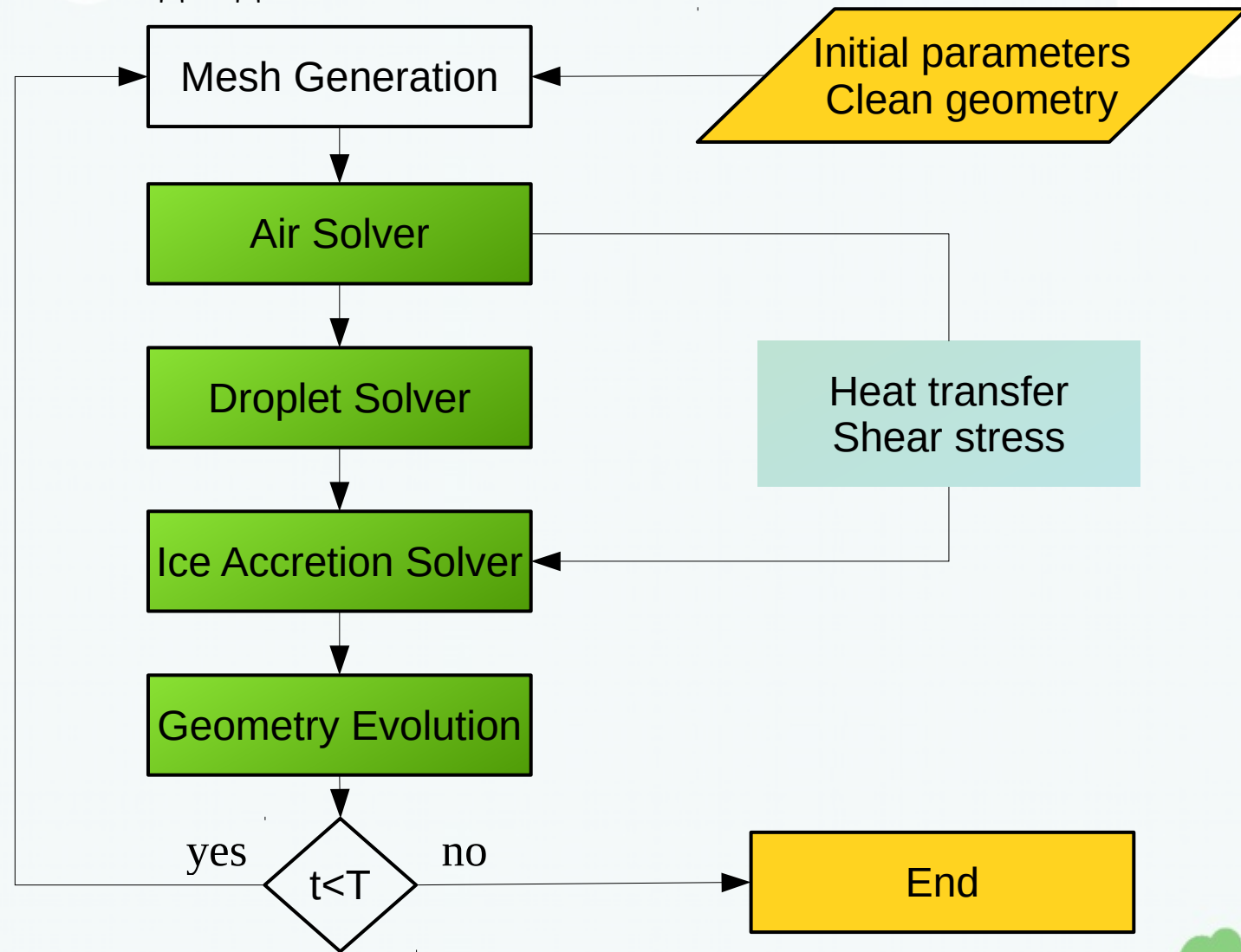


**Расчетная программа IceStudio: численное
моделирование полета гражданского самолета в
условиях обледенения**

Нгуен Нгок Шанг (МФТИ)

Методика моделирования нарастания льда

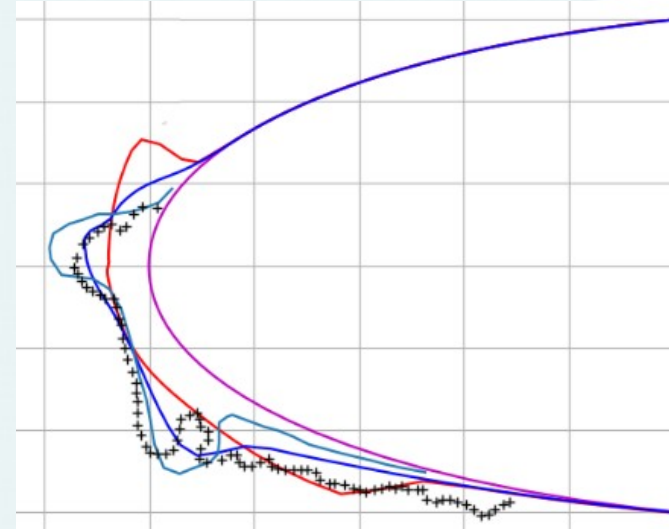
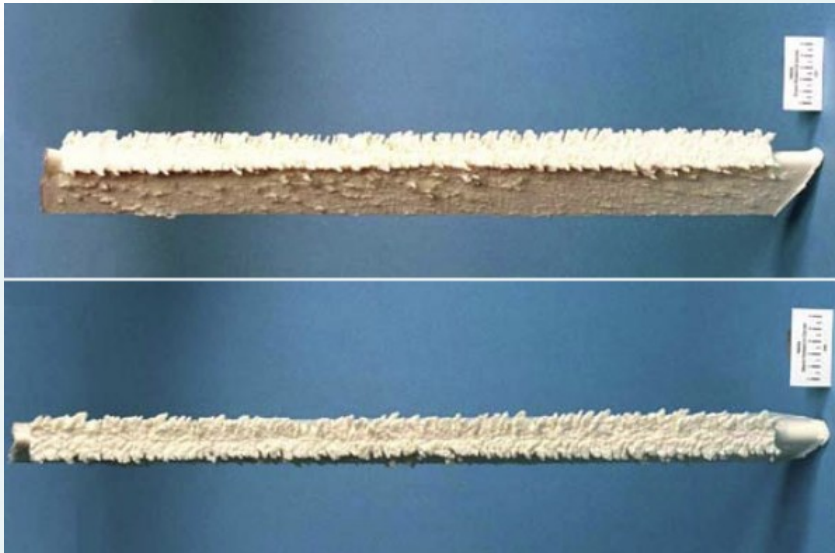
- Многослойный подход:



- Однослойный подход: $\Delta t = T$



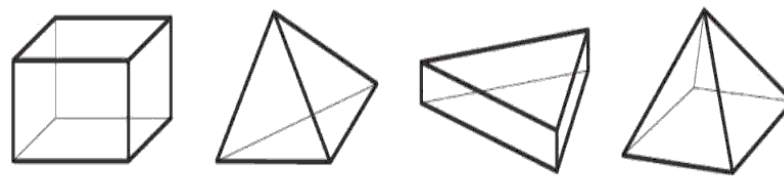
Моделирование течения “сухого” воздуха



- По сравнению с типичным аэродинамическим расчетом, возникают дополнительные проблемы:
 - Изменение геометрии тела
 - Шероховатость ледяной поверхности



Метод конечного объема на неструктурированной сетке

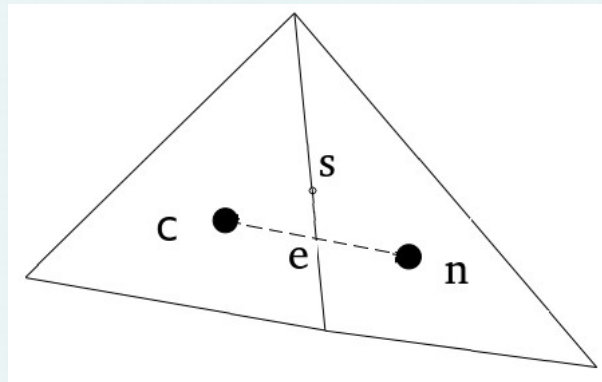


- RANS, S-A
- Градиенты в центрах ячеек — гибридный метод

$$\nabla u_c = \beta \cdot (\nabla u_c)_{wls} + (1 - \beta) \cdot (\nabla u_c)_{gg}$$

$$\beta = \min(1, 25 \cdot V_c / (L_{max} \cdot S_{max}))$$

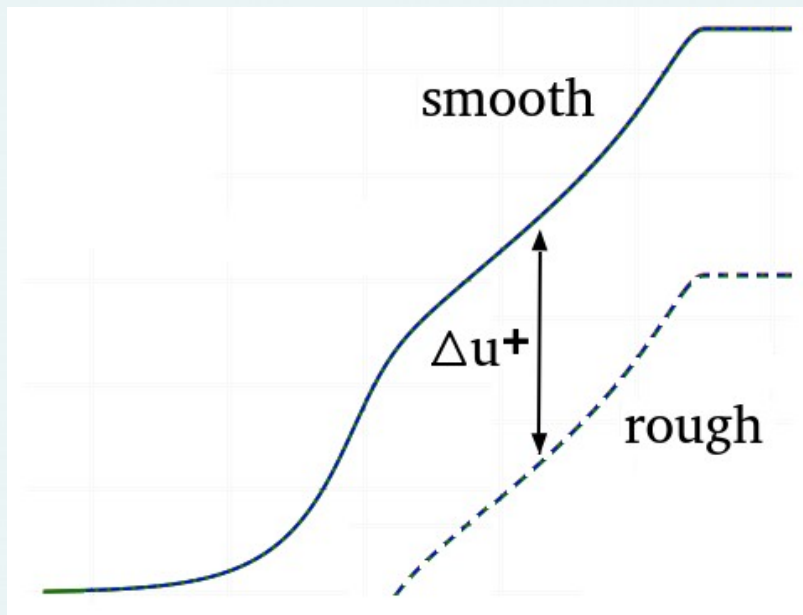
- Схема второго порядка, ограничитель — Венкатакришнан
- Градиенты на гранях ячеек : $\nabla u_s = \nabla u_s^{ave} - (\nabla u_s^{ave}, \vec{e}) \cdot \vec{e} + \nabla u_e$



Модификация модели S-A с учетом шероховатости

Влияние шероховатости:

- Изменяет закон стенки
- Увеличивает коэффициент трения и теплопередачи
- Изменяет скорость нарастания и форму льда



$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta u^+$$

Модификация S-A

$$k_s - \text{roughness}$$
$$\chi = \frac{\tilde{v}}{\nu} + C_{R1} \frac{k_s}{d}, C_{R1} = 0.5,$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\frac{\tilde{v}}{\nu}}{1 + \frac{\tilde{v}}{\nu} f_{v1}},$$

wall condition:

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial n} = \frac{\tilde{v}}{d}, d = d_{min} + 0.03 k_s$$



Моделирование поля водности (движение водяных капель)

- Подход Лагранжа, подход Эйлера
- Параболическая система водности:

Система уравнений **S1**:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = S_i \end{array} \right.$$

- Нет давления: $p_d = 0$

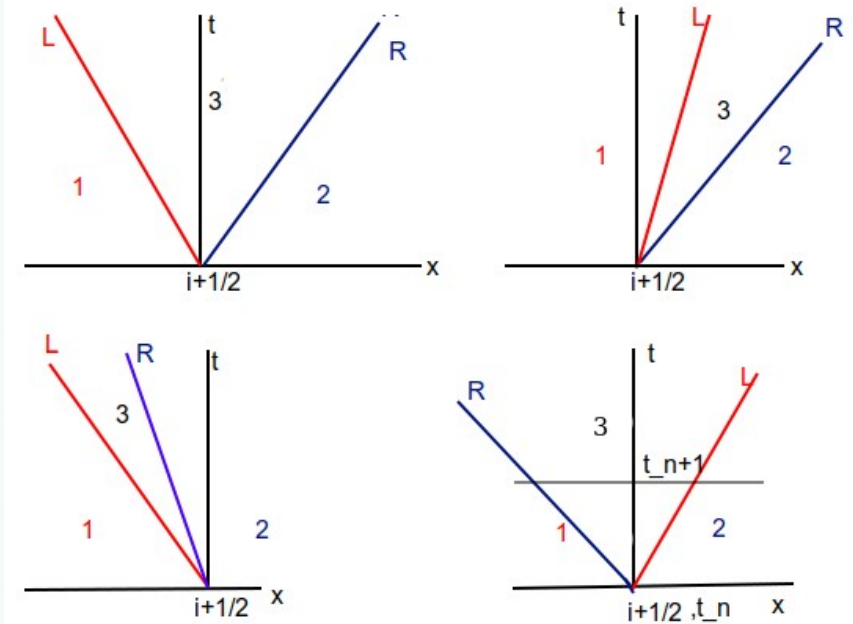
- матрица Якоби имеет одно собственное число: $\lambda = v$



Моделирование поля водности

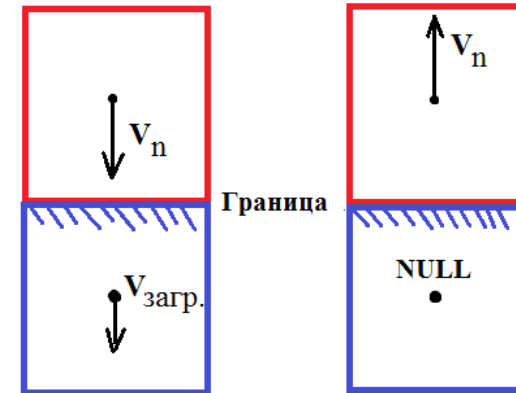
- Метод типа Годунова для задачи Римана

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } v_L > v_R \rightarrow (\rho, v)_{i+1/2} = \begin{cases} (\rho, v)_L, \text{ если } \rho_L v_L + \rho_R v_R > 0 \\ (\rho, v)_R, \text{ другой случай} \end{cases} \\ \text{Если } v_L \leq v_R \rightarrow (\rho, v)_{i+1/2} = \begin{cases} (\rho, v)_L, \text{ если } s_L > 0 \\ (\rho, v)_R, \text{ если } s_R < 0 \\ 0, \text{ если } s_L \leq 0 \leq s_R \end{cases} \end{array} \right.$$



- Граничное условие на стене

$$(\rho, v)_{out} = \begin{cases} (\rho, v)_{in}, \text{ если } v_n > 0 \\ (0, 0), \text{ если } v_n < 0 \end{cases}$$



Моделирование поля водности

- Гиперболическая система с «**давлением частиц**»:

Система уравнений **S2**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = 0$$
$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j v_i + \mathbf{p}_d \sigma_{ij})}{\partial x_j} = S_i$$

Система уравнений **S3**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = 0$$
$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j v_i + \mathbf{p}_d \sigma_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial \mathbf{p}_d}{\partial x_i} + S_i$$

- где $\mathbf{p}_d = C \rho$, $C \approx 1e-3$

- Метод Роу для задачи Римана

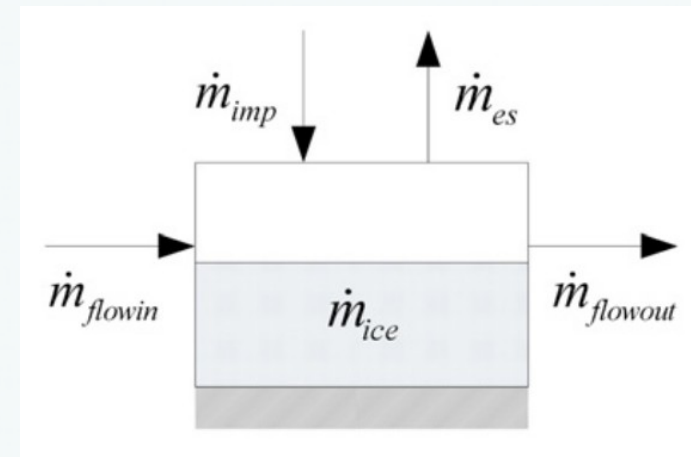


- Все модели основаны на законах сохранения массы и энергии
- **Мелководная модель (SWIM)**

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_w \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla (\bar{u} h) \right] = \dot{m}_{imp} - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{evap} \\ \rho_w \left[\frac{\partial h c_{p,w} \tilde{T}}{\partial t} + \nabla (\bar{u} h c_{p,w} \tilde{T}) \right] = \dot{Q}_{imp} - \dot{Q}_{ice} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{rad} \\ \text{Соотношения: } h \geq 0, \dot{m}_{ice} \geq 0, h \tilde{T} \geq 0, \dot{m}_{ice} \tilde{T} \leq 0 \end{array} \right.$$

- ВОЗМОЖНЫЕ СОСТОЯНИЯ:

$$\left\{ \begin{array}{l} I - \text{Rime ice: } \tilde{T}^n < 0, \dot{m}_{ice}^{n+1} \geq 0, h^{n+1} = 0 \\ II - \text{Glaze ice: } \tilde{T}^n = 0, \dot{m}_{ice}^{n+1} \geq 0, h^{n+1} \geq 0 \\ III - \text{Liquid: } \tilde{T}^n > 0, \dot{m}_{ice}^{n+1} = 0, h^{n+1} \geq 0 \end{array} \right.$$



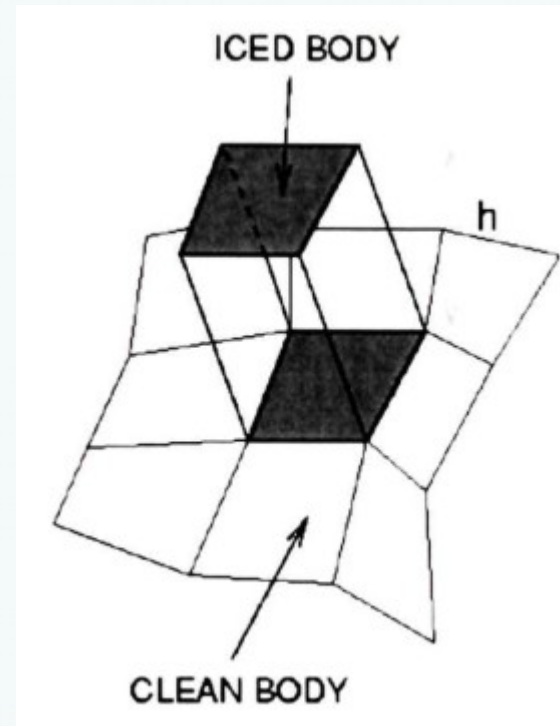
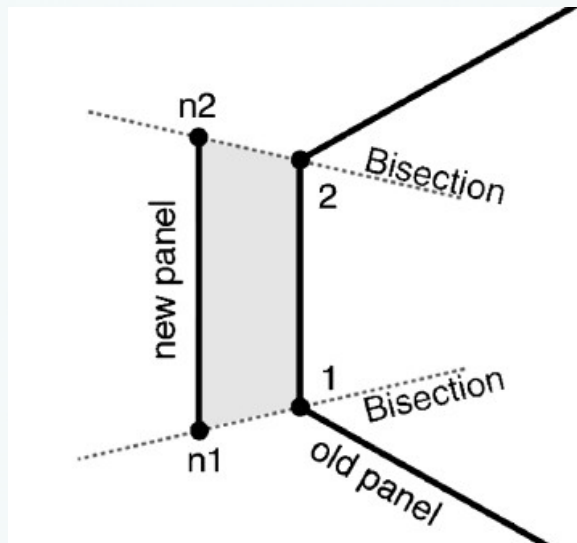
Моделирование нарастания льда

- Геометрическое изменение формы ледяного слоя

- скорость нарастания льда в центрах ячеек: $d_i = \frac{\dot{m}_{ice}}{\rho_{ice}}$

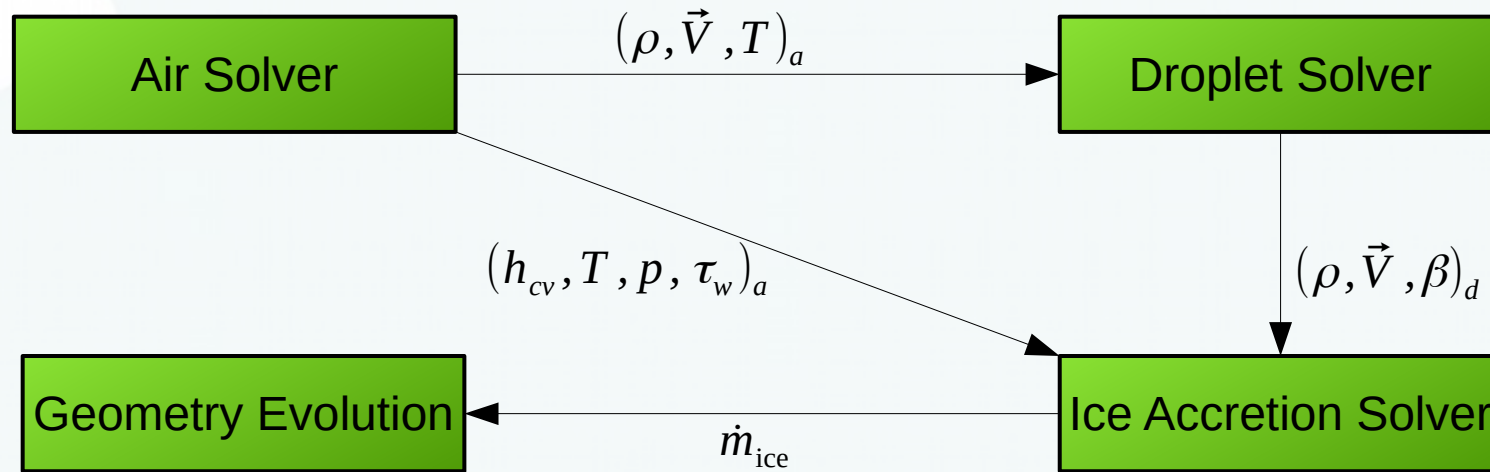
- скорость нарастания льда в узлах (2D): $d_{node} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}$

- передвижение узлов по биссектрисе (\vec{b}): $\vec{x}_{new} = \vec{x}_{old} + d_{node} \Delta t \vec{b}$

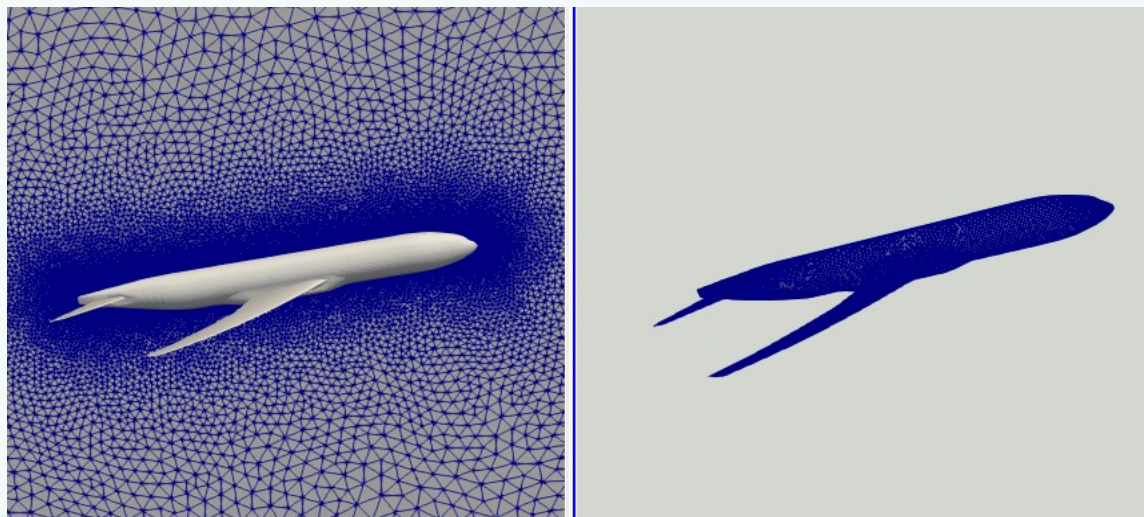


Архитектура программы

- Связь между солверами



- Генерация 3D-поверхностной сетки по объемной

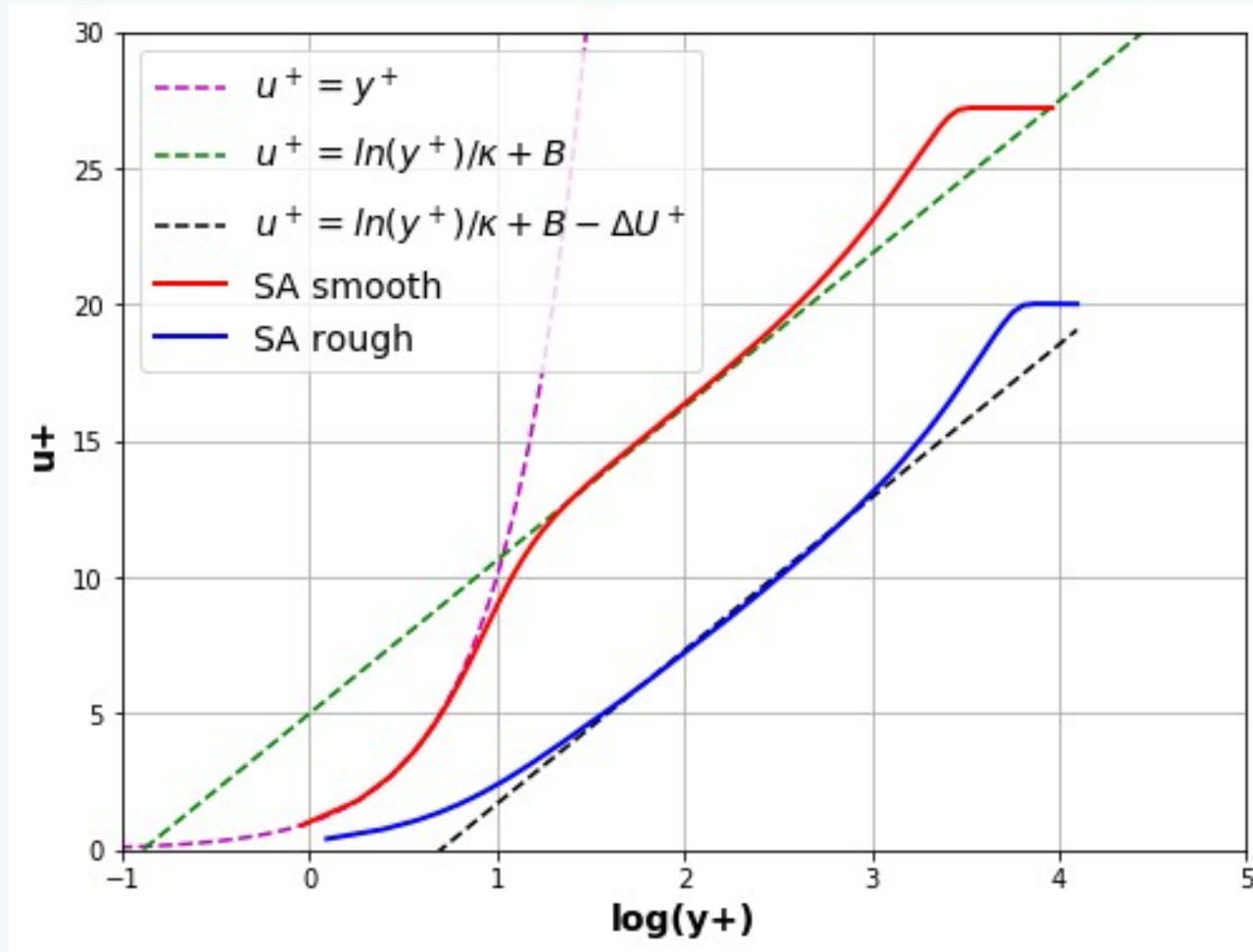


Тестовые расчеты



1. Обтекание шероховатой пластины

$M=0.2, Re_L=5.0e6 (L=1), T=300 K, k_s=0.63 mm, x=0.97 m$

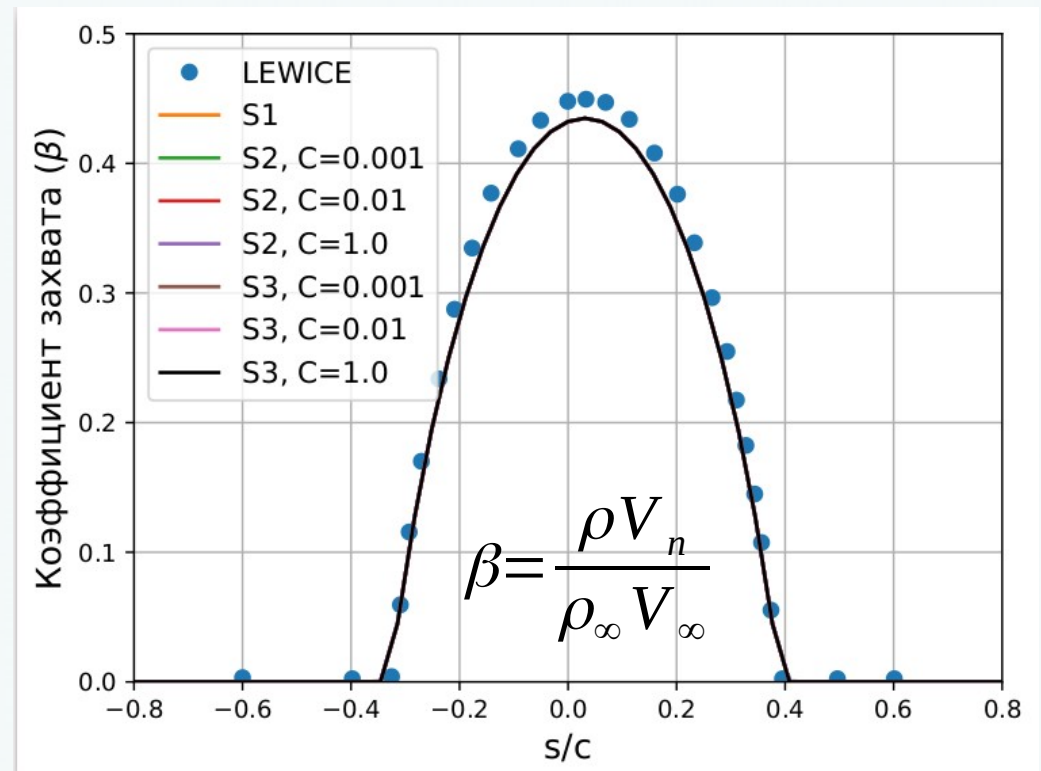
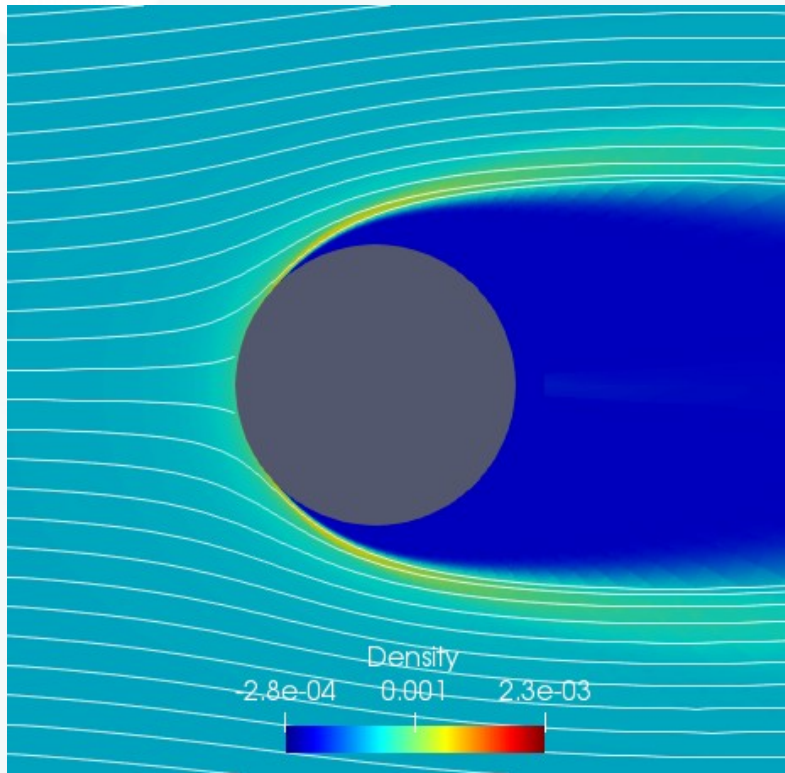


→ Численный результат и теория согласованы



2. Обтекание цилиндра

$Chord = 0.1524\text{ m}$, $V = 90.0\text{ m/s}$, $AOA = 0.0^\circ$, $P = 100000.0\text{ Pa}$, $T = 268.3\text{ K}$,
 $MVD = 20\text{ }\mu\text{m}$, $LWC = 0.54\text{ g/m}^3$

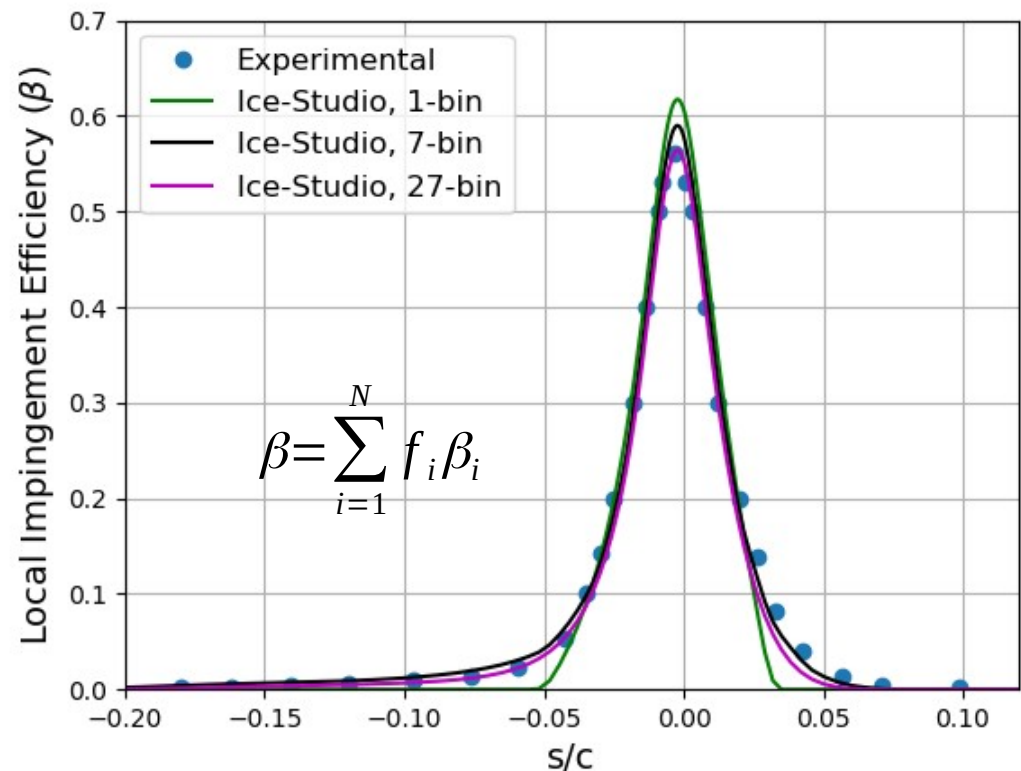
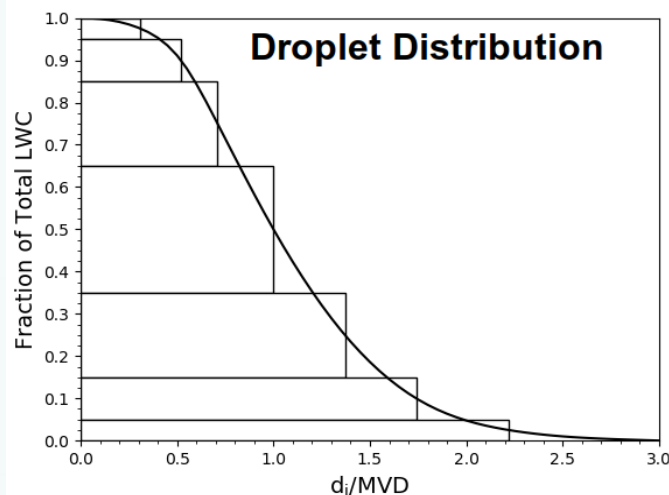
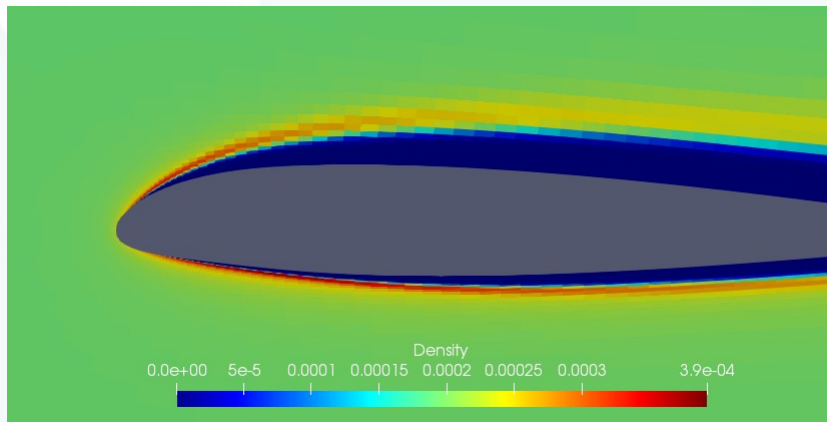


→ решение оригинальной системы водности (без давления) методом Годунова и решения модификаций системы (с давлением частиц) методом Роу практически одинаковы и приемлемы



3. Обтекание NASA23012. Набор капель разных размеров

$Chord = 0.914\text{ m}$, $V_\infty = 78.23\text{ m/s}$, $AOA = 2.5^\circ$, $T_\infty = 299\text{ K}$,
 $p_\infty = 101330\text{ Pa}$, $MVD = 20\text{ }\mu\text{m}$, $LWC = 0.19\text{ g/m}^3$

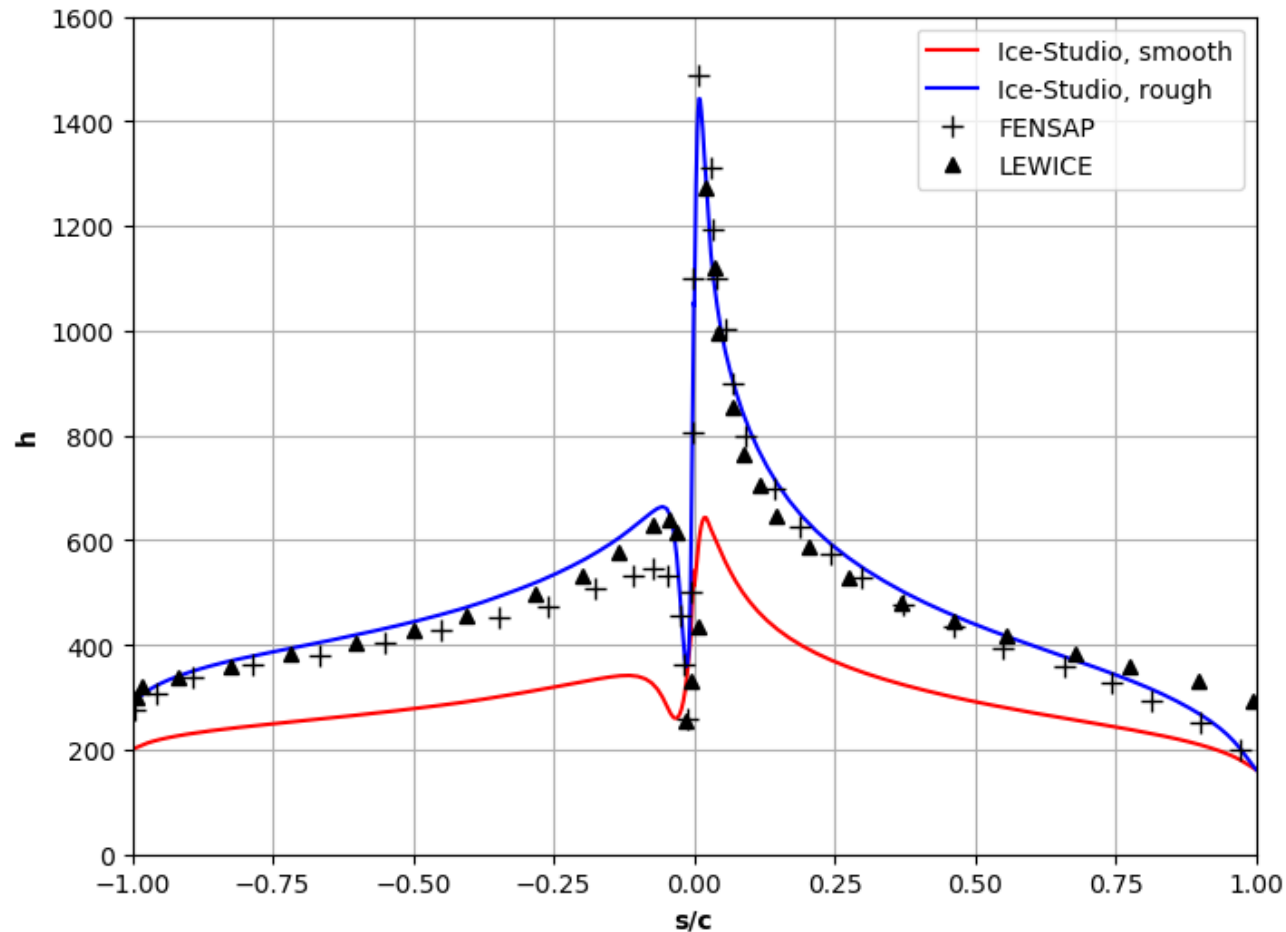


→ Увеличение количества типов капель (по размеру) повысит точность, но требует больше ресурсов.

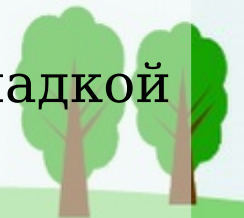


4. Обледенение **NACA0012**, glaze ice

$Chord = 0.533\text{ m}$, $T = 262.04\text{ K}$, $P = 100\text{ kPa}$, $U = 102.8\text{ m/s}$, $AOA = 4^\circ$,
 $k_s = 0.55\text{ mm}$, $MVD = 20$, $LWC = 0.55\text{ g/m}^3$, $t_{accretion} = 420\text{ s}$

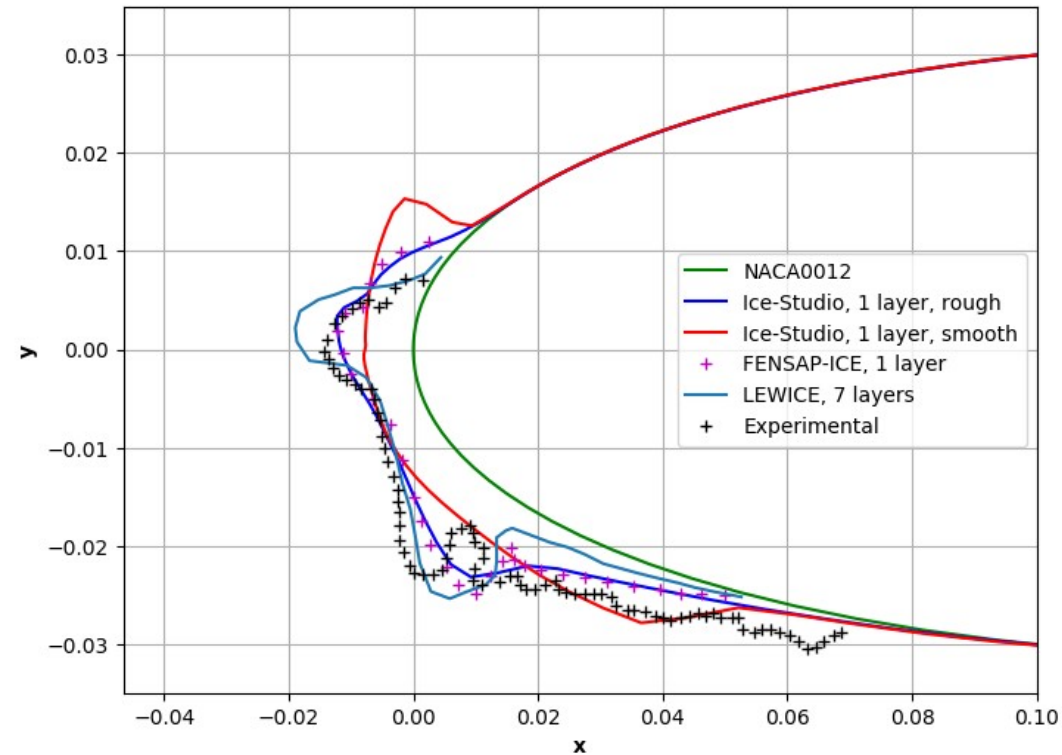
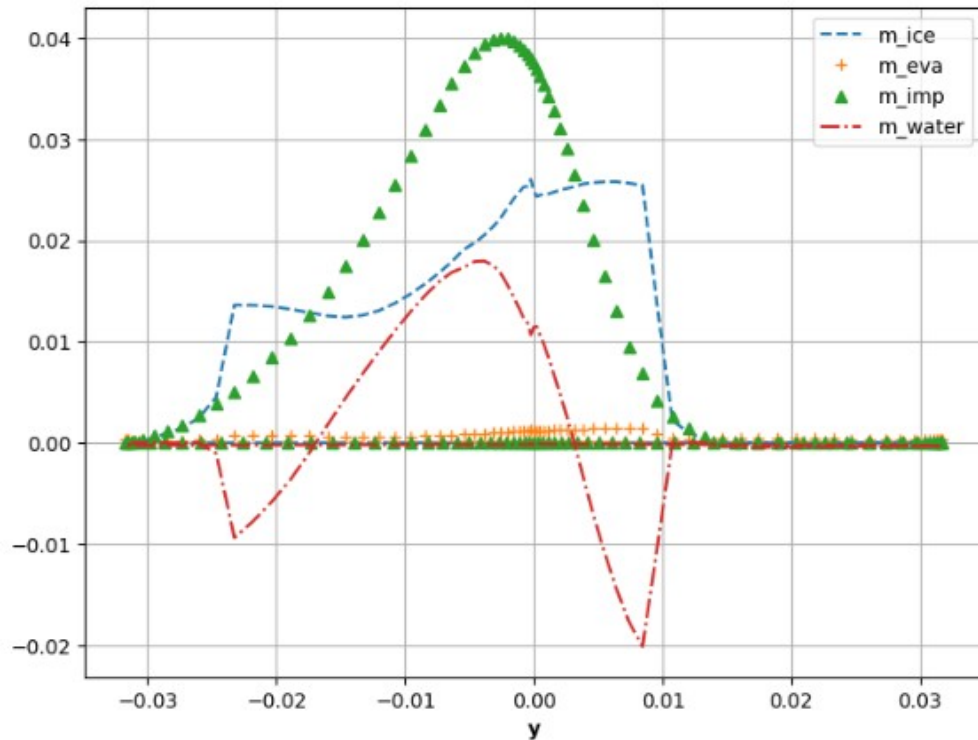


→ большая разница коэффициента теплопередачи для гладкой и шероховатой поверхности



Обледенение NACA0012, glaze ice

Потоки массы



→ Большая доля воды на поверхности. Видно вытекание воды из точки торможения по поверхности

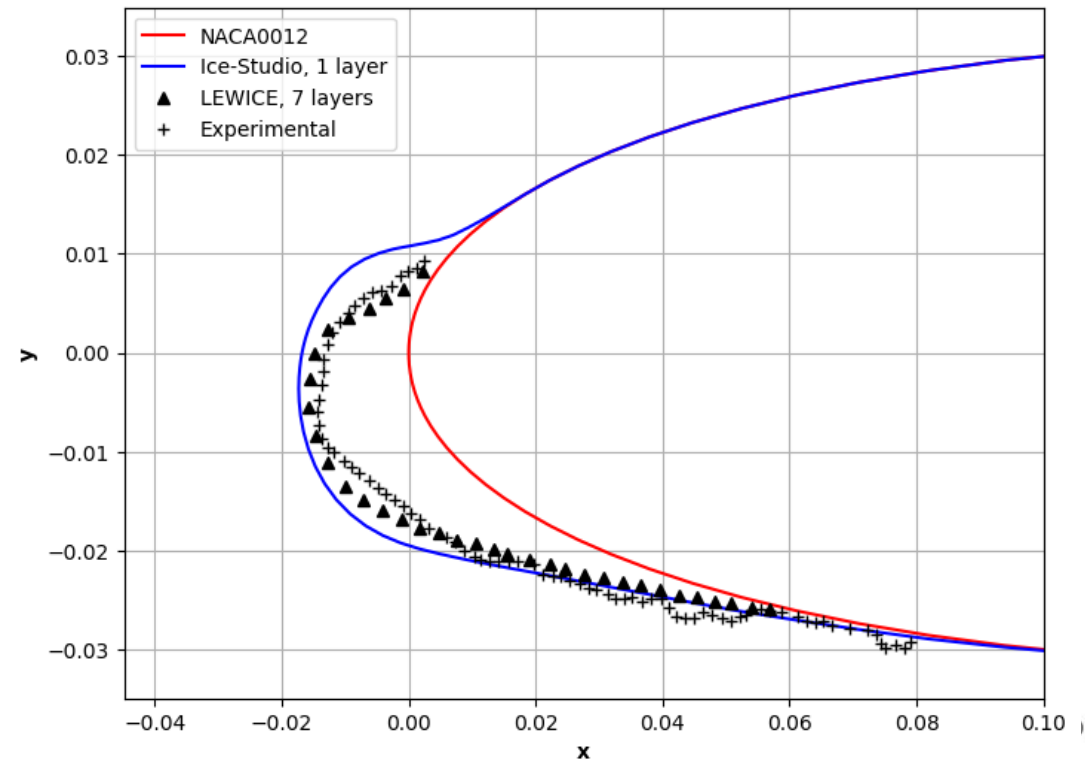
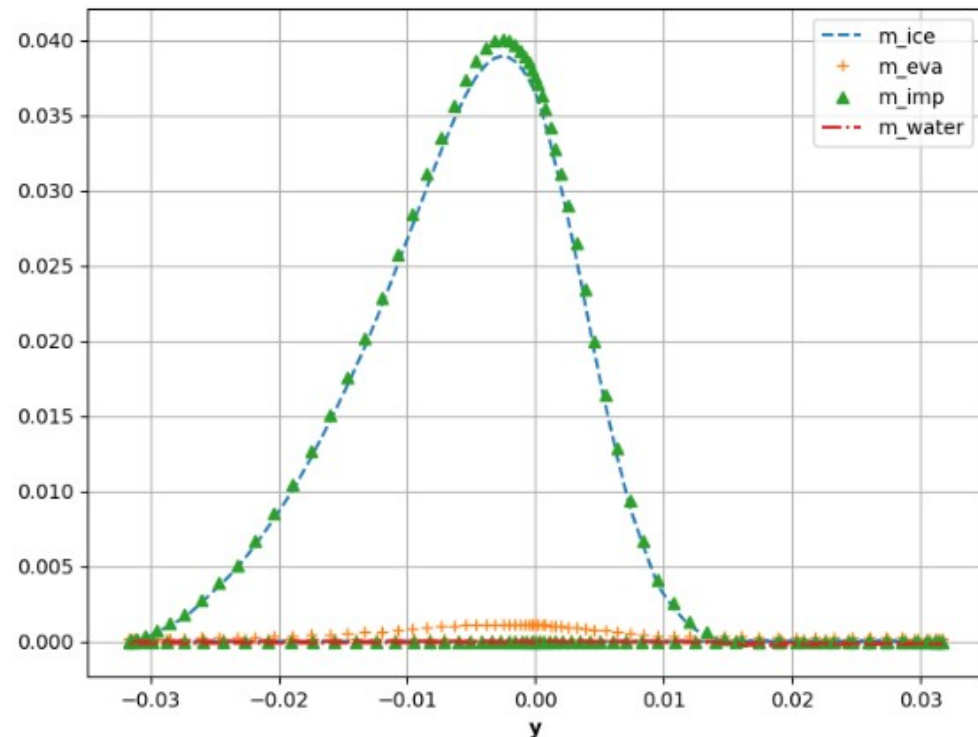
→ Большая разница в форме ледяного слоя при применении стандартной модели СА и его модификации для шероховатой поверхности



5. Обледенение NACA0012, rime ice

$T = 250.37 \text{ K}$, $P = 100 \text{ kPa}$, $U = 102.8 \text{ m/s}$, $AOA = 4^\circ$,
 $k_s = 0.28 \text{ mm}$, $MVD = 20$, $LWC = 0.55 \text{ g/m}^3$, $t_{\text{accretion}} = 420 \text{ s}$

Mass flux



→ Почти вся вода превращается в лёд

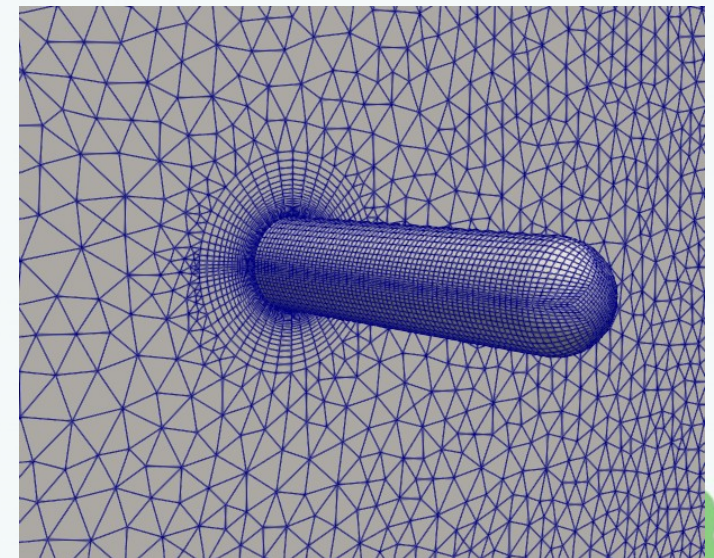
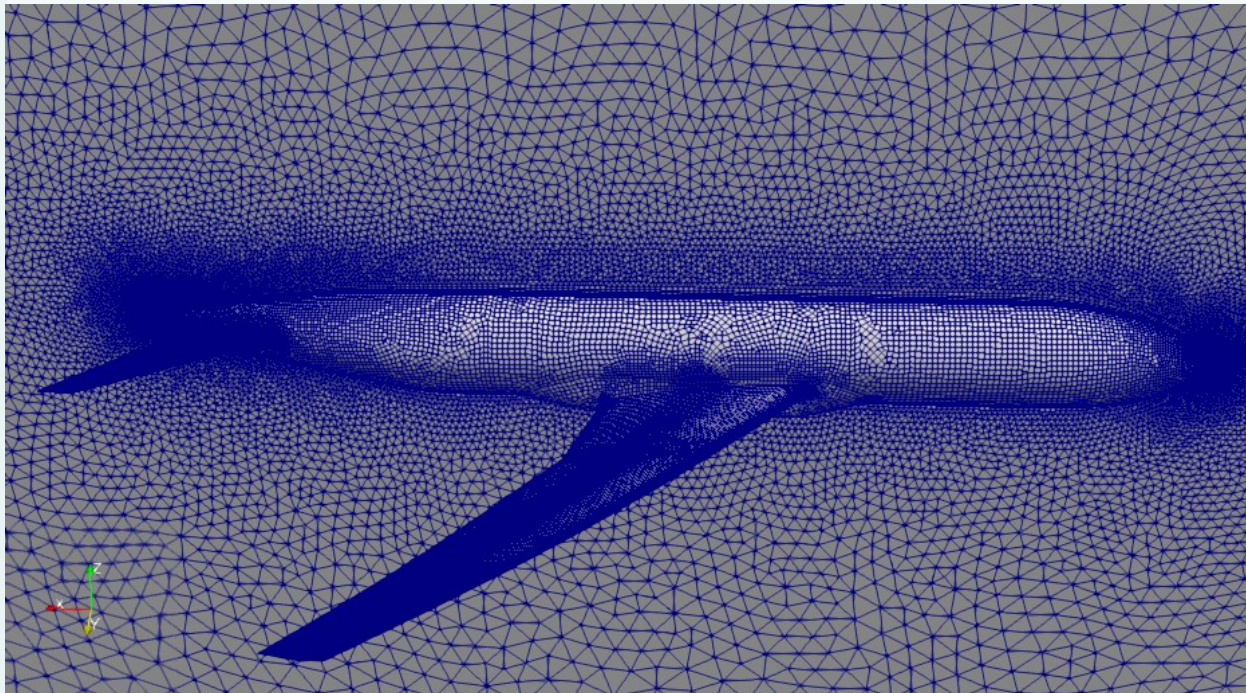


Практическое применение



1. Выбор места положения датчика обледенения

- Требование: должно быть обеспечено попадание на цилиндр датчика достаточного количества воды из набегающего потока
- Датчик обледенения:
 - высота основания датчика $h = 40\text{ mm}$
 - размер зонда $H = 25.4\text{ mm}$, $D = 6.35\text{ mm}$
- Модель CRM: размах крыла $L = 59\text{ m}$



1. Выбор места положения датчика обледенения

Требования EASA

Список расчетных режимов для регионального самолёта

Фаза полета	Число М	Скорость (KTAS)	Угол атаки (град.)	Высота [ft]
Takeoff	0.227	150	-1.0	0
Takeoff	0.227	150	14.0	0
Hold	0.57	347	0.5	22000
Hold	0.57	347	3.25	22000
Hold	0.57	347	6.0	22000
Cruise	0.81	477	0.5	30000
Cruise	0.81	477	3.25	30000
Cruise	0.81	477	6.0	30000

Список размеров капель

MVD (мкм)	10	20	35	50	100
-----------	----	----	----	----	-----

1. Выбор места положения датчика обледенения

. Режим ожидания:

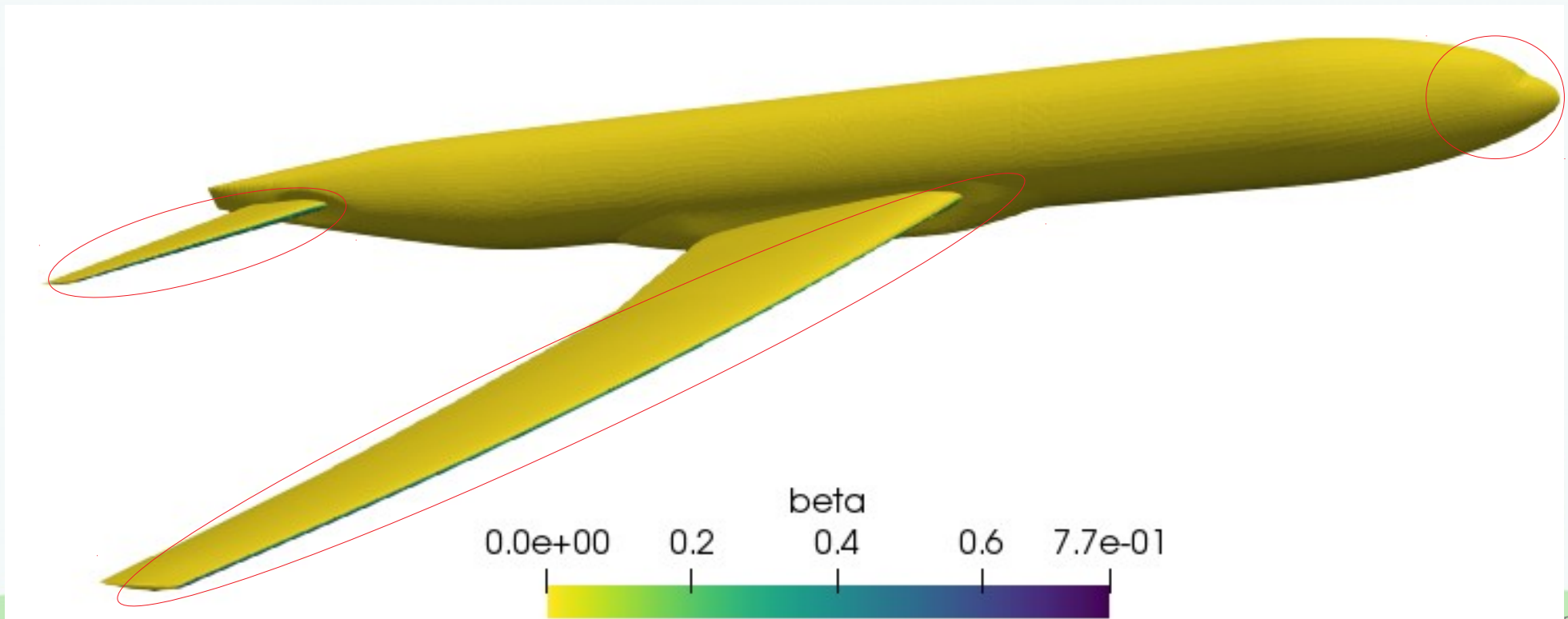
Hold: $M=0.57, V=178.7 \text{ m/s}, AoA=3.25, H=6705,6 \text{ m}$

$MVD=20 \mu\text{m}, LWC=1.0 \text{ g/m}^3$

. Коэффициент захвата каплей:

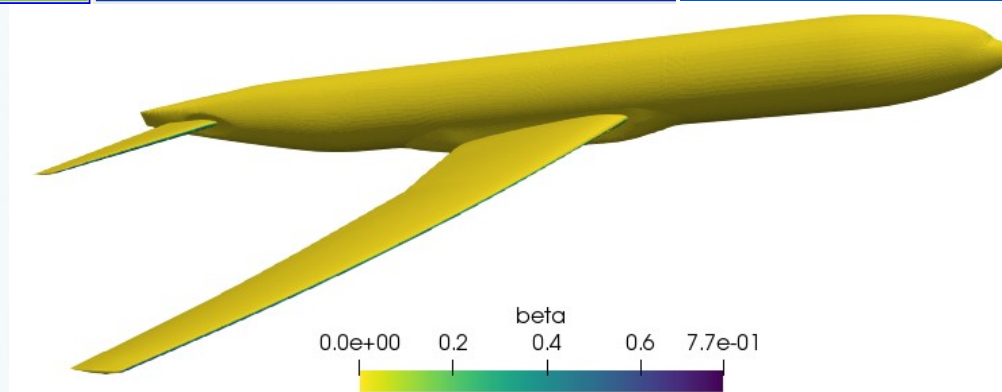
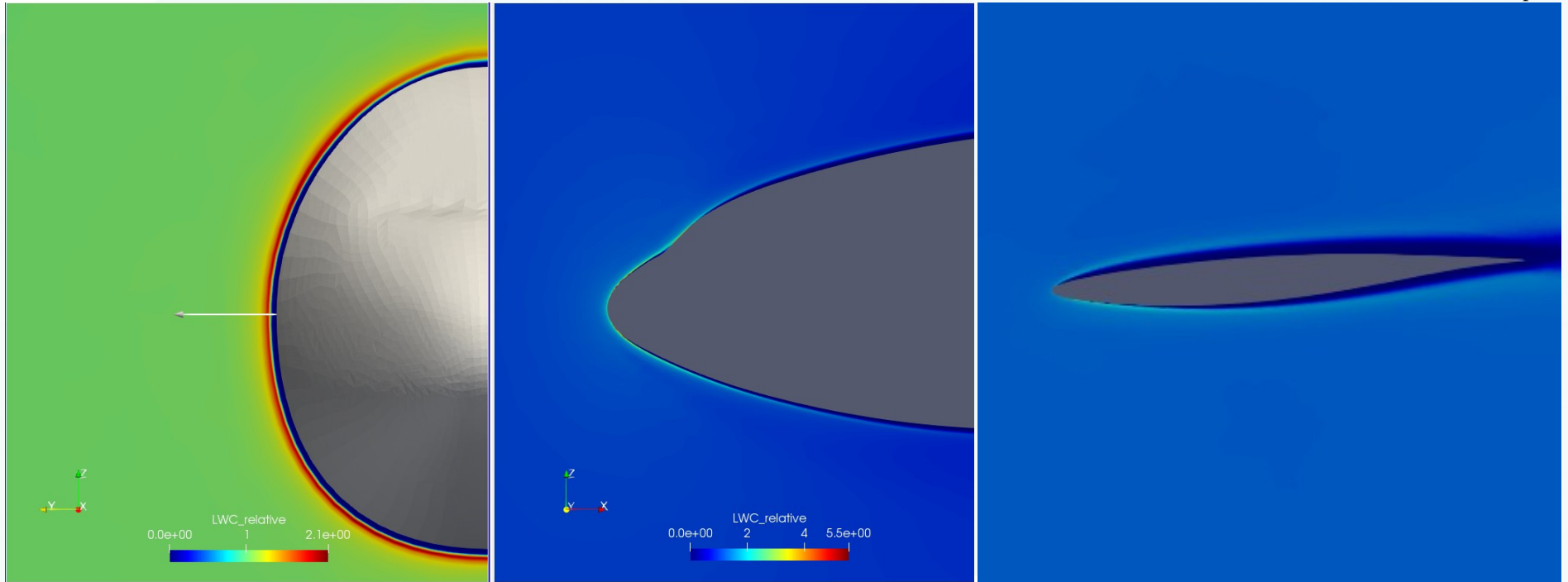
$$\beta_{\text{drop}} = \frac{\rho v_n}{\rho_{\infty} v_{\infty}}$$

. Главная область попадания каплей: носовая часть фюзеляжа, передняя кромка крыла и стабилизатора



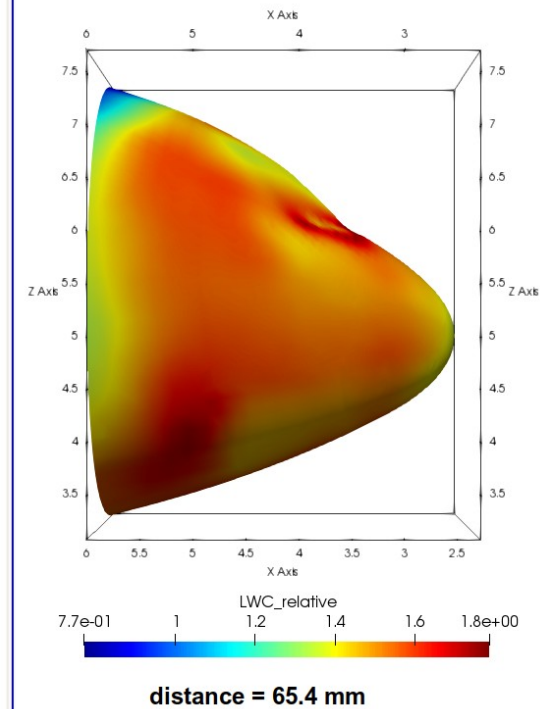
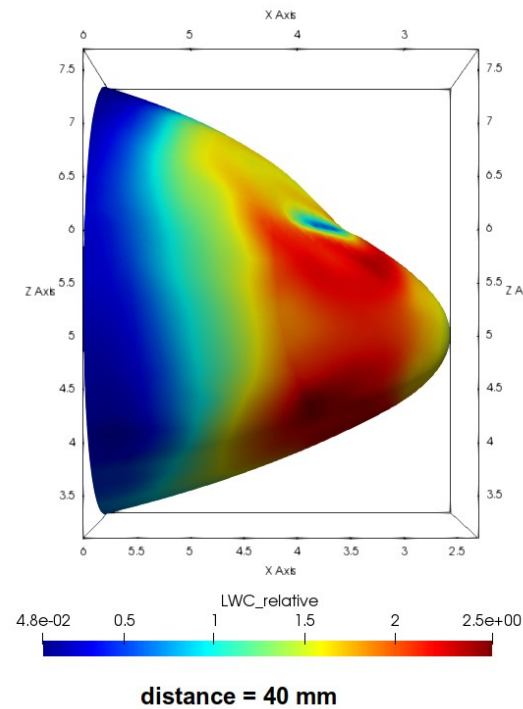
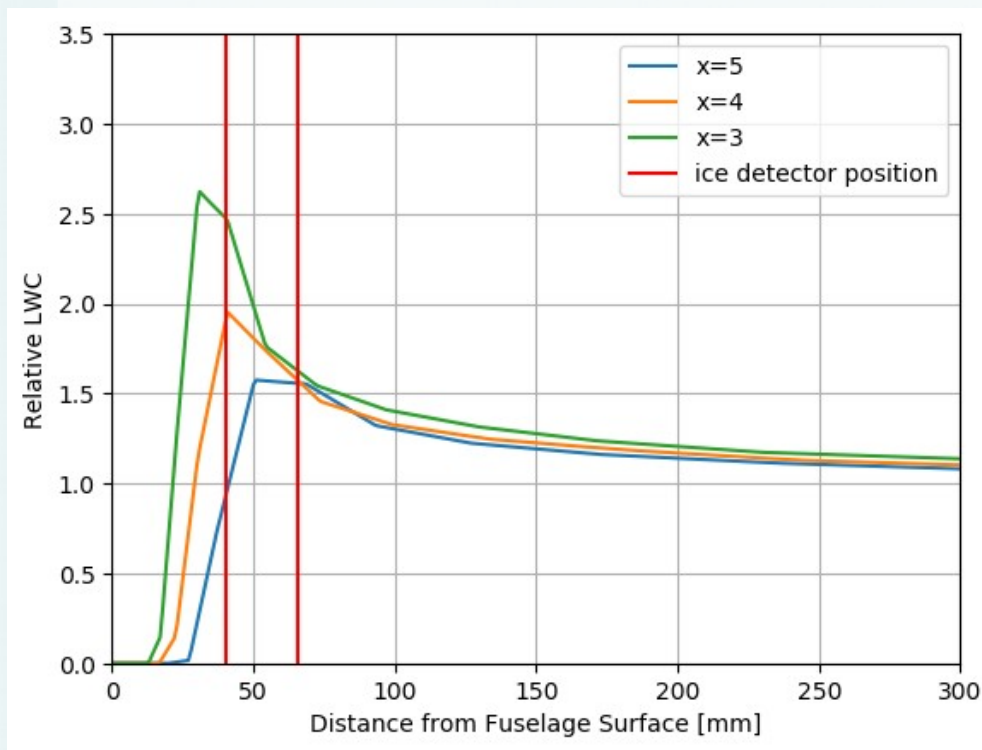
1. Выбор места положения датчика обледенения

- Поле относительной влажности (RLWC) вокруг самолета: $RLWC = \frac{\rho_{\text{drop}}}{\rho_{\text{drop}, \infty}}$



1. Выбор места положения датчика обледенения

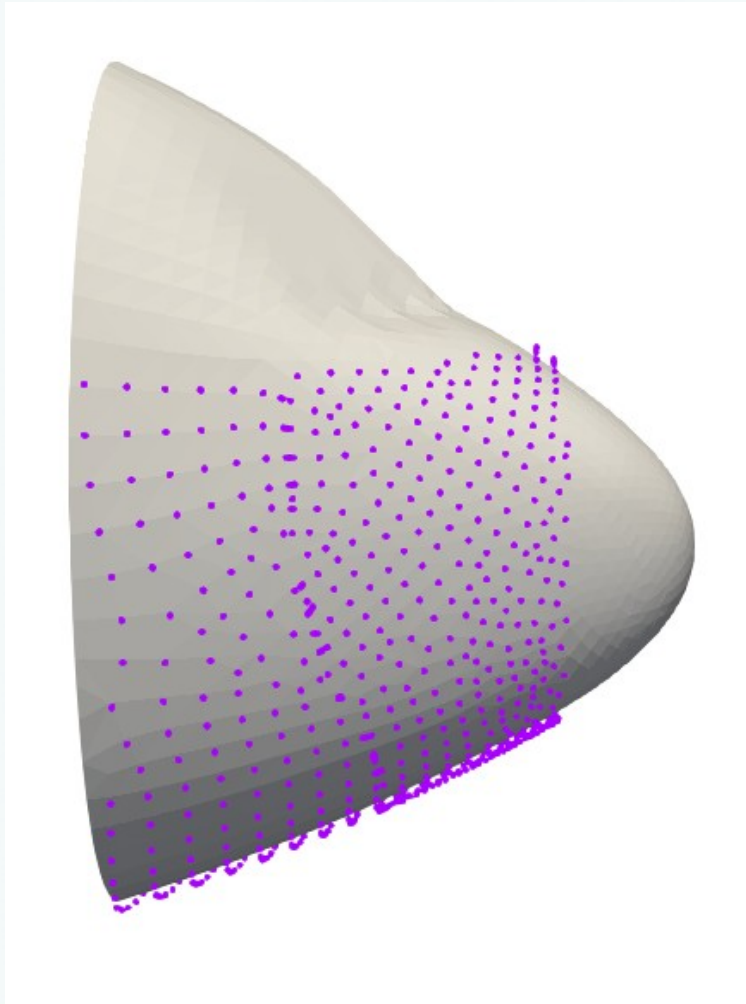
- Поле относительной влажности на разных расстояниях от поверхности самолета



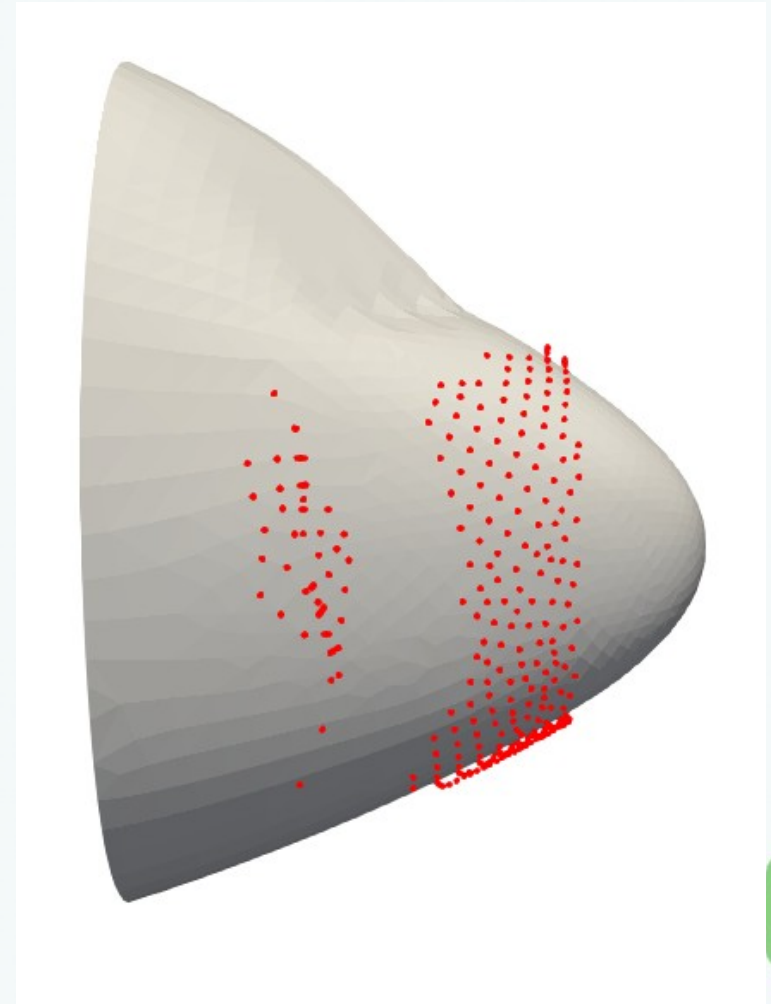
1. Выбор места положения датчика обледенения

Допустим, условие выбора:

$$3.0 < x < 5.0, z < 6.0,$$
$$1.0 \leq RLWC \leq 3.0$$



MVD=20мкм

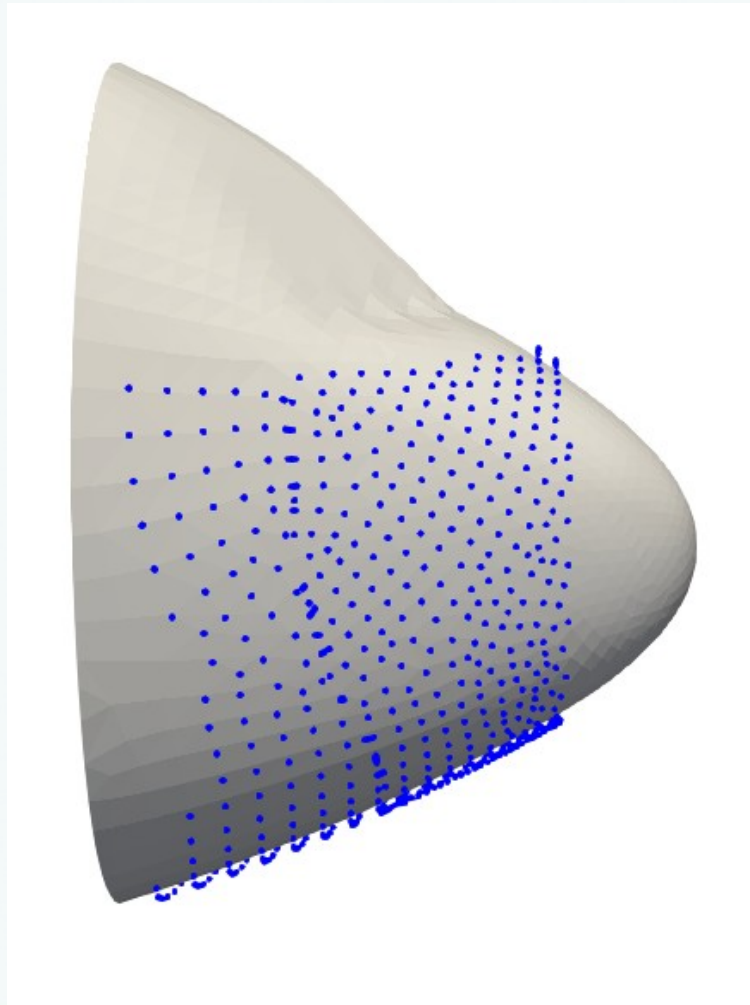


MVD=50мкм

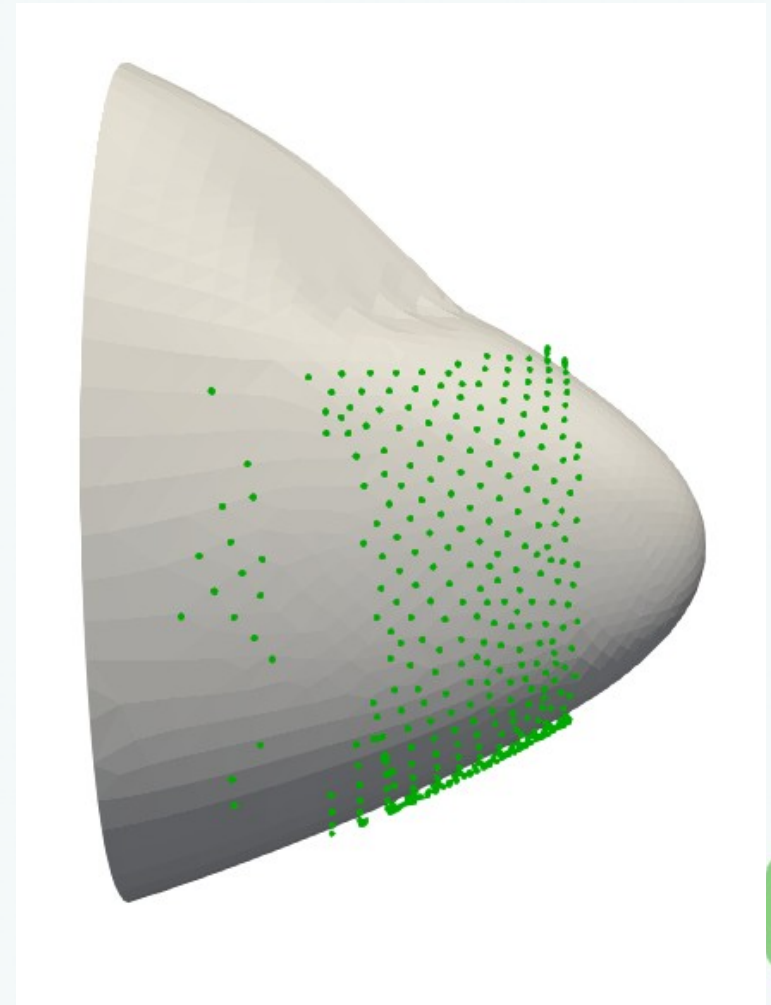
1. Выбор места положения датчика обледенения

Аналогично для других режимов:

Cruise: $M=0.81$, $AoA=3.25$



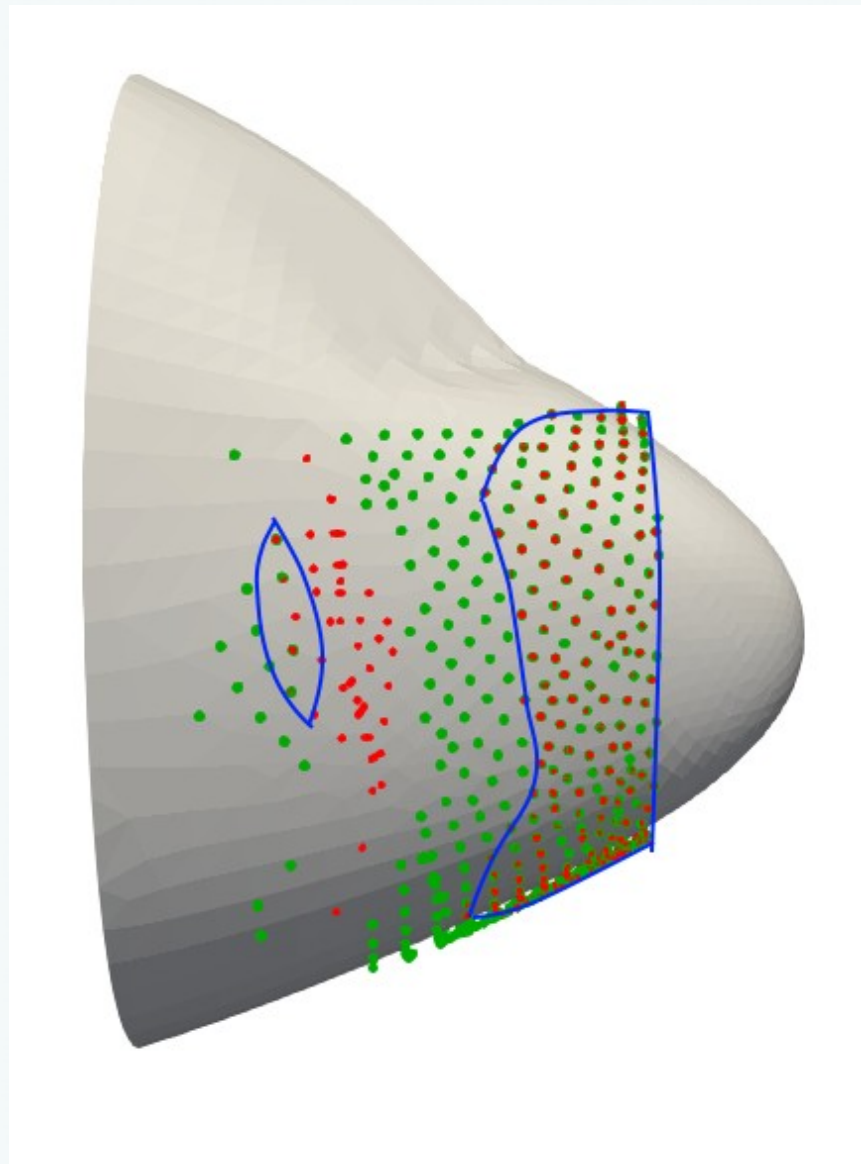
MVD=20мкм



MVD=50мкм

1. Выбор места положения датчика обледенения

Подходящее место:



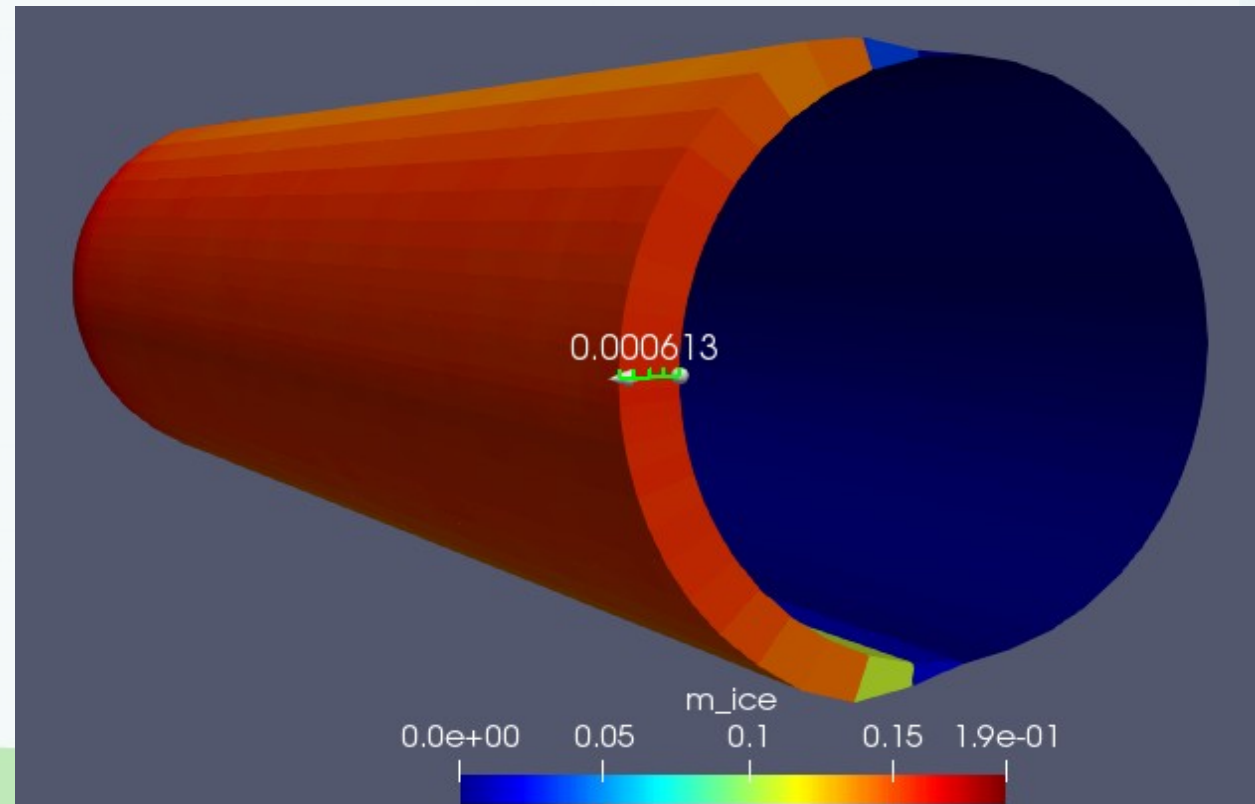
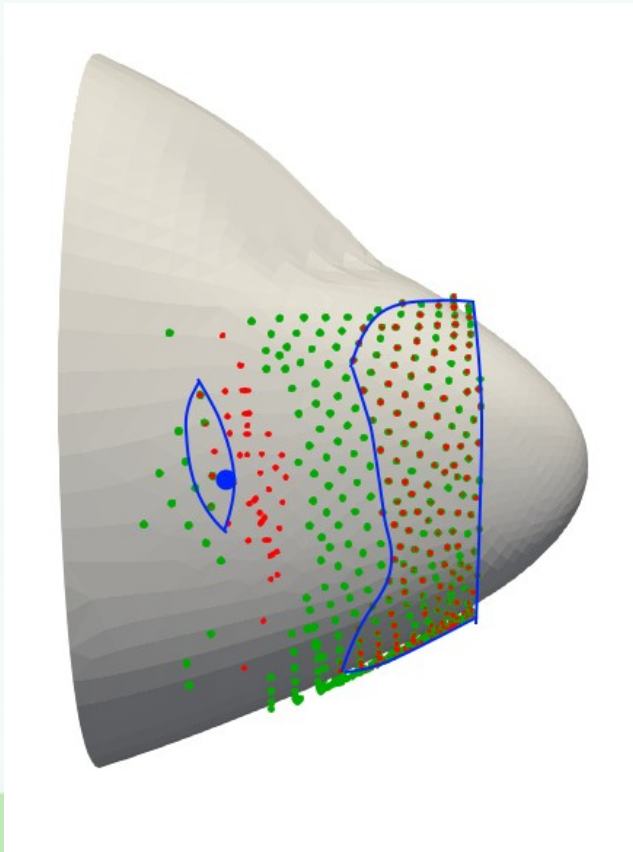
2. Дополнительные требования к датчику обледенения

- **Требование:** система сигнализации обледенения должна обеспечивать включение ПОС до того, как на поверхности самолета образуются ледяные наросты недопустимо большого размера
- Для данного датчика сигнал срабатывает при массе льда 0.125 г (примерно при толщине льда 0.5 мм)
- Методология проверки дополнительных требований:
 1. Моделирование обледенения датчика с локальными параметрами, определение времени срабатывания датчика
 2. Моделирование обледенения самолета за это время
 3. Проверка соответствия требованиям



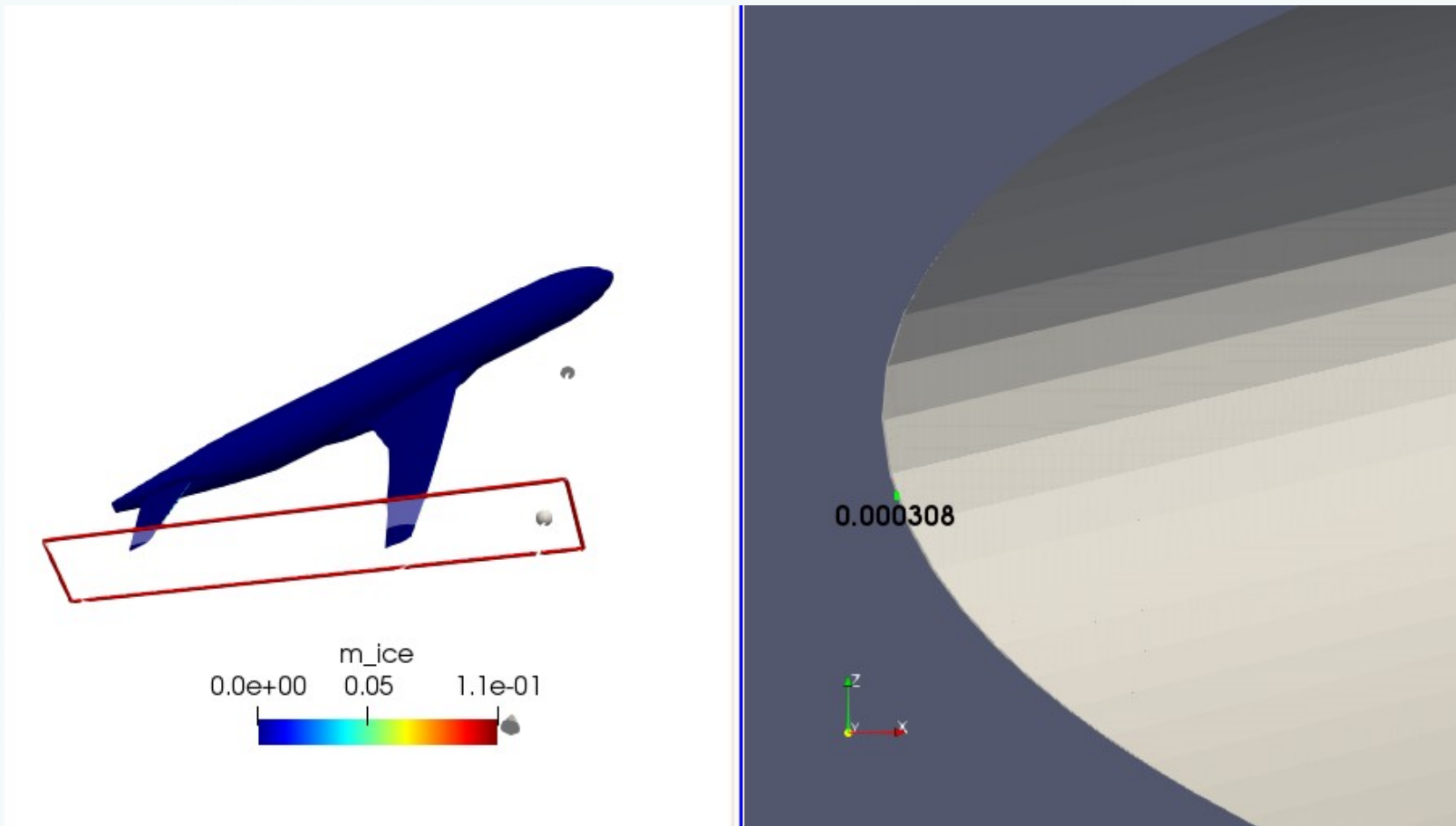
2. Дополнительные требования к датчику обледенения

- Режим ожидания: $LWC_{\infty} = 1.0 \text{ g/m}^3$
- Локальные параметры: $x = 4.25, z = 5.25, LWC_{\text{sensor}} = 1.7567 \text{ g/m}^3$
- Время срабатывания сигнала: 4.0 s
- Максимальная скорость нарастания льда: $\dot{m}_{\text{ice}} \approx 0.2 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$
- Толщина слоя льда: $\sim 0.6 \text{ mm}$



2. Дополнительные требования к датчику обледенения

- Режим ожидания: $LWC_{\infty} = 1.0 \text{ g/m}^3$
- Время нарастания льда: 4.0 s
- Максимальная скорость нарастания льда: $\dot{m}_{\text{ice}} \approx 0.1 \text{ (kg/m}^2 \text{ s)}$
- Толщина слоя льда: $\sim 0.3 \text{ mm}$



Трудности и проблемы

- Шероховатость ледяного слоя
- Движение крупных водяных капель и кристаллов льда
- Накапливание расчетной неточности при моделировании нарастания льда
- Перестроение расчетной сетки
- Для каждого режима необходимо проводить много расчетов



Заключение

- Разработанный метод Годунова для системы уравнений водности, основанный на решении задачи Римана, является достаточно простым и позволяет получать приемлемые результаты
- Учет шероховатости льда позволяет повысить точность моделирования тепловых потоков и, как следствие, формы выросшего льда
- Расчет водности с использованием набора капель разных размеров позволяет повысить точность моделирования поля водности при одновременном увеличении времени расчета
- Разработанный метод можно использовать для решения практических задач, таких как выбор места положения датчика на самолете и проверка его работоспособности на выбранном месте





**Спасибо
за внимание!**