



центр высокопроизводительных
вычислительных систем

ПЕРМСКИЙ ПОЛИТЕХ

Численное и экспериментальное моделирование авиационных противообледенительных систем

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.

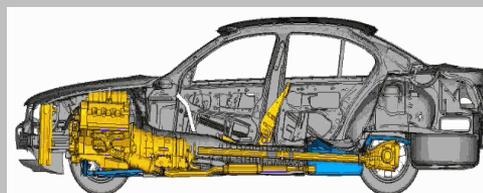
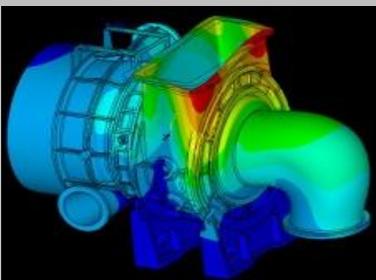
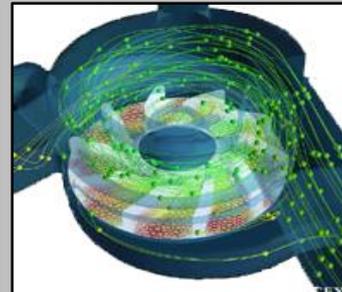
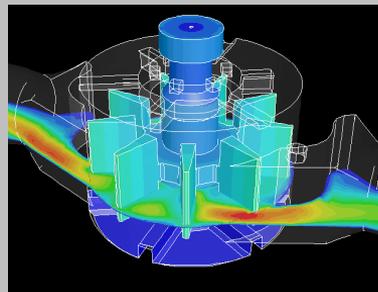
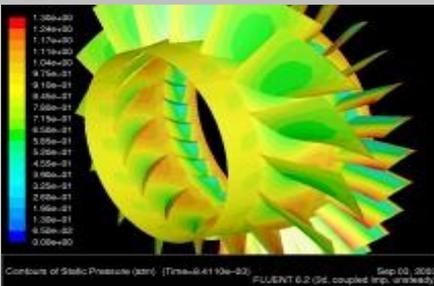
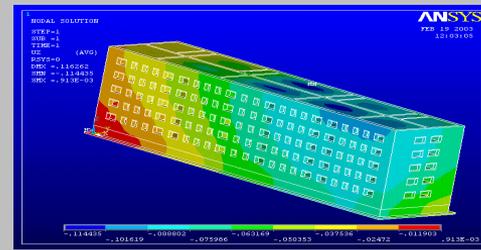
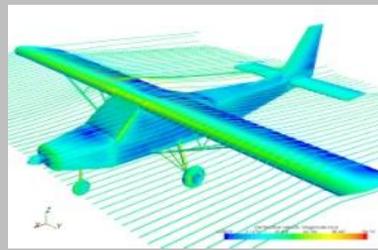
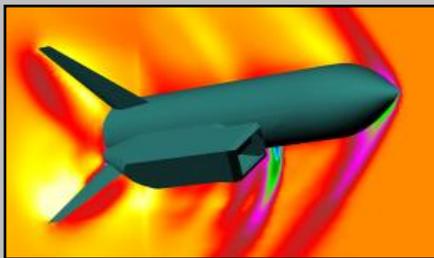


- 100 вычислительных узлов
- 1 136 ядер
- Объем оперативной памяти 7 680 Гбайт
- Пиковая производительность 196 Тфлопс
- 6 шестнадцатиядерных процессоров «Intel Gold 6444Y» (всего 96 ядер)
- 4 двенадцатиядерных процессоров «Intel Silver 4410Y» (всего 48 ядер)
- 62 восьмиядерных процессоров «Intel Xeon 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.



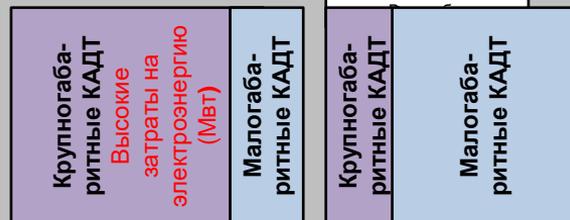


- ЛОГОС
- FlowVision
- IOSO PM
- Fidesys
- КОМПАС
- T-Flex
- ANSYS
- Abaqus
- LS-DYNA
- STAR-CCM+
- Comsol
- NX





**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)

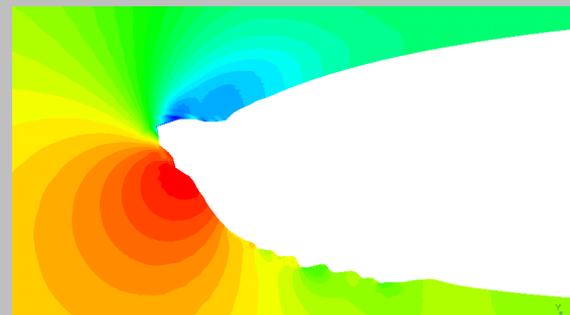
- 02.04.2012, ATR 72-201, г. Тюмень, 33 чел. (обледенение воздушного судна)

Актуальность работы

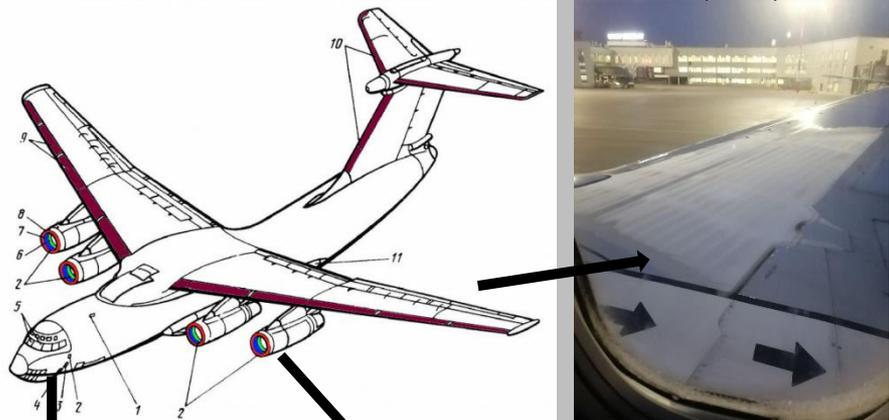
**Математическое моделирование
обледенения без вибраций**



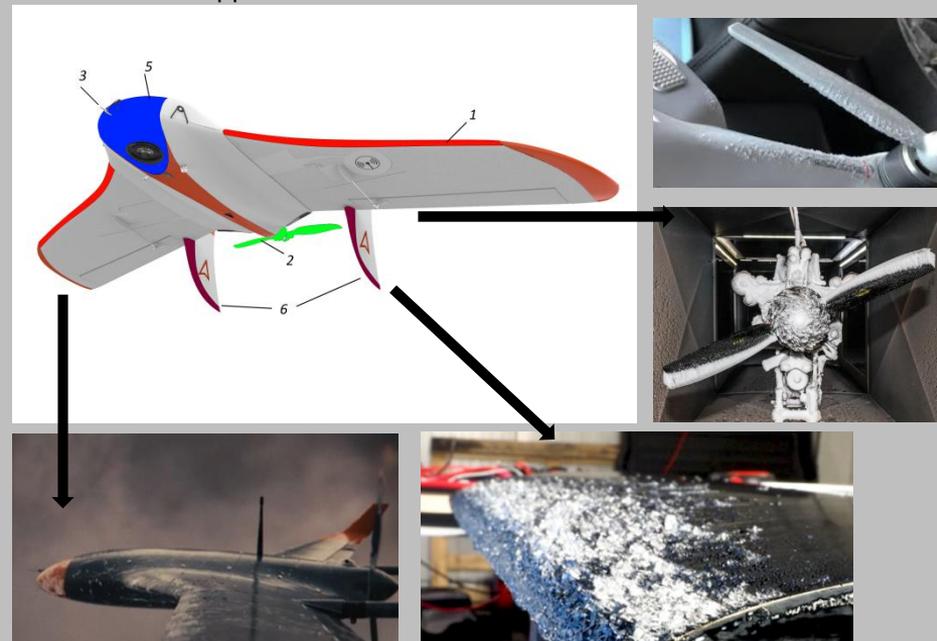
**Высокопроизводительные вычисления
Междисциплинарность**



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

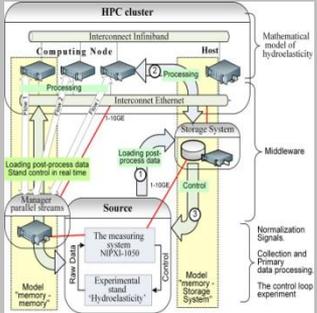


Области наиболее подверженных
обледенению элементов **БВС**



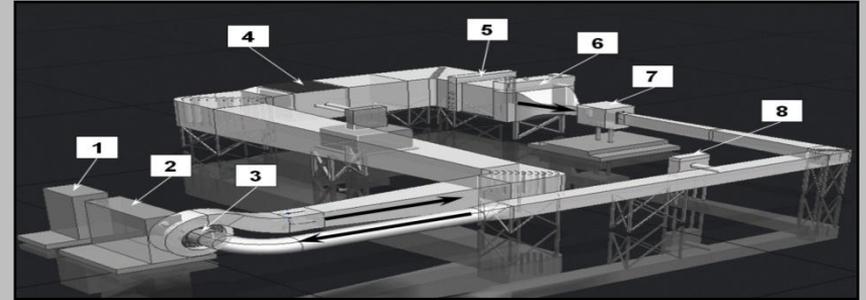


Численное моделирование

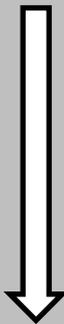


Моделирование с использованием высокопроизводительных расчетных комплексов

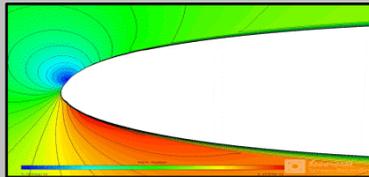
Экспериментальные исследования



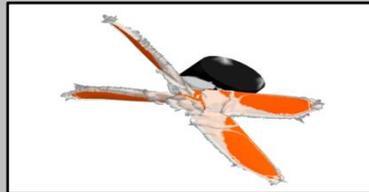
Аэродинамические климатические стенды, моделирующие все полетные условия



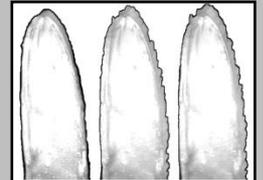
Неподвижные элементы ЛА



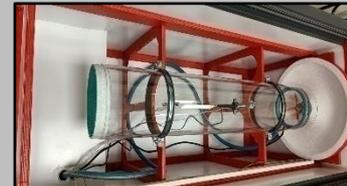
Вращающиеся элементы ЛА

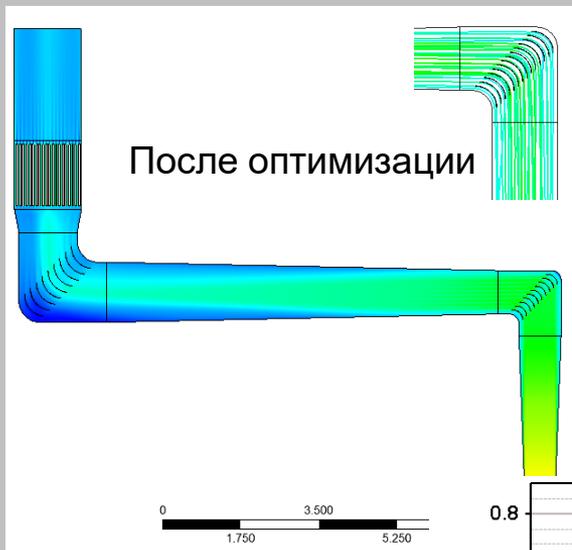
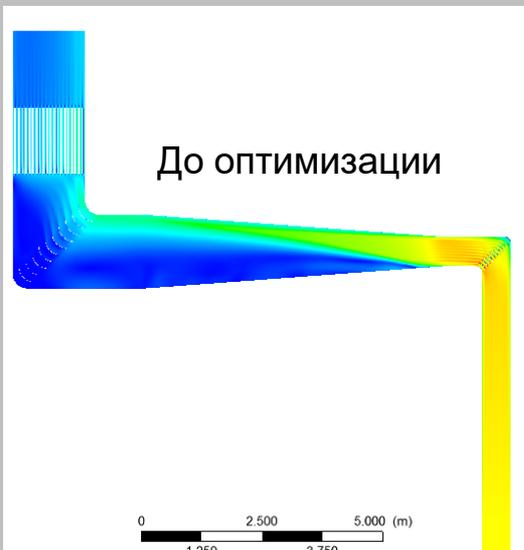


Неподвижные элементы ЛА



Вращающиеся элементы ЛА



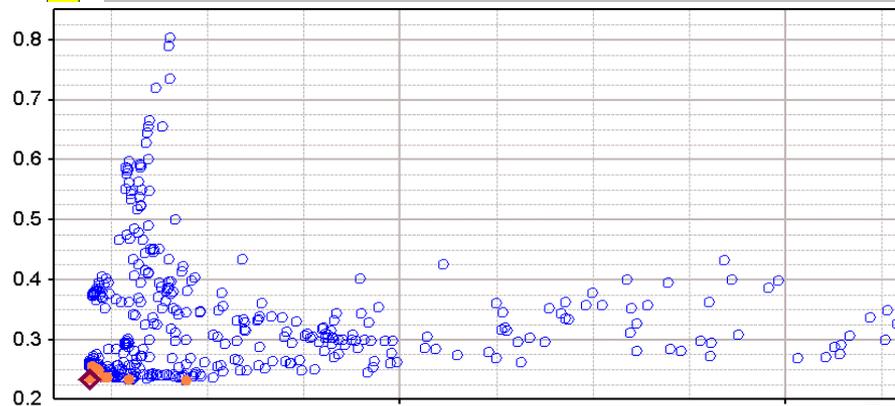


№ р-та	Y ₂ , мм	Y ₃ , мм	Y ₄ , мм	Y ₅ , мм	Z ₂ , мм	Z ₃ , мм	Z ₄ , мм	Z ₅ , мм	L, мм	β _{отр} -1000	Unev, %	dP, %
256	500	407	339	241	521	421	302	281	2576	15,83	3,81	0,33
257	590	444	412	151	604	576	442	283	2276	38,68	2,83	0,46
258	431	301	252	158	471	410	309	308	1813	8,54	6,23	0,36
259	689	452	447	251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

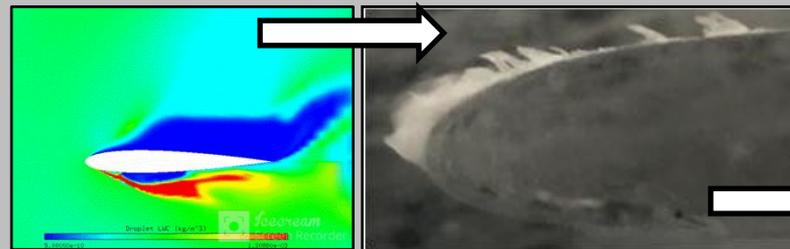
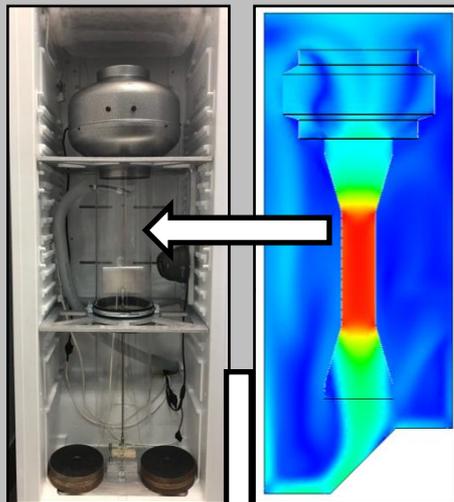
3 критерия оптимизации:

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

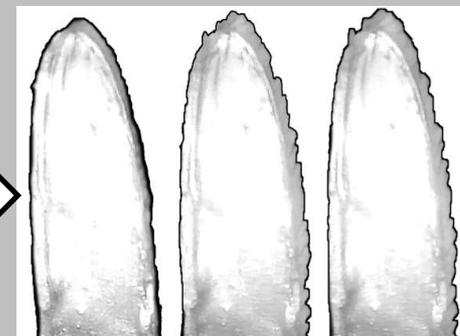
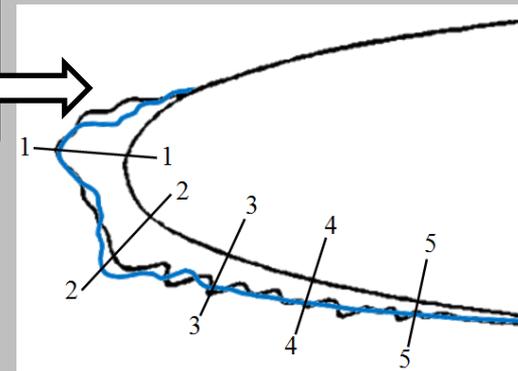
P21@dPSopIc06



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

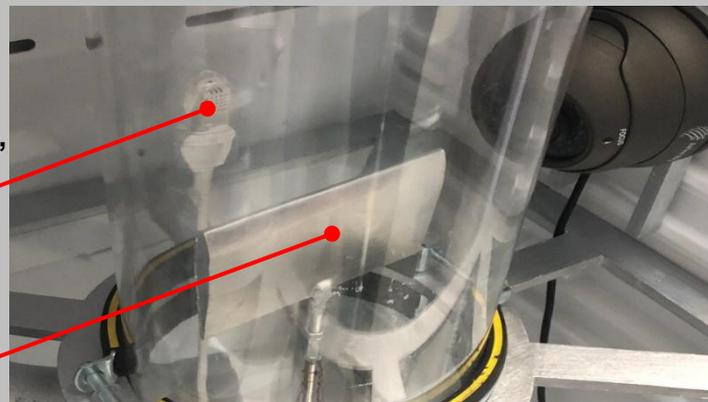
Крепление
проточного тракта

Шток виброузла

Виброузел

Датчики
температуры,
влажности

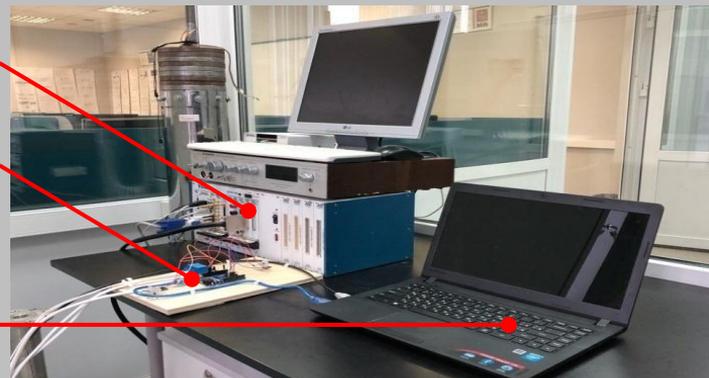
Профиль крыла
NACA 0012

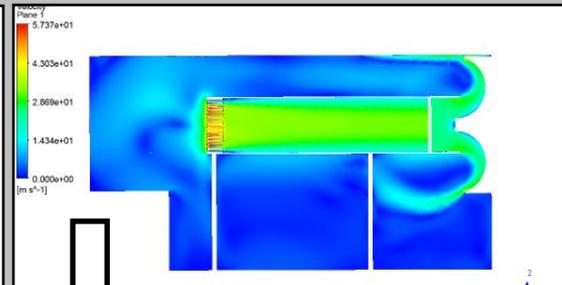
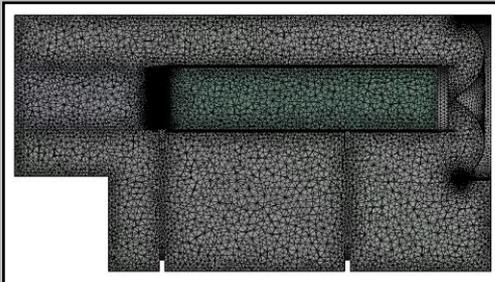
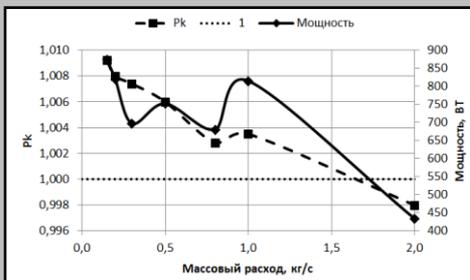
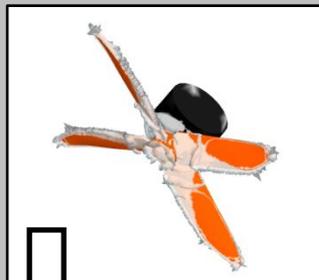


National Instrument

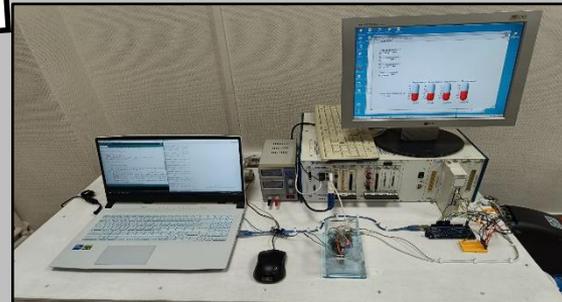
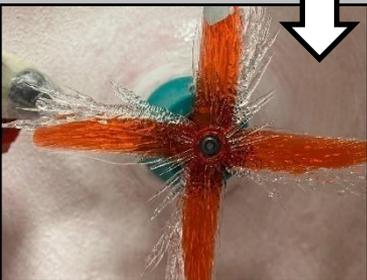
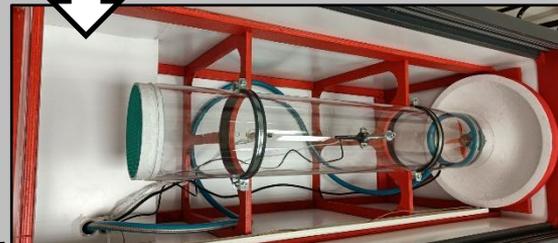
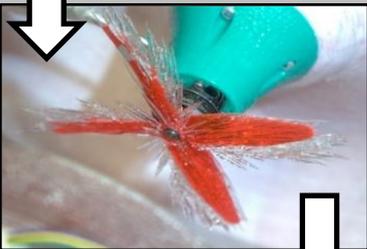
Микроконтроллерный
блок управления

Управляющий терминал



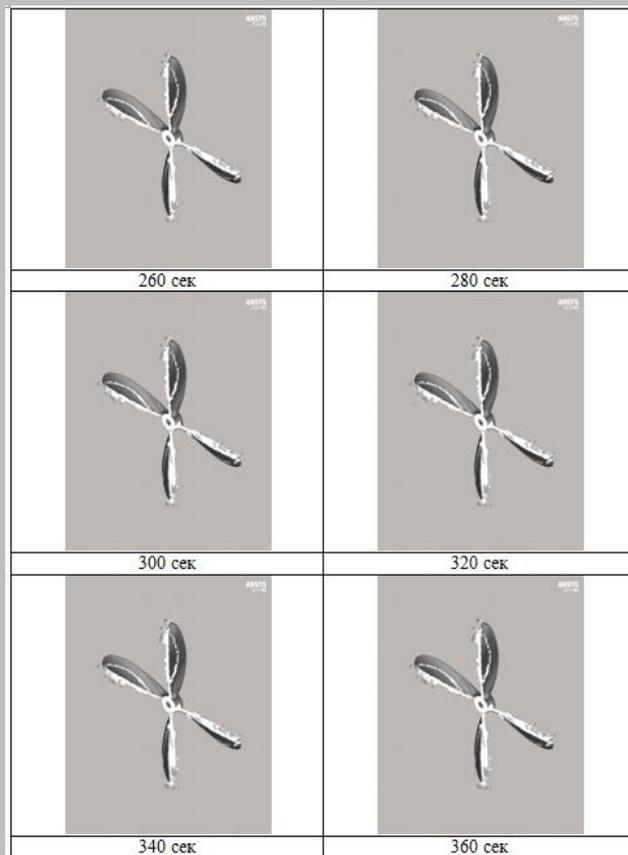


**3. Расчетно-экспериментальные
исследования вибраций вентилятора
авиационного двигателя при
обледенении**





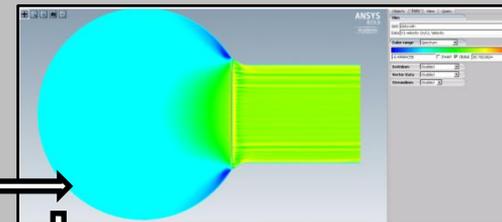
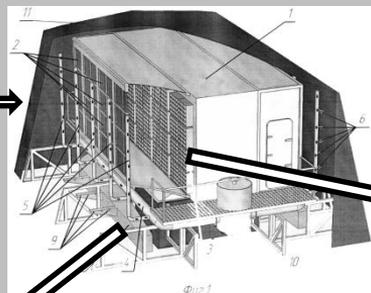
Численный эксперимент



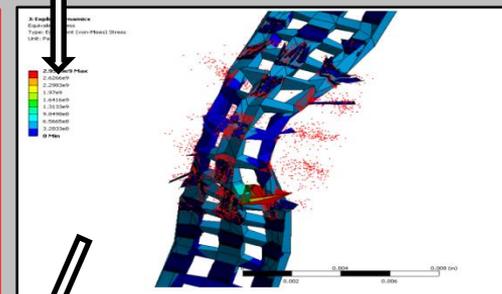
Обледенение винта беспилотника

Физический эксперимент





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



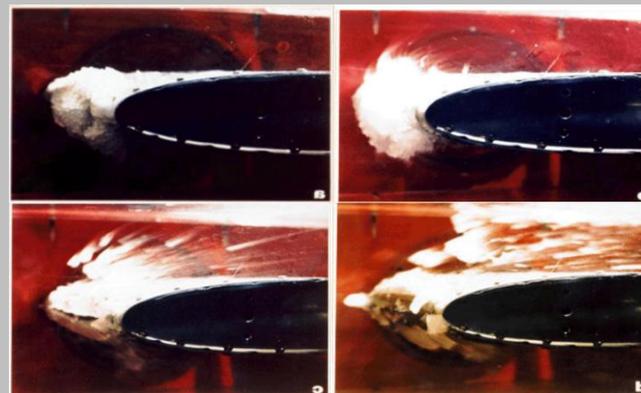


Постановка исследования теплового состояния

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

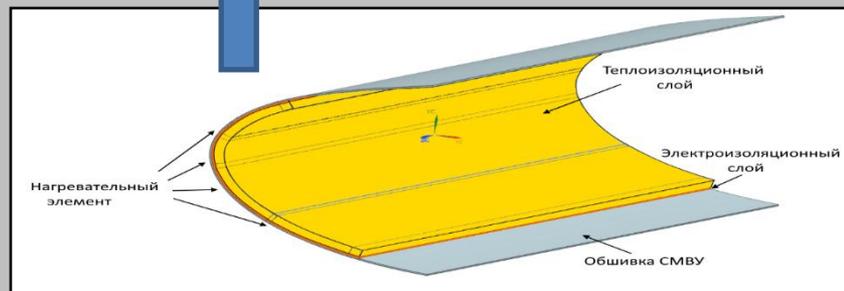
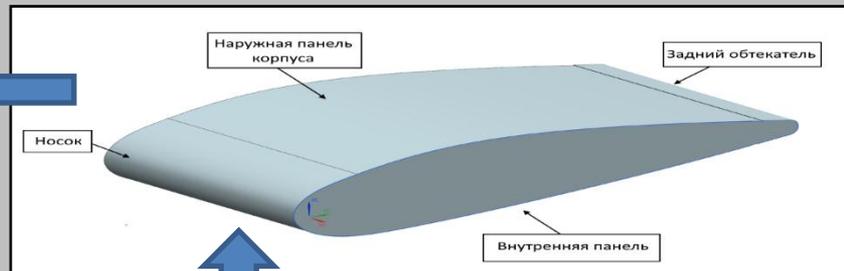
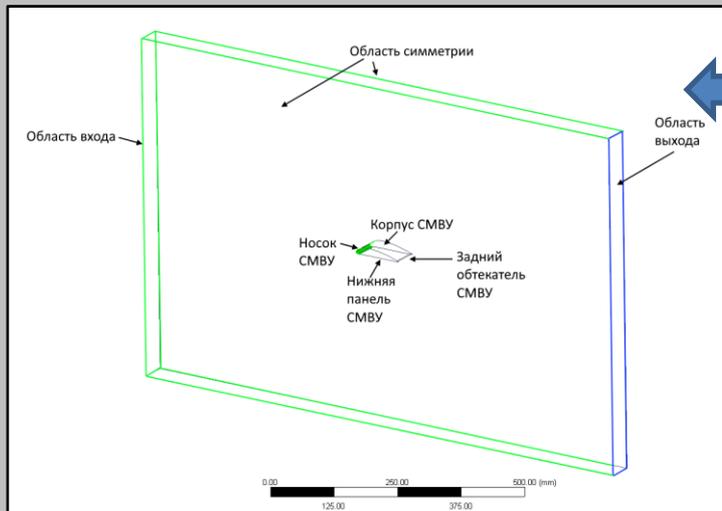
Для достижения цели поставлены **задачи**:

- 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 **NACA 5318** и **NACA 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

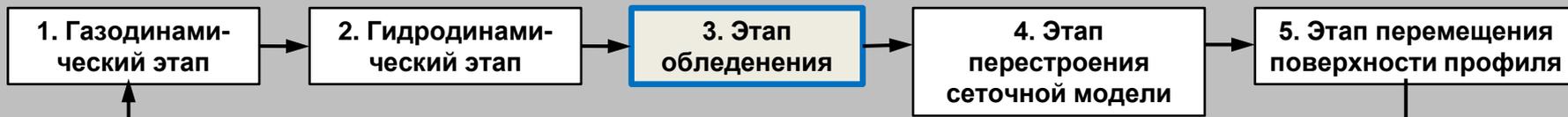
$$K = \frac{\rho_\kappa d_\kappa^2 V_{z,\infty}}{18L \mu_z},$$

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

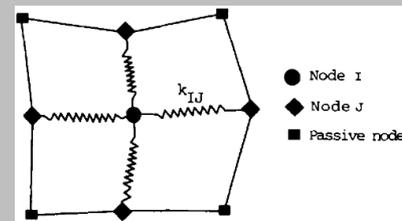
$$\begin{cases} h_n \geq 0, \\ \dot{m}_{льда} \geq 0, \\ h_n \tilde{T}_n \geq 0, \\ \dot{m}_{льда} \tilde{T}_{льда} \leq 0. \end{cases}$$



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.



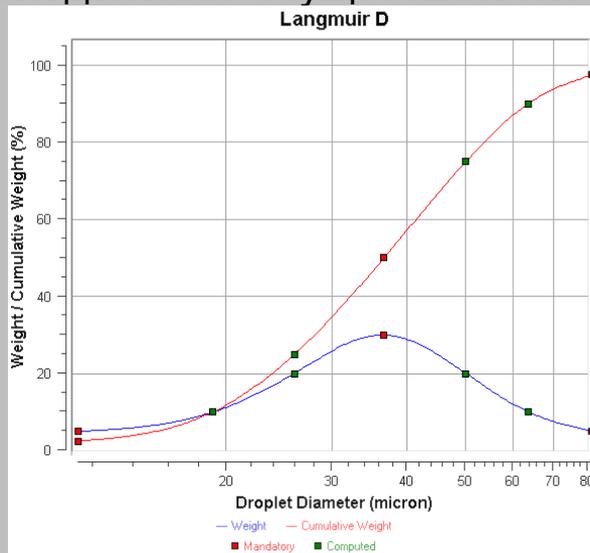
Параметры моделирования условий полета при обледенении

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/м³;
- 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).



Обледенению 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.

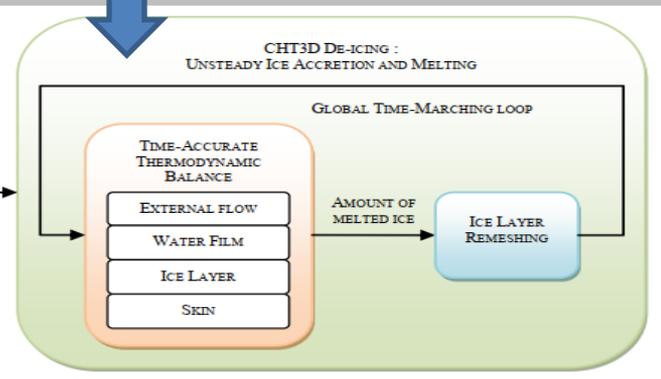
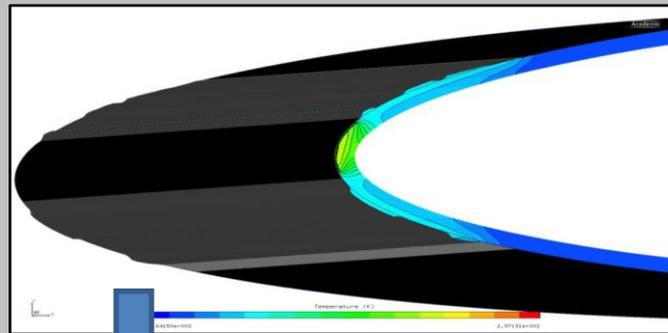
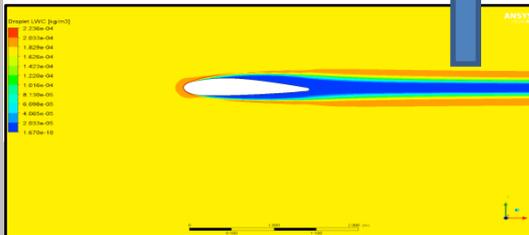
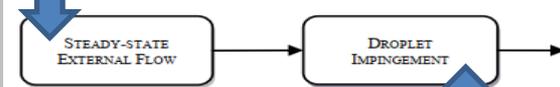
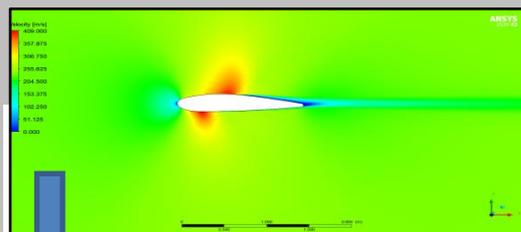
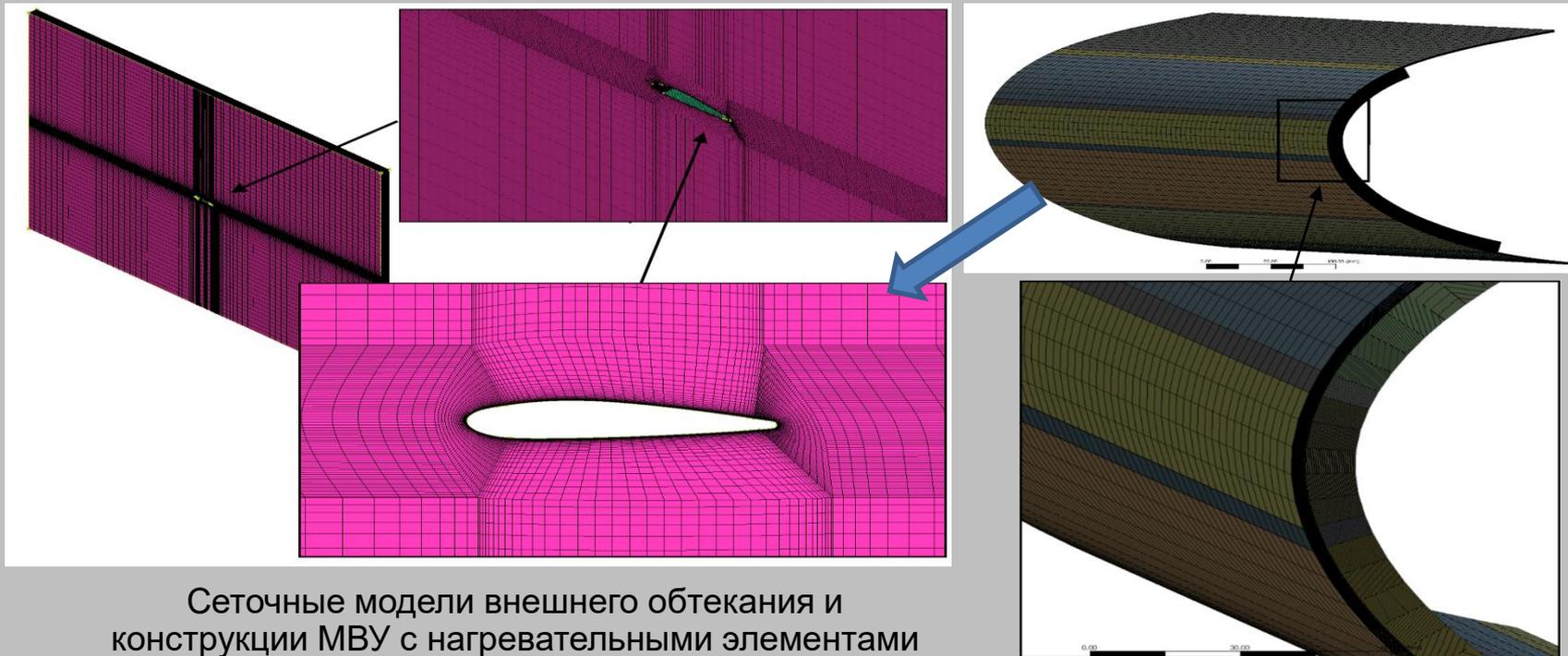


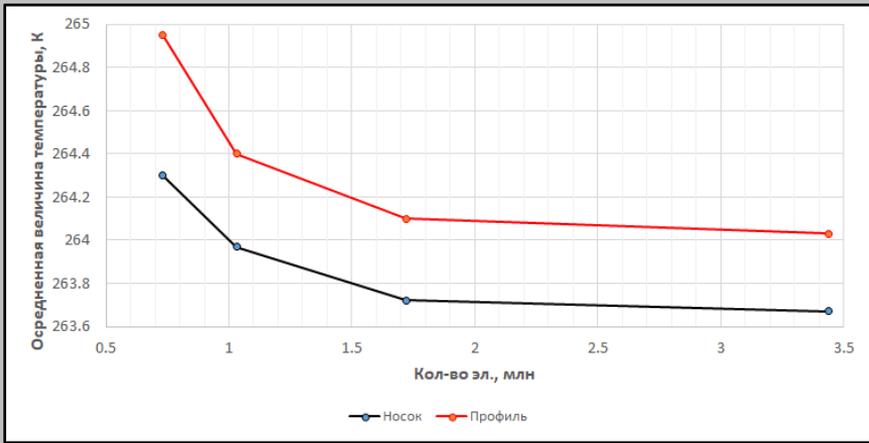
Схема реализации сопряженного теплообмена



Сеточные модели внешнего обтекания и конструкции МВУ с нагревательными элементами



Оценка сеточной сходимости задачи

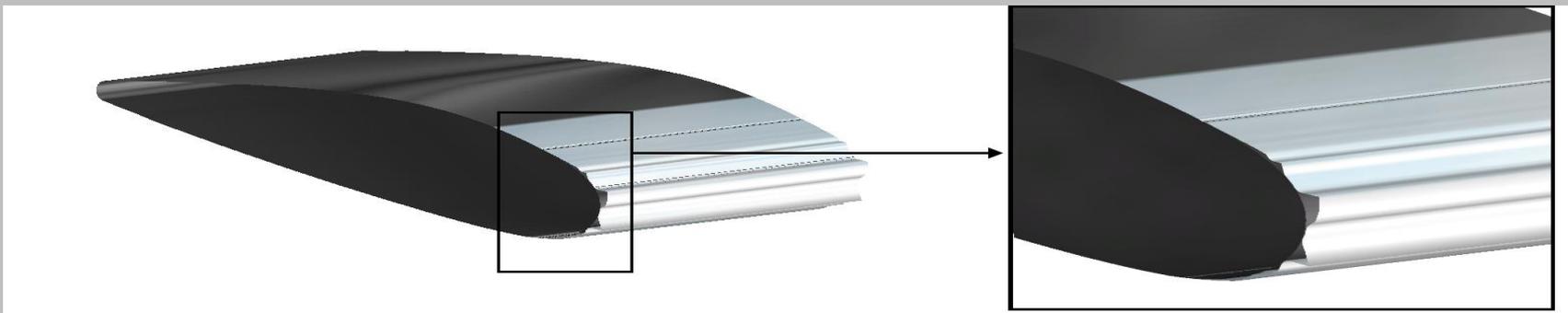


При моделировании общее количество элементов составило 1,72 млн элем.

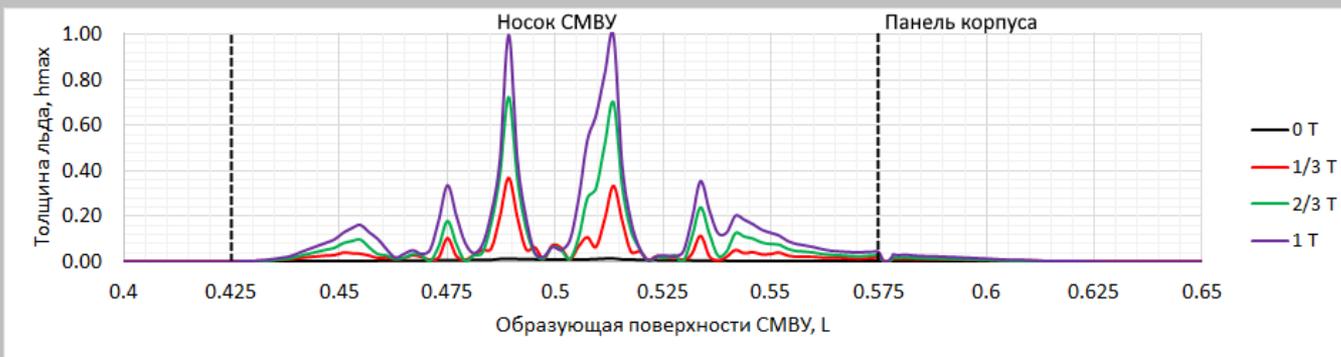
The figure displays four screenshots of a simulation software interface, likely ANSYS Fluent, showing convergence analysis for different mesh sizes (1000, 2000, 4000 elements). Each window displays the following information:

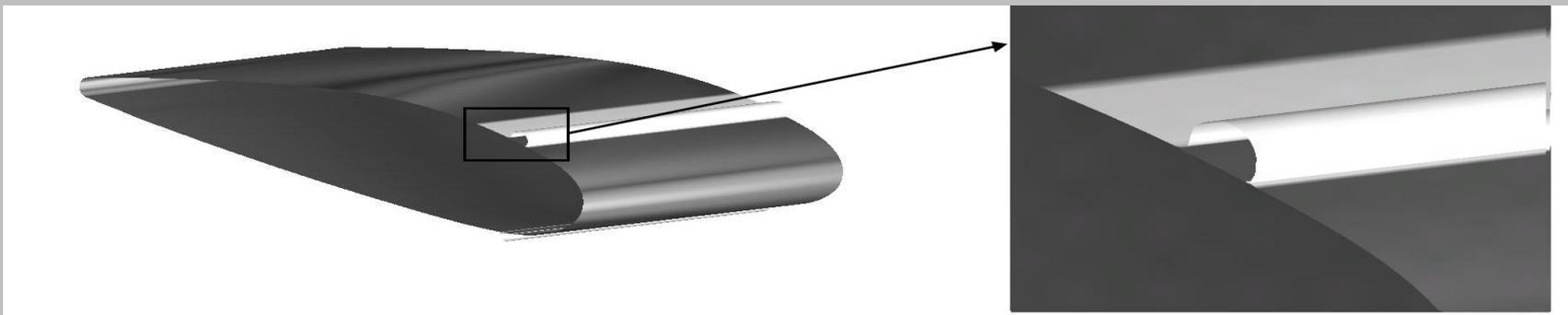
- summary of collection efficiency in hq/s for water droplets:**
 - inlets and farfields: -0.419001E-02
 - walls: 0.419001E-02
 - symmetry planes: 0.000000E+00
 - plane (front): 0.000000E+00
 - plane (back): 0.000000E+00
 - % of total mass loss: 0.000000E+00
- linear statistics:**
 - particle assembly time: 00:00:08.52
 - particle solution time: 00:00:11.06
- residuals of droplet equations:**
 - mass: 1.11E-06
 - u: 4.47E-15
 - v: 1.19E-06
 - w: 6.51E-14
 - temp: 4.47E-06

The screenshots show that the simulation results are consistent across different mesh sizes, indicating convergence of the solution.

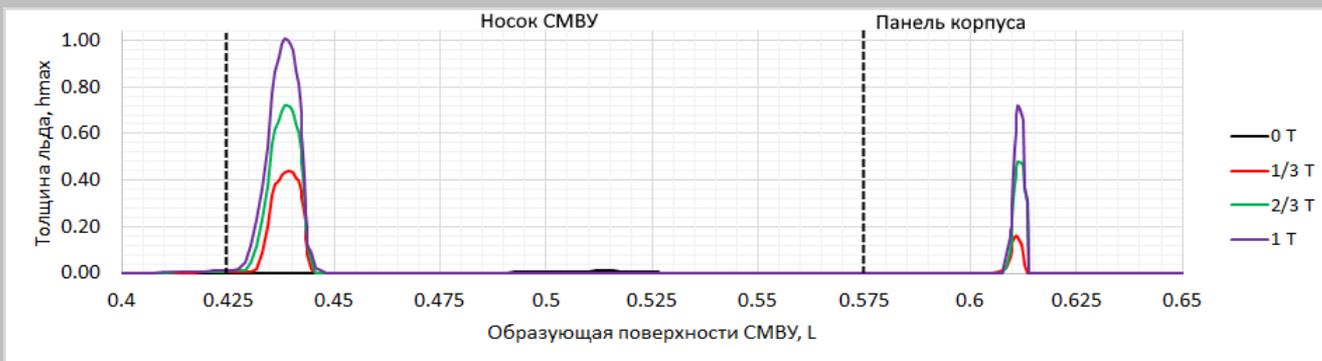


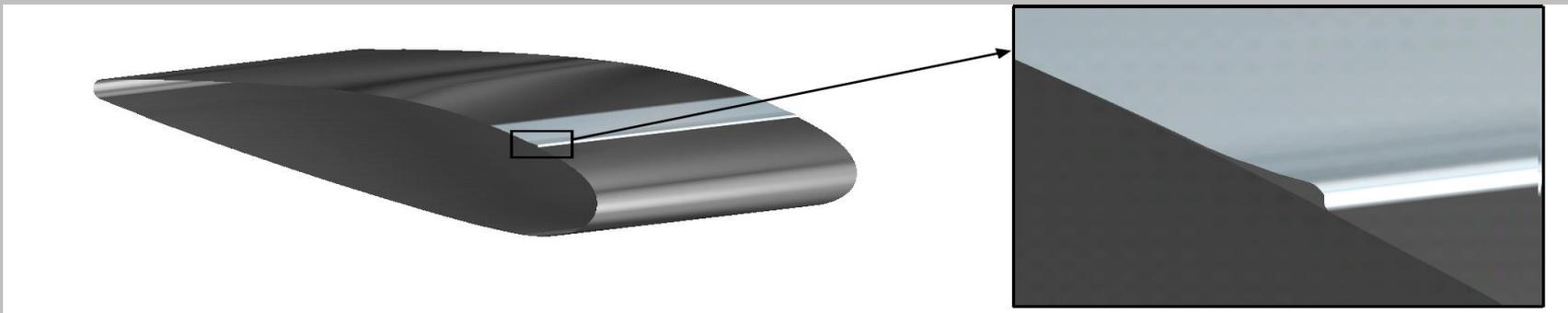
Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до $1,0 T_s$



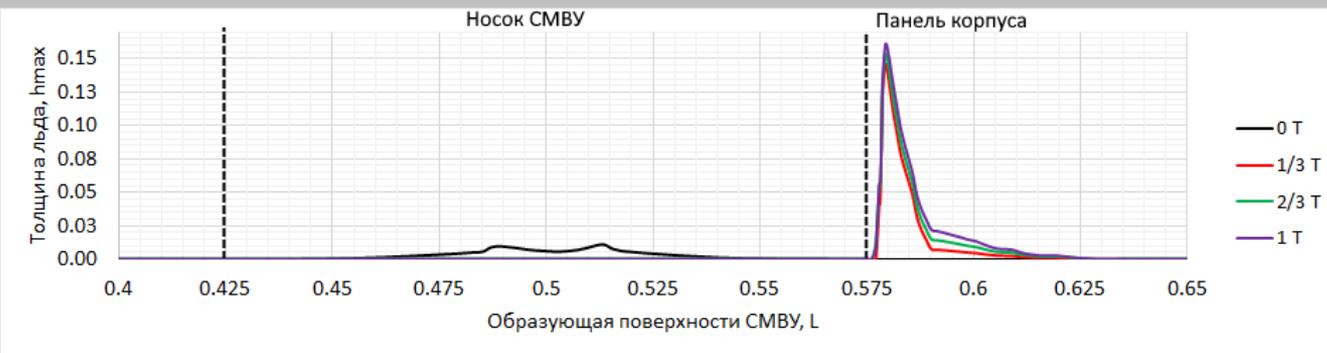


Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до $1,02 T_s$



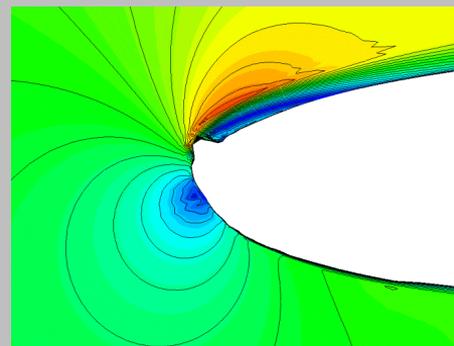
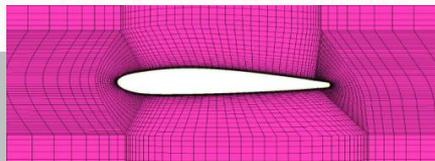
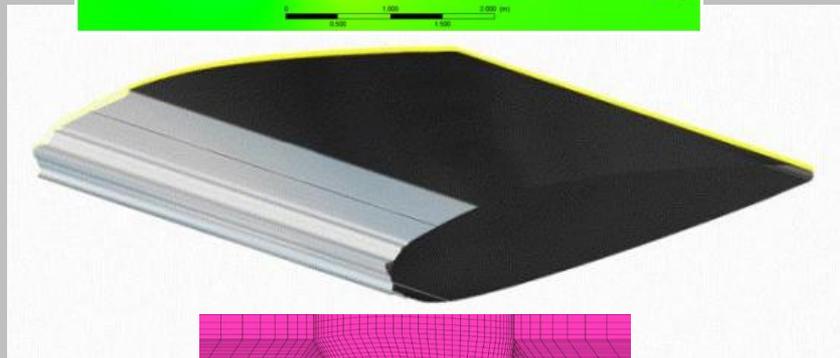
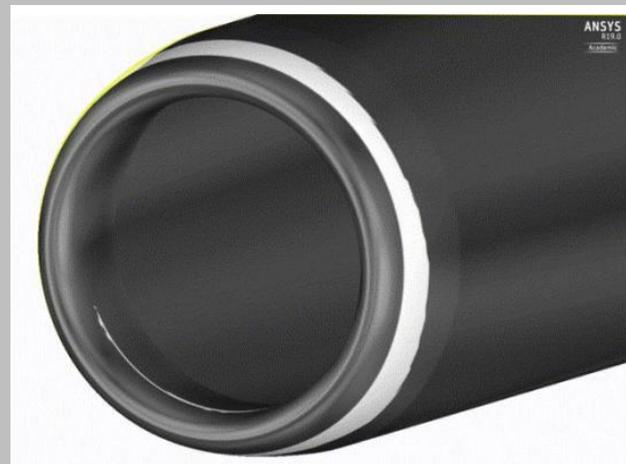
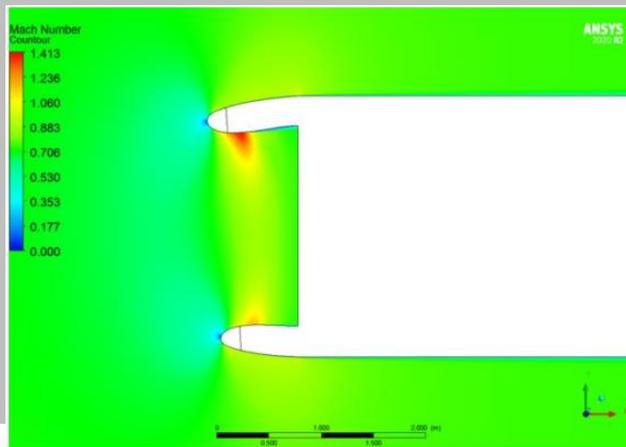


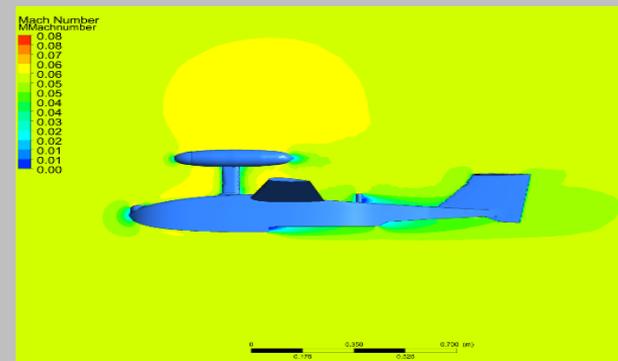
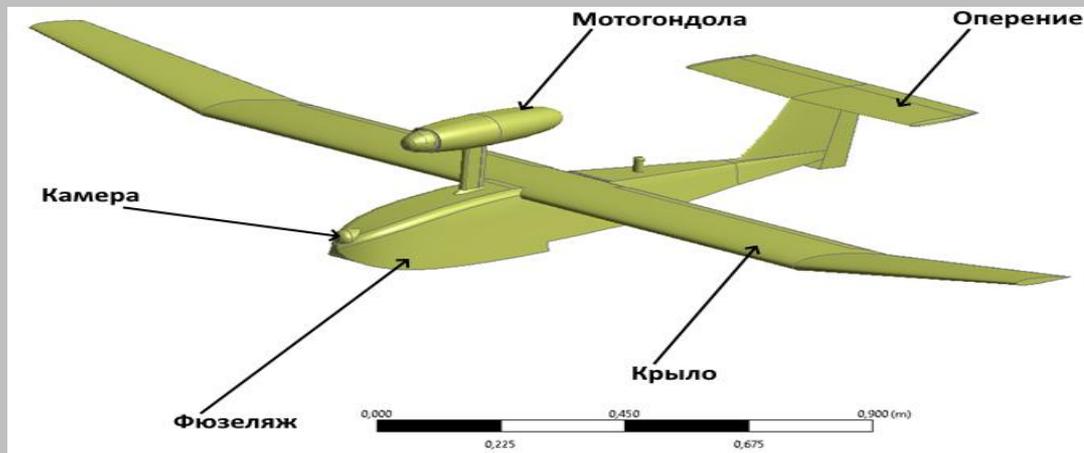
Распределение толщин льда по образующей МВУ при постоянном нагреве ЭНЭ до $1,05 T_s$





Обледенение воздухозаборника АД





Расчетно-
экспериментальные
исследования **БАС**



**центр высокопроизводительных
вычислительных систем**

ПЕРМСКИЙ ПОЛИТЕХ

Спасибо за внимание!