



центр высокопроизводительных  
вычислительных систем

ПЕРМСКИЙ ПОЛИТЕХ

# Численное и экспериментальное моделирование авиационных противообледенительных систем

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ №25-19-20020

Старший научный сотрудник ЦВВС ПНИПУ, канд. техн. наук, Калюлин Станислав Львович

Научный руководитель:  
Декан АКФ ПНИПУ, д-р техн. наук, профессор Модорский Владимир Яковлевич

Бабушкина А.В., Владимиров Н.В., Серегина М.А., Черепанов И.Е., Белобородов С.М.

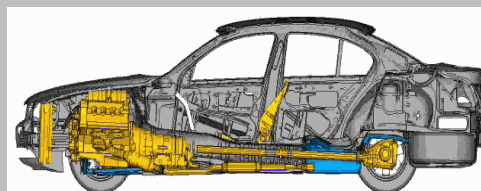
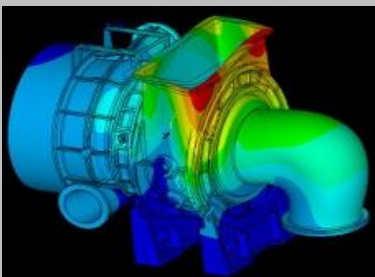
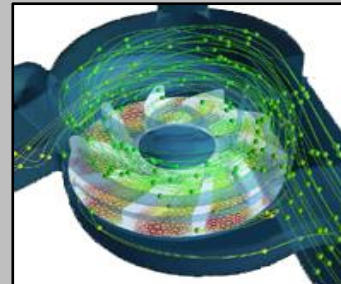
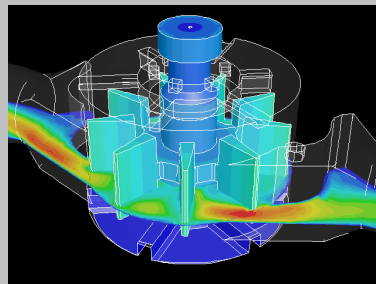
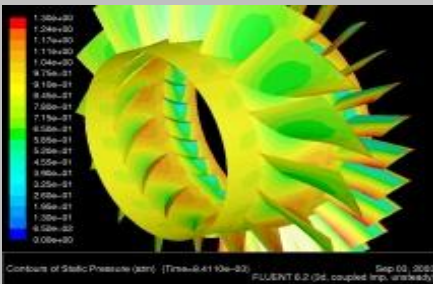
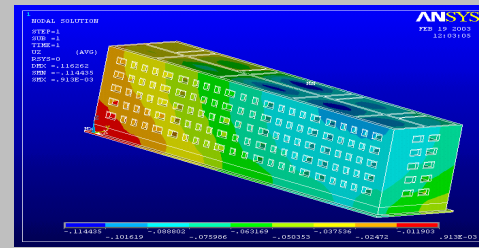
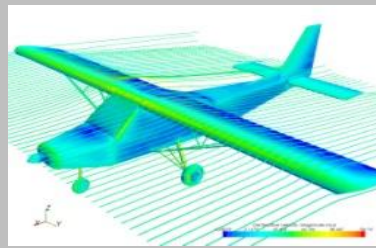
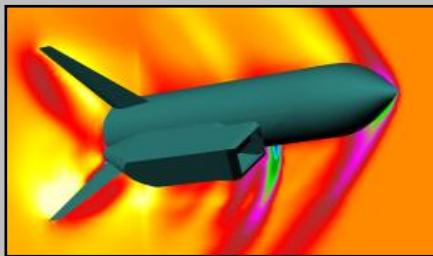


- 100 вычислительных узлов
- 1 136 ядер
- Объем оперативной памяти 7 680 Гбайт
- Пиковая производительность 196 Тфлопс
- 6 шестнадцатиядерных процессоров «Intel Gold 6444Y» (всего 96 ядер)
- 4 двенадцатиядерных процессоров «Intel Silver 4410Y» (всего 48 ядер)
- 62 восьмиядерных процессоров «Intel Xeon E5-2680» (всего 480 ядер)
- 128 четырехядерных процессоров «Barcelona-3» (всего 512 ядер)
- 8 вычислительных модулей GPU NVIDIA Tesla A100 80GB
- 12 вычислительных модулей GPU NVIDIA Tesla M2090 6GB.



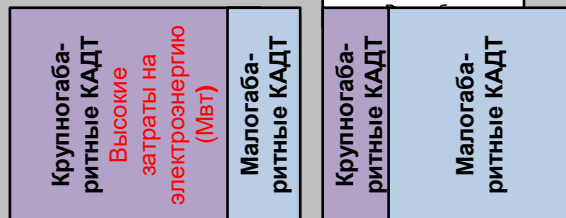


- ЛОГОС
- FlowVision
- IOSO PM
- Fidesys
- КОМПАС
- T-Flex
  
- ANSYS
- Abaqus
- LS-DYNA
- STAR-CCM+
- Comsol
- NX





**Физическое моделирование  
обледенения без вибраций**



**Зарубежная статистика авиационных происшествий:**

- 202 случая обледенения за 1998-2007 годы, 21% с жертвами («Aircraft Owners and Pilot Association»)

- 255 случая обледенения за 1985-1999 годы, 12% с жертвами («Army Aircraft Icing»)

**Статистика в РФ:**

- 02.12.2021, Airbus 321, г. Иркутск, вынужденная посадка (обледенение приемников полного давления, крыльев, воздухозаборников)

- 11.02.2018, Ан-148-100В, г. Оренбург, 71 чел. (обледенение приемников полного давления)

- 19.03.2016, Boeing 737-800, г. Ростов-на-Дону, 62 чел. (обледенение крыльев)

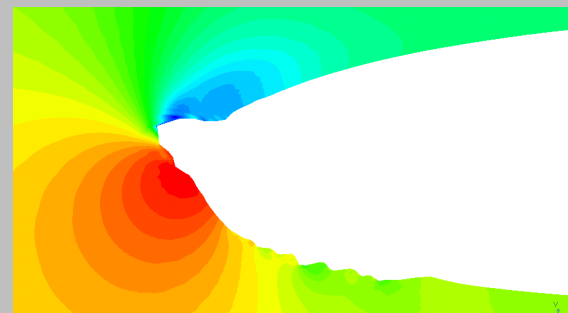
- 02.04.2012, ATR 72-201, г. Тюмень, 33 чел. (обледенение воздушного судна)

**Актуальность работы**

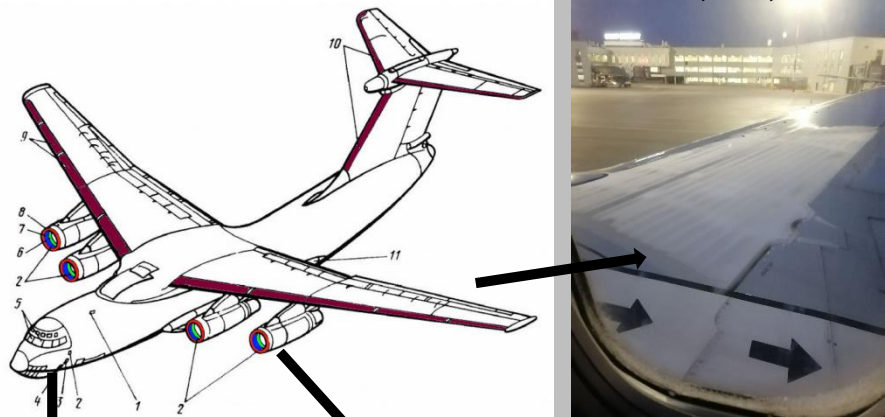
**Математическое моделирование  
обледенения без вибраций**



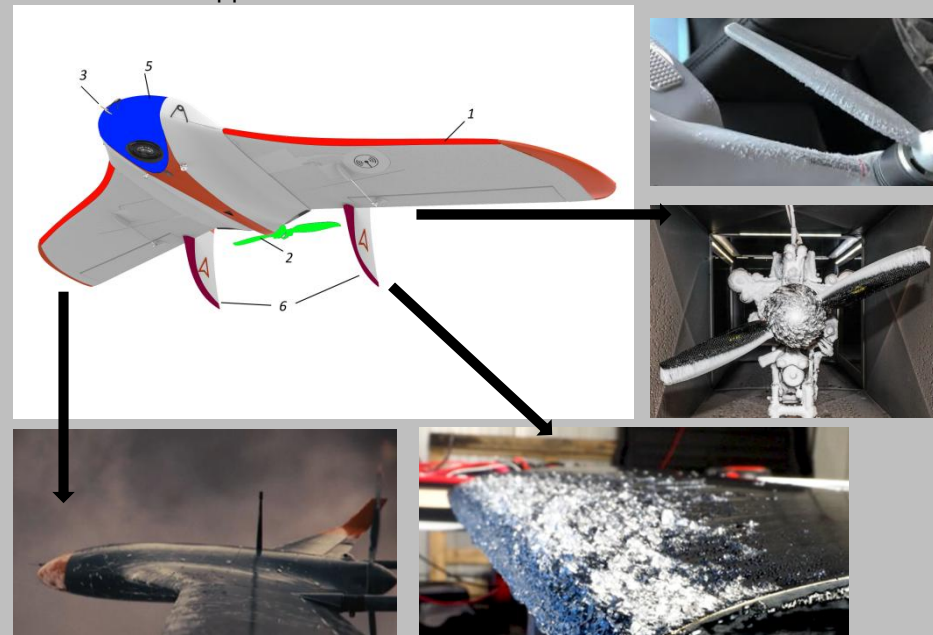
**Высокопроизводительные вычисления  
Междисциплинарность**



Области наиболее подверженных  
обледенению элементов **ВС** **В-737-800, -1С, 27.03.23**

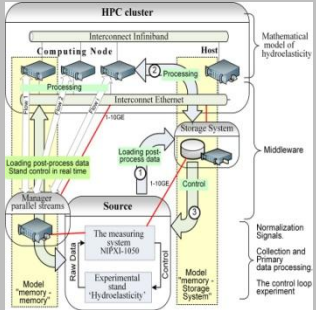


Области наиболее подверженных  
обледенению элементов **БВС**





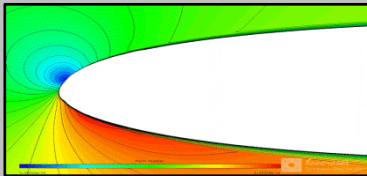
### Численное моделирование



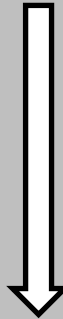
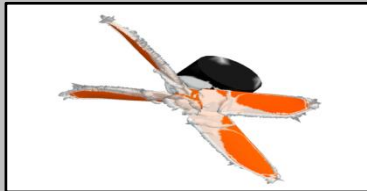
Моделирование с использованием высокопроизводительных расчетных комплексов



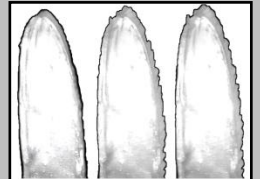
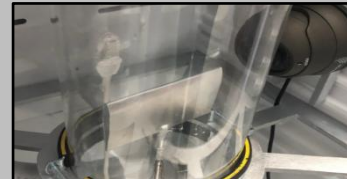
Неподвижные элементы ЛА



Вращающиеся элементы ЛА



Неподвижные элементы ЛА

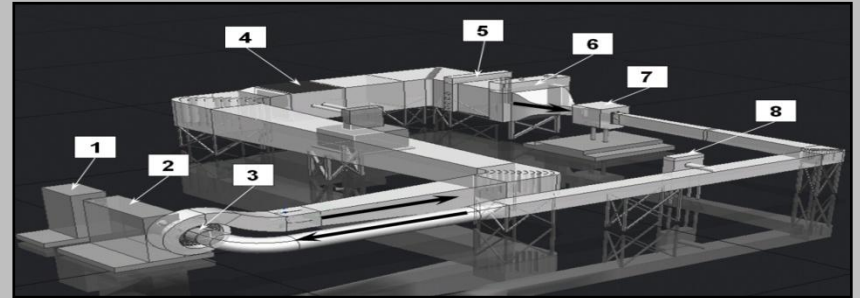


Вращающиеся элементы ЛА

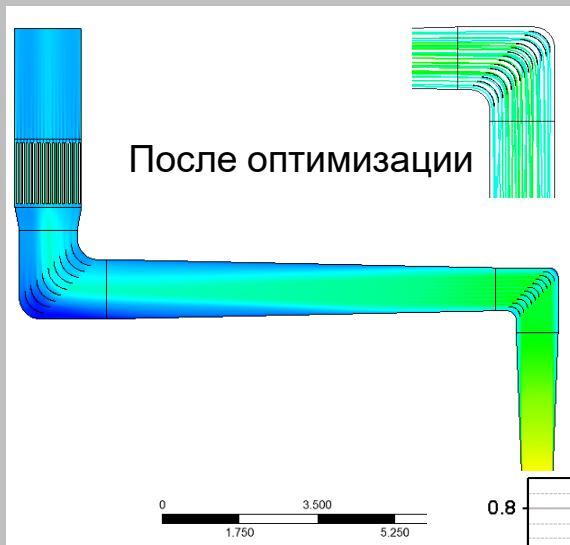
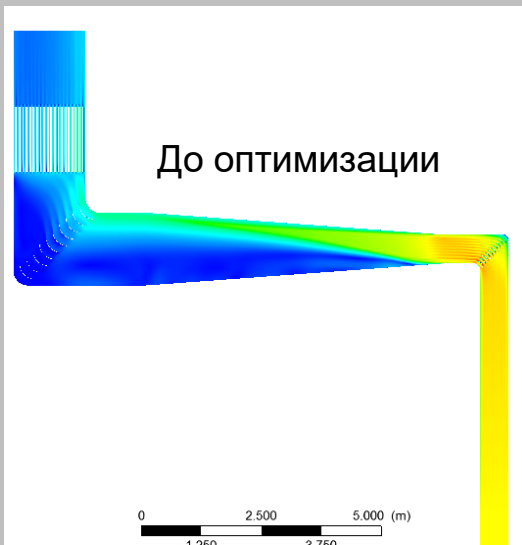


## Методы исследования процессов обледенения

### Экспериментальные исследования



Аэродинамические климатические стенды, моделирующие все полетные условия

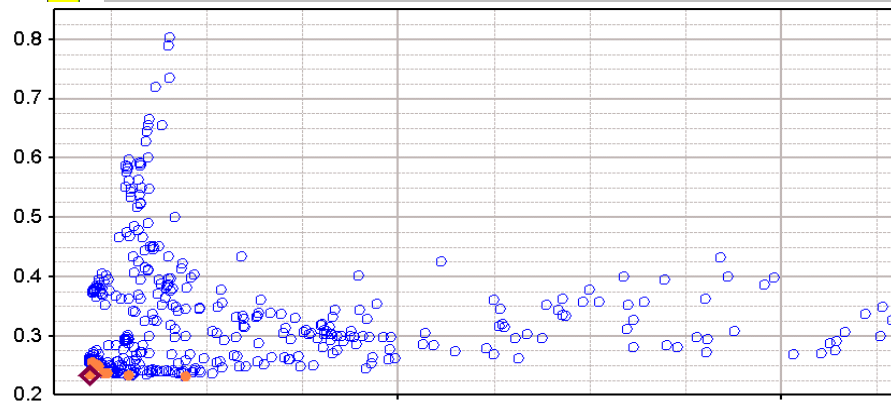


№ р-та	Y <sub>2</sub> , мм	Y <sub>3</sub> , мм	Y <sub>4</sub> , мм	Y <sub>5</sub> , мм	Z <sub>2</sub> , мм	Z <sub>3</sub> , мм	Z <sub>4</sub> , мм	Z <sub>5</sub> , мм	L, мм	β <sub>отр</sub> -1000	Unev, %	dP, %
256	500	407	339	241	521	421	302	281	2576	<b>15,83</b>	<b>3,81</b>	<b>0,33</b>
257	590	444	412	151	604	576	442	283	2276	<b>38,68</b>	<b>2,83</b>	<b>0,46</b>
258	431	301	252	158	471	410	309	308	1813	<b>8,54</b>	<b>6,23</b>	<b>0,36</b>
259	689	452	447	251	600	604	526	322	2845	<b>27,13</b>	<b>3,26</b>	<b>0,29</b>
260	544	441	267	203	526	468	314	251	2085	<b>11,98</b>	<b>2,83</b>	<b>0,35</b>
261	429	429	284	166	535	478	342	251	2176	<b>9,99</b>	<b>1,37</b>	<b>0,41</b>
262	621	450	417	155	594	576	525	260	2583	<b>35,93</b>	<b>3,05</b>	<b>0,73</b>
263	670	488	434	202	620	578	535	298	2573	<b>39,46</b>	<b>1,55</b>	<b>0,33</b>
264	575	422	280	162	528	390	389	261	2278	<b>12,85</b>	<b>1,49</b>	<b>0,42</b>
265	500	394	372	237	482	423	379	281	2575	<b>11,70</b>	<b>2,77</b>	<b>0,32</b>
266	583	457	387	202	670	610	543	274	2186	<b>55,53</b>	<b>1,93</b>	<b>0,31</b>
267	589	491	398	162	648	586	456	300	2479	<b>53,10</b>	<b>2,87</b>	<b>0,38</b>
268	645	405	273	151	592	492	393	251	2911	<b>34,76</b>	<b>2,26</b>	<b>0,64</b>
269	621	472	428	220	626	587	503	302	2324	<b>40,50</b>	<b>2,73</b>	<b>0,29</b>
270	591	490	409	174	531	527	495	270	2219	<b>28,69</b>	<b>1,57</b>	<b>0,37</b>
271	567	503	321	178	547	427	325	251	2036	<b>16,29</b>	<b>1,58</b>	<b>0,35</b>
272	678	483	443	230	592	560	471	318	2782	<b>28,19</b>	<b>3,13</b>	<b>0,31</b>
273	604	349	283	183	514	393	341	251	2168	<b>16,06</b>	<b>1,87</b>	<b>0,37</b>
274	456	421	305	157	529	494	331	251	2112	<b>10,76</b>	<b>1,61</b>	<b>0,44</b>
275	574	500	389	289	643	622	441	331	2633	<b>65,83</b>	<b>6,37</b>	<b>0,30</b>
276	597	452	349	192	524	480	363	253	2600	<b>26,19</b>	<b>1,64</b>	<b>0,39</b>

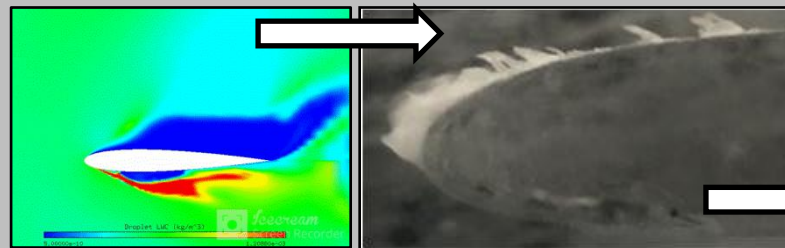
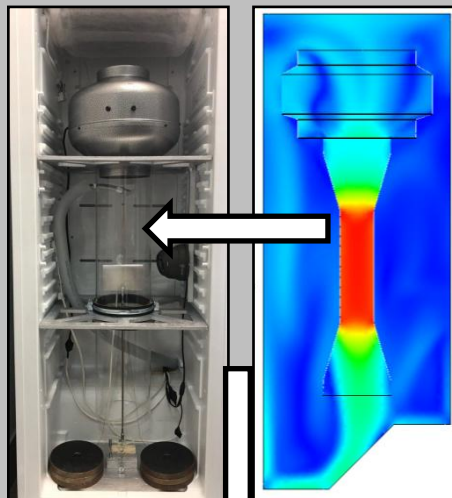
### 3 критерия оптимизации:

- Потери полного давления
- Масса льда
- Неравномерность на входе в рабочую часть в ядре потока

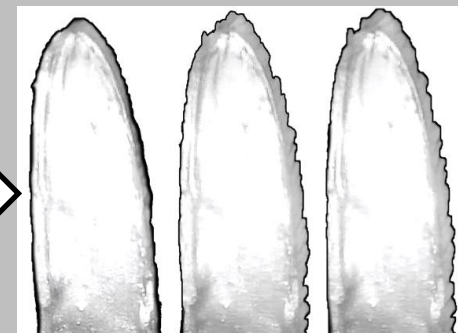
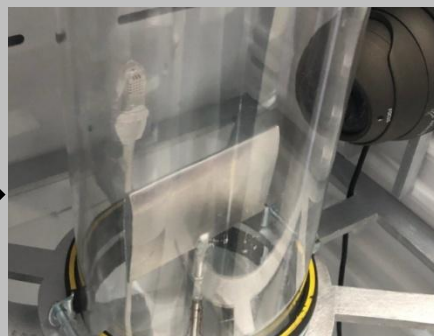
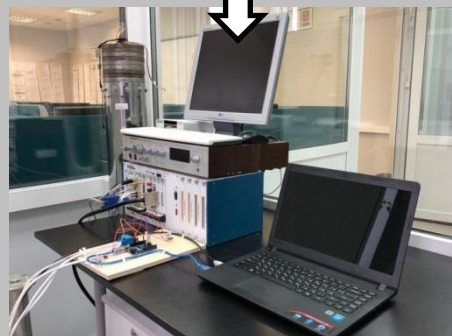
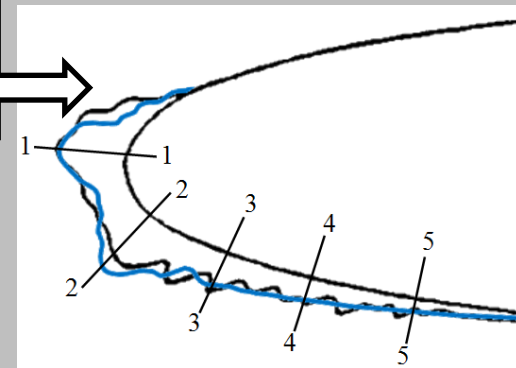
P21@dPSopIc06

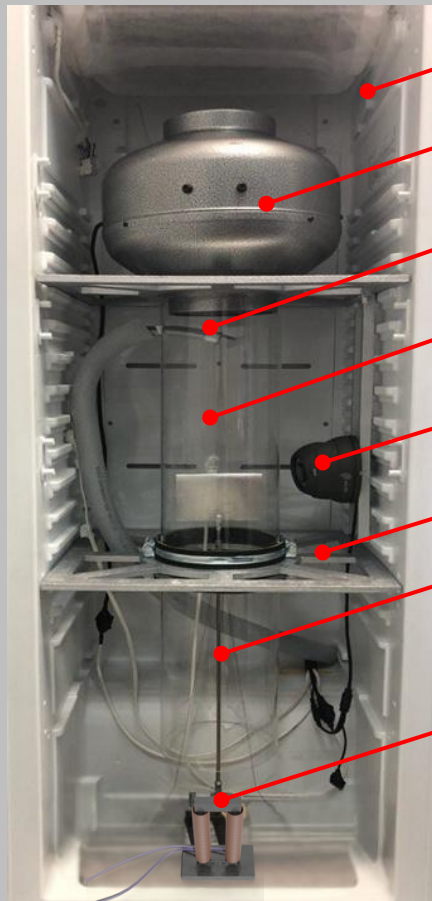


P22@UnevVel06



2. Расчетно-экспериментальные исследования механизмов образования, таяния, разрушения ледяных наростов на элементах ЛА при вибрациях





Холодильная камера

Нагнетатель

Трубка подачи пара с подогревом

Аэродинамический тракт, оргстекло (Ø180 мм)

Видеокамера с ИК подсветкой

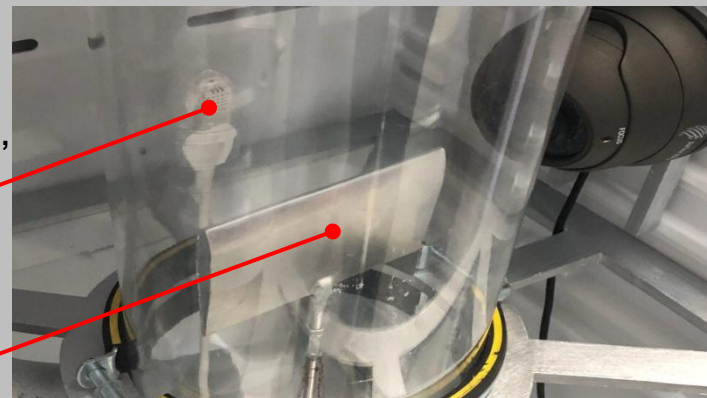
Крепление проточного тракта

Шток виброузла

Виброузел

Датчики температуры, влажности

Профиль крыла NASA 0012

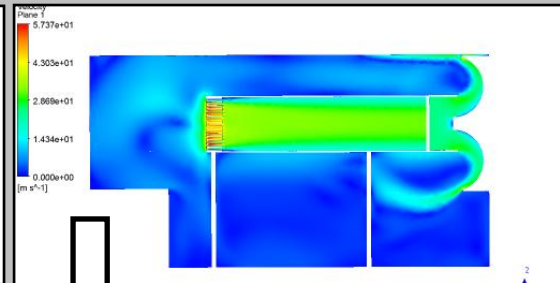
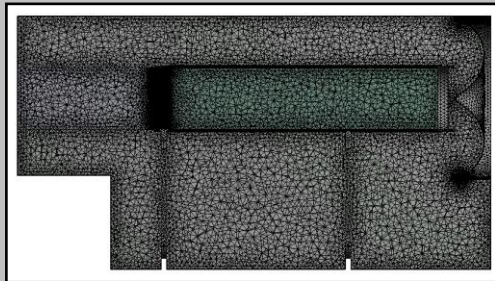
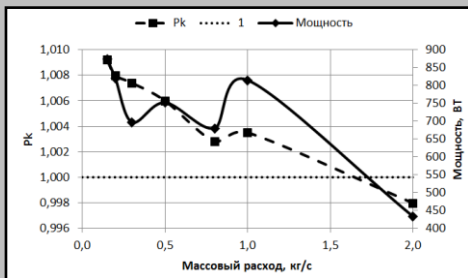
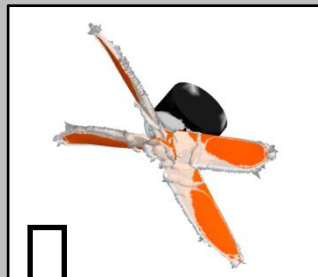


National Instrument

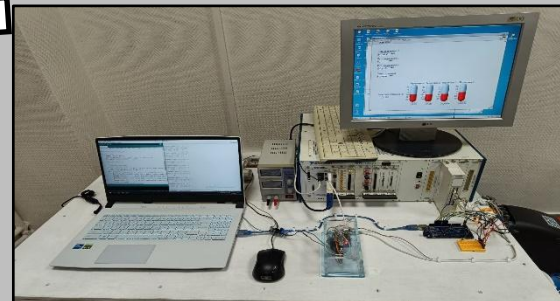
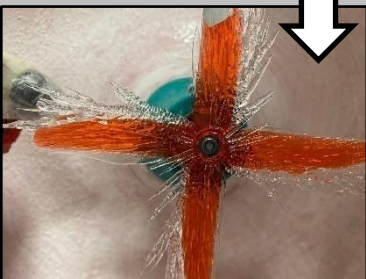
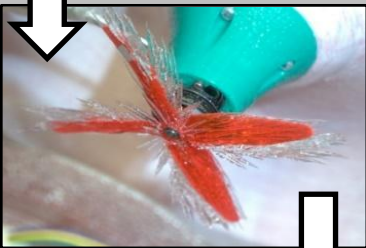
Микроконтроллерный блок управления

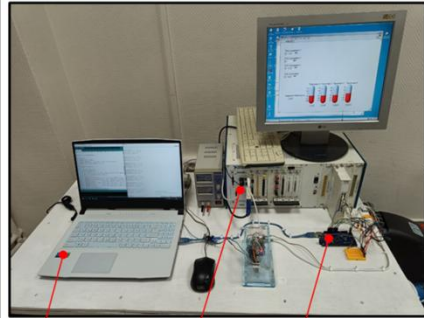
Управляющий терминал





**3. Расчетно-экспериментальные  
исследования вибраций вентилятора  
авиационного двигателя при  
обледенении**





Система управления

National Instrument

Микроконтроллерный блок



Компрессор

Емкость с водой

Фотокамера

Вспышка

Насос электрический

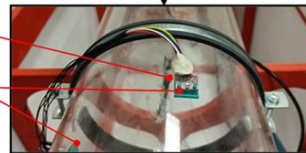
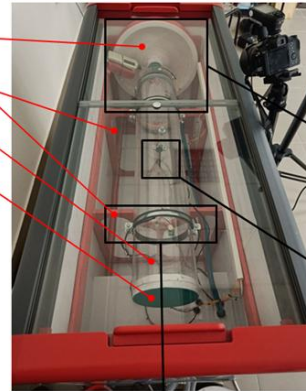
Холодильная камера

Радиусный обтекатель

Каркас

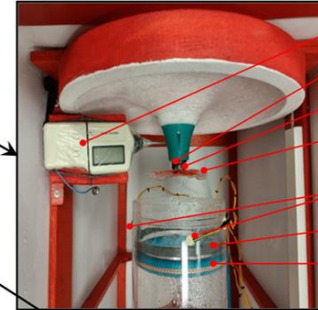
Проточный тракт

Спрямляющая решетка



Термопары

Датчики температуры, давления и влажности



Виброметр

Акселерометры

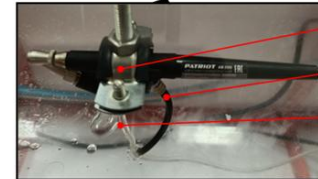
Электродвигатель

Модельный вентилятор

Датчики температуры, давления и влажности

ЭТПС

ВТ ПОС



Форсуночный блок

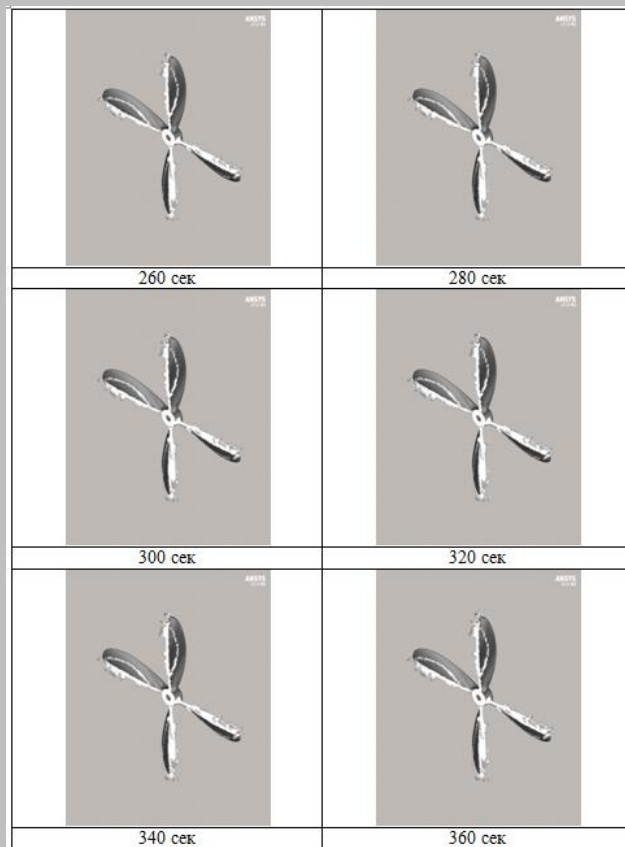
Подача воздуха

Подача воды



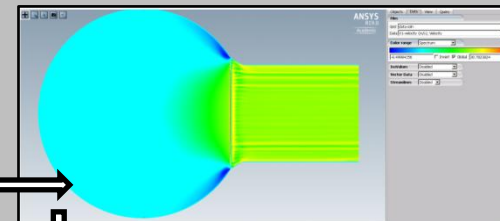
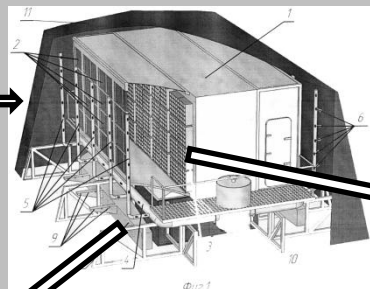
## Обледенение винта беспилотника

### Численный эксперимент

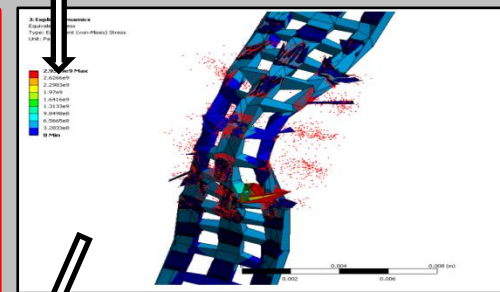


### Физический эксперимент





4. Расчетно-экспериментальные исследования поведения ледяного покрова воздухоочистительных устройств газоперекачивающих агрегатов



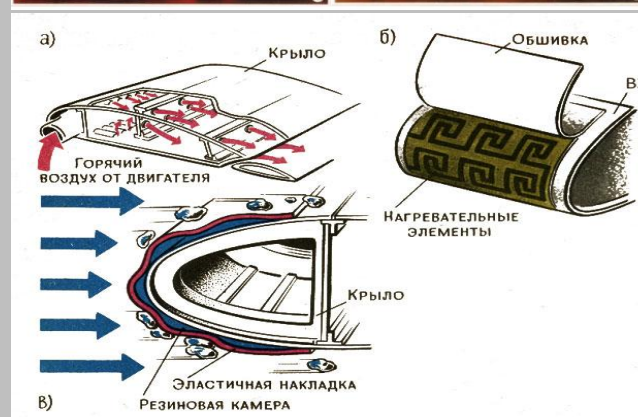
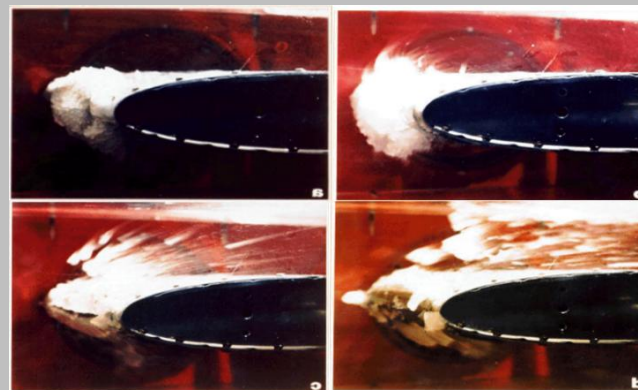


## Постановка исследования теплового состояния

Исследование теплового состояния внешней поверхности модельного входного устройства (с нагревательными элементами) **малогабаритной** силовой установки в условиях полета при обледенении.

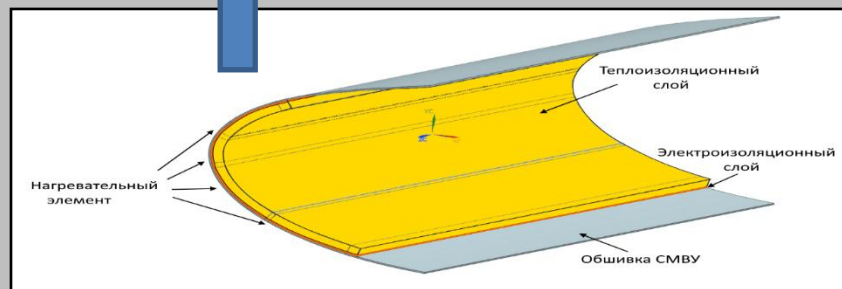
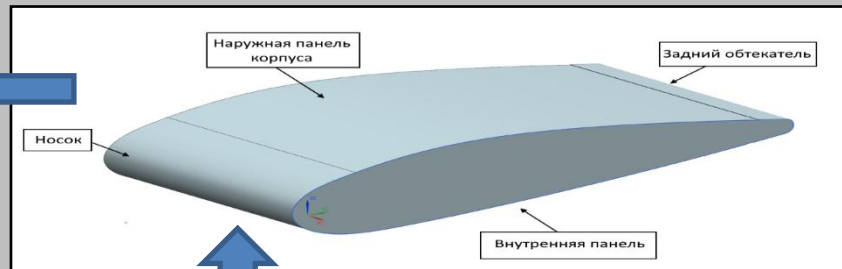
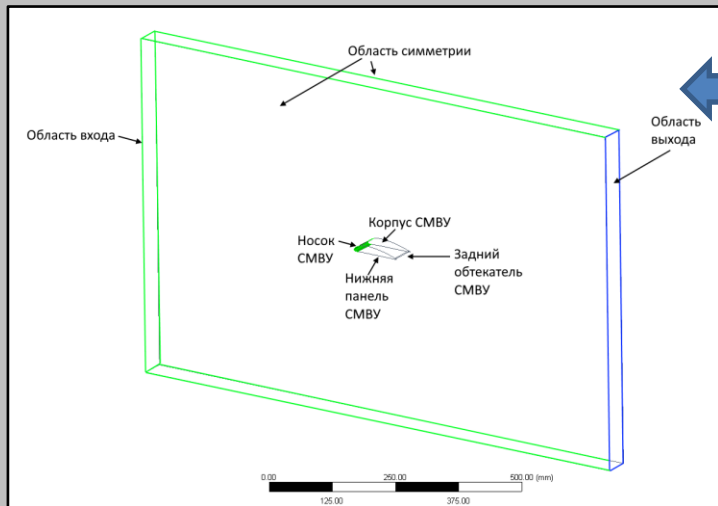
Для достижения цели поставлены **задачи**:

- Разработать расчетные и сеточные модели конструкции модельного крыла и внешней газодинамики;
- Выполнить численное моделирование, направленное на определение **теплового состояния** внешней поверхности крыла в условиях полета при обледенении для **различных температурных режимов** тепловой противообледенительной системы.



**Объектом исследования** является модельное входное устройство (МВУ) с внедренными в обшивку носка нагревательными элементами.

Осесимметричное МВУ базируется на профиле, в основе которого совокупность профиля NASA 5318 и NASA 4310.



Область внешнего обтекания, геометрия МВУ и послойная компоновка носка с расположением нагревательных элементов



## Система допущений

1. Газодинамические процессы рассматриваются в трехмерной нестационарной постановке с подвижными границами;
2. Гидродинамические процессы рассматриваются в трехмерной нестационарной постановке с подвижными границами;
3. Обледенение рассматривается в трехмерной нестационарной постановке с подвижными границами;
4. Движение границы ледяных наростов на аэродинамическом профиле рассматривается как совокупность относительного движения переохлажденной жидкости на стенке вследствие действия набегающего аэродинамического потока с последующей ее кристаллизацией, а также переносного движения конструкции вследствие вибрации;
5. Не моделируется скол льда ввиду сложности процесса. Принимается, что весь образовавшийся в процессе эксперимента лед может отколоться от модельного воздухозаборника;
6. Рассматривается многофазная среда – газ, жидкость, лед;
7. Учитывается гравитация;
8. Газ является несущей, а жидкость – несомой средой;
9. Газ является вязким и сжимаемым;
10. Жидкость несжимаема, так как процессы рассматриваются при низких давлениях;
11. Жидкость в потоке газа рассматривается в виде монодисперсных капель, учитываются процессы дробления и коагуляции;
12. Жидкость, вступившая в контакт с поверхностью аэродинамического профиля, рассматривается как тонкая жидкая пленка, которая способна перемещаться вследствие сдвиговых напряжений, создаваемых движением газодинамического потока, испаряться и отрываться от аэродинамического профиля;
13. Стенки аэродинамического профиля являются адиабатическими;
14. Учитывается шероховатость стенок профиля;
15. Учитываются процессы аккреции и сублимации льда, испарение жидкой пленки;
16. Не учитывается аэроупругость конструкции аэродинамического профиля ввиду большой жесткости передней кромки;
17. Ввиду малости не учитываются электромагнитные процессы;
18. Ввиду малости не учитывается содержание примесей в среде.



## 1. Газодинамический этап (уравнения массы, импульса, энергии)

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_z \mathbf{V}_z) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho_z \mathbf{V}_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_z \mathbf{V}_z \otimes \mathbf{V}_z) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau},$$

$$\frac{\partial (\rho_z H^*)}{\partial t} - \nabla P + \nabla \cdot (\rho_z \mathbf{V}_z H^*) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_z + \mathbf{V}_z \cdot \boldsymbol{\tau}),$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu_z \left( \nabla \mathbf{V}_z + \mathbf{V}_z \nabla - \frac{2}{3} \delta_K \nabla \cdot \mathbf{V}_z \right) \quad H^* = H + \frac{|\mathbf{V}_z|^2}{2}$$

Граничные и начальные условия

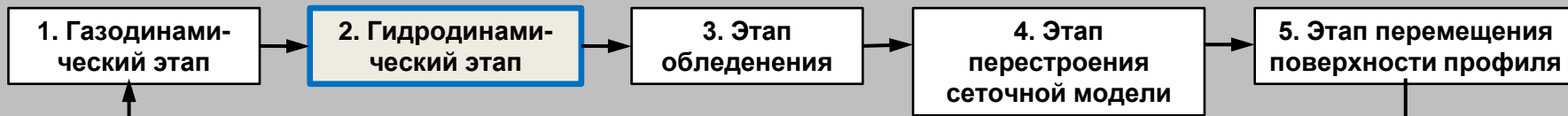
$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ex} = \mathbf{V}_\infty \\ T_{ex} = T_\infty \\ P_{вх} = P_\infty \\ t \in [0 \dots T] \end{cases}$$

Применяется модель турбулентности Спаларта-Аллмараса, содержащая шероховатость

Уравнения состояния для  
давления и энтальпии газа

$$P = \rho_z R_0 T_z,$$

$$dH = c_p dT_z,$$



## 2. Гидродинамический этап (уравнения массы, импульса)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{V}_\kappa) = 0,$$

$$\frac{\partial (\alpha \mathbf{V}_\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot [\alpha \mathbf{V}_\kappa \otimes \mathbf{V}_\kappa] = \alpha \frac{C_D \text{Re}_\kappa}{24K} (\mathbf{V}_z - \mathbf{V}_\kappa) + \frac{\alpha}{Fr^2} \left( 1 - \frac{\rho_z}{\rho_\kappa} \right),$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления

$$C_D = 2 \frac{D_A}{\rho_{z,\infty} V_{z,\infty} A_\infty},$$

Соотношения для числа Рейнольдса капель

$$\text{Re}_\kappa = 2 \frac{\rho_\kappa d_\kappa V_{z,\infty} \|\mathbf{V}_z - \mathbf{V}_\kappa\|}{\mu_z},$$

Инерционный параметр капель

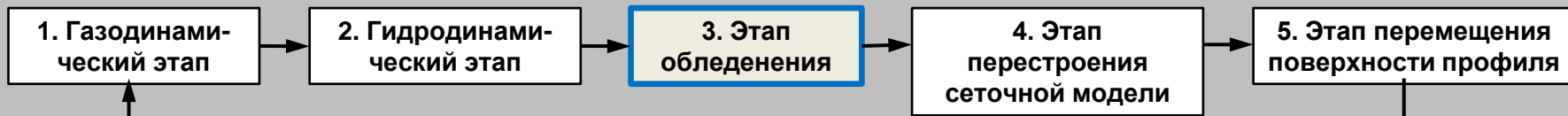
$$K = \frac{\rho_\kappa d_\kappa^2 V_{z,\infty}}{18L \mu_z},$$

Коэффициент локального осаждения капель на поверхности

$$\beta = - \frac{\alpha \mathbf{V}_\kappa \mathbf{n}}{\varphi_\infty V_{z,\infty}}$$

Граничные и начальные условия

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha\kappa} = \varphi_\infty \\ D_\kappa = f(D_i) \\ \rho_\kappa = const \\ t \in [0..T] \end{cases}$$



### 3. Этап обледенения (уравнения массы, энергии)

Скорость жидкой пленки на поверхности

$$\bar{V}_n(\mathbf{x}, y) = \frac{1}{h_n} \int_0^{h_n} \mathbf{V}_n(\mathbf{x}, y) dy = \frac{h_n}{2\mu_n} \boldsymbol{\tau}_z(\mathbf{x}) \Big|_{wall}, \quad \mathbf{V}_n(\mathbf{x}, y) = \frac{y}{\mu_n} \boldsymbol{\tau}_z(\mathbf{x}),$$

$$\rho_\kappa \left[ \frac{\partial h_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{V}_n h_n) \right] = V_{z,\infty} \varphi \beta - \dot{m}_{испарения} - \dot{m}_{льда},$$

$$\rho_\kappa \left[ \frac{\partial h_n c_n T_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{V}_n h_n c_n \tilde{T}_n) \right] = \left[ c_n (\tilde{T}_{z,\infty} - \tilde{T}_n) + \frac{\|\mathbf{V}_\kappa\|^2}{2} \right] V_{z,\infty} \varphi \beta - L_{испарения} \dot{m}_{испарения} + (L_{плавления} - c_{льда} \tilde{T}_{льда}) \dot{m}_{льда} - \lambda_m (\tilde{T}_n - \tilde{T}_{льда}),$$

Граничные и начальные условия

$$\begin{cases} T_{wall} = T_0 \\ \phi = const \\ \rho_\kappa = const \\ t = t_i, i = 1..n \end{cases}$$

Определяющие соотношения

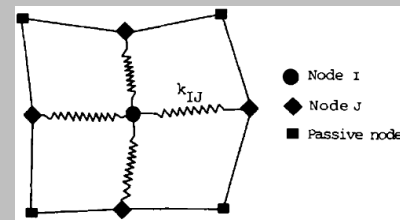
$$\begin{cases} h_n \geq 0, \\ \dot{m}_{льда} \geq 0, \\ h_n \tilde{T}_n \geq 0, \\ \dot{m}_{льда} \tilde{T}_{льда} \leq 0. \end{cases}$$



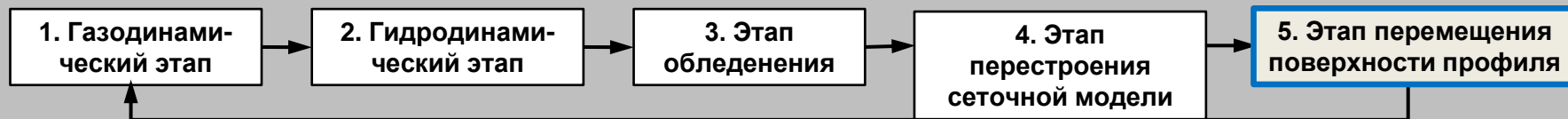
## 4. Этап перестроения сеточной модели

$$\min_{x_i} P_I = \min_{x_j} \sum_j (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^2 k_{ij}$$

$$\mathbf{x}_i^{m+1} = \mathbf{x}_i^m + \omega \frac{\sum_j (\mathbf{x}_j^m - \mathbf{x}_i^m) k_{ij}^m}{\sum_j k_{ij}^m}$$



Положение  $i$ -того узла сетки можно интерпретировать как решение задачи минимизации потенциальной энергии.



## 5. Этап перемещения поверхности обтекаемого профиля

$$U_i|_{стенки} = A \cdot \sin(\omega t_i), \quad \begin{cases} A = const; \\ \omega = const. \end{cases}$$

Для явного учета вибрации аэродинамического профиля вся сеточная модель движется жестко как единое целое в рамках лагранжевого подхода. Газодинамические параметры пересчитываются с учетом перемещения границы обледенения по гармоническому закону.



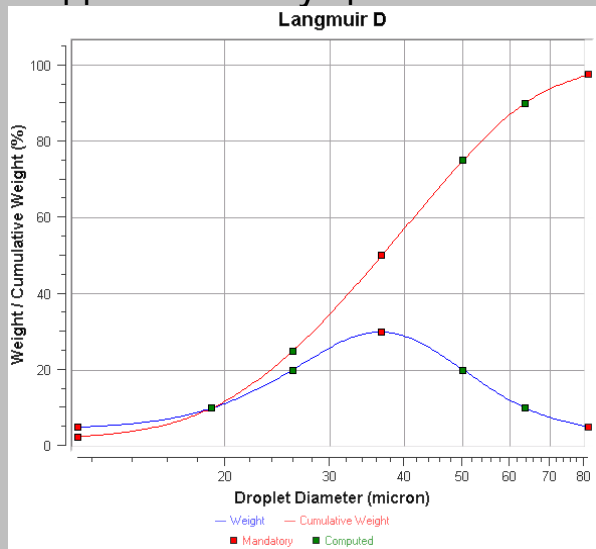
# Параметры моделирования условий полета при обледенении

Численное моделирование условий полета при обледенении осуществляется с параметрами:

- Высота полета – **1000** м;
- Скорость воздушного потока – **30** м/с;
- Температура воздушного потока – **-10** °С;
- Влажность воздушного потока – **86%**;
- Водность потока – **0,4** г/м<sup>3</sup>;
- Среднемедианный диаметр каплей – **36,6** мкм;
- Распределение каплей по размерам и водовзвеси – распределение **Langmuir D**;
- Время моделирования процессов – **5** мин.

## Условия работы ПОС при численном моделировании

Определение теплового состояния и влияния на процессы обледенения конструкции МВУ осуществляется в условиях постоянного нагрева каждого нагревательного элемента с тепловой мощностью, обеспечивающей в среднем температуру внешней поверхности носка МВУ в диапазоне **1,0...1,05 Ts** ( $T_s$  - температуры торможения потока вблизи носка конструкции МВУ).



Обледенении в нестационарной постановке сопряженного теплообмена (*CHT3D De-icing*).

1. Расчет внешней аэродинамики
2. Расчет поведения каплей в потоке
3. Определение тепловых полей сопрягаемых моделей конструкции и внешней газодинамики => формы ледяных наростов во времени.

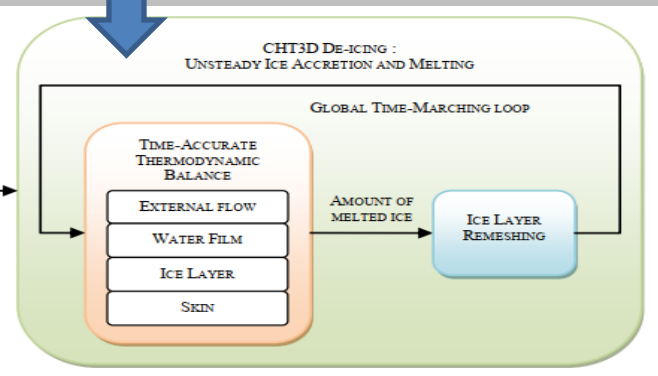
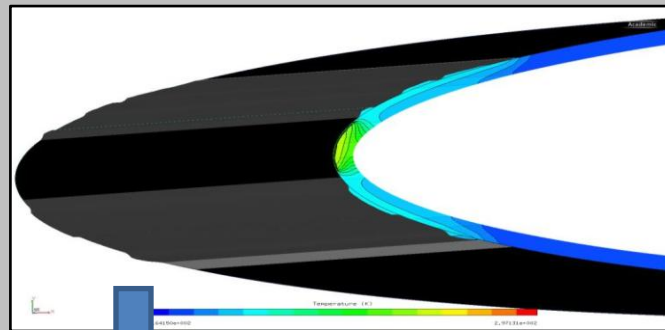
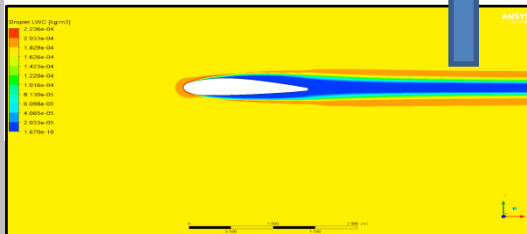
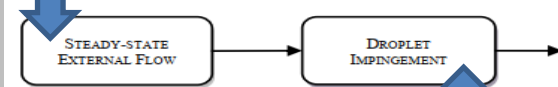
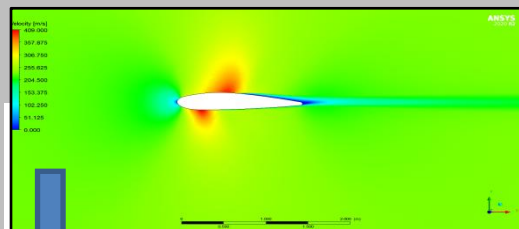
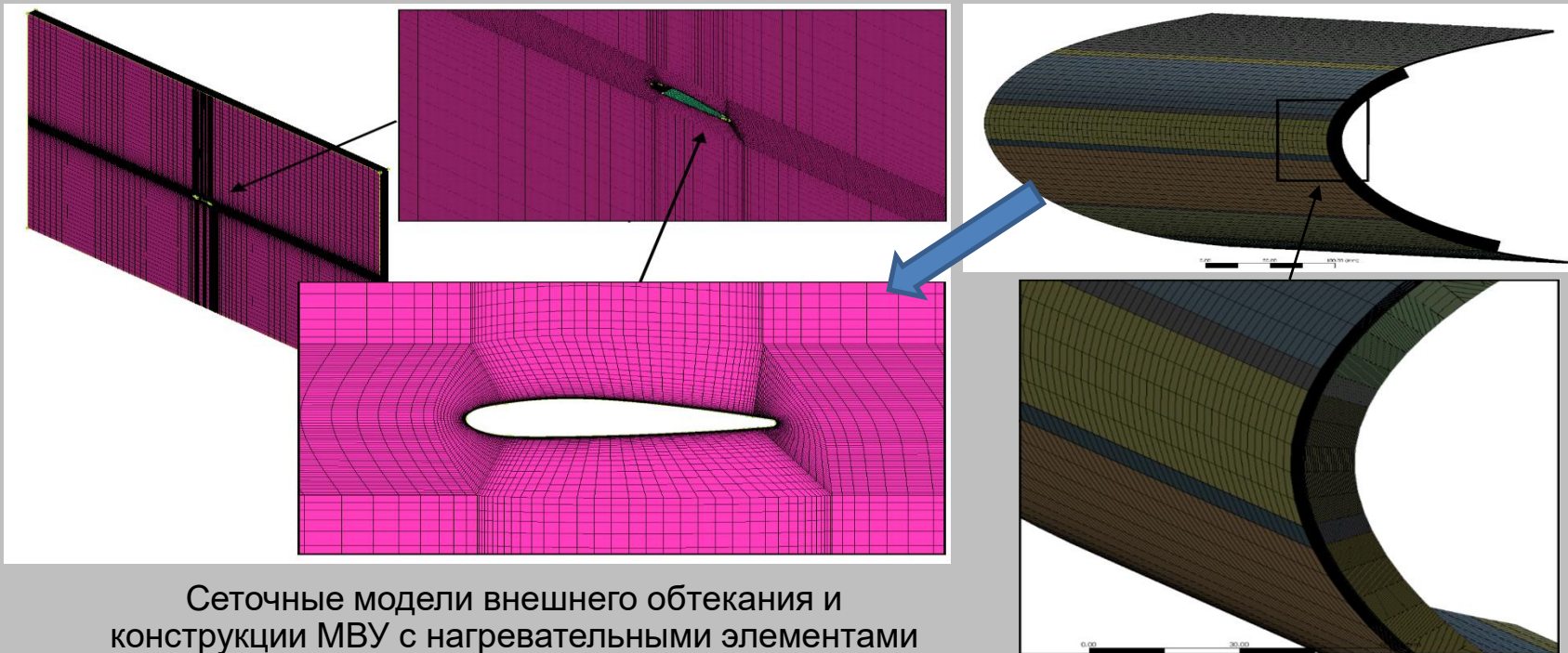


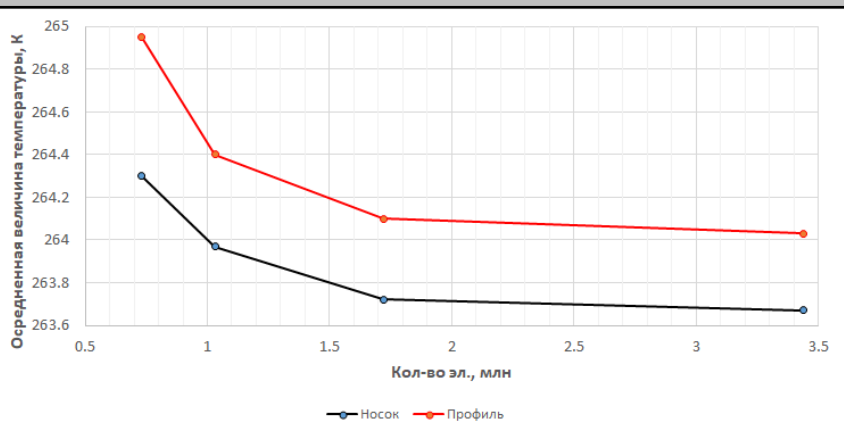
Схема реализации сопряженного теплообмена



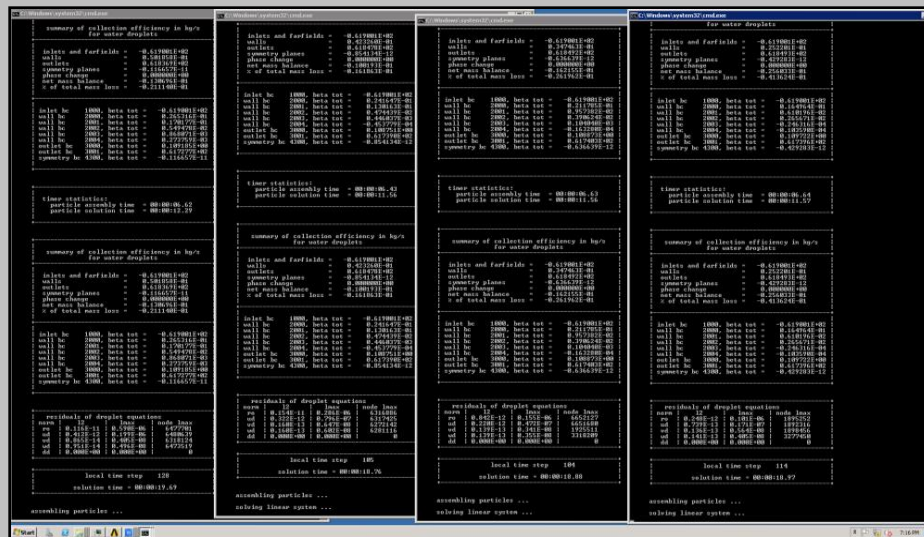
Сеточные модели внешнего обтекания и конструкции МВУ с нагревательными элементами

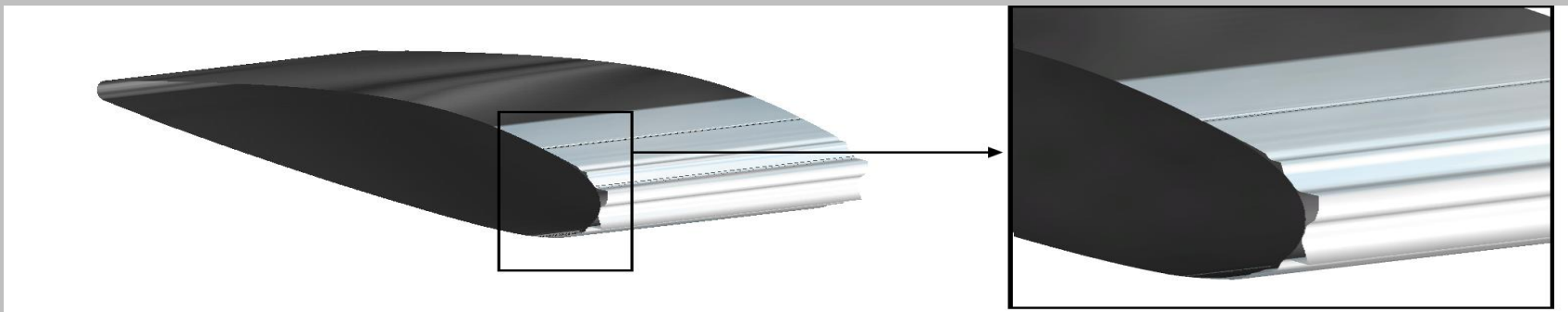


# Оценка сеточной сходимости задачи

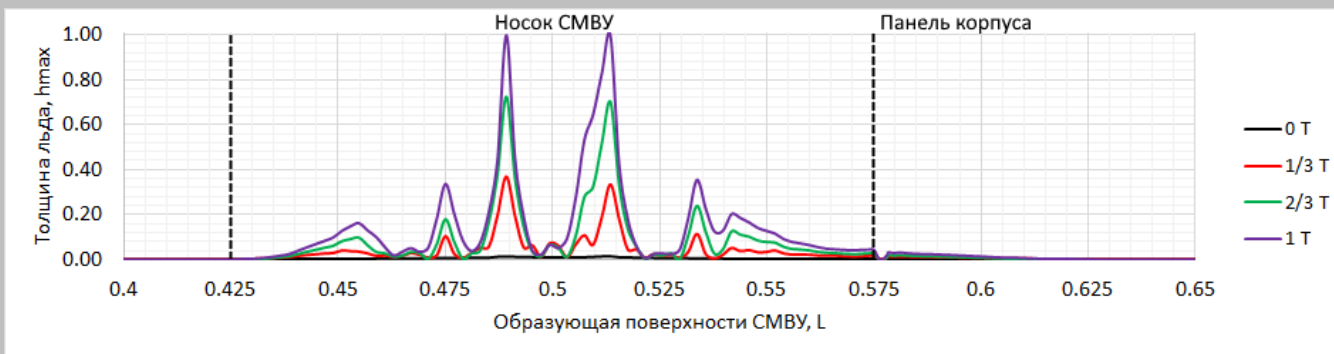


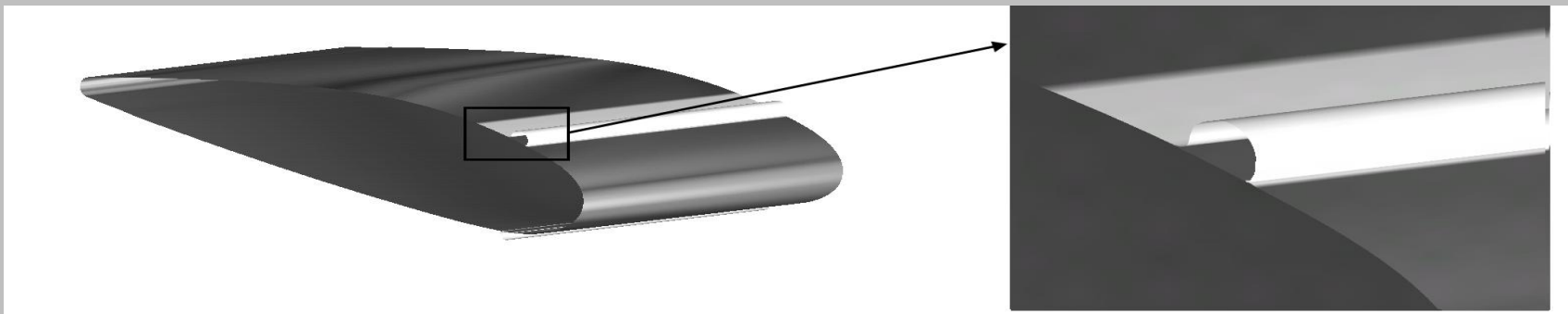
При моделировании общее количество элементов составило 1,72 млн элем.



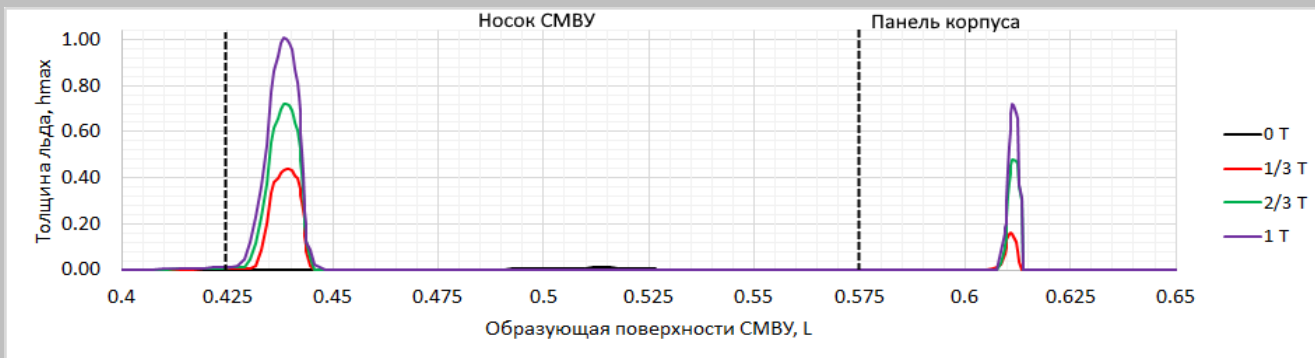


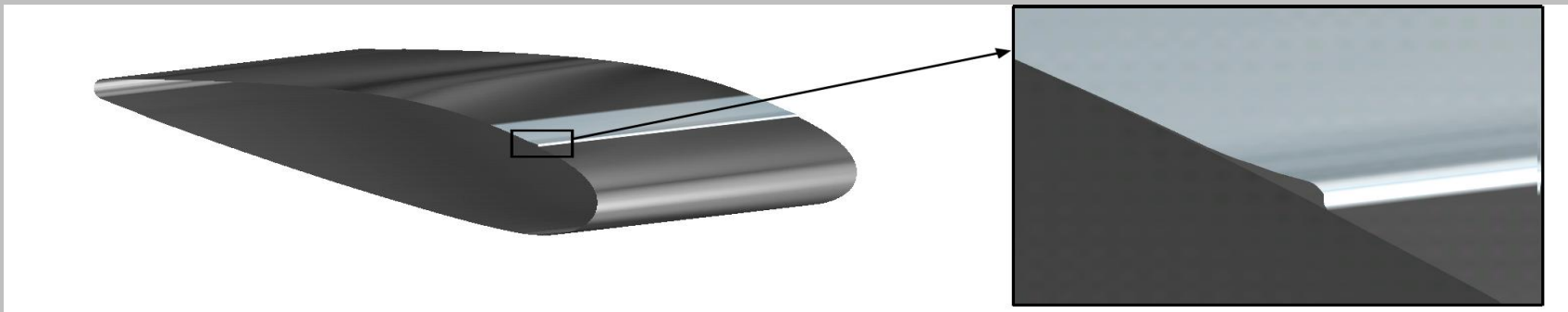
Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до  $1,0 T_s$



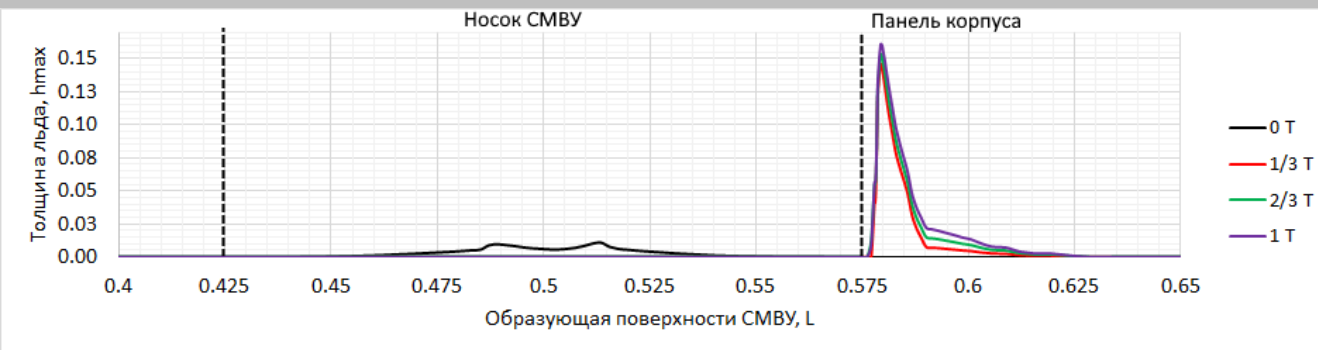


Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до  $1,02 T_s$



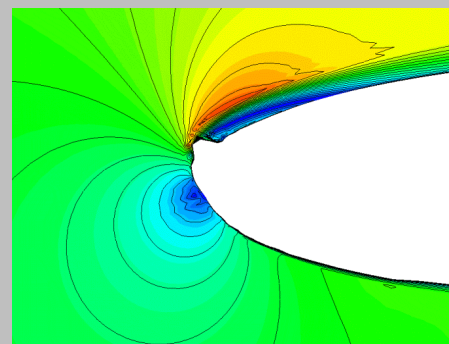
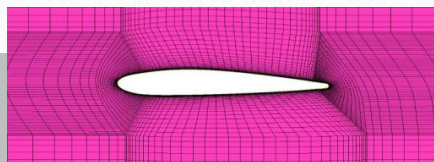
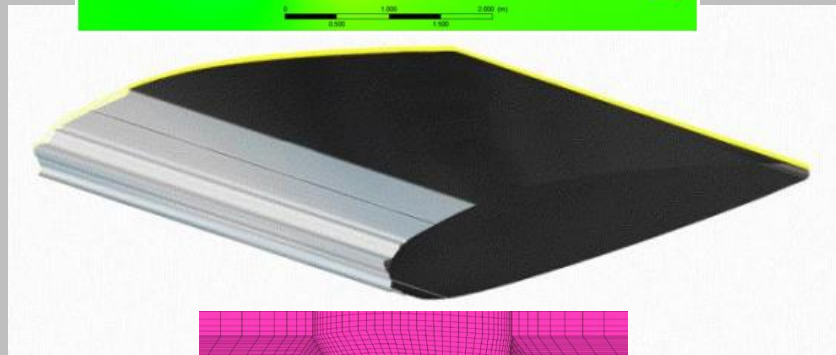
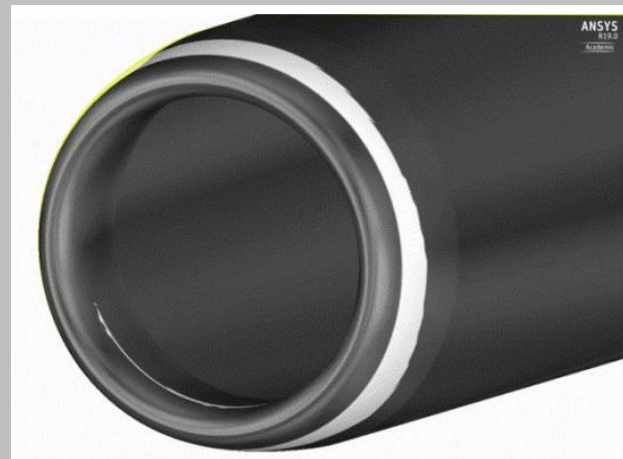
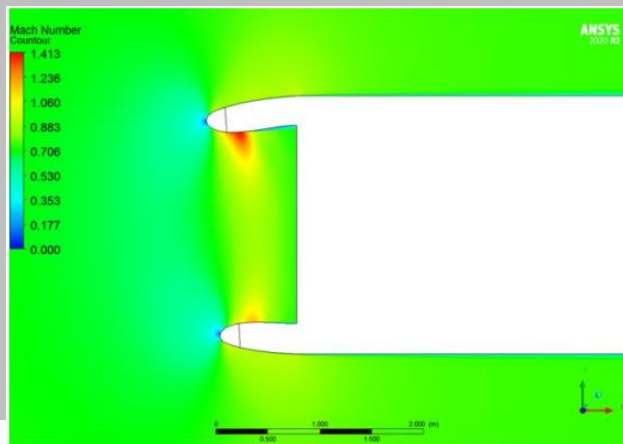


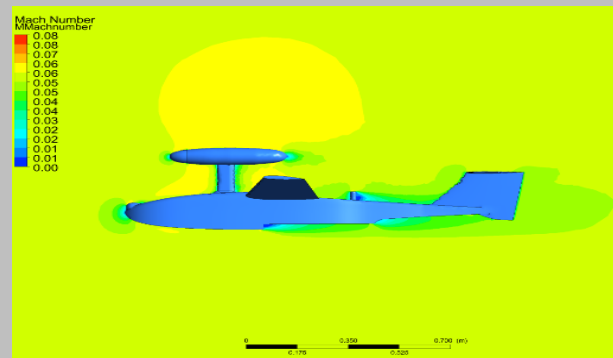
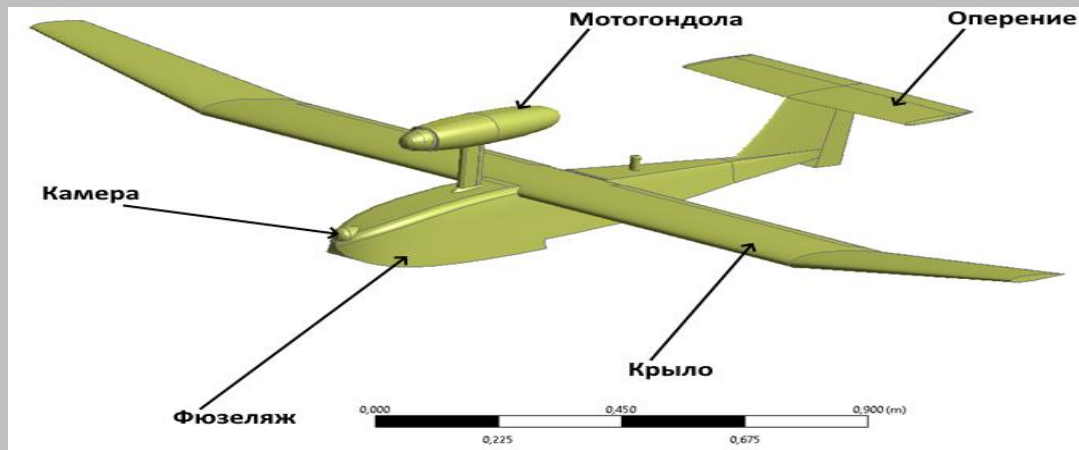
Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до  $1,05 T_s$





# Обледенение воздухозаборника АД





Расчетно-  
экспериментальные  
исследования **БАС**



**центр высокопроизводительных  
вычислительных систем**

ПЕРМСКИЙ ПОЛИТЕХ

**Спасибо за внимание!**