

# Моделирование обледенения в CADFlo

Павлов Андрей

**+ | TI Интеграция**

29.11.2025



# Многостадийное моделирование «Обледенения»

## Опция включена в летний релиз 2025 года



В автоматическом режиме реализуется многостадийный расчет:

Стационарная аэродинамика

Стационарное поле течения переохлажденных частиц

**Нестационарный процесс обледенения:**

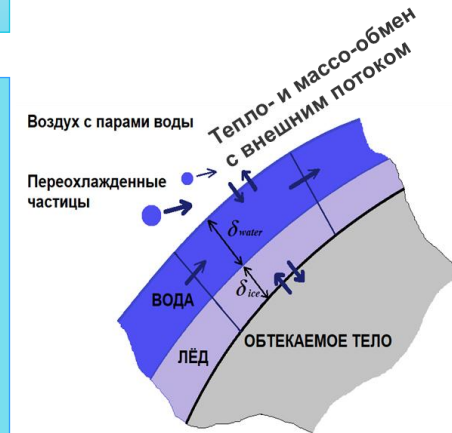
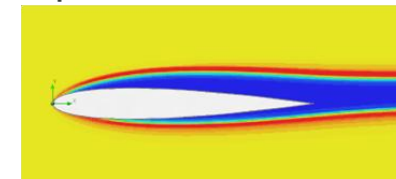
- Образование пленки с фазовым переходом «лёд-вода» при выпадении переохлажденных частиц на поверхность ЛА
- Течение пленки под воздействием внешнего потока с учетом расслоения на лёд и воду
- Сопряженный теплообмен во внешнем потоке, пленке и ЛА
- Конденсация-испарение между пленкой и обтекающим внешним потоком

Создание 3D твердотельного льда по данным 2D модели. Автоматическое перестроение сетки для измененной геометрии ЛА с учетом 3D льда

Уточнение стационарной аэродинамики и стационарного поля течения частиц

*N* перестроений геометрии за  
физическое время *Time* процесса  
обледенения

Liquid Water Content

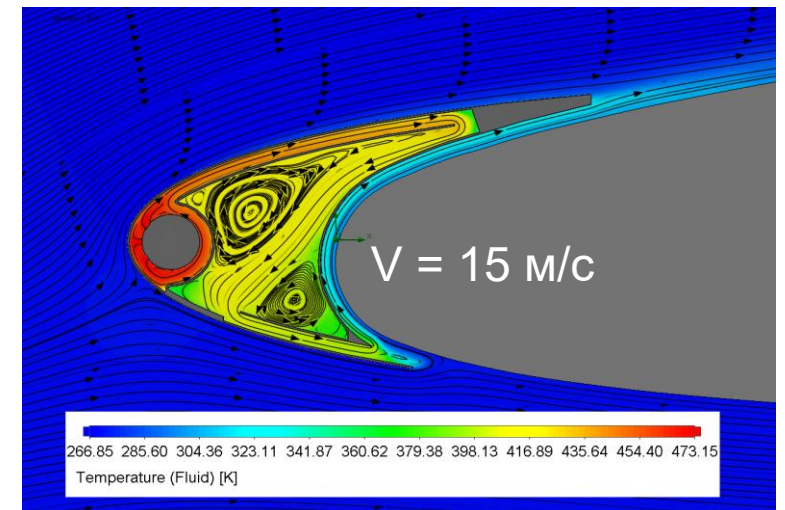
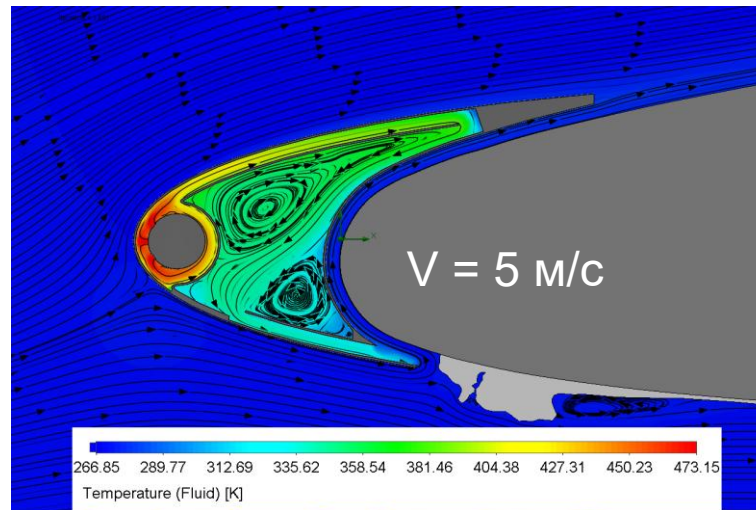
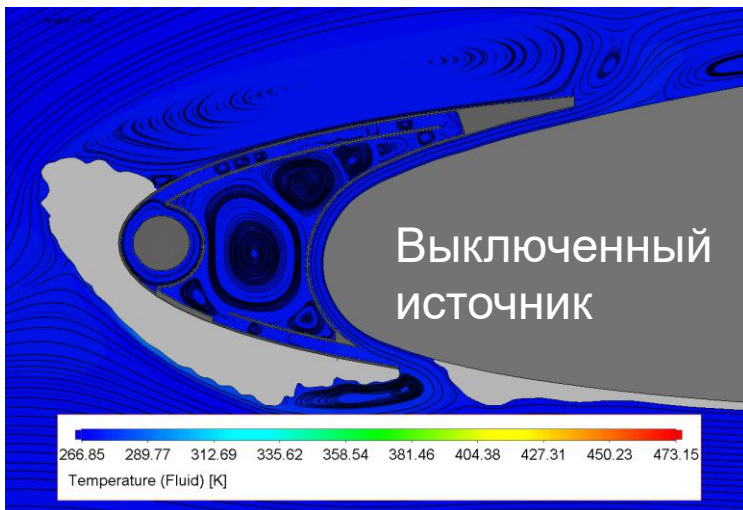
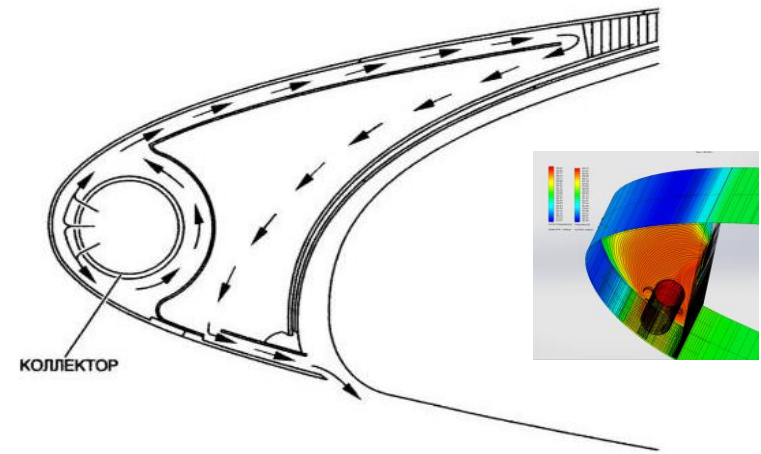


# Особенности моделирования в CADFlo



1. Удобное «GUI» (моделирование одним запуском).
2. Пленка на поверхности рассчитывается совместно с 3D теплообменом в обтекаемых телах и газе. Тела представляются со всей их сложной внутренней структурой, как это позволяет богатая стандартная функциональность СНТ. Отсюда следует возможность решения многообразных реальных инженерных задач.

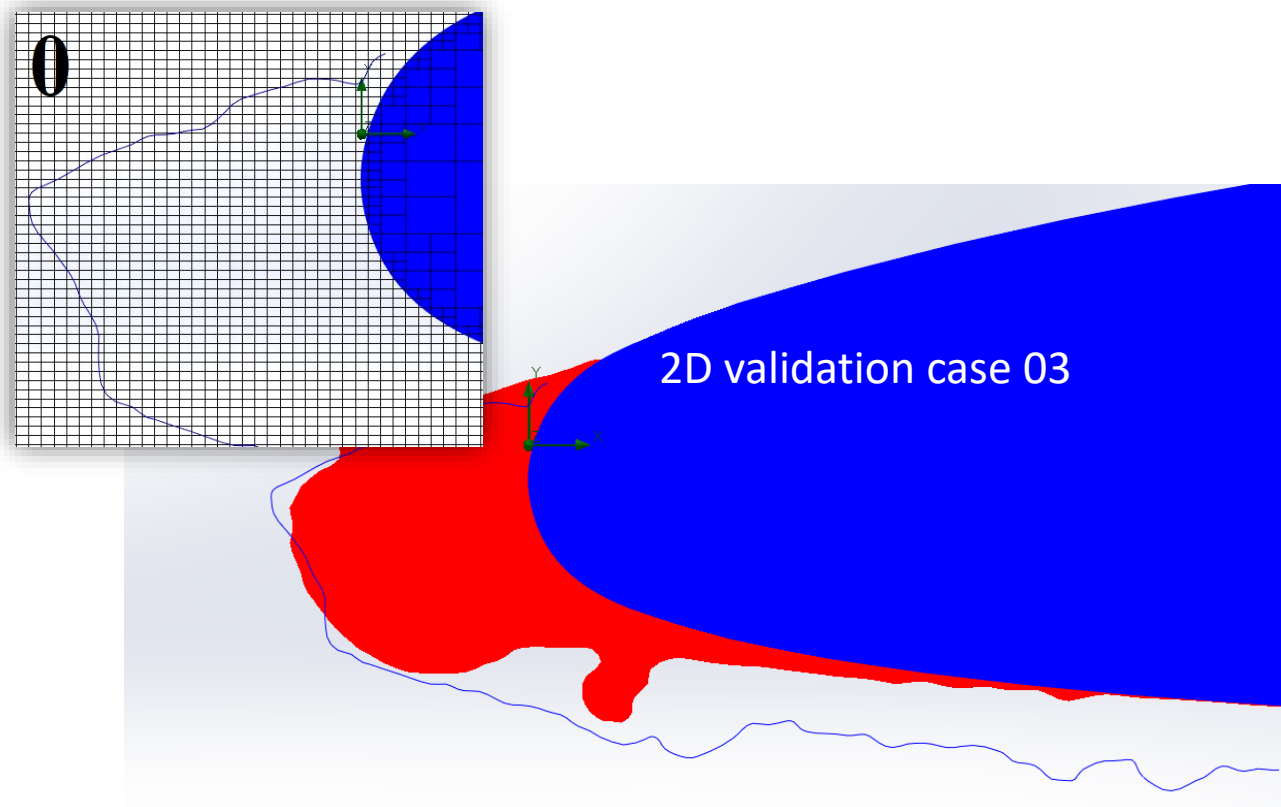
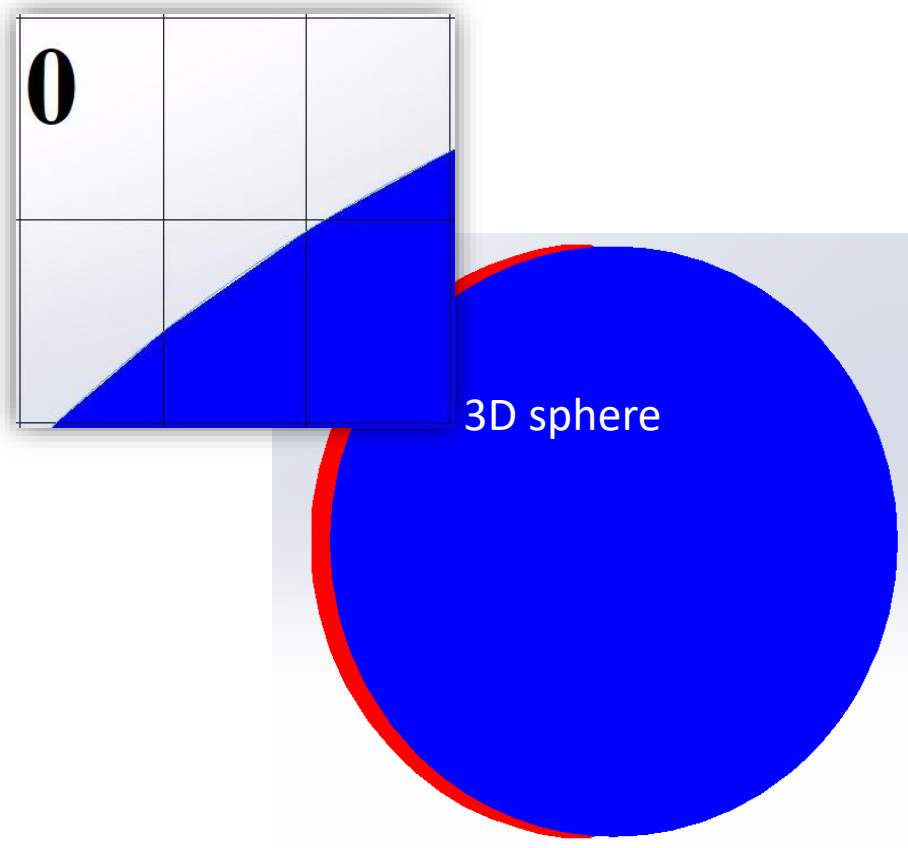
Схема движения воздуха ПОС в предкрылке самолета Суперджет



# Особенности моделирования в CADClo



3. Многократный (десятки раз) захват льда как 3D тела является робастным, быстрым, консервативным, без ограничений на толщину и форму льда.



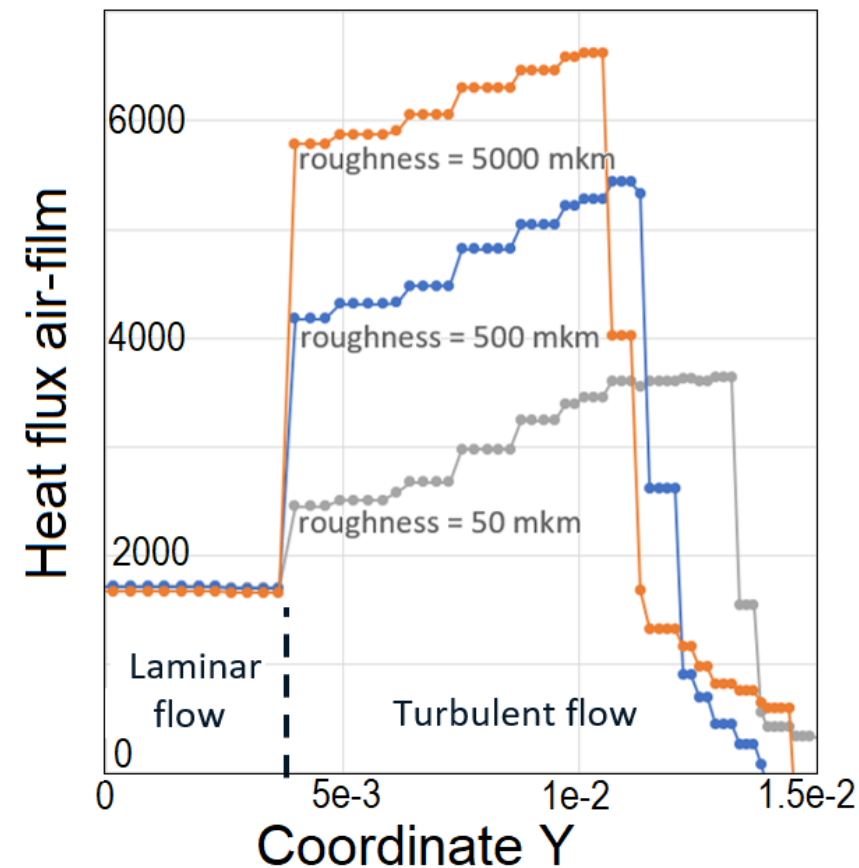
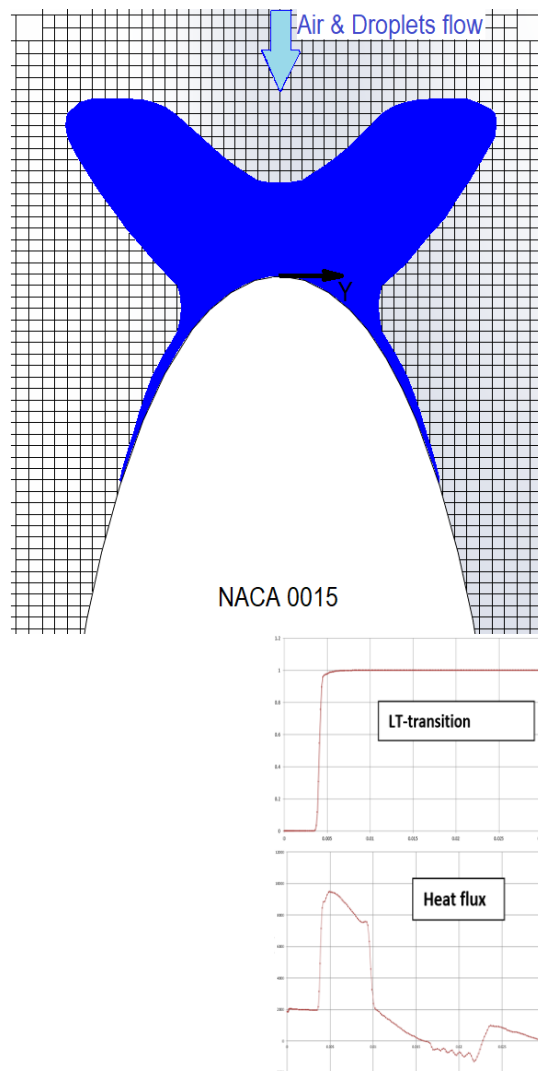


# Особенности моделирования в CADClo



4. Ламинарно-турбулентный переход и шероховатость играют основную роль в механизме роста льда сложных форм. Они определяют положение геометрических особенностей («рогов»).

Реализованный в CADClo ламинарно-турбулентный переход и шероховатость позволяют воспроизводить сложные формы льда



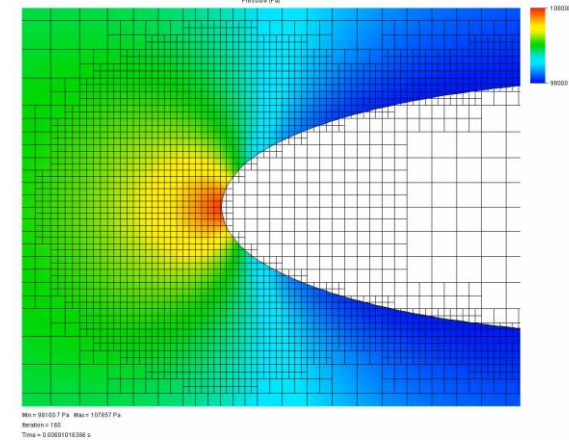
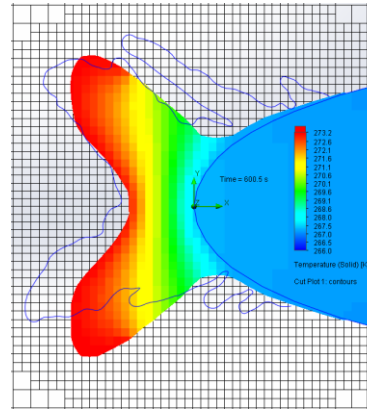
# Обледенение 2D профилей



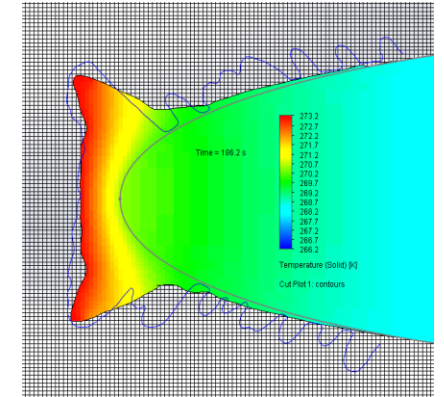
## ANSYS FENSAP-ICE тесты

Case 01 Rime Run-404	OK
Case 02 Rime Run-211v3	OK
Case 03 Rime Run-212v3	OK
Case 04 Rime Run-080108v3	OK
Case 06 Glaze Run AE1055436	OK
Case 07 Glaze Run 624963	OK
Case 08 Glaze Run AC1097336	OK
Case 11 Glaze Run 711	OK*
Case 14 Rime NASA AE1008336	OK*

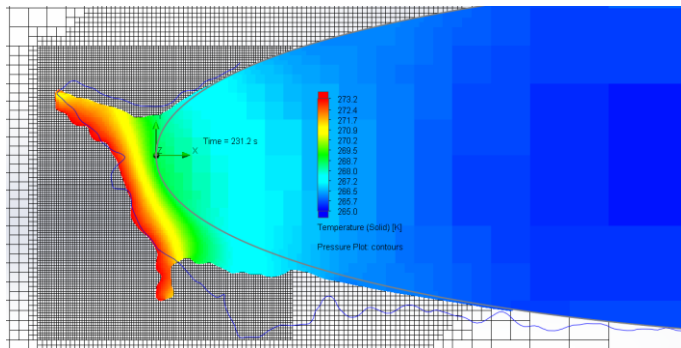
Case 07 glaze



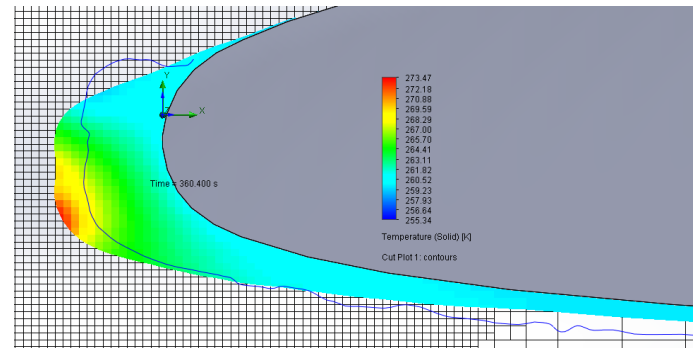
Case 08 Glaze  
Run AC1097336



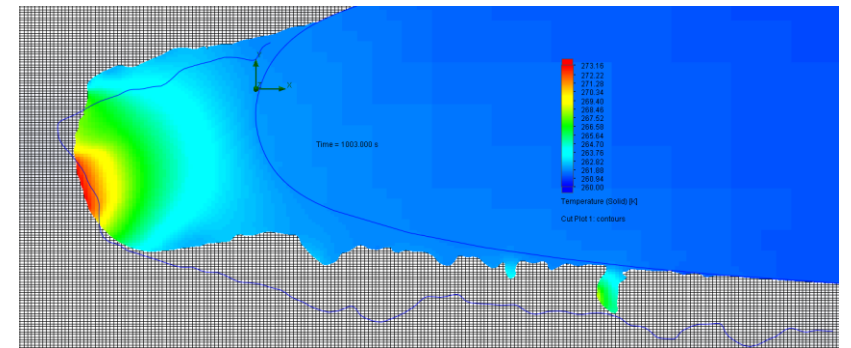
Case 06 Glaze Run AE1055436



Case 04 Rime Run-080108



Case 03 Rime Run-212

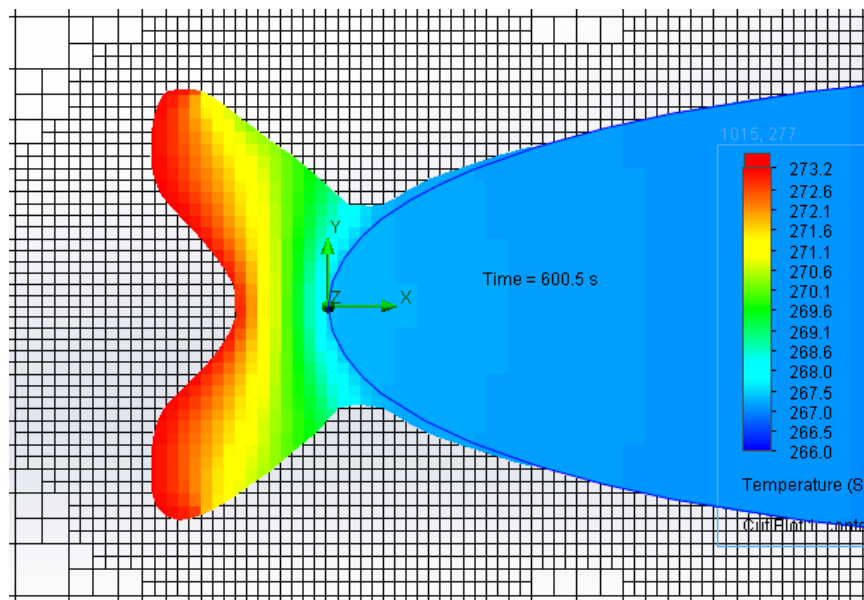


# Обледенение 2D профилей

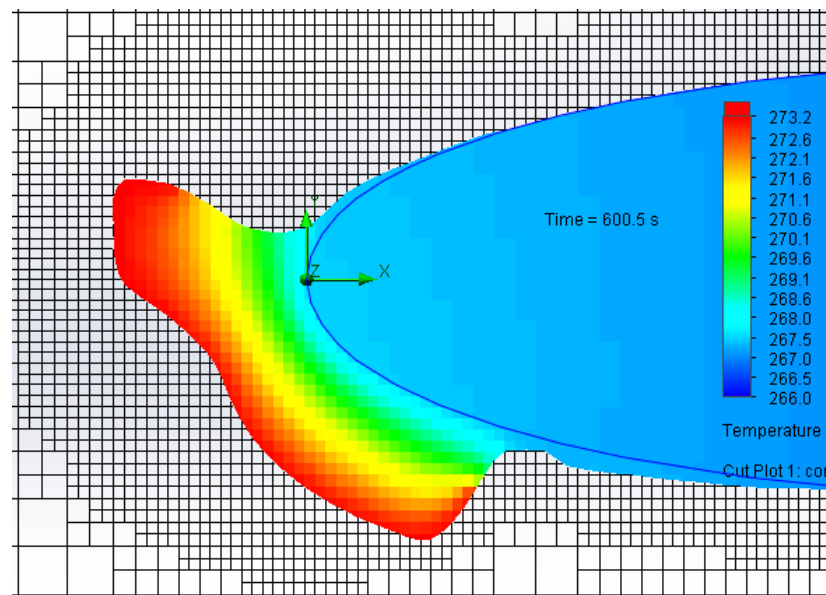


Обледенение при меняющемся по времени угле атаки на примере «Case 07 Glaze Run 624963»

Постоянный угол атаки:



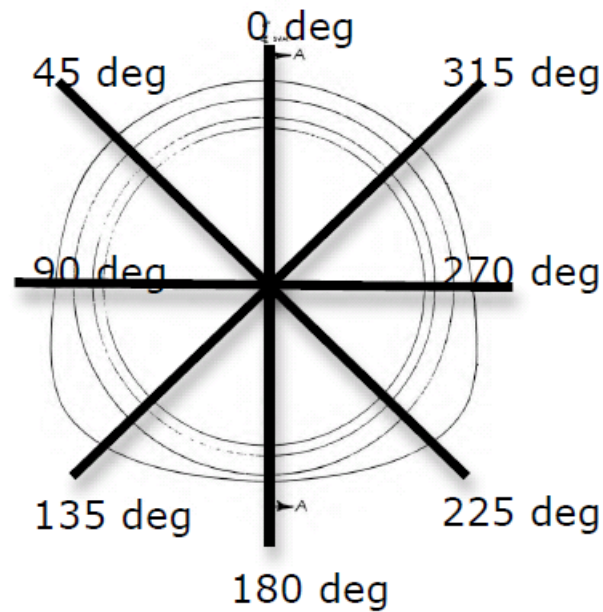
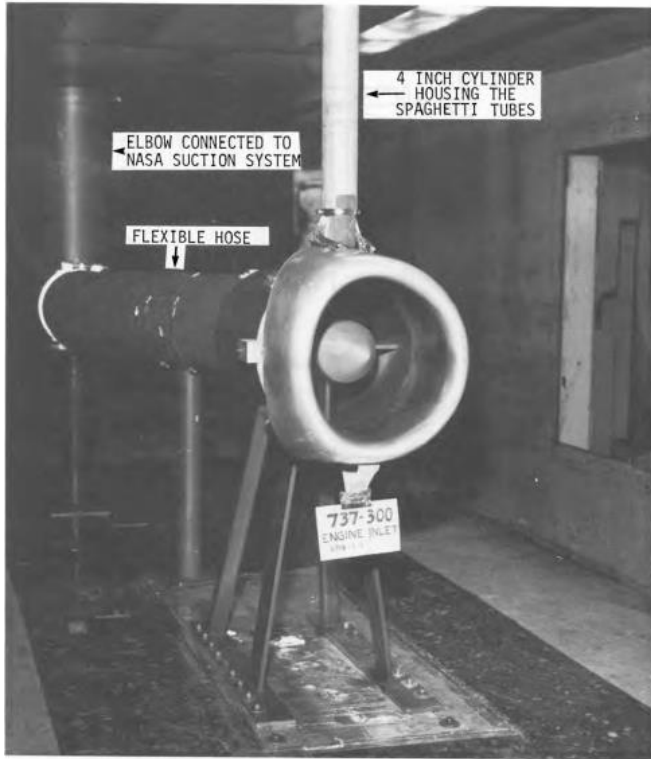
Переменный угол атаки:



Заданная зависимость  
угла атаки от времени:

Dependency	
Dependency type:	
F(time) - table	
Table of values:	
Value t	Values f(t)
0 s	0 °
50 s	7.5 °
100 s	15 °

# Обледенение несимметричной мотогондолы Boing 737-300



Cross-sections

Модель	B-737-300 Nacelle
Характерный размер	0.363 м
Скорость воздуха	76.27 м/с
Статическое давление	95699.2 Па
Статическая температура	267.96 К
Угол Атаки	0°
LWC	0.55 г/м <sup>3</sup>
MVD	20 мкм
Длительность обледенения	420 с
Массовый расход воздуха	10.4144723 кг/с

*M. Papadakis, R. Elangonan, G.A. Freund, Jr., M. Breer, G.W. Zumwalt, and L. Whitmer, "An Experimental Method for Measuring Water Droplet Impingement Efficiency on Two- and Three-Dimensional Bodies", NASA Contractor Report 4257, DOT/FAA/CT -87/22, , 1989*

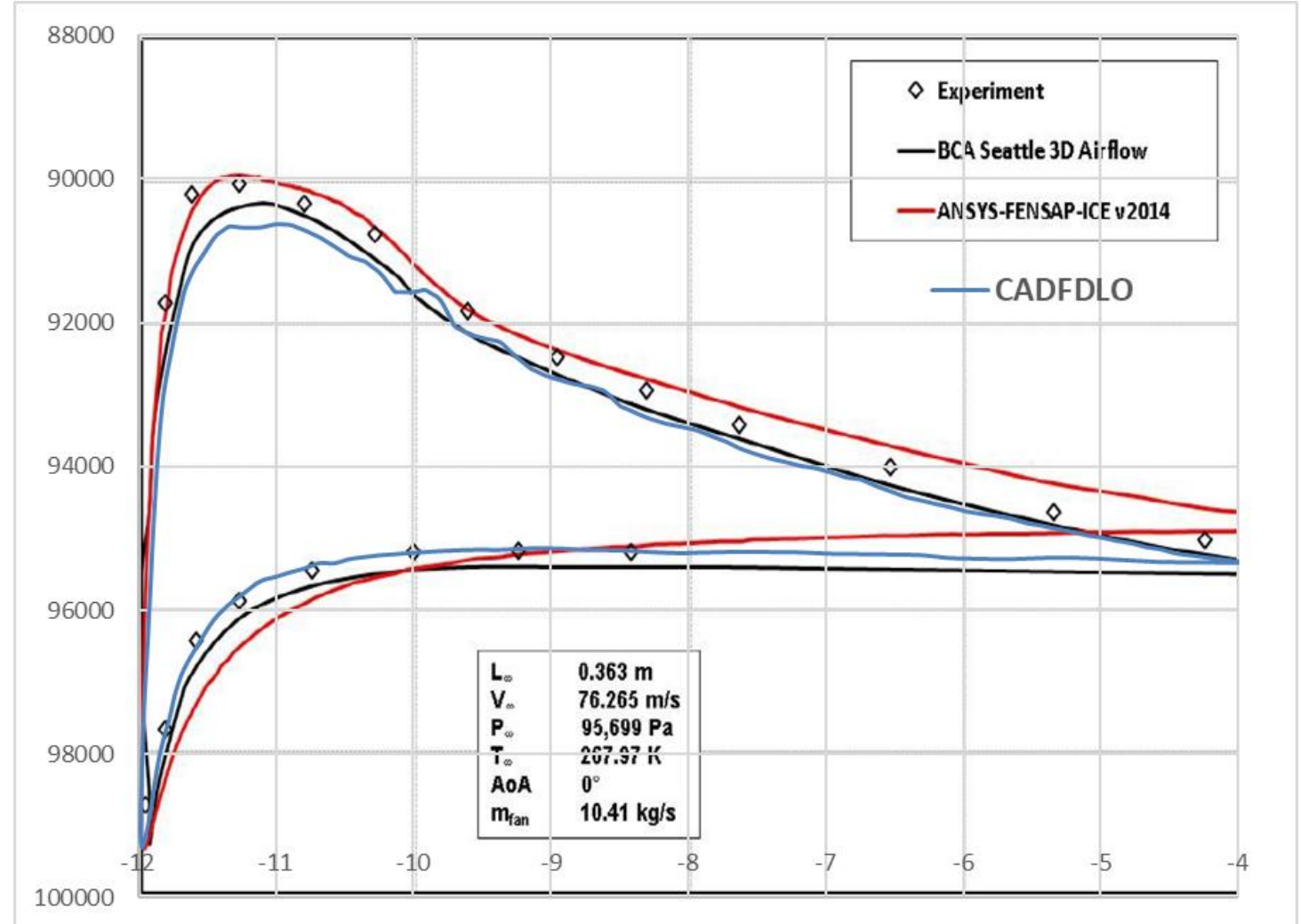
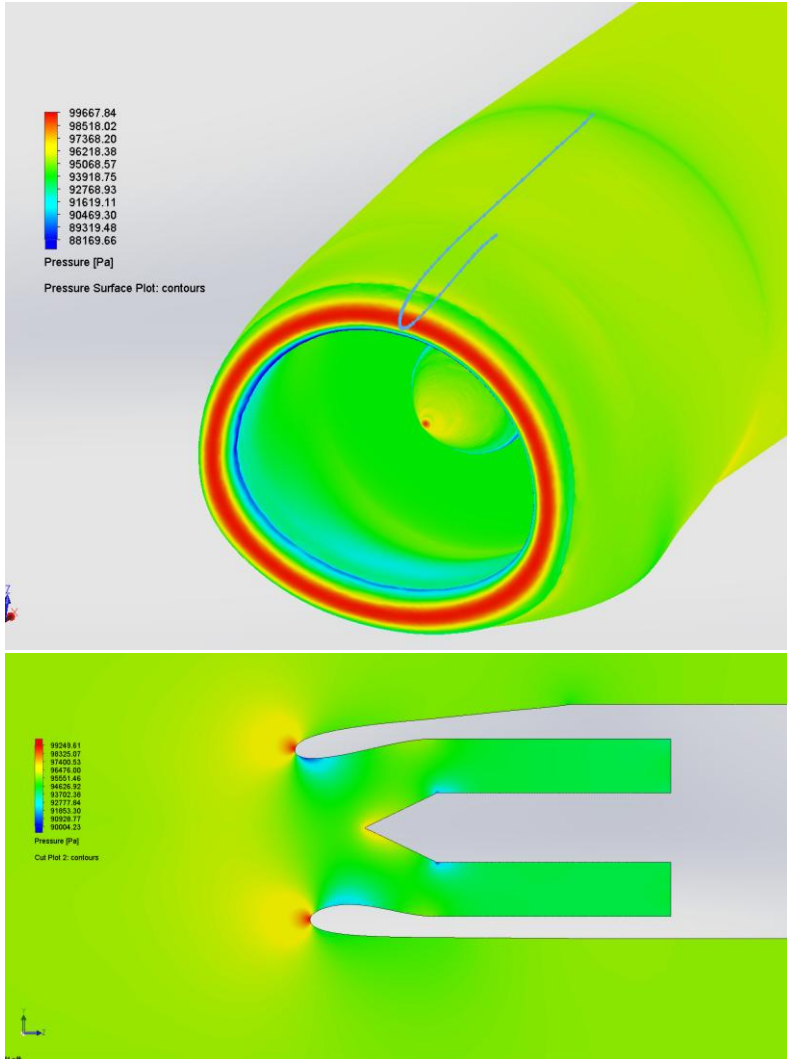
Note: Pages 182-197 contain the information for the experimental data comparison



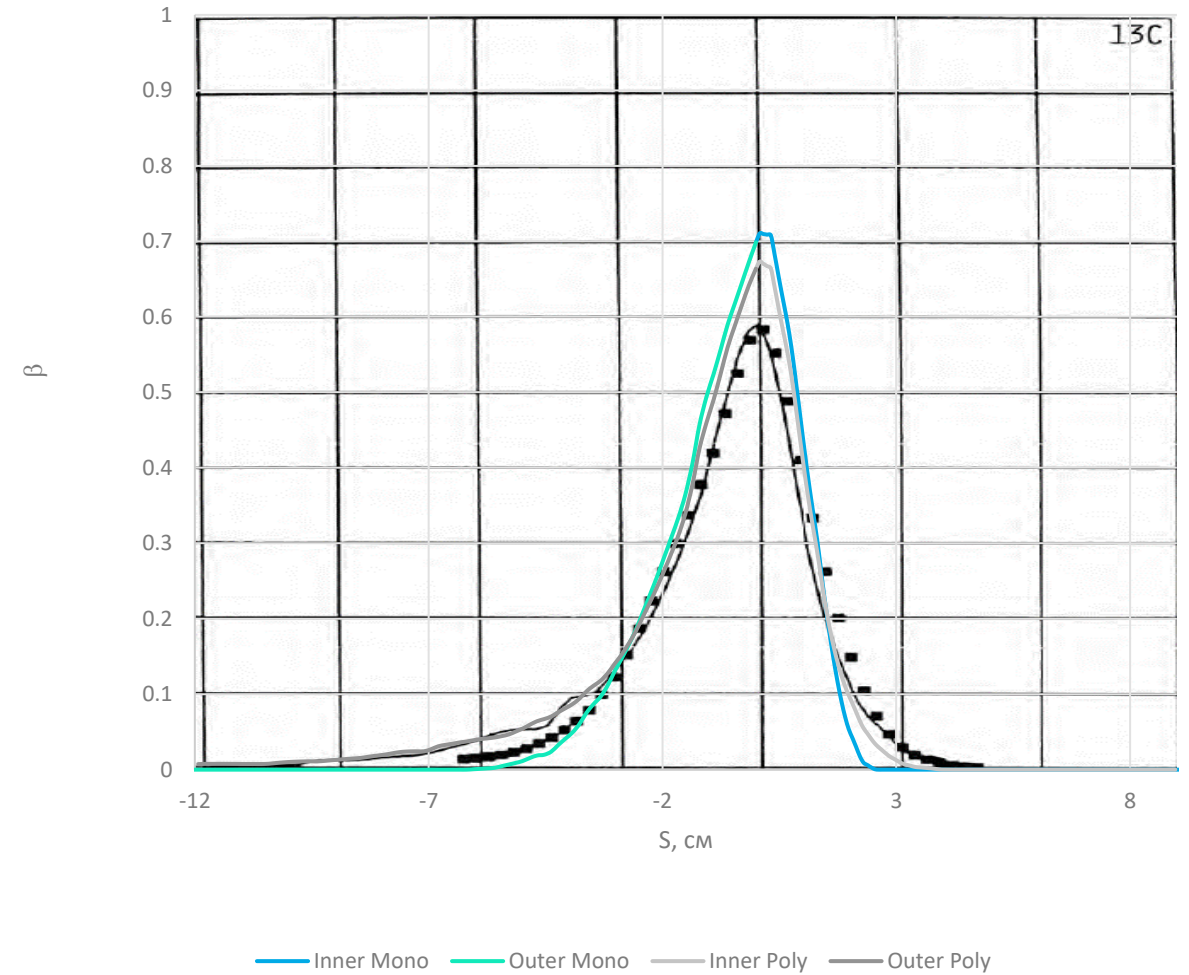
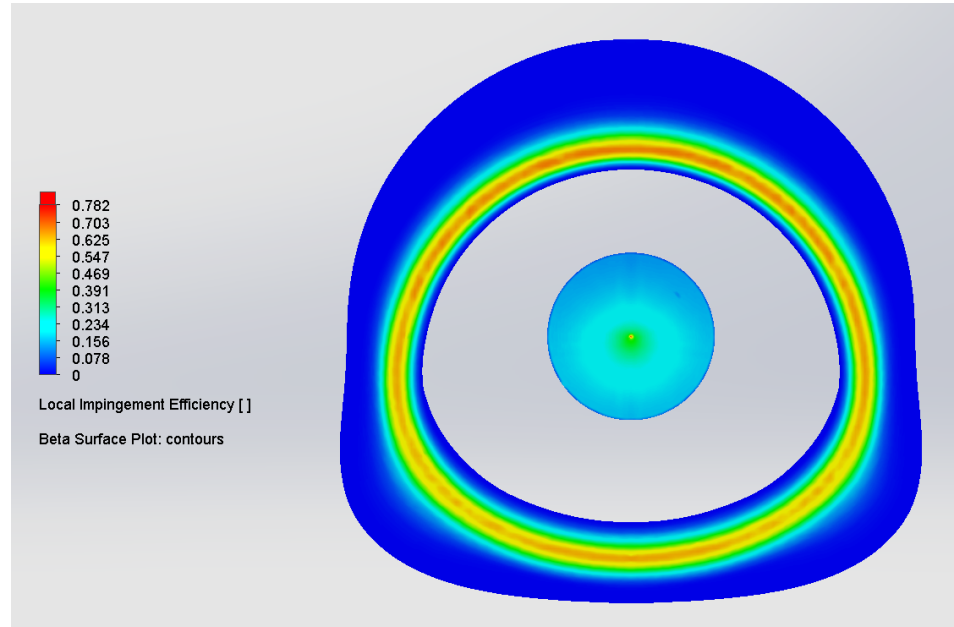
# Расчет аэродинамики. Мотогондола Boeing 737-300



## Давление на поверхности мотогондолы



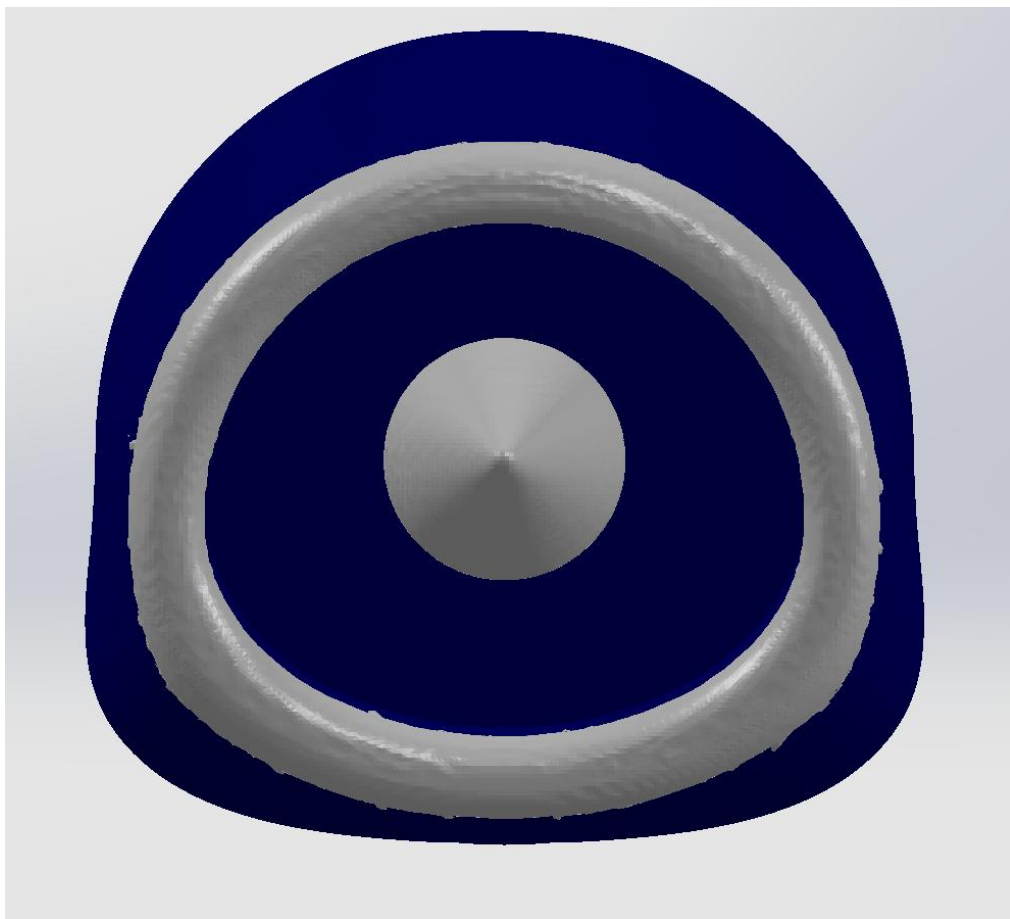
# Расчет движения моно- и полидисперсных капель



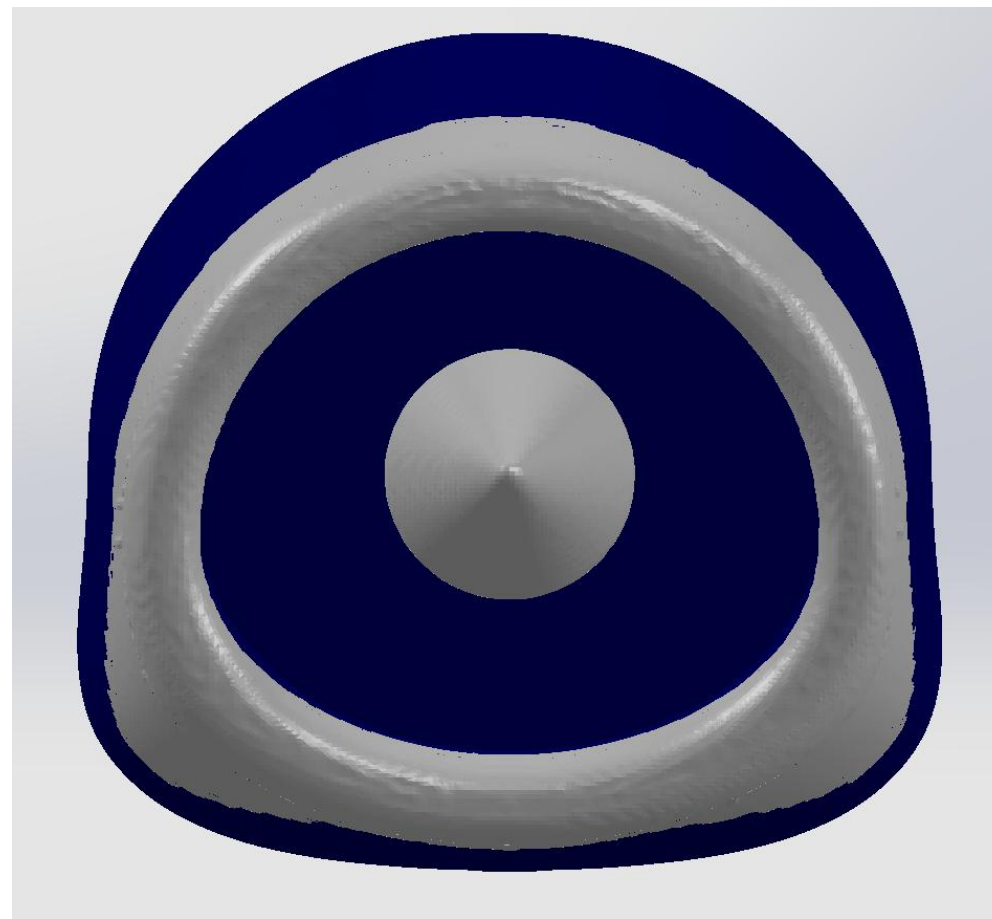
# Формы льда CADFlo.



Монодисперсные капли



Полидисперсные капли



Три захвата льда. Время обледенения 420 с

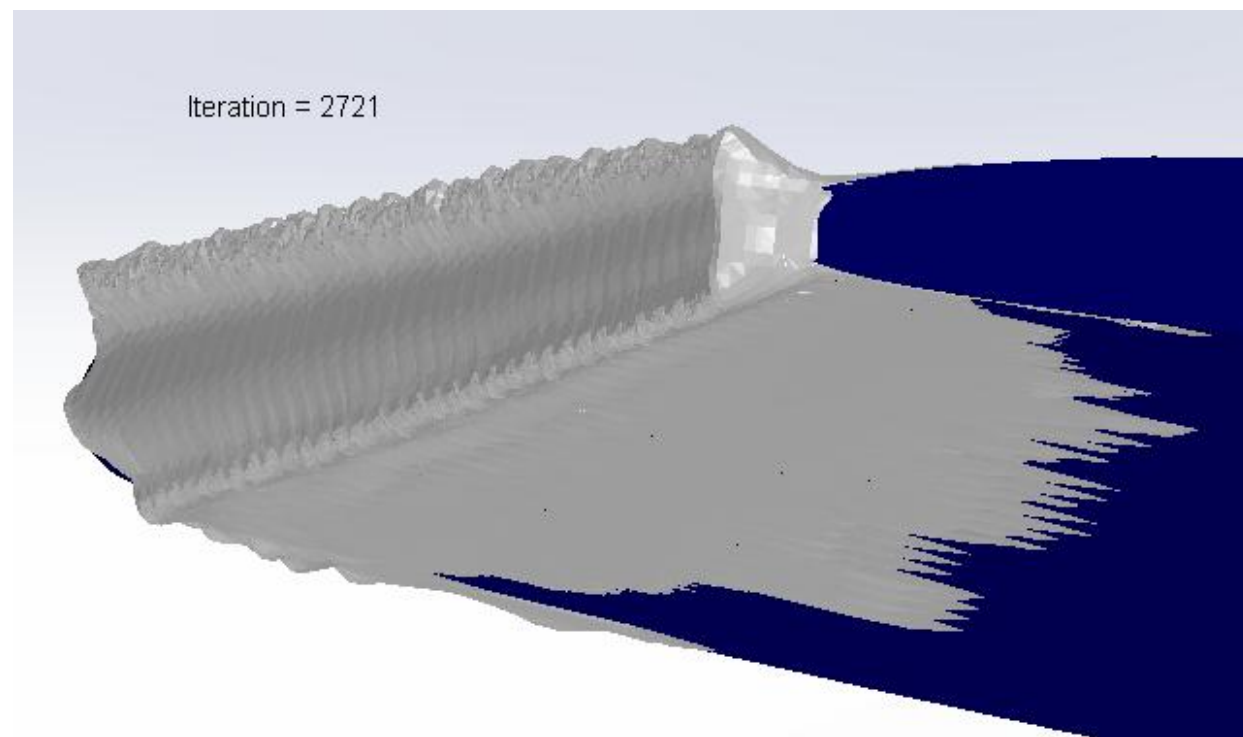
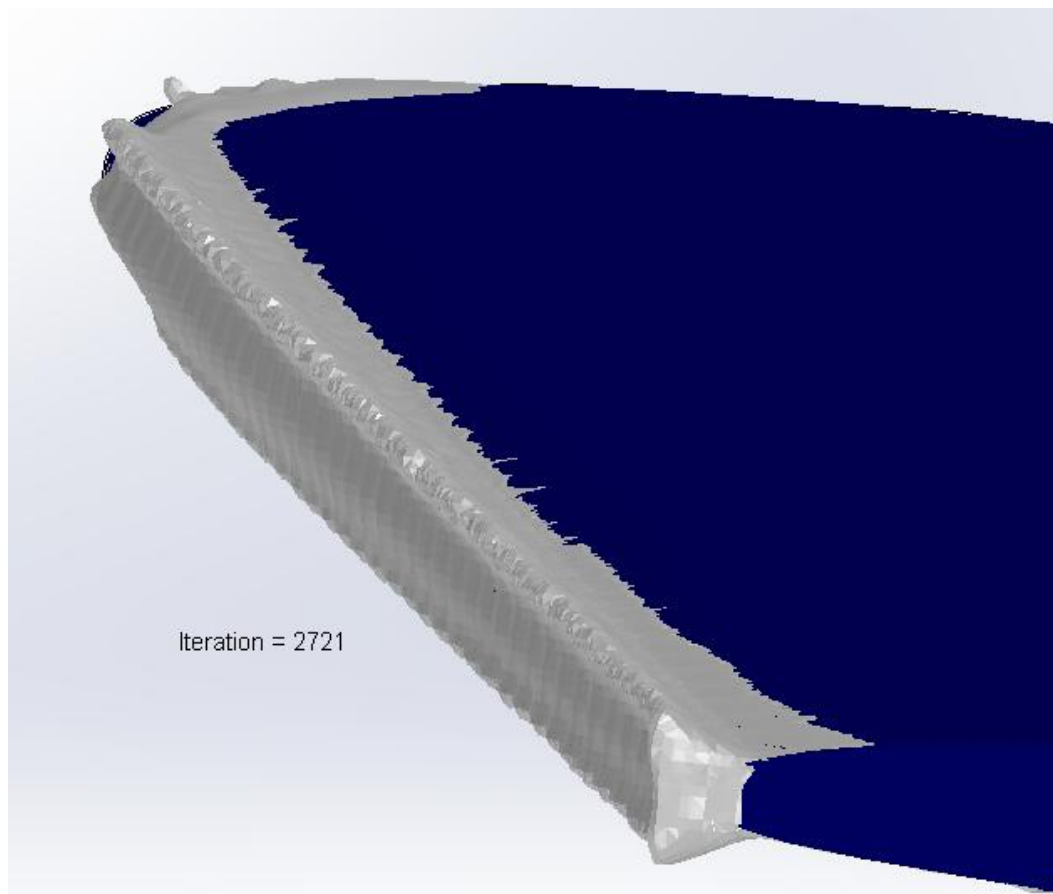
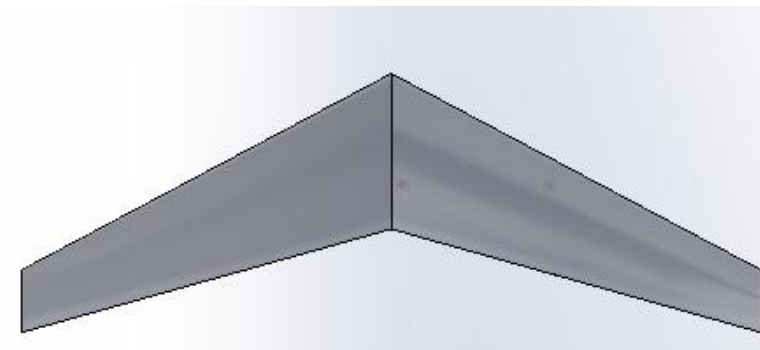
# Обледенение 3D ЛА



Pressure	110941 Pa
Temperature	-3.88888889 °C
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	-111.76 m/s

Physical time 601.000 s  
Total cells 2418529  
Fluid cells 1998452

**CPU: 15 часов**  
**10 захватов льда**





# Влияние численных параметров на результаты



Параметр	Рекомендации для влажного режима, $MVD < 40 \mu\text{м}$	Степень влияния
Размер пространственной сетки	$h < (0.5 \div 0.1)\%$ от хорды $L$	<b>Значительно</b>
Количества захватов льда	$N$ захватов $> 15$	<b>Значительно</b>
Шероховатость льда	$3000 \div 5000 \mu\text{м}$	<b>Значительно</b>
Размер шага по времени	$\Delta t < 0.2$ сек	<b>Незначительно</b> (пока не нарушается условие Куранта для течения пленки)
Распределение капель по размерам: моно- или полидисперсные капли	Монодисперсное	<b>Незначительно</b>
Материал тела и его начальная температура	Следует уточнять свойства материала и температуру обтекаемого тела	<b>Значительно</b>
Настройки ламинарно-турбулентного перехода	$0 < C(lam-turb) < 0.75$	<b>Незначительно</b> (в указанном диапазоне)

# Влияние численных параметров на результаты



Размер шага сетки

h (% от L)	Форма льда на 600 сек
5%	
2%	
1%	
0.5%	
0.25%	
0.125	
0.0625	

Время между захватами льда

Число захватов льда как 3D	Время между захватами (сек)	Форма льда на 600 сек
5	120 сек	
7	85.7 сек	
10	60 сек	
15	40 сек	
30	20 сек	
60	10 сек	

Шероховатость

Шероховатость льда (мкм)	Форма льда на 600 сек
50	
500	
1000	
3000	
5000	
10000	

Материал и начальная температура профиля

Материал профиля и начальная температура (C)	Форма льда на 600 сек
<b>Aluminum 5052</b> Specific heat = 921 J/ (kg * K), Thermal conductivity = 140 W / (m*K), T0 = -10.011 C.	
<b>Aluminum 5052</b> Specific heat = 921 J/ (kg * K), Thermal conductivity = 140 W / (m*K), T0 = 0 C.	
<b>Aluminum 5052</b> Specific heat = 921 J/ (kg * K), Thermal conductivity = 140 W / (m*K), T0 = +5 C.	
<b>Polytetrafluoroethylene (PTFE)</b> Specific heat 1300 J/ (kg * K) Thermal conductivity 0.3 W / (m*K) T0 = -10.011 C	

# Ближайшие планы: разбрызгивание капель



Добавление модели  
разбрызгивания крупных  
капель (SLD)

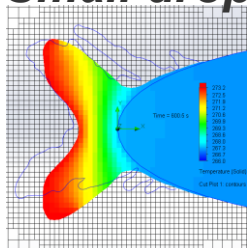
## «LEWICE Splashing Model»:

*Wright W. Further refinement of  
the LEWICE SLD model [C].*

*Reno, Nevada: 44th AIAA*

*Aerospace Sciences Meeting and  
Exhibit, 2006: 464*

## Small droplets ( $MVD = 19\mu m$ ):

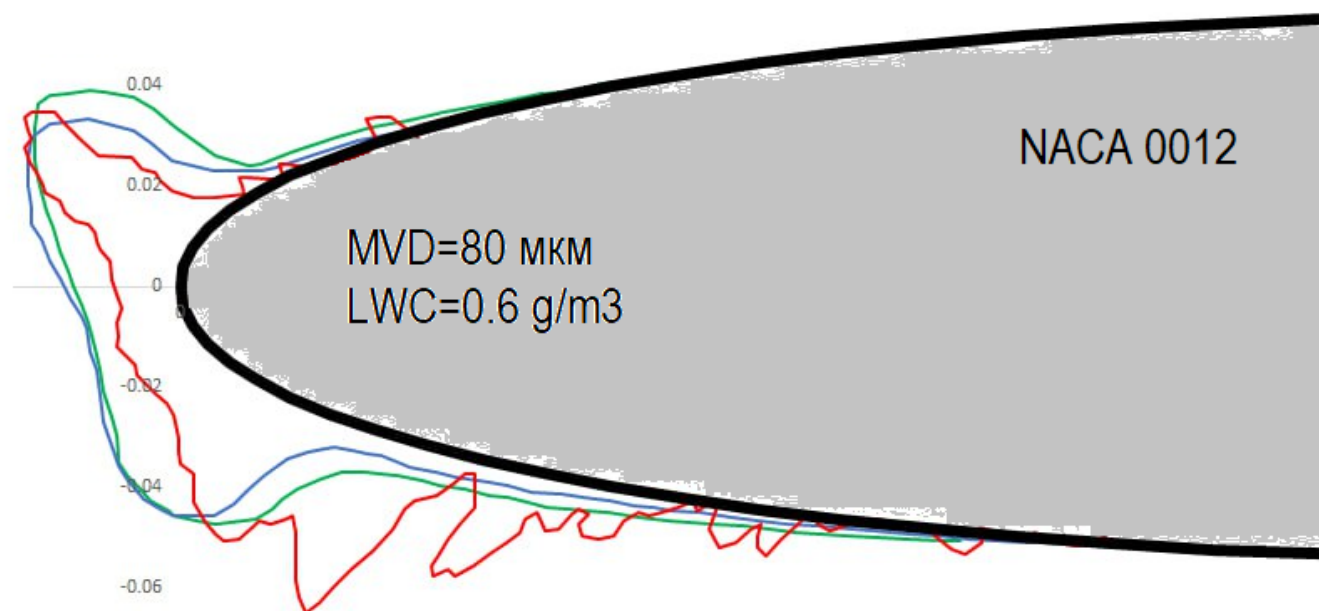


Mass  
reduction  
is 0.25%

## Large droplets ( $MVD = 80\mu m$ ):

- Experiment \*
- CADFlo without splashing
- CADFlo with splashing

Splashing leads to 22% mass reduction



\* Miller, D.R., Potapczuk, M.G., and Langhals, T.J., *Preliminary Investigation of Ice Shape Sensitivity to Parameter Variations*, NASA/TM-2005-213562 (AIAA Paper 2005-0073), 2005.

Спасибо  
за внимание

+ | ТІ Интеграция

