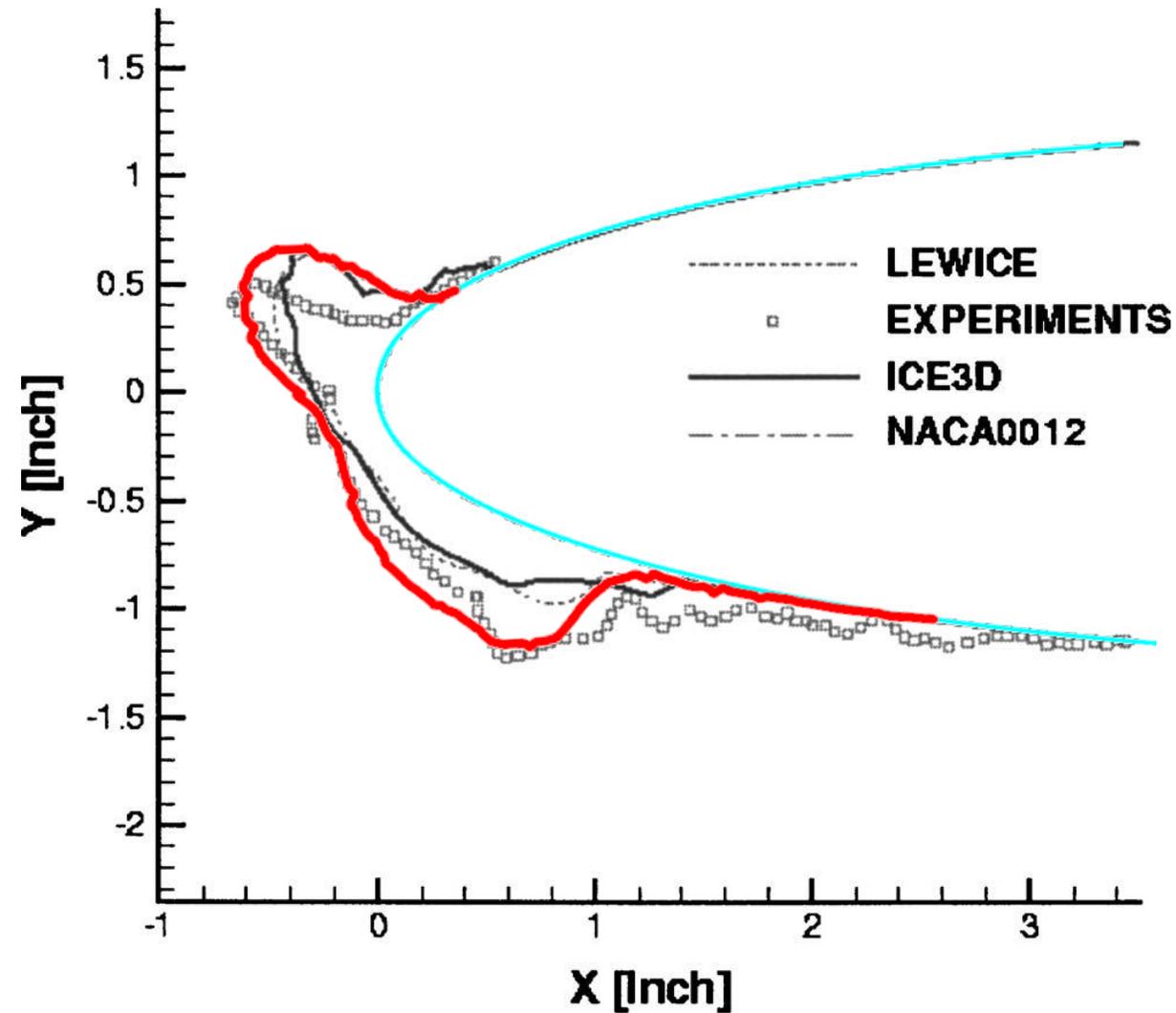
НАСА0012, RUN 308, ~300 с (распределение температуры)



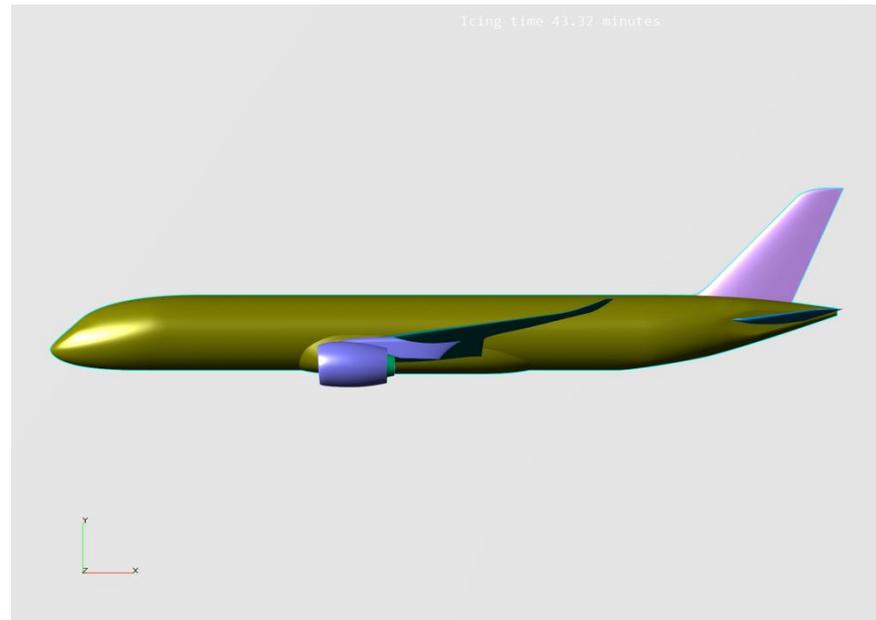
Скорость капель (раскрашена температурой) + температура ЛЬДА



NACA0012, RUN 308, ~300 с (аккреция льда)



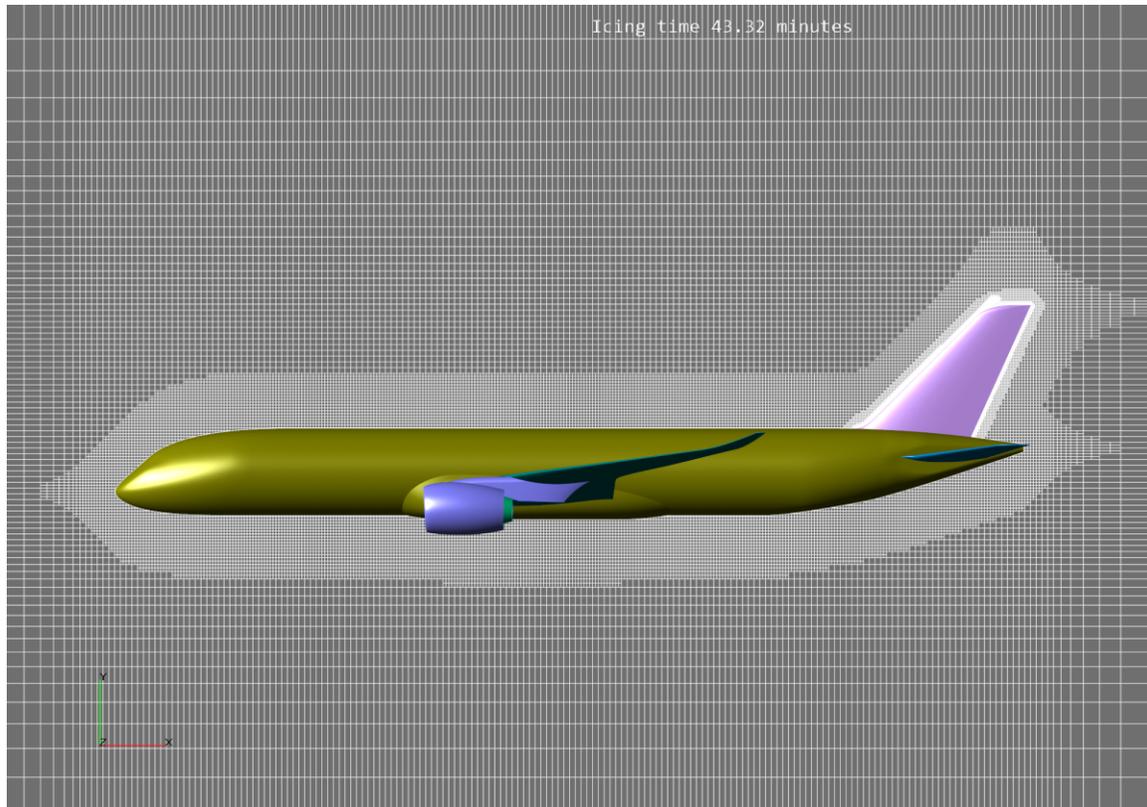
Моделирование обледенение поверхности транспортного самолета



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



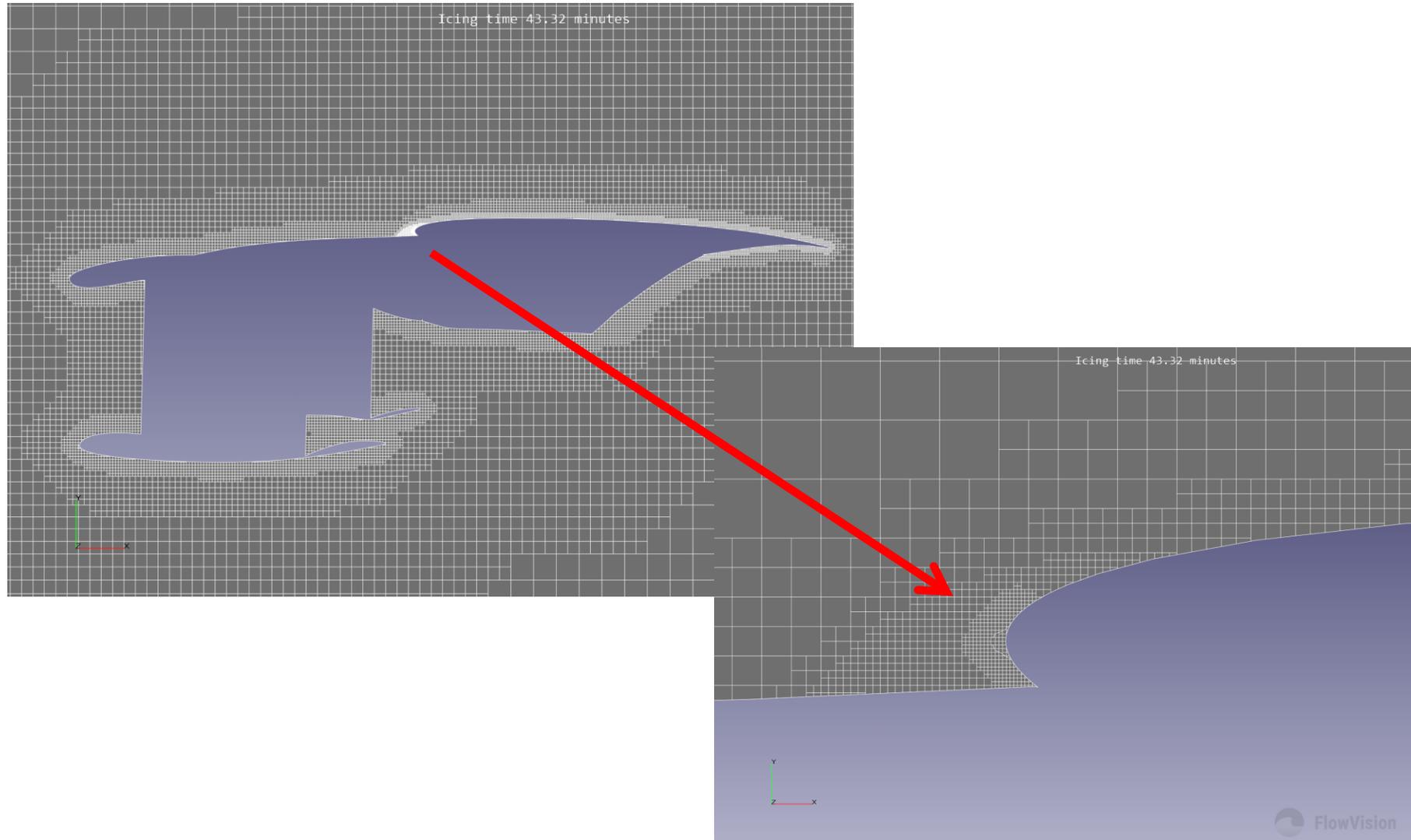
Расчетная сетка



- ❑ 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

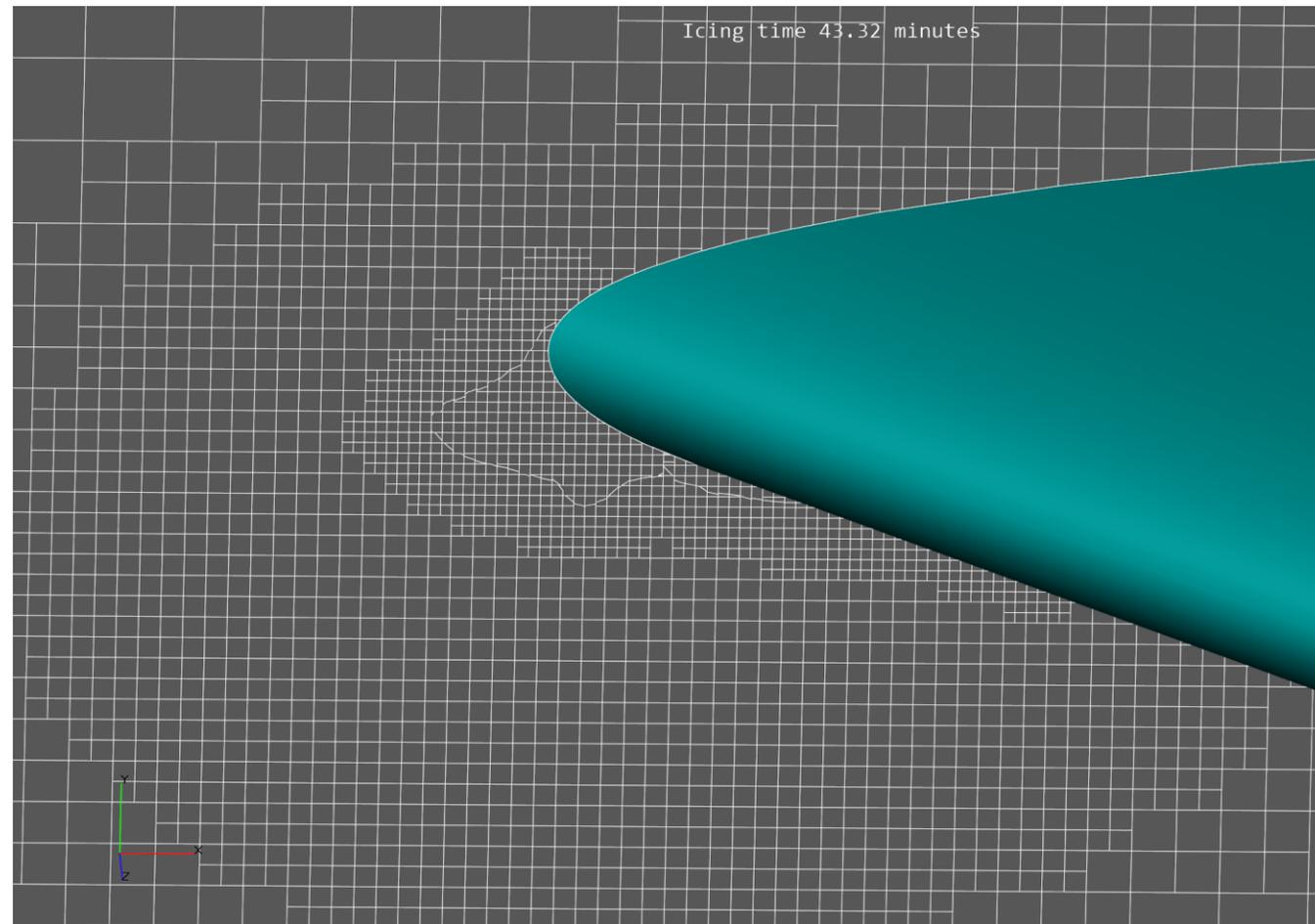


Сетка на секущей мотогондолу плоскости

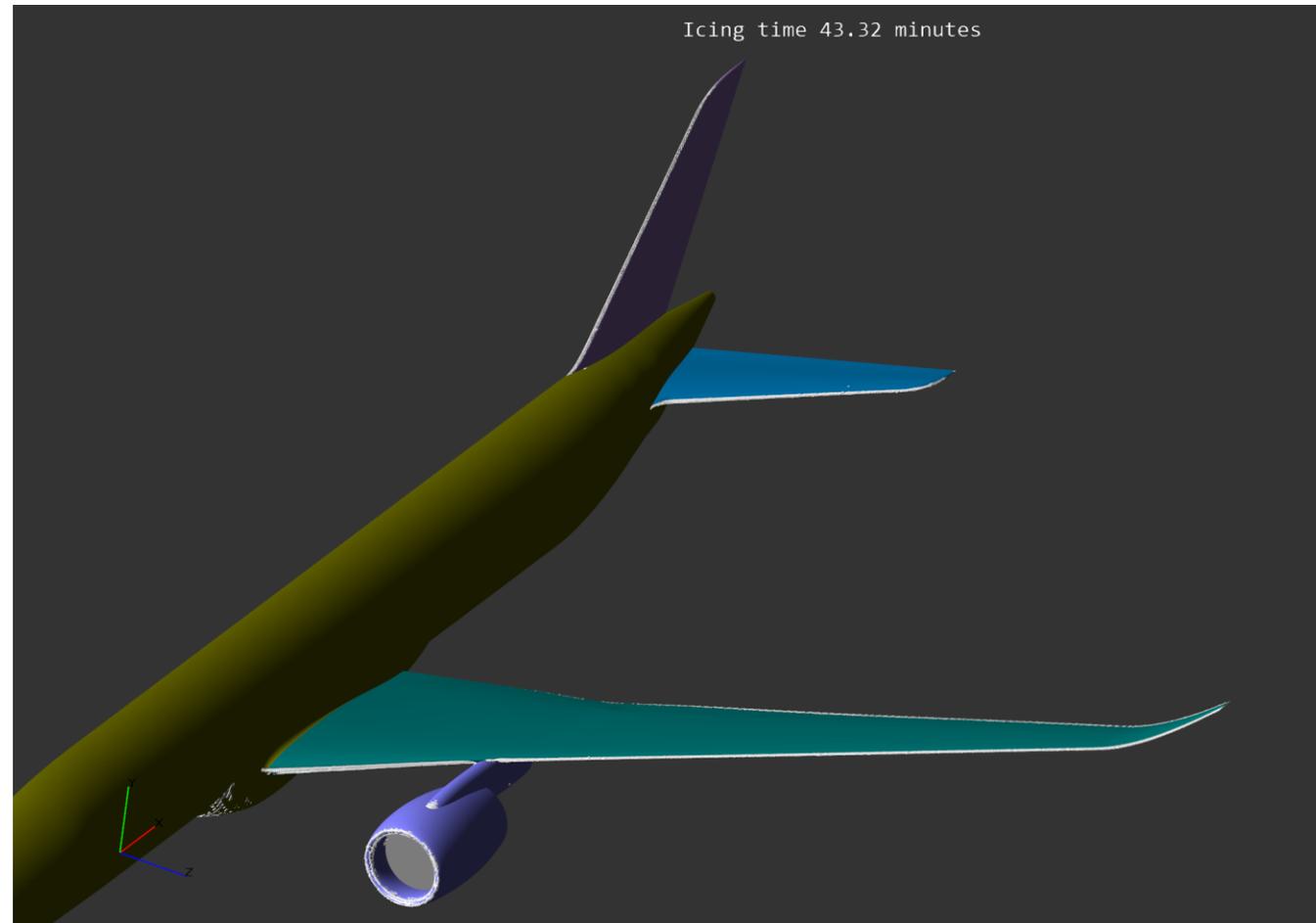


Сетка в окрестности передней кромки крыла

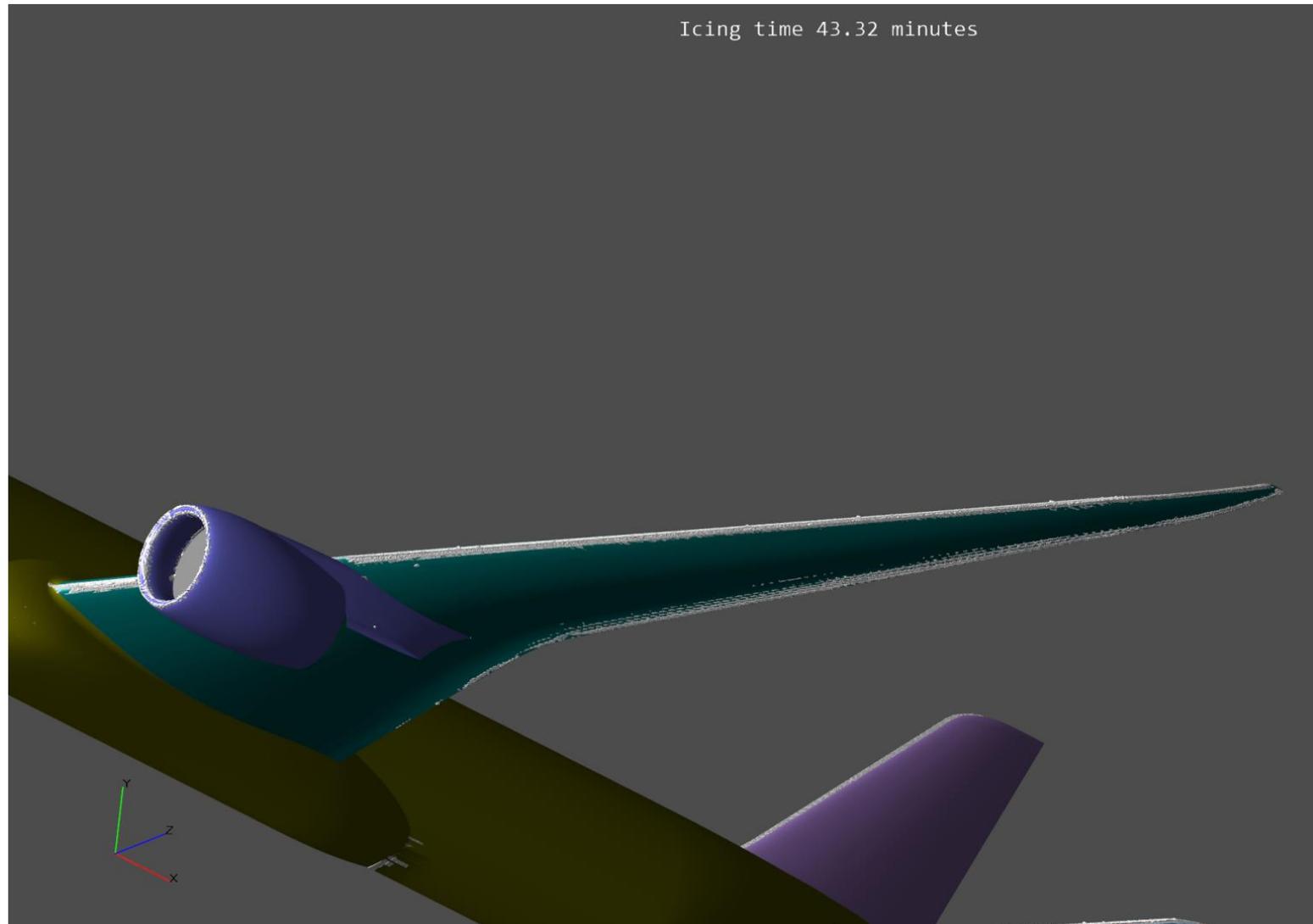
Форма льда выделена белой линией



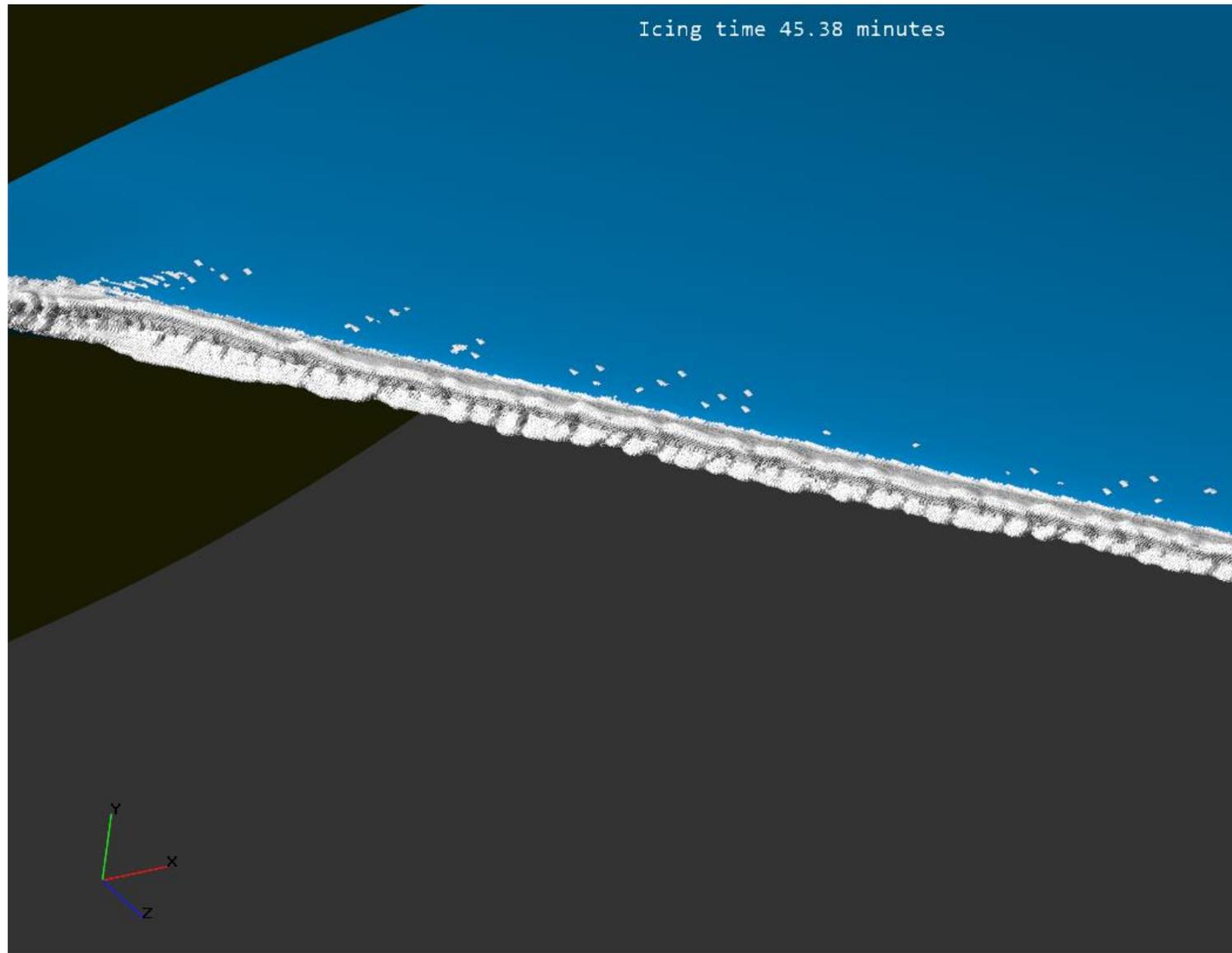
Наросшие корочки льда на передних кромках крыла, хвостового оперения и воздухозаборника



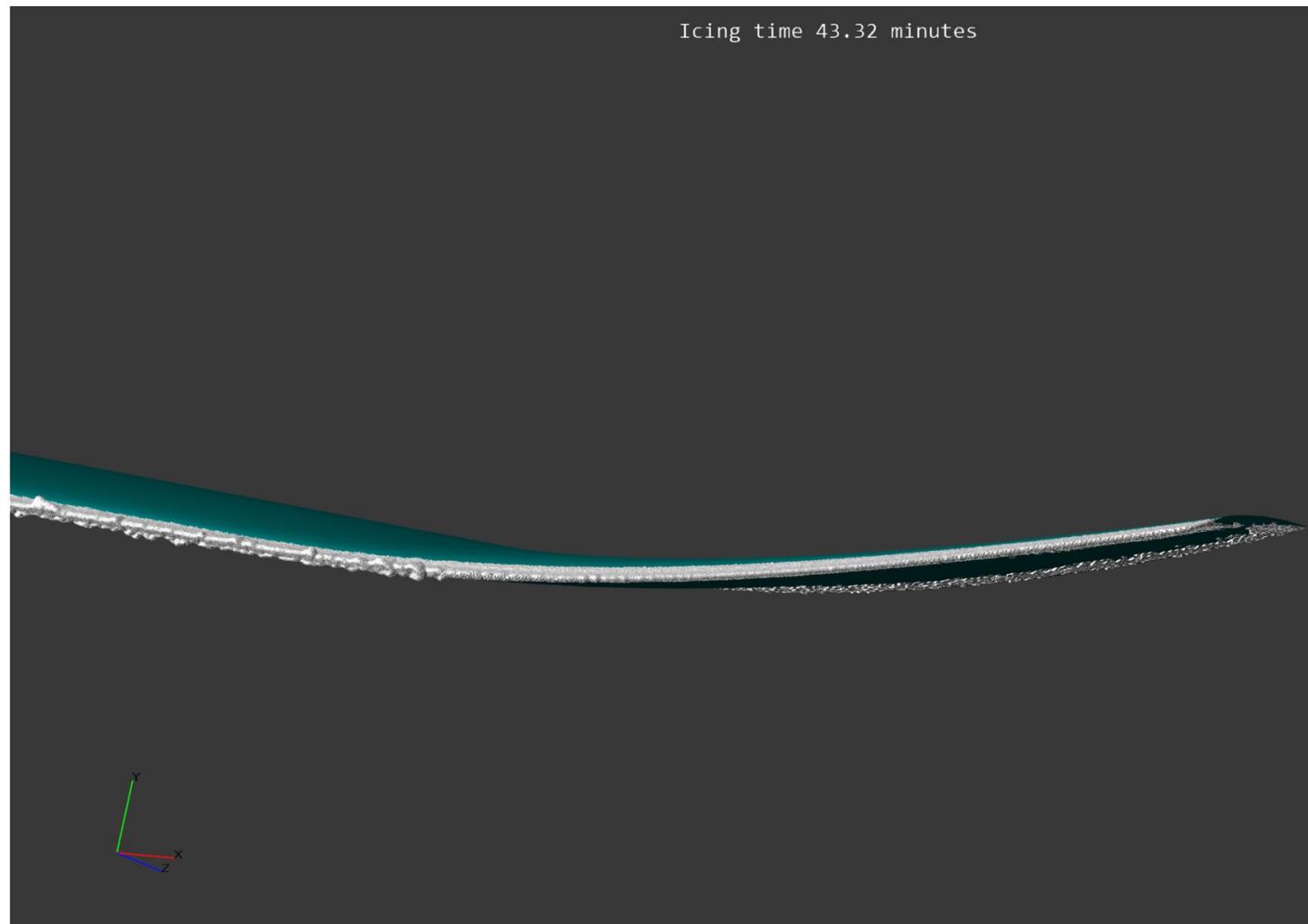
Обледенение крыла. Вид «снизу»



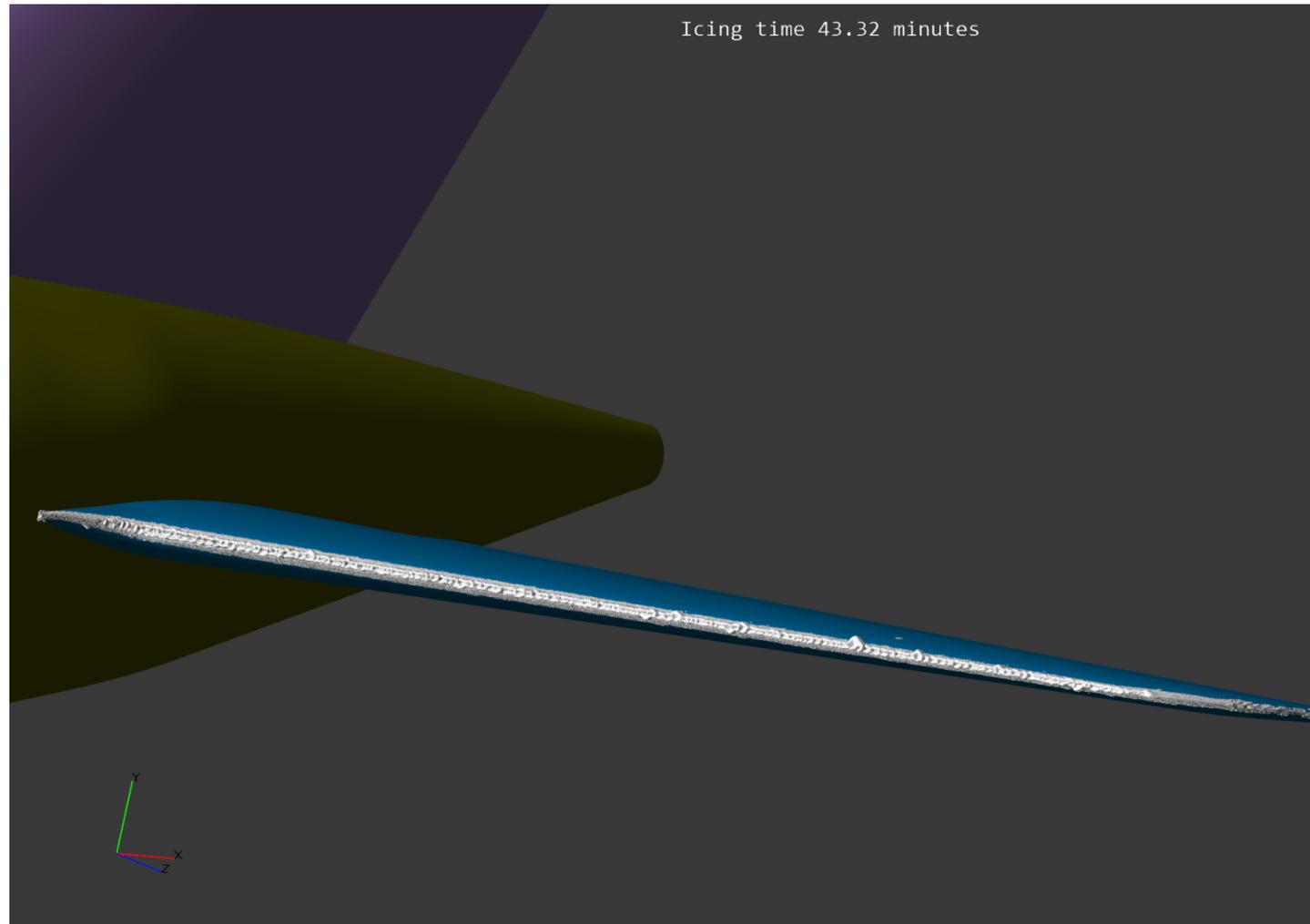
Лед на крыле вблизи фюзеляжа



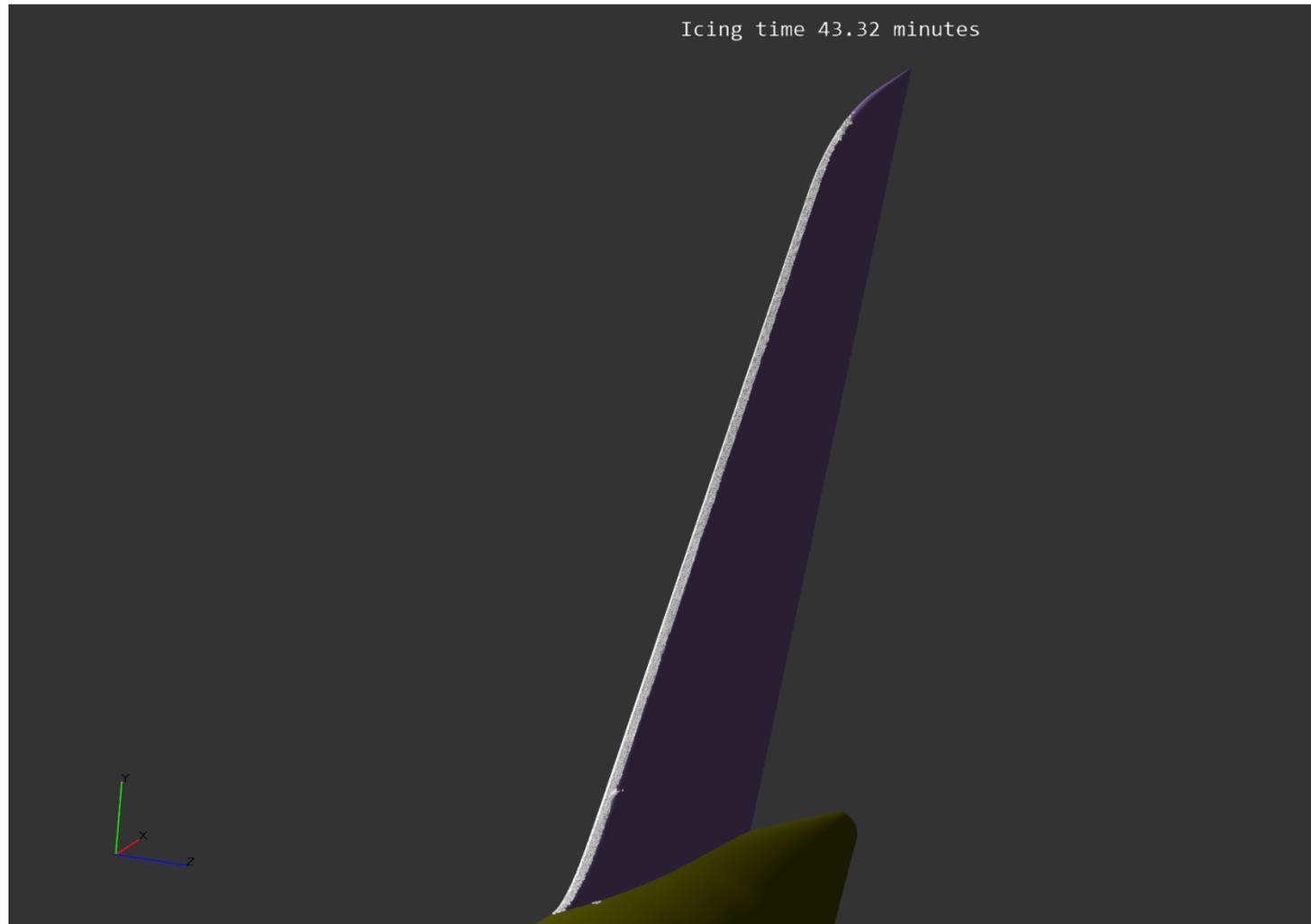
Обледенение законцовки крыла



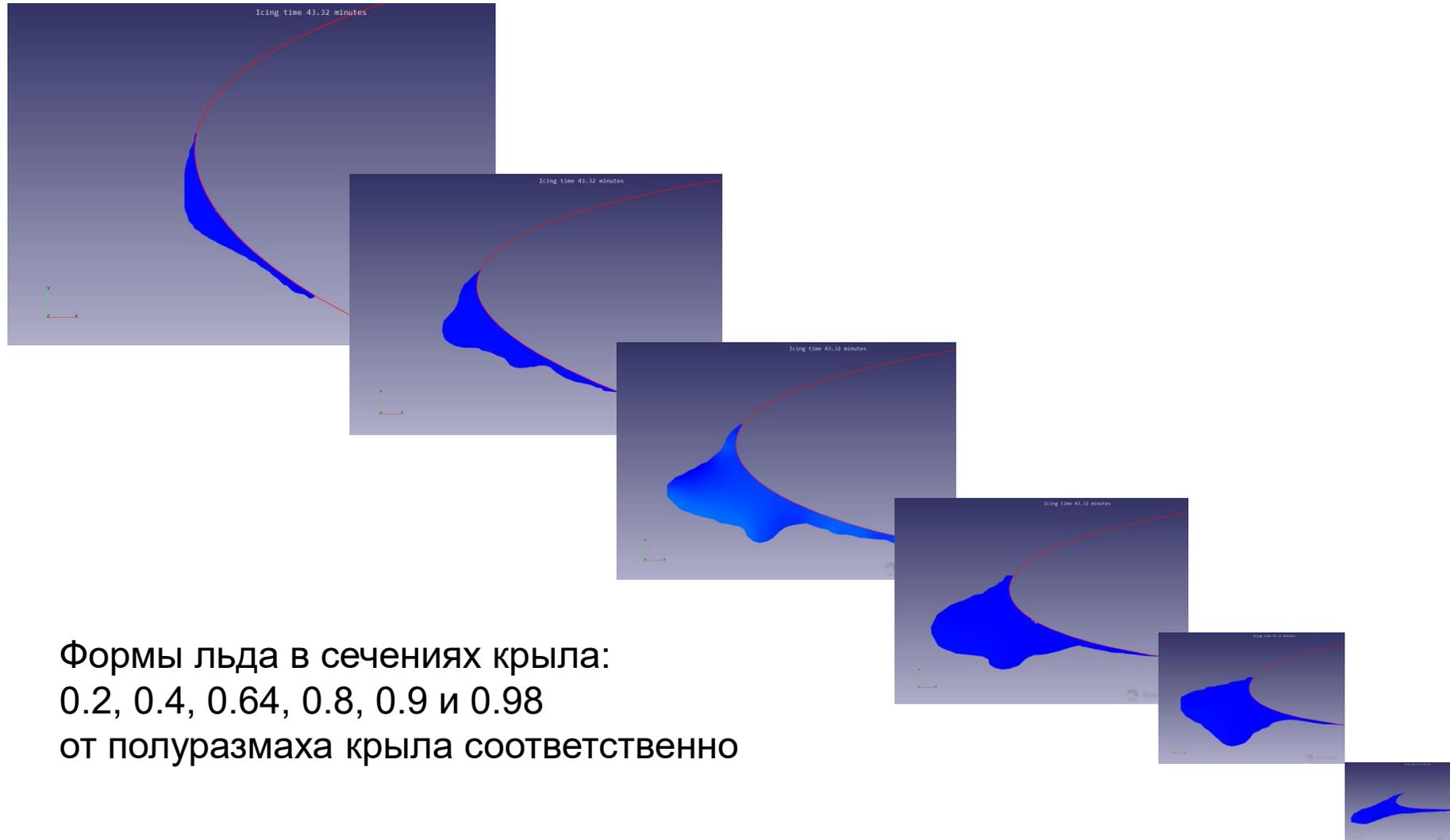
Лед на горизонтальном оперении



Лед на вертикальном оперении

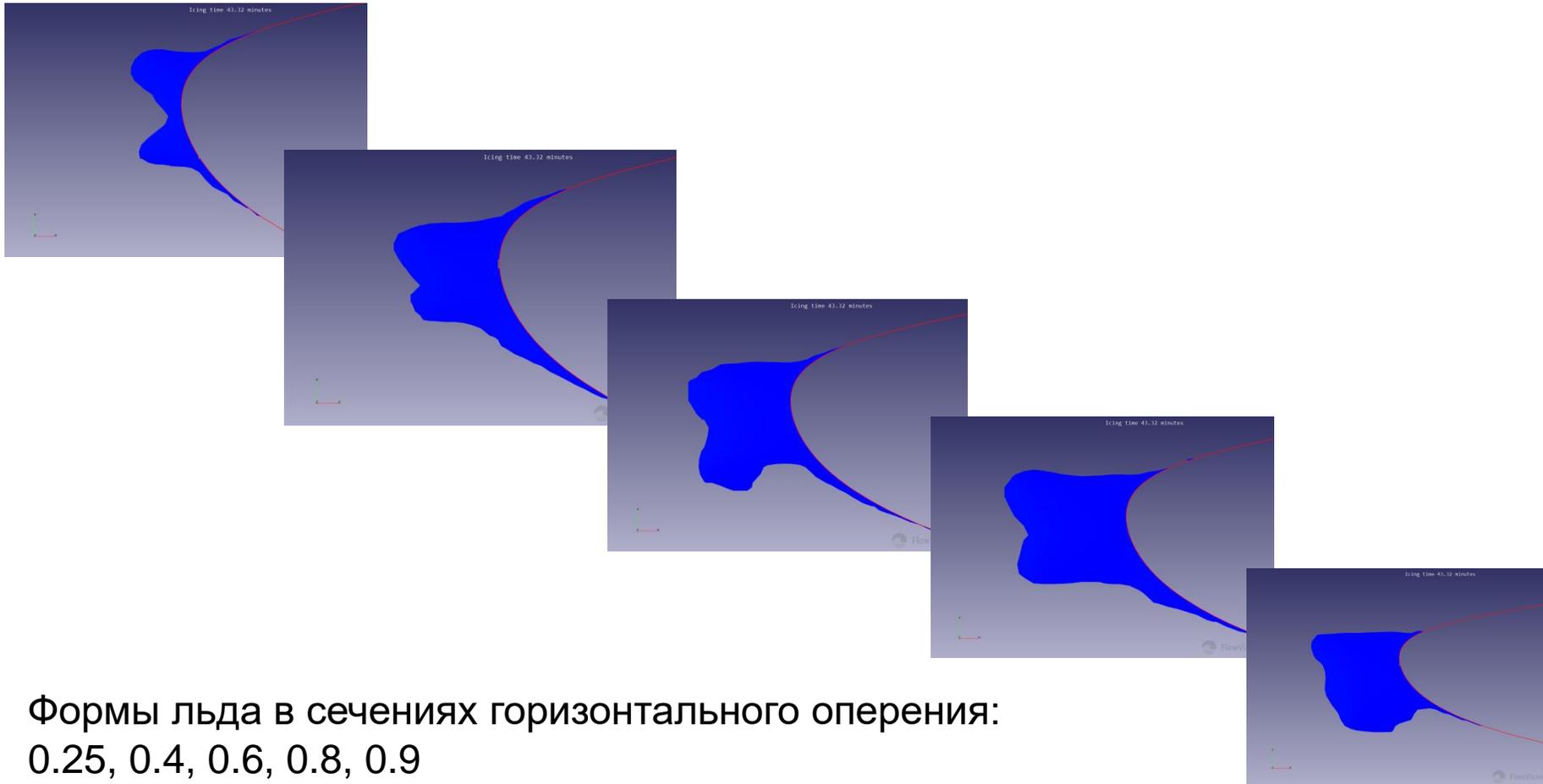


Формы наростов льда в различных сечениях крыла



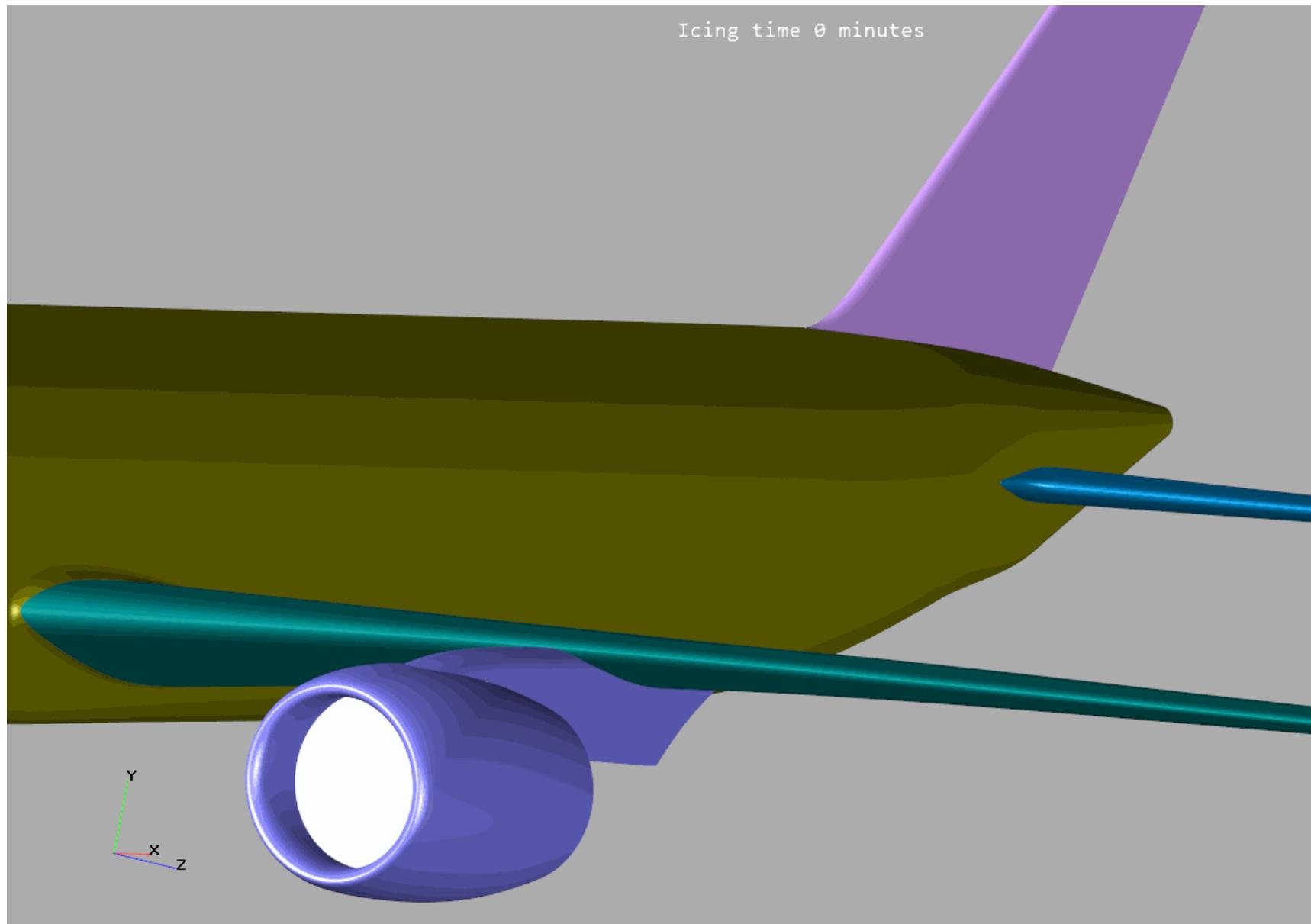
Формы льда в сечениях крыла:
0.2, 0.4, 0.64, 0.8, 0.9 и 0.98
от полуразмаха крыла соответственно

Формы наростов льда в различных сечениях горизонтального оперения



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



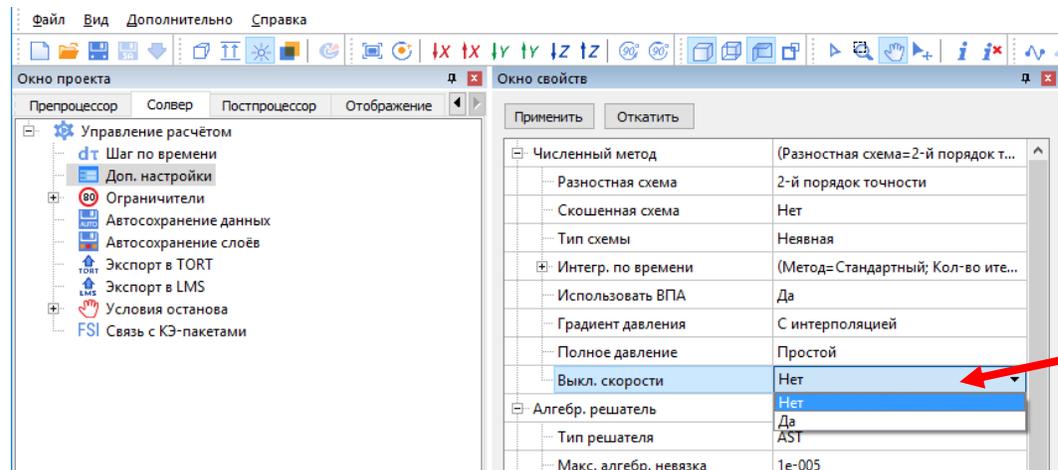


Суета сует...



А вот теперь о проблемах

1. Моделирование движение жидкости при $Re \ll 1$ (например, $Re = 10^{-6}$)



ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Оказалось, что схема расщепления не работает для таких низких Re . Между скоростью и давлением возникает декаплинг. Можно существенно уменьшать шаг по времени, но решение неустойчиво...

... собираемся реализовать модель Бринкмана.

А вот теперь о проблемах

- 2. Генерация расчетной сетки для грязной геометрии – имеются дыры (заделать просто) и самопересечения (исправить очень сложно)**
- 3. FSI с другими программами – очень тяжелая задача, требует уйму времени для настройки совместного решения и подбора параметров. Видимо придется реализовывать моделирование уравнений МДТТ в рамках КО-подхода на сетке SGGR.**
- 4. Расщепление по физпроцессам не всегда позволяет решать задачи. Необходимо решать уравнения одновременно и видимо использовать метод Ньютона – а это долго и много памяти...**



Выводы

- **Работы – не видно края**
- **Государство ведет себя на рынке CAE как слон на муравейнике.**
- **Но заграница нам поможет...**

