

VIII Российская конференция  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



МИНОБРНАУКИ  
РОССИИ



# Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике

**Т.К. Козубская**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

22 сентября 2021 года - Геленджик

## Введение

**Вычислительный эксперимент** – инструмент прикладных исследований

Как любой инструмент,  
он имеет свои плюсы и минусы, ограничения и специфику, ...

Как любой инструмент,  
он развивается и постоянно совершенствуется

Он ни в коем случае не безальтернативен, а комплементарен

## Введение

**Вычислительный эксперимент в аэродинамике** (как правило, **стационарной**) широко используется на практике при разработке новых летательных аппаратов

В отличие от него, **вычислительный эксперимент в аэроакустике и нестационарной аэродинамике** в инженерных разработках практически не используется. Этот новый класс вычислительного эксперимента только начинает свою жизнь..

Доклад посвящен рассмотрению **особенностей** вычислительного эксперимента в аэроакустике и (нестационарной) аэродинамике, **проблем с его постановкой**, а также обзору **текущего состояние и потенциальных возможностей**..

# 1. Высокая вычислительная стоимость вычислительного эксперимента в аэроакустике и нестационарной аэродинамике

Разрешение **принципиально трехмерных и нестационарных хаотичных турбулентных вихревых структур** потока при представляющих интерес числах Рейнольдса требует:

- **огромных вычислительных сеток** (сотни миллионов - миллиарды узлов) и мелких шагов интегрирования по времени для разрешения взаимодействующих структур в широком диапазоне масштабов, в том числе достаточно мелких, ответственных за высокочастотный шум
- **длинных временных интервалов** (огромного числа шагов по времени) для получения статистически представительных результатов по корректной оценке низкочастотного шума

## 2. Реализуемость вычислительного эксперимента только на высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных системах



### Критичный недостаток вычислительных ресурсов в России

Европейская программа PRACE для поддержки проектов по суперкомпьютерным вычислениям

Доступ на 7 вычислительных кластеров мощностью **15-30 Pflops** каждый  
Готовится к вводу новый MareNostrum **~200 Pflops**

### В России

Самый наш мощный и практически единственный доступный науке – **Ломоносов 2 ~5 Pflops**

<https://parallel.ru/cluster/lomonosov2.html>

Нам недоступный суперкомпьютер Сбербанка обладает мощностью **6-7 Pflops**



Joliot-Curie, GENCI@CEA, France



JUWELS, GCS@FZJ, Germany



HAWK, GCS@HLRS, Germany



SuperMUC-NG, GCS@LRZ, Germany



MARCONI, CINECA, Italy



MareNostrum 4, BSC, Spain



Piz Daint, ETH Zurich/CSCS, Switzerland

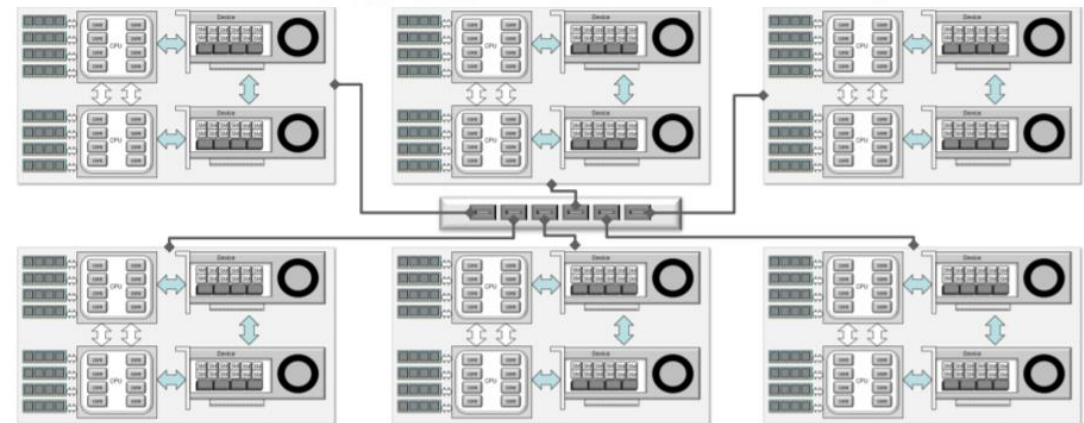
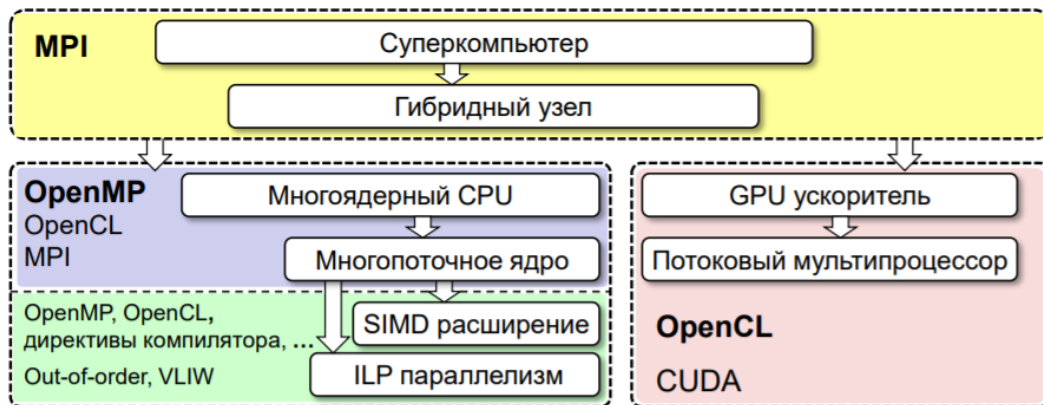
<https://prace-ri.eu/hpc-access/hpc-systems/>

## 2. Реализуемость вычислительного эксперимента только на высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных системах

### Критичная необходимость новых гетерогенных параллельных технологий

**Гибридные суперкомпьютеры** сочетают вычислительные устройства разной архитектуры: многоядерные процессоры и массивно-параллельные ускорители сопроцессоры GPU.

Для обеспечения эффективности его использования **параллельный алгоритм** должен гибко сочетать различные парадигмы параллельного программирования: с распределенной памятью, общей памятью, потоковая обработка на GPU, векторизация, ...



### 3. Программные комплексы, обеспечивающие вычислительный эксперимент в аэроакустике

#### Высокоэффективное использование десятков тысяч CPU и тысяч GPU

И это вполне реалистичное требование сегодняшнего дня

#### Расчеты мирового уровня (типа Tier-0 PRACE)

- это несколько десятков миллионов CPUh (обычно 20-100M CPUh)
- входной билет масштабируемость кода от 10 тыс. ядер,  
пример испанского проекта:  
Tier-0 PRACE на 30M CPUh, использовалось 16 тыс. CPU-ядер
- передовые расчеты (например, проводимые компанией EXA):  
O(10K) CPU-ядер, сетки O( $10^{10}$ ) DoF, расчетное время O(10M) CPUh

### 3. Программные комплексы, обеспечивающие вычислительный эксперимент в аэроакустике

Существующие коммерческие коды пока не в полной мере отвечают требованиям по параллельной эффективности

В настоящее время:

- **ANSYS CFX** – параллельные реализации только для CPU,
- **ANSYS FLUENT** – параллельные реализации для CPU, частичный порт на GPU в основном решателя СЛАУ для ускорения расчетов (гомогенные вычисления)
- **NUMECA** – параллельные реализации для CPU, частичный порт на GPU, 2-3 раза ускорение на определенных задачах (гетерогенные вычисления)
- **ЛОГОС** – параллельные реализации только для CPU, работающих GPU реализаций для CFD нет

Но работа ведется, и по мере востребованности вычислительного эксперимента в аэроакустике и нестационарной аэродинамике ситуация несомненно будет улучшаться

Разработка эффективных гетерогенных моделей параллельности активно ведется в исследовательских кодах (NOISEtte, GPU реализация в ЦАГИ НИО9 для моделирования струйных течений, ...)



## 4. Матобеспечение.

### Численные методы, отвечающие требованиям вычислительного эксперимента в аэроакустике

Сегодня, чтобы дотянуться до успешных прикладных расчетов в авиационных приложениях при использовании сеток допустимой размерности, необходимы **численные методы со следующими свойствами:**

- **повышенная точность**, повышенная разрешающая способность,
- **неявные схемы интегрирования по времени**,
- для вихреразрешающих расчетов **минимизация численной диссипации при сохранении устойчивости**
- **консервативность\*** и **монотонность\***

## 4. Матобеспечение.

### Численные методы, отвечающие требованиям вычислительного эксперимента в аэроакустике



Такого рода численные методы могут с высокой эффективностью реализовываться на вычислительных системах с самой сложной гибридной архитектурой

Связанная с подобными алгоритмами высокая арифметическая интенсивность при локальности данных в памяти **только способствуют повышению эффективности распараллеливания**

Тренд на повышение точности и усложнение алгоритмов будет сохраняться и в будущем, т.к. **рост вычислительных мощностей с неизбежностью будет опережаться ростом сложности востребованных в авиации задач** (требованием разрешения все более мелких масштабов, требованием расширения области определения расчета от отдельных конструктивных элементов до самолета целиком)

## 5. Матобеспечение.

### Математические модели

### в аэроакустике и нестационарной аэродинамике

#### Численное решение нестационарных уравнений Навье-Стокса (DNS – Direct Numerical Simulation)

с нужной степенью подробности разрешения принципиально важных особенностей турбулентных течений в задачах внешнего обтекания в авиационной промышленности сегодня **НЕВОЗМОЖНО**  
Ближайшие ориентиры по достижимости – конец века..

#### Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS),

не дают полной информации о важных аэроакустических свойствах летательного аппарата (аэродинамические и акустические нагрузки, их спектральный состав, диаграмма направленности акустического излучения и его спектральный состав в дальнем поле)

#### Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений

на основе LES (моделирование крупных вихрей) и гибридных RANS-LES подходов сегодня является практически **единственным подходом**, обеспечивающим вычислительный эксперимент в аэроакустике

## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES) – основной метод вычислительного эксперимента в аэроакустике

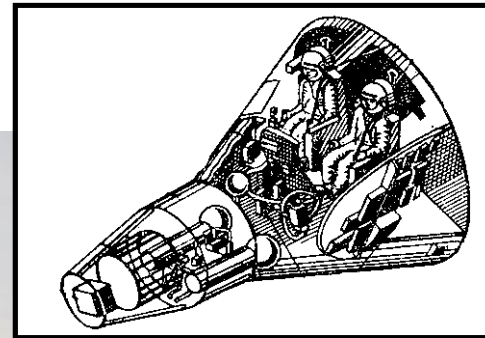
Всё еще достаточно дорого, увы.. 😞

Но ситуация постоянно и неуклонно улучшается, несмотря и вопреки .. 😊

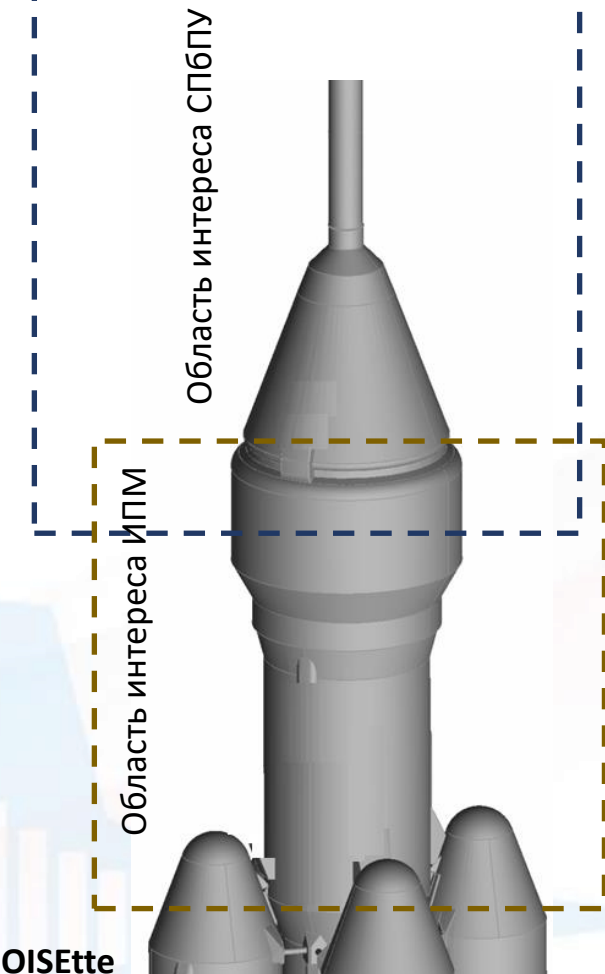
Вихреразрешающее моделирование уже сегодня позволяет численно решить **широкий спектр задач аэроакустики и нестационарной аэродинамики в авиационных приложениях**

## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

Нестационарное турбулентное течение вблизи поверхности ракеты космического назначения на стадии запуска



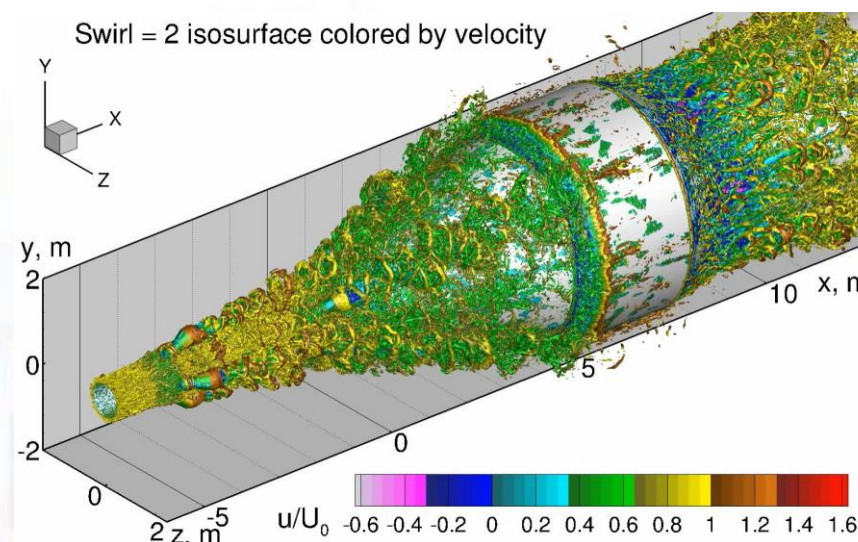
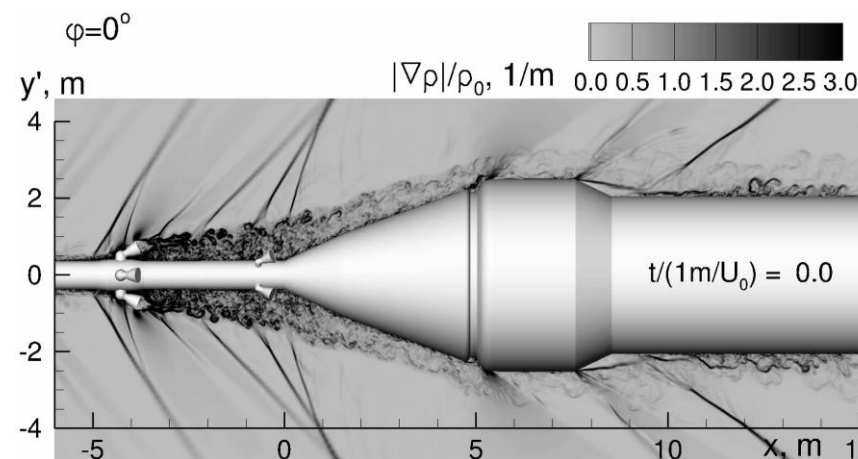
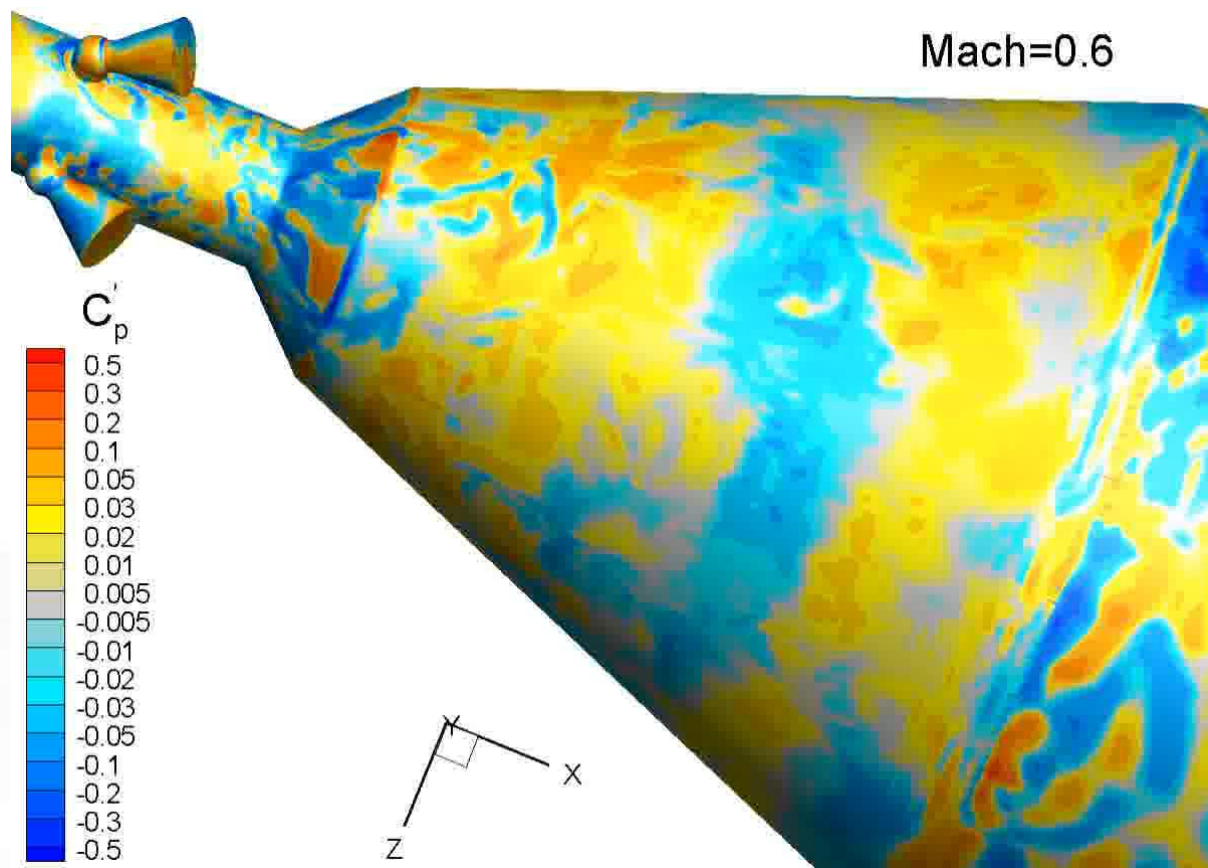
Высота полёта:  
6.5÷13 км  
Числа Рейнольдса:  
 $9.8 \div 7.4 \cdot 10^6$ ,  
Числа Маха: 0.8÷1.3





## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

Нестационарное турбулентное течение вблизи поверхности ракеты космического назначения

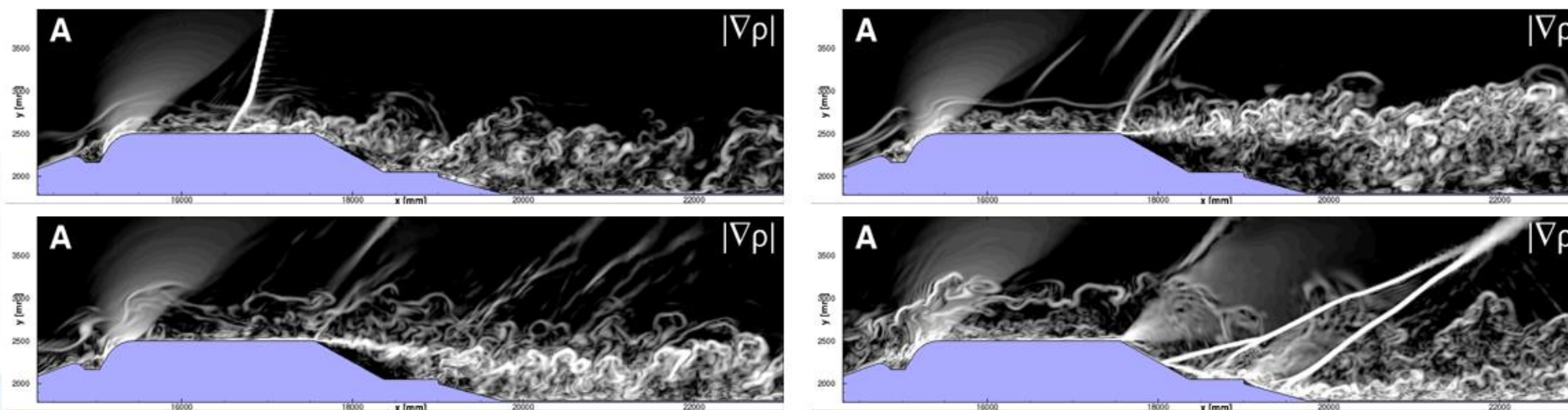
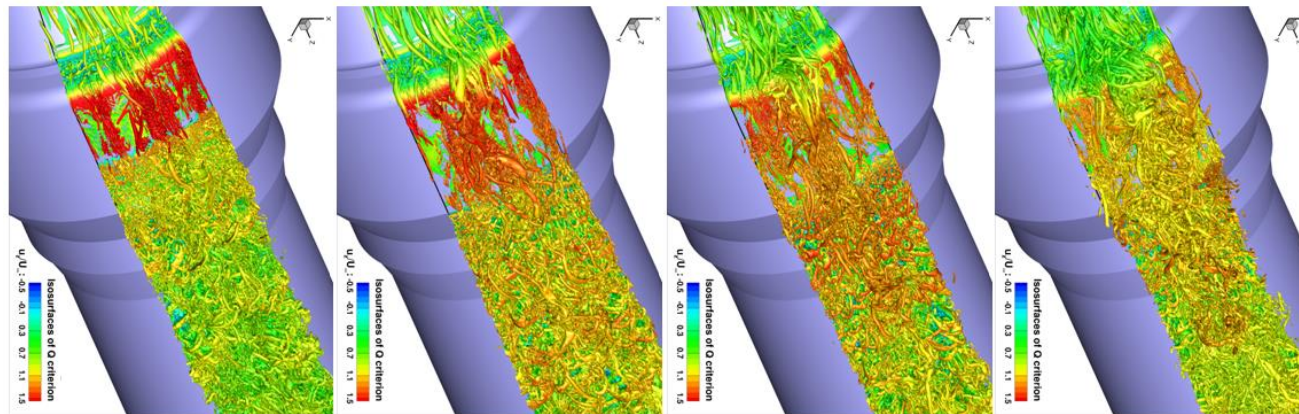


Выполнен: СПбПУ Петра Великого, CAT Lab, код NTS



## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

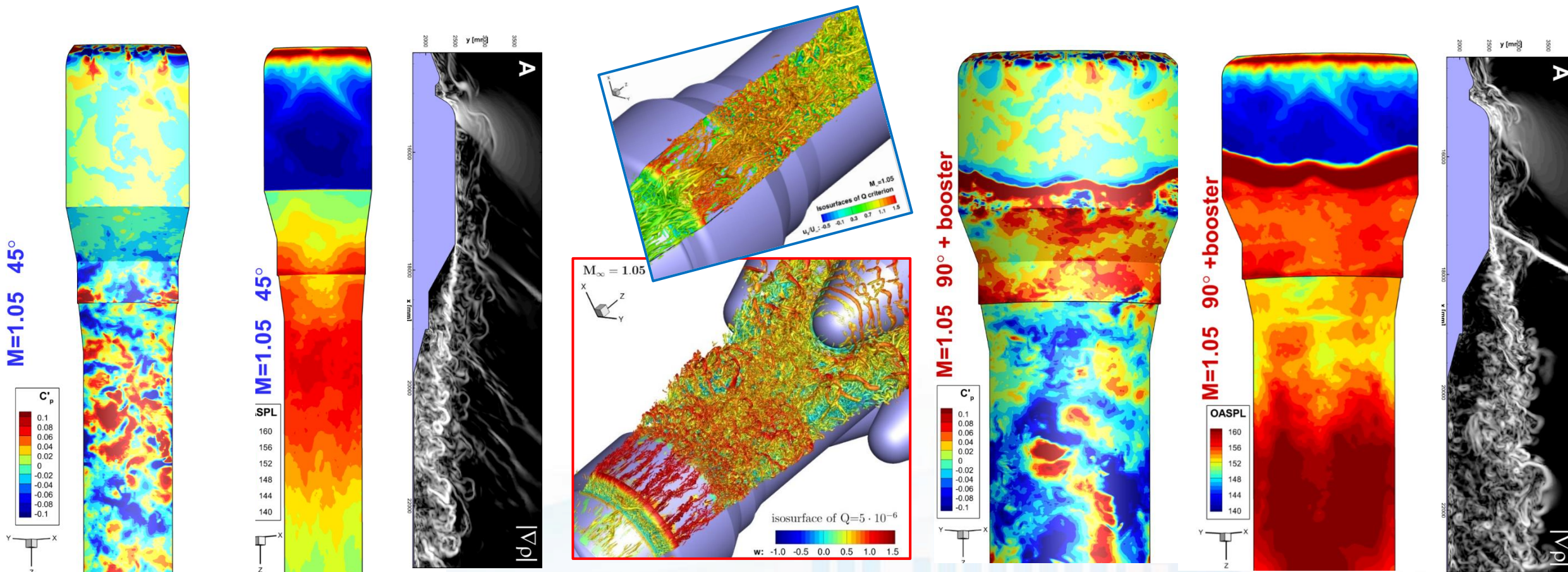
Нестационарное турбулентное течение вблизи поверхности ракеты космического назначения





## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

Нестационарное турбулентное течение вблизи поверхности ракеты космического назначения



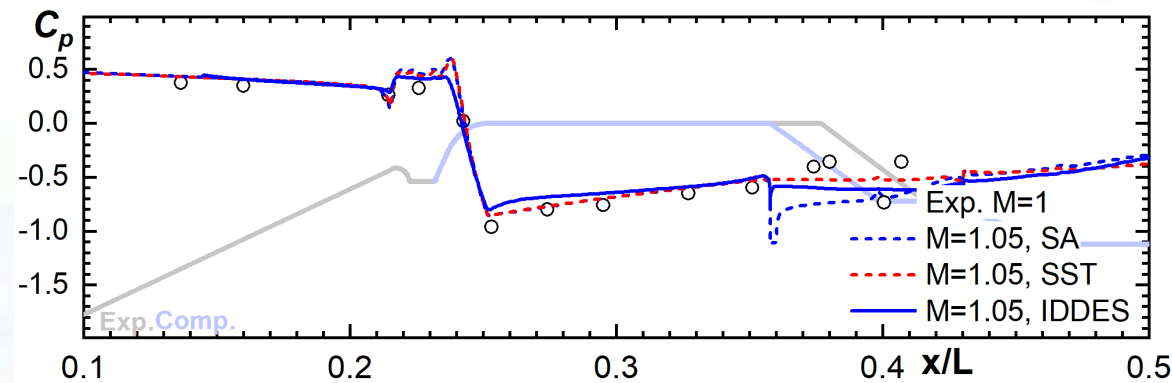
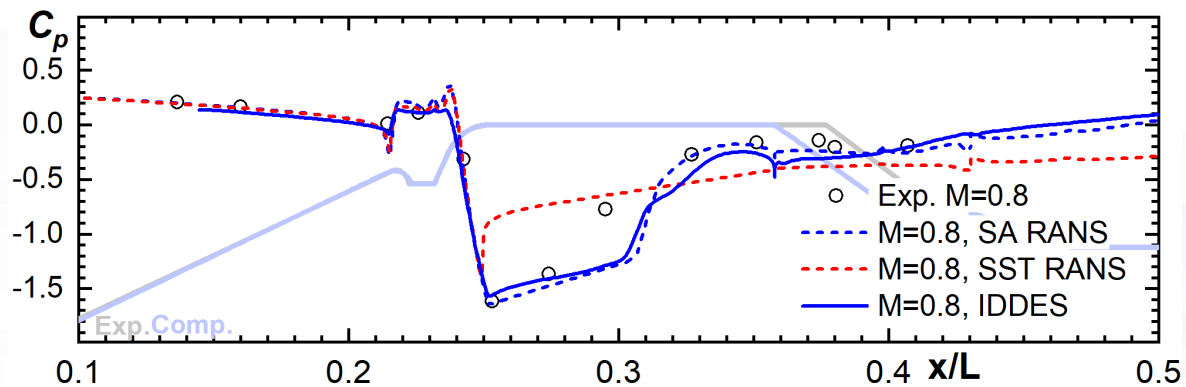
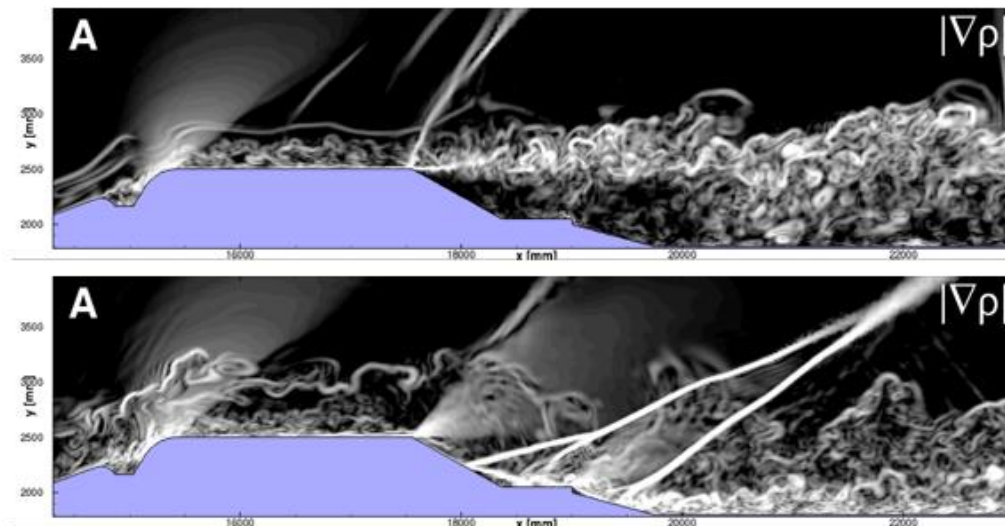
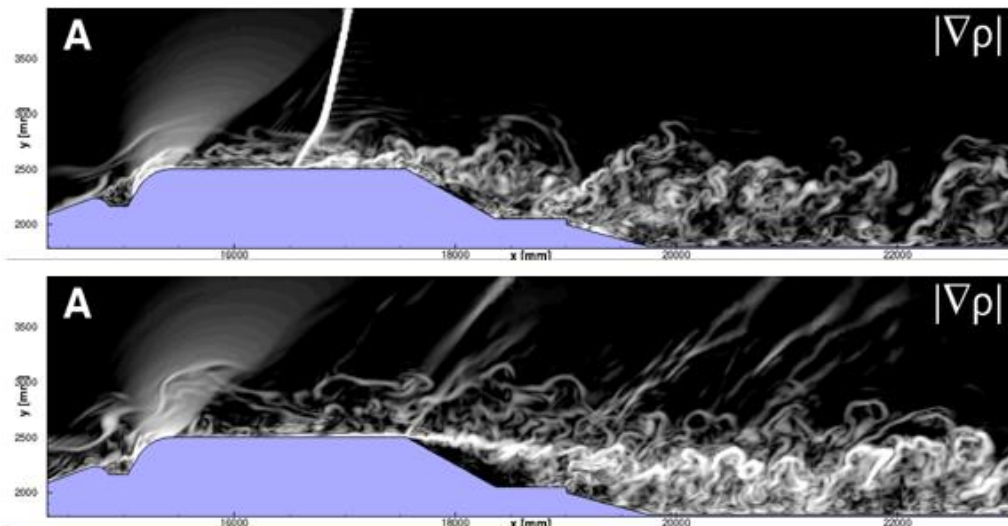
$Re=10^7$





## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

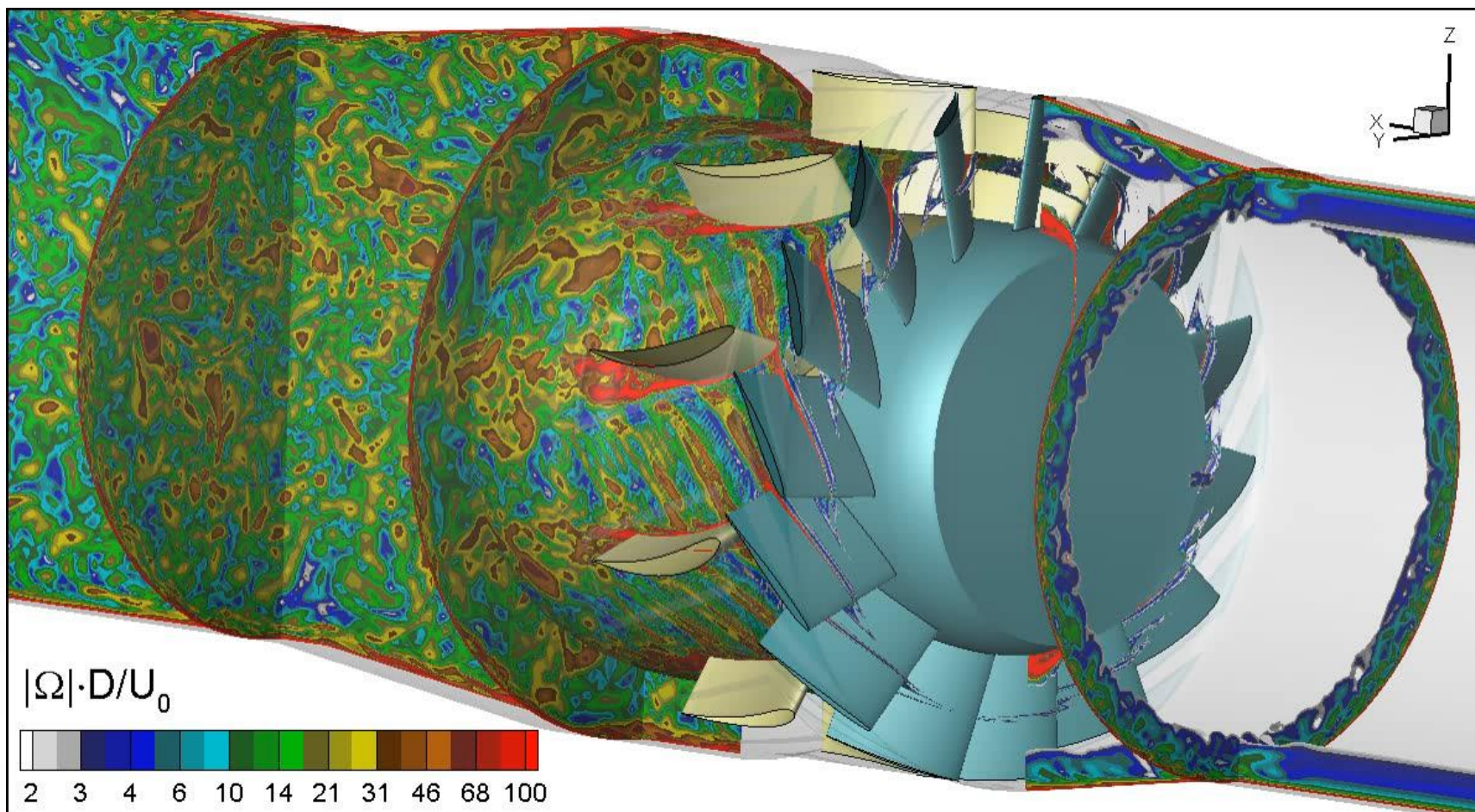
Нестационарное турбулентное течение вблизи поверхности ракеты космического назначения





## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

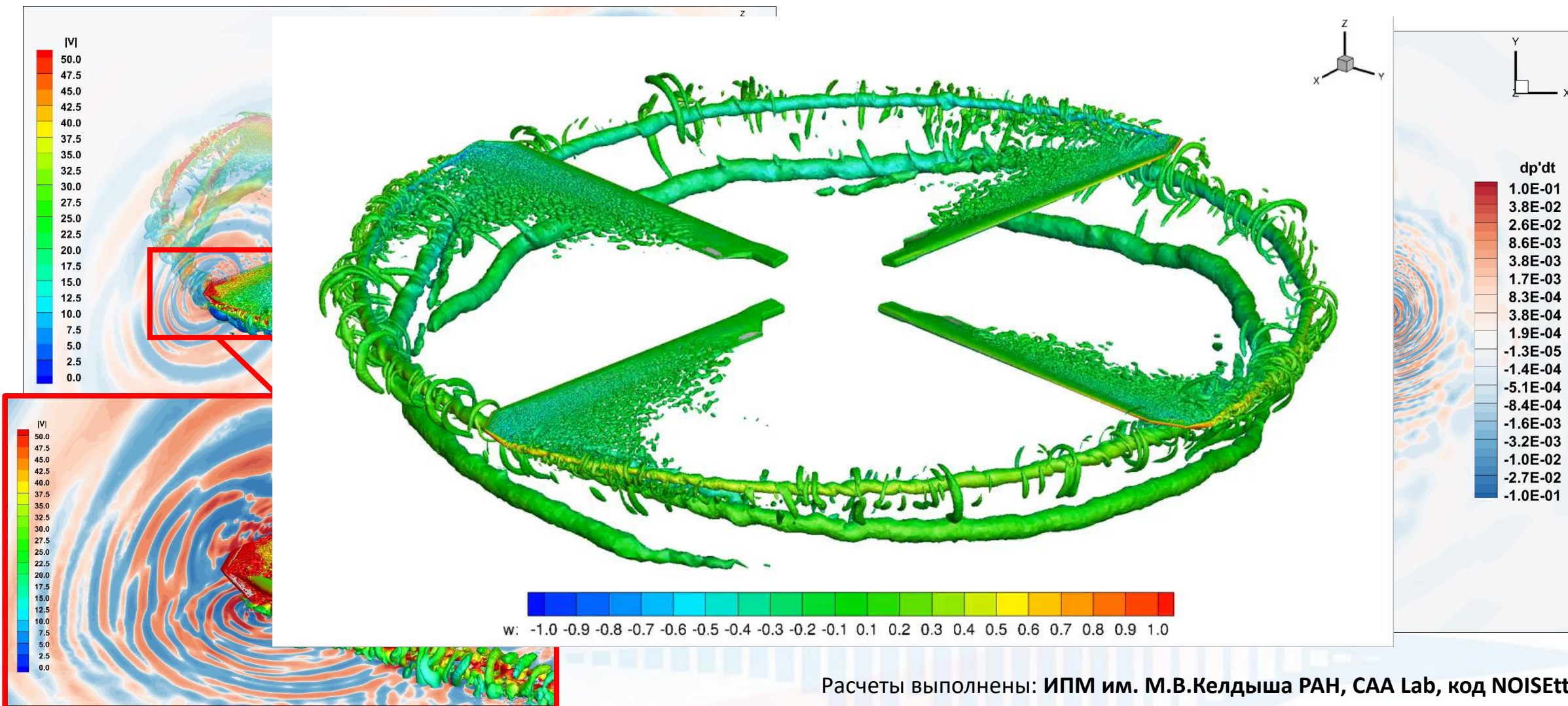
### Вентилятор в системе кондиционирования самолета





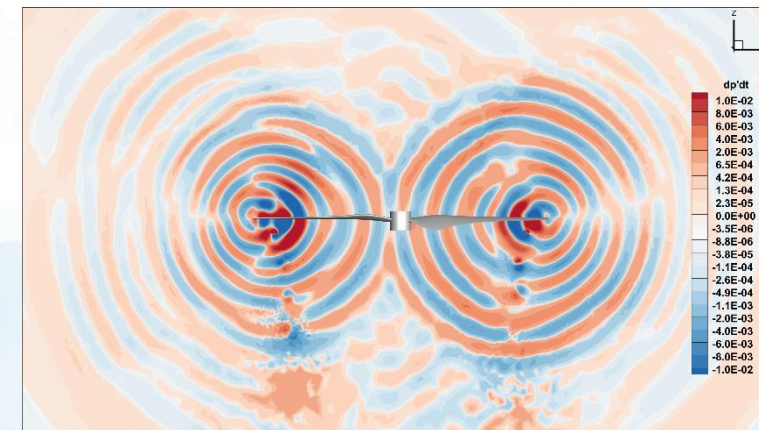
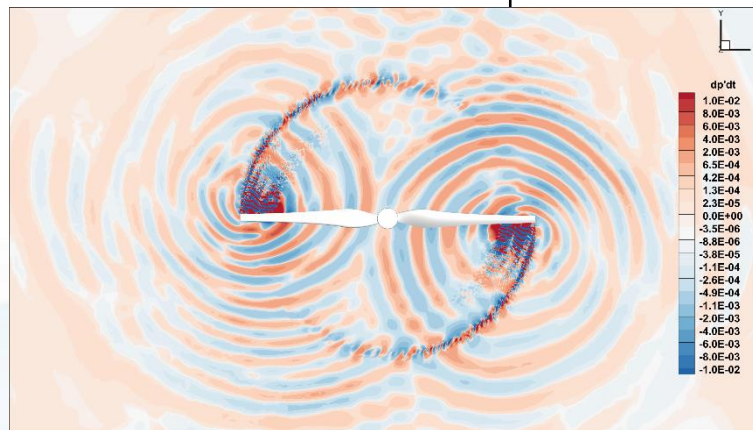
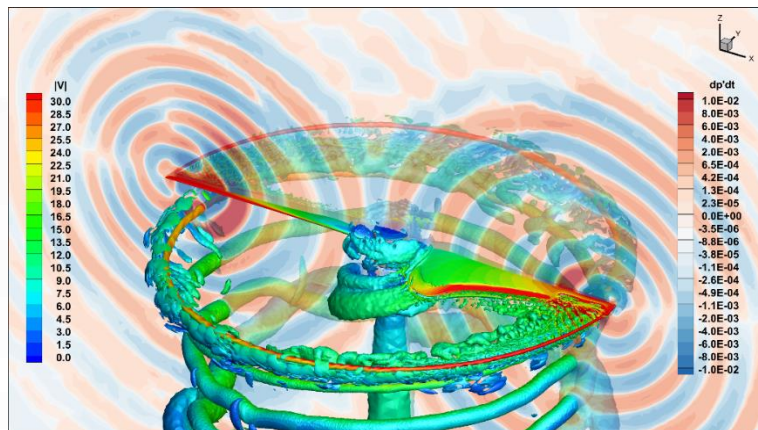
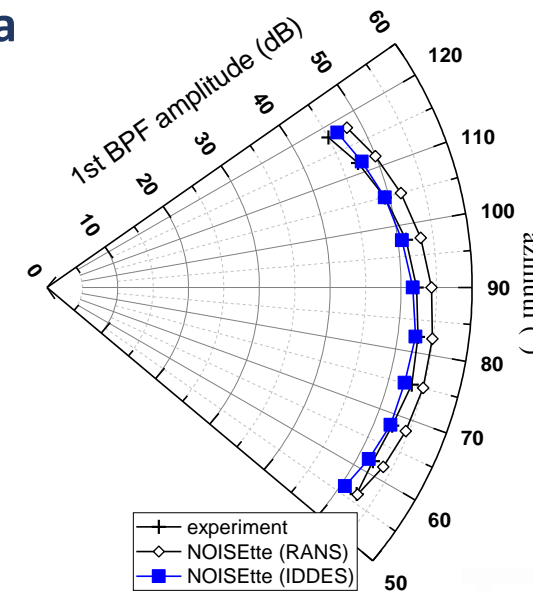
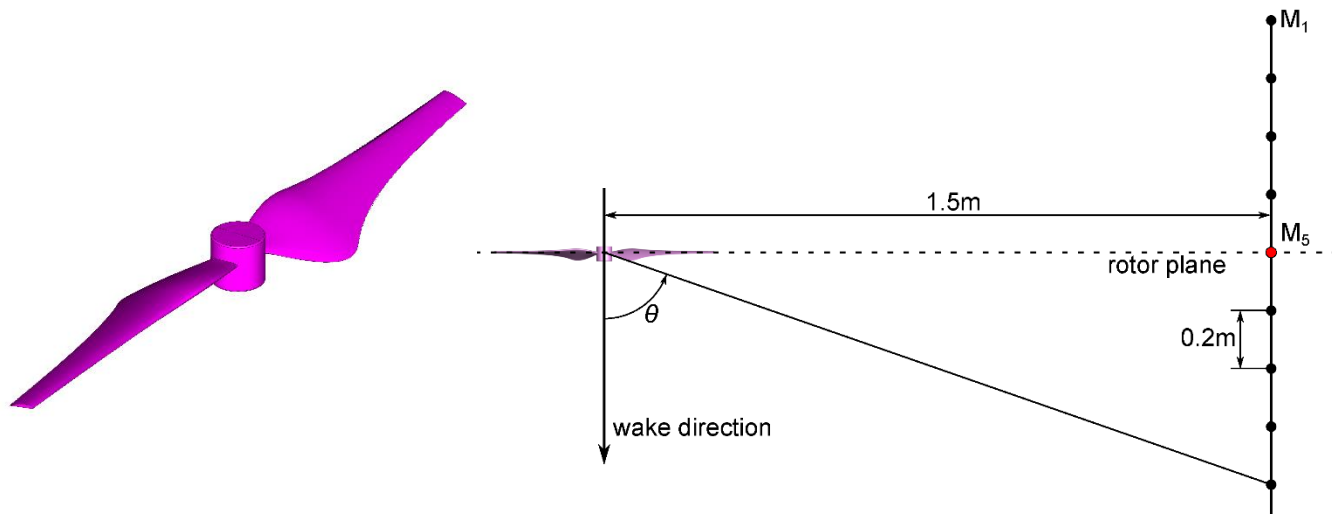
## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры

### Турбулентное течение, создаваемого 4х-лопастным винтом вертолета на режиме висения





## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES). Примеры Аэродинамические и акустические характеристики винта квадрокоптера

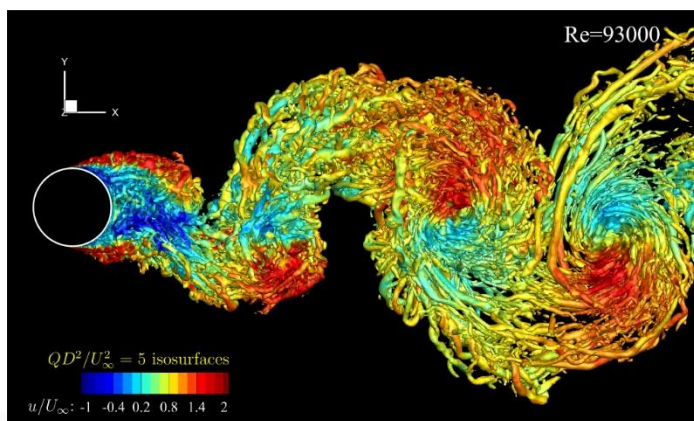




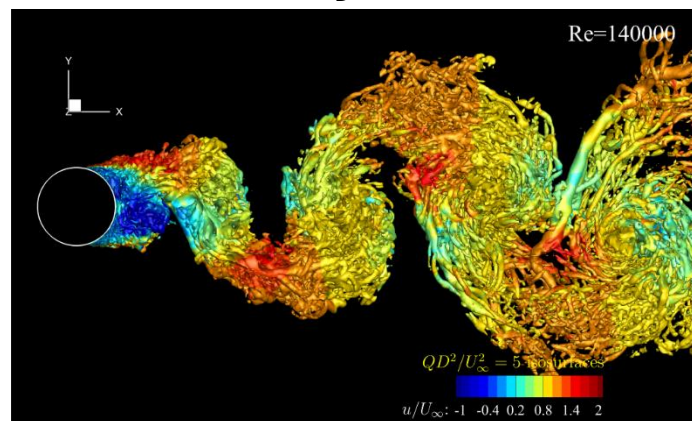
## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES) – основной метод вычислительного эксперимента в аэроакустике

Следует отметить, что **не все задачи** легко поддаются численному решению гибридными RANS-LES методами  
Самый простой пример – течение около **цилиндров** при **околокритических** и **посткритических** числах Рейнольдса

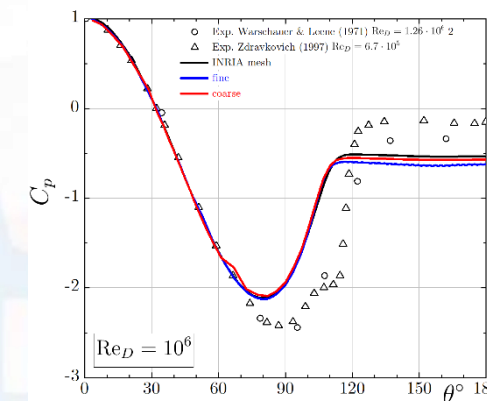
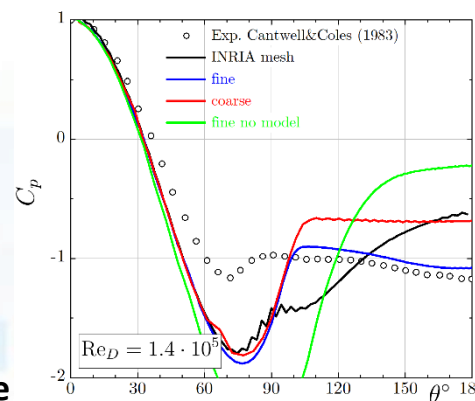
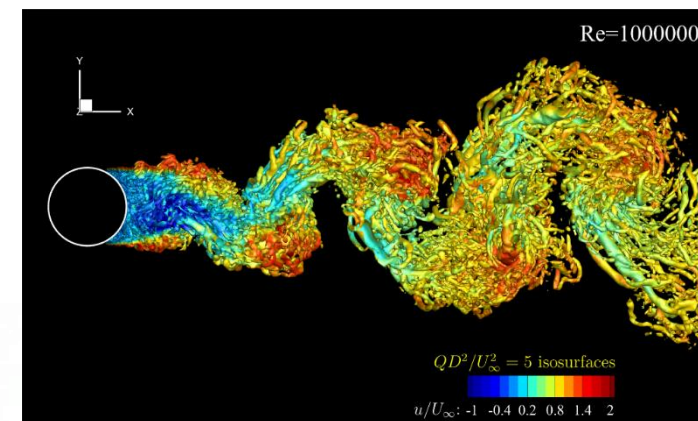
Докритическое  $Re_D < 10^5$ :  $Re_D = 93000$



Критическое  $10^5 < Re_D < 5 \cdot 10^5$ :  $Re_D = 1.4 \cdot 10^5$



Посткритическое  $Re_D > 5 \cdot 10^5$ :  $Re_D = 10^6$



## 6. Вихреразрешающее моделирование (RANS-LES, LES) – основной метод вычислительного эксперимента в аэроакустике

Из-за высокой вычислительной стоимости **массовые расчеты** (с большими матрицами варьируемых параметров) **возможны только для достаточно простых конфигураций..**

Тем не менее, **«тяжелые» и не массовые расчёты также востребованы.**

Например, в следующих случаях:

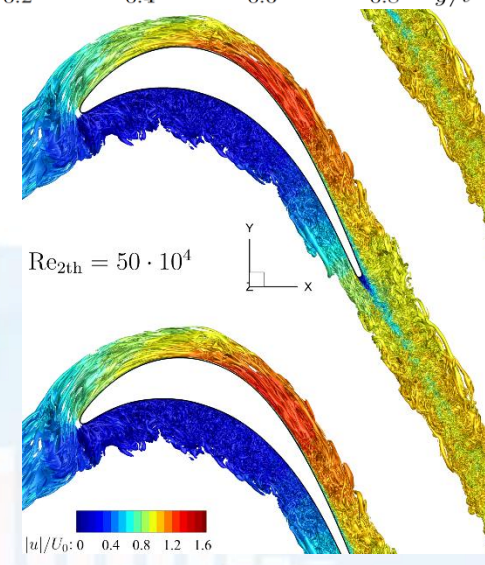
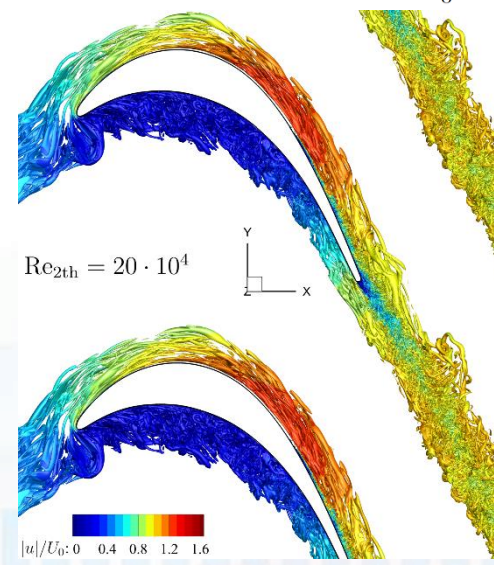
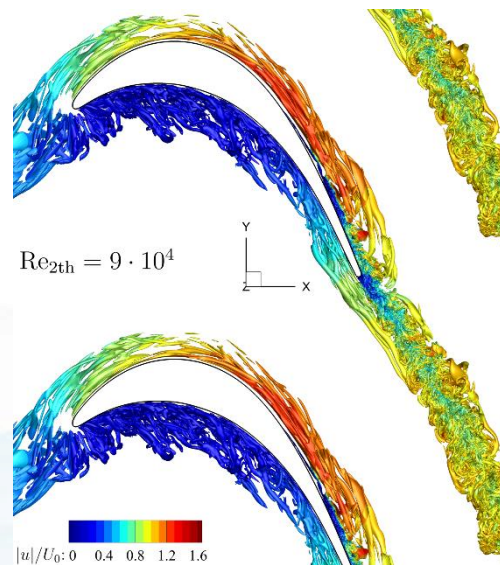
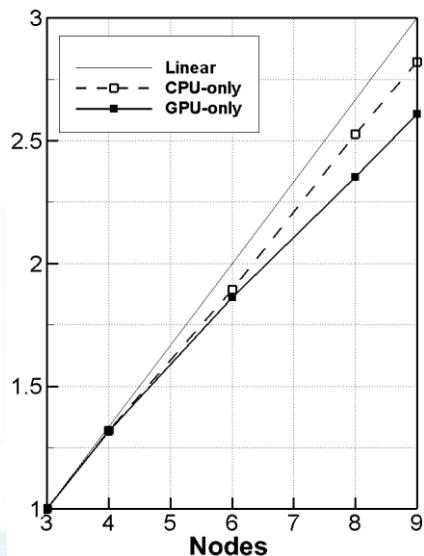
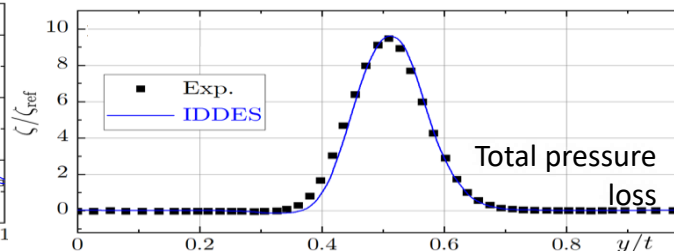
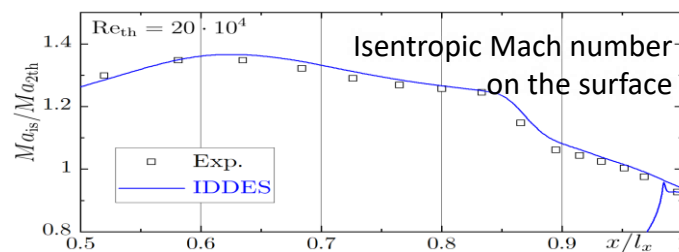
- детальное **исследование того или иного физического явления** (например, отрывные зоны),  
существенным образом влияющего на аэродинамические и акустические свойства
- **верификация более «дешевых» моделей RANS**,  
а именно подбор наиболее подходящей для той или иной задачи замыкающей модели турбулентности, модели ламинарно-турбулентного перехода, параметров корреляционных зависимостей и т.п.
- **подробное представление полей течения** во времени и пространстве  
**для лучшего понимания физики течения**



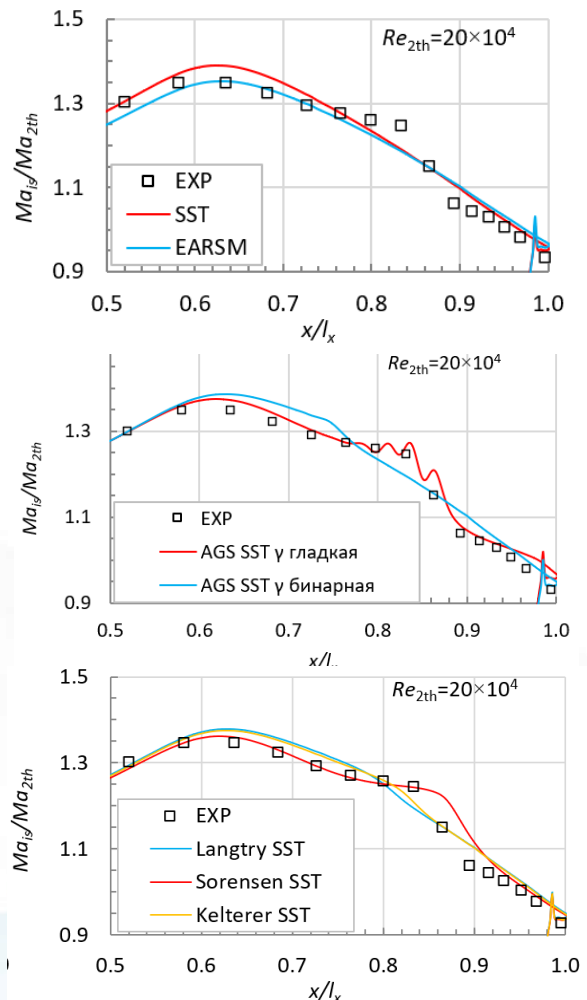
# Пример полезных «тяжелых» и не массовых расчётов с использованием вихреразрешающих подходов: моделирование течения в турбине низкого давления

Цель: исследование эффекта потерь полного давления при уменьшении числа Рейнольдса

## Турбинная решётка T106C



# Пример полезных «тяжелых» и не массовых расчётов с использованием вихреразрешающих подходов: моделирование течения в турбине низкого давления



Абсолютные потери полного давления  $\zeta$ , %

Расчет	$Re_{2th} = 9 \cdot 10^4$	$Re_{2th} = 20 \cdot 10^4$	$Re_{2th} = 50 \cdot 10^4$
<b>IDDES</b>	<b>4.37</b>	<b>2.78</b>	<b>2.18</b>
SST	4.18	3.48	2.99
BSL-EARSM	8.58	7.9	7.43
AGS SST $\gamma$ бин.	4.4	2.92	2.67
AGS SST $\gamma$ глад.	5.06	3.19	2.25
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Langtry	4.04	2.95	2.71
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Sorensen	5.13	3.31	2.26
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer	<b>4.19</b>	<b>2.92</b>	<b>2.43</b>
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ BSL-EARSM Kelterer	<b>4.59</b>	<b>3.24</b>	<b>2.6</b>

НИР выполнена: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, САА Lab, код NOISEtte и ООО «НУМЕКА», код NUMESA

2 доклада: А.П. Дубень и др., 22 сентября, 17:00, 17:25



## 7. Новое направление – экстрагирование полезной физической информации

**из «тонны» подробных пространственно-временных данных,  
полученных в ходе вычислительного эксперимента на основе вихреразрешающего моделирования**

Получение осредненных характеристик

– это слишком мало и, как правило, не оправдывает вычислительные затраты на вихреразрешающее моделирование.

Определение спектрального состава пульсаций давления или скорости в контрольных точках

– это нужно, но далеко не исчерпывает всей физической информации, предоставляемой ВЭ на основе вихреразрешающего моделирования

### **Новые методы «добычи» информации**

- **численный бимформинг для локализации акустического источника и определения его спектральных характеристик**
- **методы декомпозиции пространственно-временных полей данных:**  
разложение по ортогональным модам (Proper Orthogonal Decomposition / POD),  
разложения по динамическим модам (Dynamic Mode Decomposition / DMD), ..

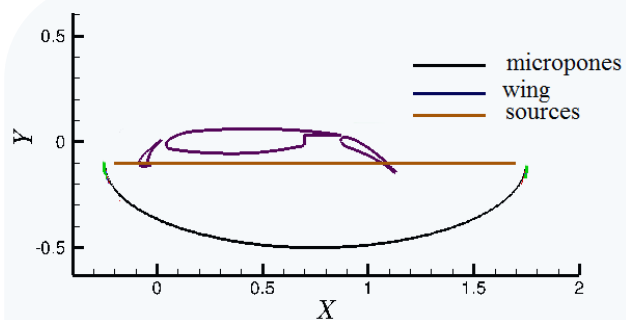
Каждый подход имеет свои преимущества и свои ограничения.

Их комбинация позволяет провести объективный **анализ акустического поля обтекаемого объекта**

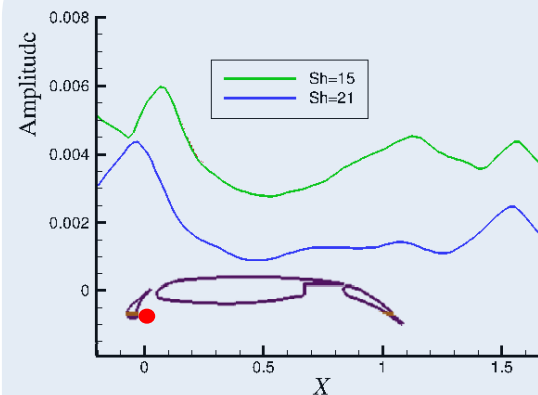
## 7. Новое направление – экстрагирование полезной физической информации

### Численный бимформинг

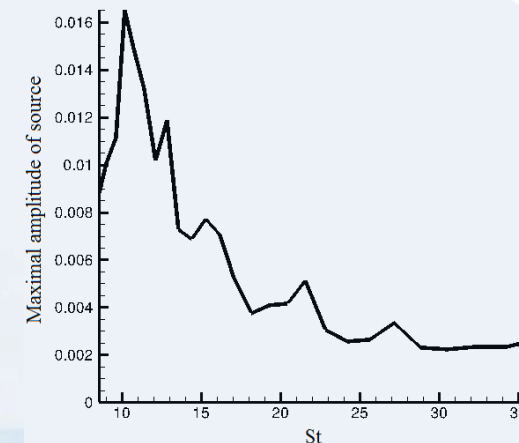
позволяет выявить полосы частот с повышенной амплитудой шума и примерно локализовать его источники



Расположение линий  
источника и микрофонов  
относительно крыла



Амплитуда источников вдоль крыла  
для частот  $St = 15, 21$   
Заметен подъем амплитуды в районе  
красной точки при  $St = 21$



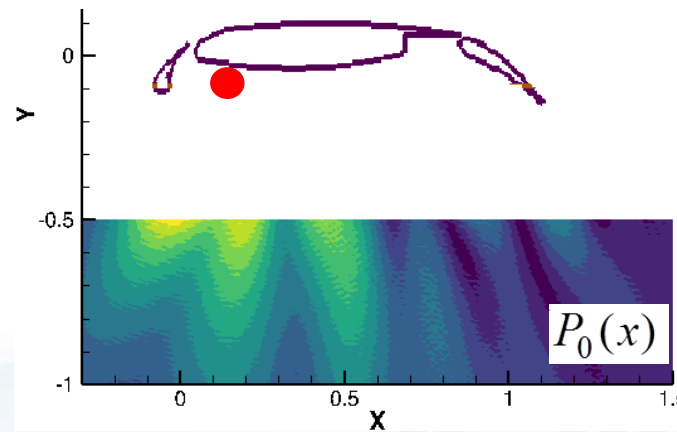
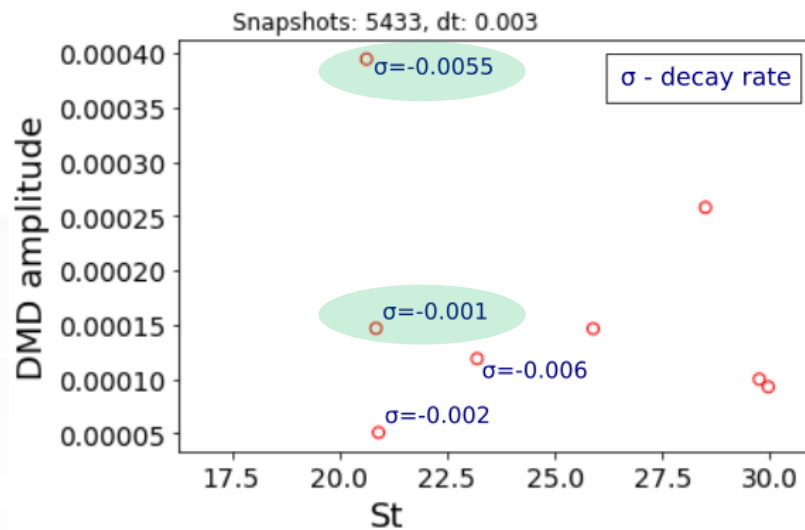
Зависимость максимальной  
амплитуды источника от частоты

## 7. Новое направление – экстрагирование полезной физической информации

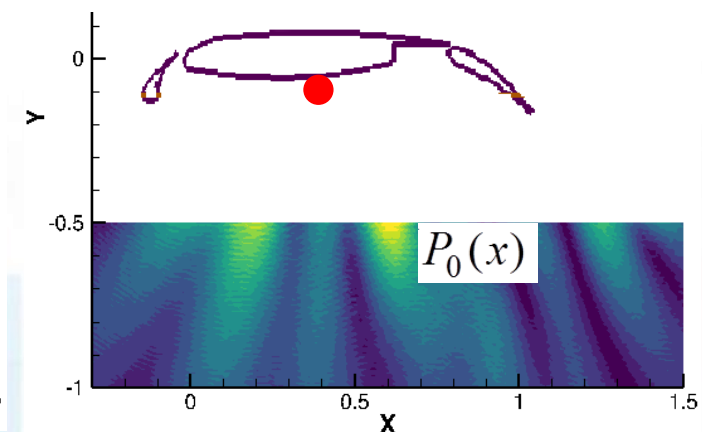
**Разложение по динамическим модам** позволяет подтвердить сильно шумящие частоты и уточнить расположение источников шума и направления его распространения

Моды характеризуются пространственной **функцией амплитуды**  $P_0(x)$  в некоторой области (прямоугольник под профилем)

Каждая мода имеет по времени свою **частоту**  $\omega$  и **декремент затухания**  $\sigma$ :  $P(t, x) = e^{\sigma t} e^{i\omega t} P_0(x)$ ,  $\sigma \leq -0$ ,  $\omega = 2\pi St$



Мода для  $St=20.6$ ,  $s=-0.0055$



Мода для  $St=20.9$ ,  $s=-0.001$

Амплитуда, частота ( $St$ ) и декремент затухания ( $s$ ) некоторых DMD мод в рассматриваемом прямоугольнике

Наблюдается фокусировка лепестков функции амплитуды мод в районе красных точек. Первая мода имеет примерно в 2.5 больший максимум

## 8. Валидация программных комплексов как инструмента проведения вычислительного эксперимента в аэроакустике и нестационарной аэродинамике

**Валидация** моделей, численных методов и реализующих программных кодов  
– неотъемлемая часть вычислительного эксперимента, гарантия его корректности и требуемой точности

**Валидация** – обязательная часть всех выполняемых промышленно-ориентированных НИР и ОКР

В работе «вычислителей» валидация предваряется и подкрепляется подробной **верификацией** всех составных частей численного алгоритма.

## 8. Валидация программных комплексов как инструмента проведения вычислительного эксперимента в аэроакустике и нестационарной аэродинамике

### ⚡ Острая проблема – отсутствие и труднодоступность кейсов для валидации

**Физический эксперимент для валидации** – это особый вид эксперимента: высокая точность, повторяемость, максимальная подробность измерений, тщательный выбор конфигураций (простота, но репрезентативность), подбор характерных режимов и т.п.

В России это направление, увы, практически отсутствует, за исключением отдельных случаев (ЦАГИ, С.М. Босняков + ИТПМ СО РАН, ?) А хорошо бы иметь **Российский банк валидационных кейсов..** с доступом и с соответствующими правилами доступа всем российским вычислителям..



**Европейский опыт:** специальные проекты Рамочных программ Евросоюза по кейсам для валидации (участники – как экспериментаторы, так и вычислители)

В подборе кейсов для валидации программных средств необходимо не соревнование, а **сотрудничество экспериментаторов и вычислителей**

## 8. Валидация программных комплексов как инструмента проведения ВЭ в аэроакустике и нестационарной аэродинамике

### Острая проблема – отсутствие и труднодоступность кейсов для валидации

А пока честным российским «вычислителям» приходится добывать кейсы «на стороне» (в литературе, на сайтах, выполненные в зарубежных организациях (NASA, ONERA, ..), просить у консорциумов Европроектов и тп.

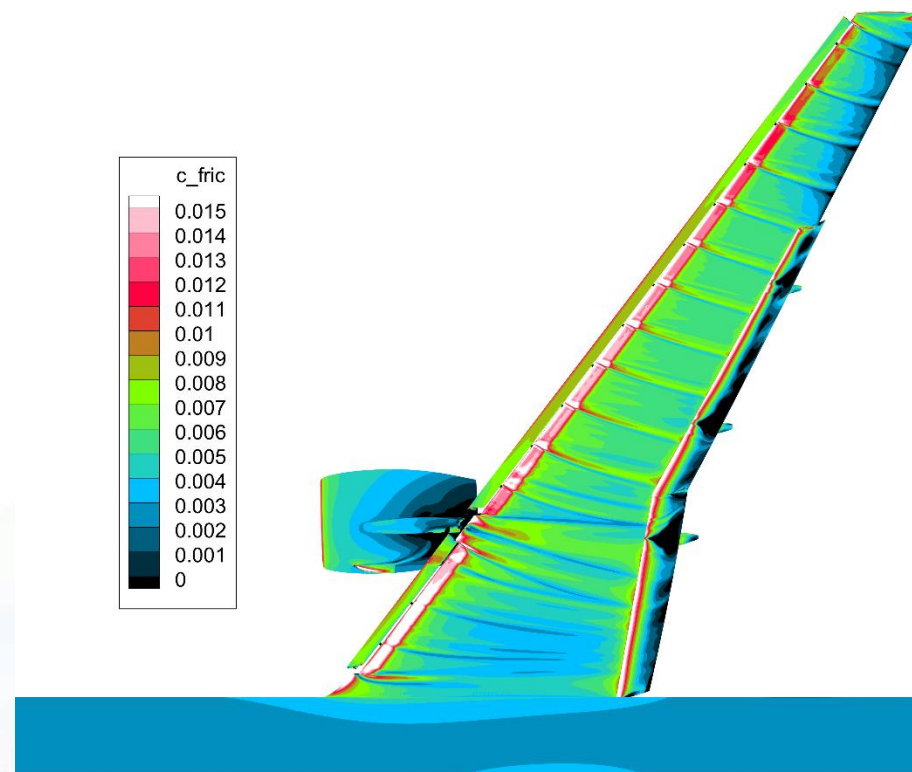
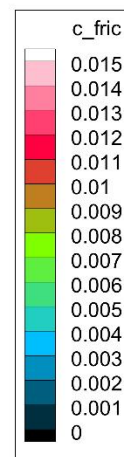
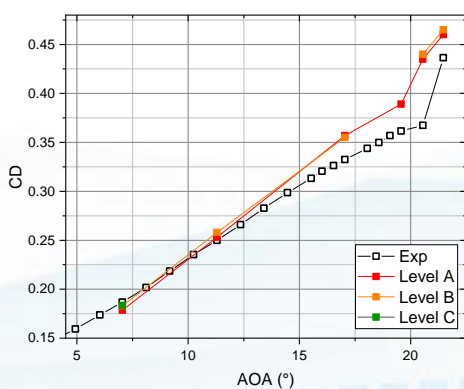
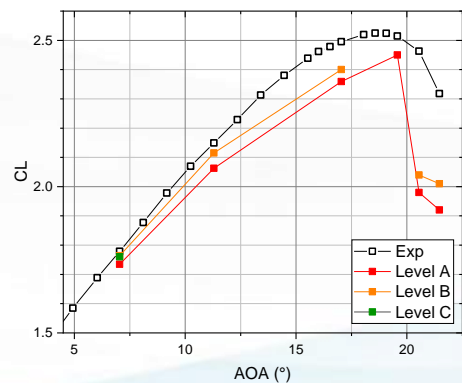
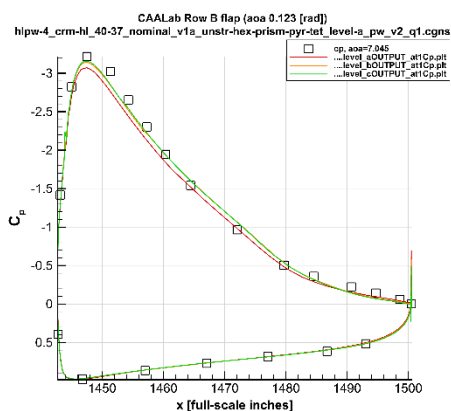
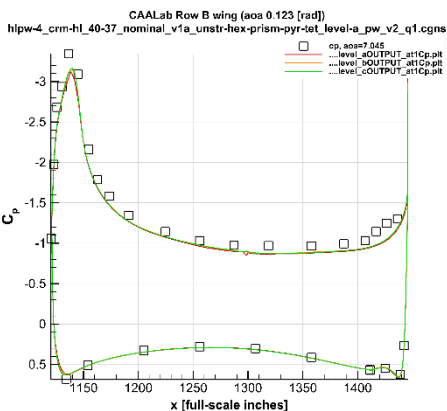
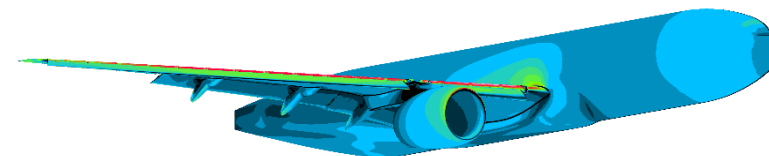
**И это очень осложняет работу..**



# Примеры «не наших» кейсов для валидации

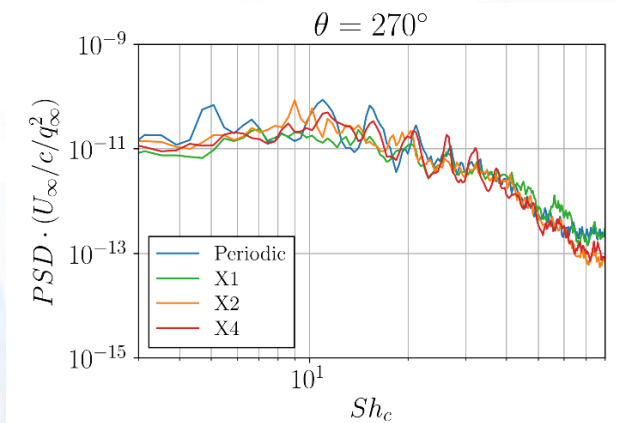
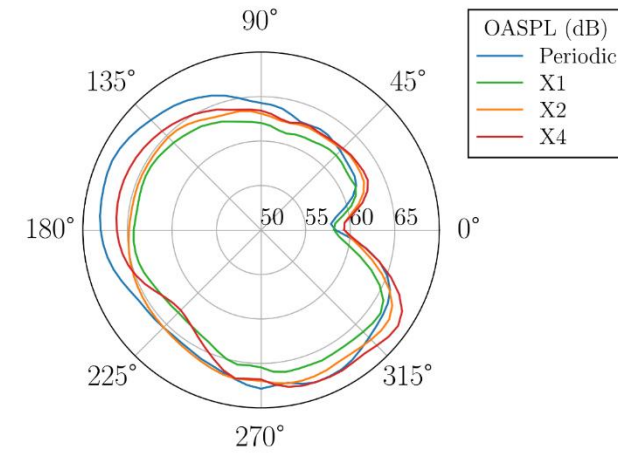
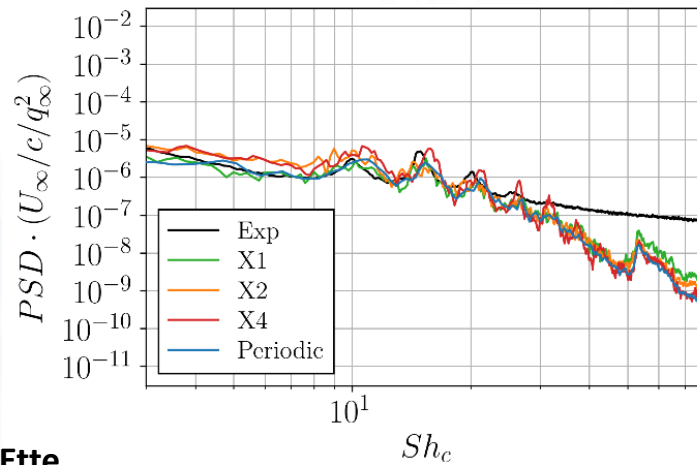
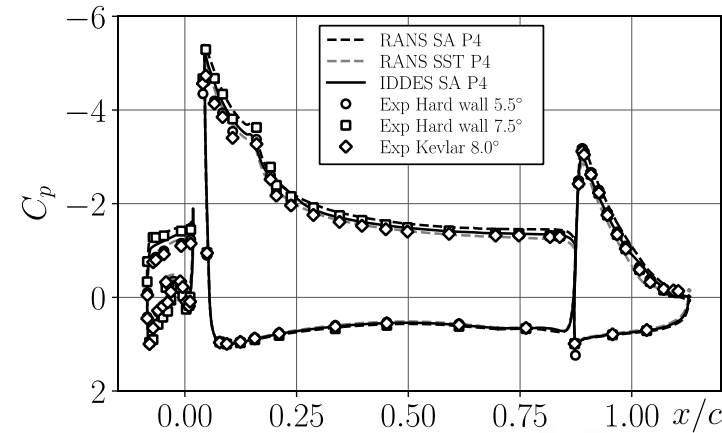
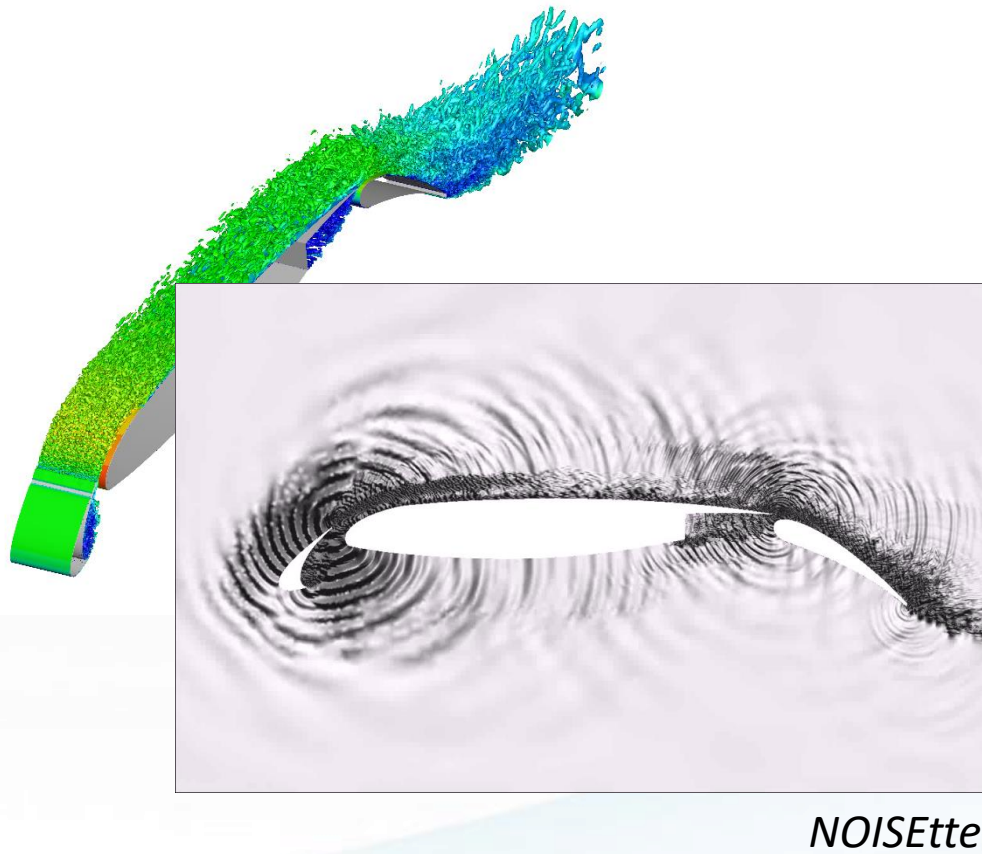
4th AIAA CFD High Lift Prediction Workshop, 2021

Геометрия: NASA High Lift Common Research Model (10%-scale)



# Примеры «не наших» кейсов для валидации

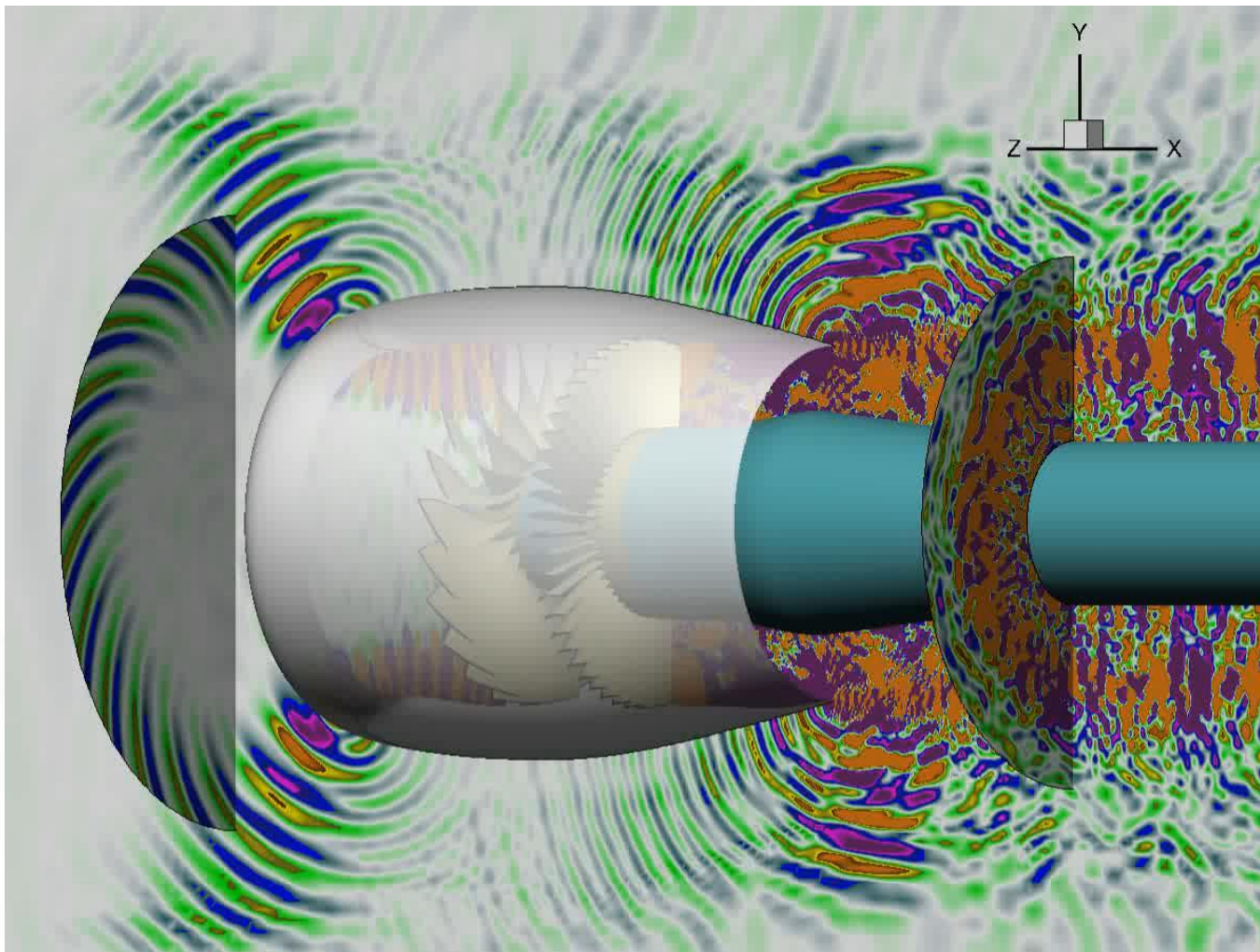
## Трехкомпонентный профиль 30P30N. Эксперимент NASA, 2014



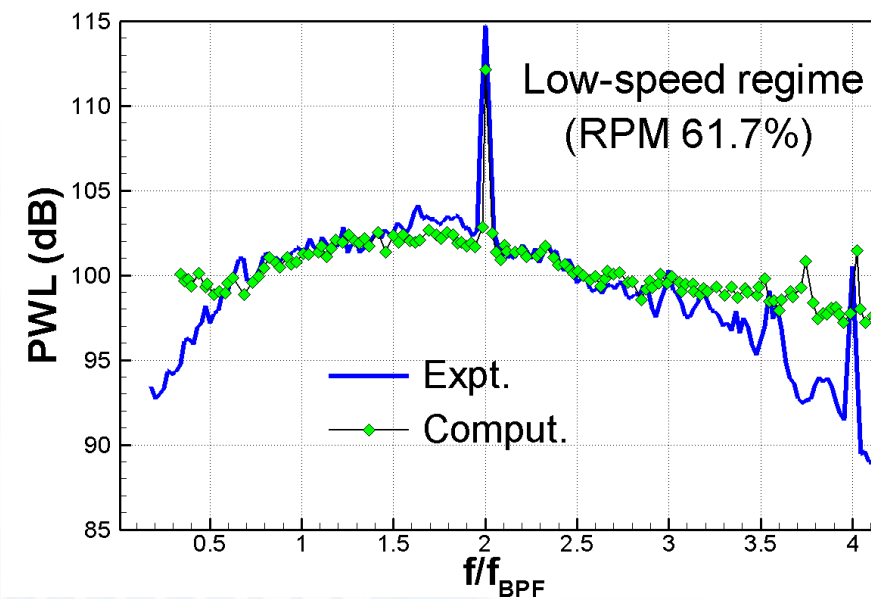




## Примеры «не наших» кейсов для валидации

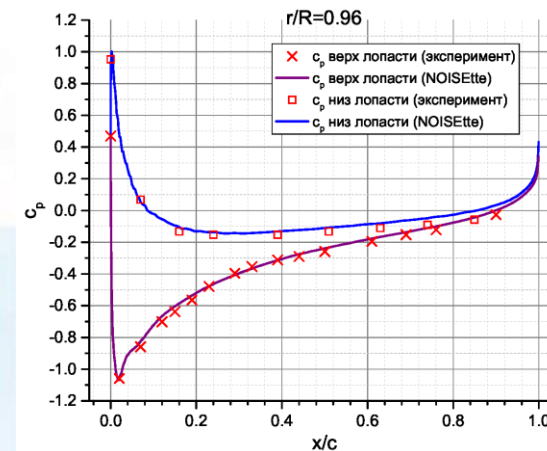
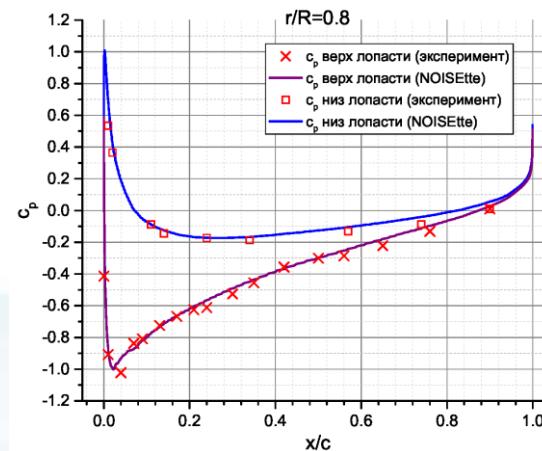
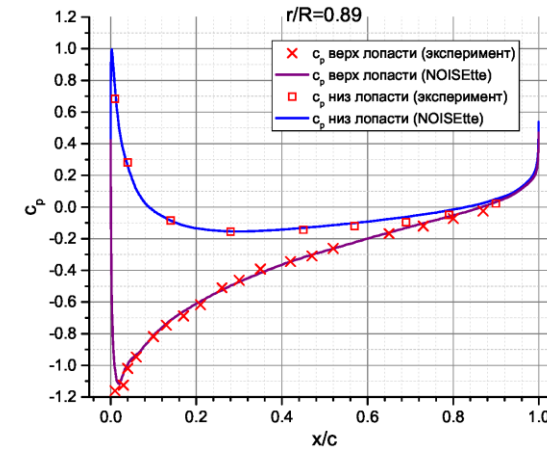
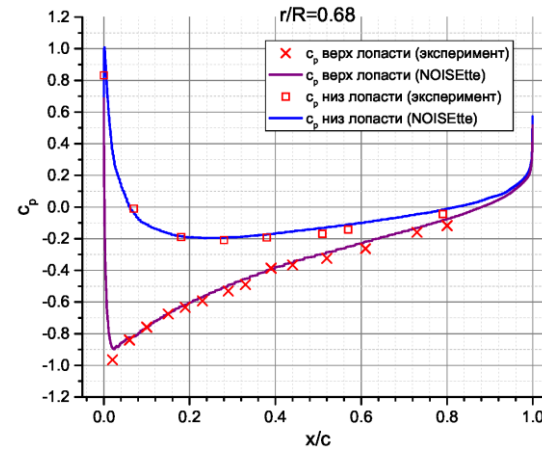
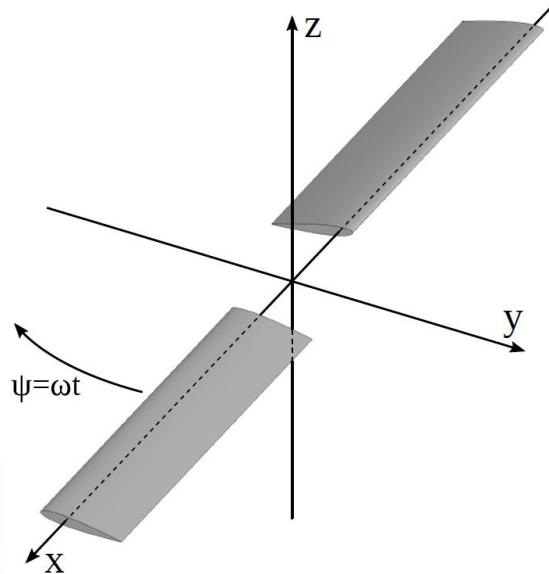


Расчеты выполнены: СПбПУ Петра Великого, CAT Lab, код NTS



# Примеры «не наших» кейсов для валидации

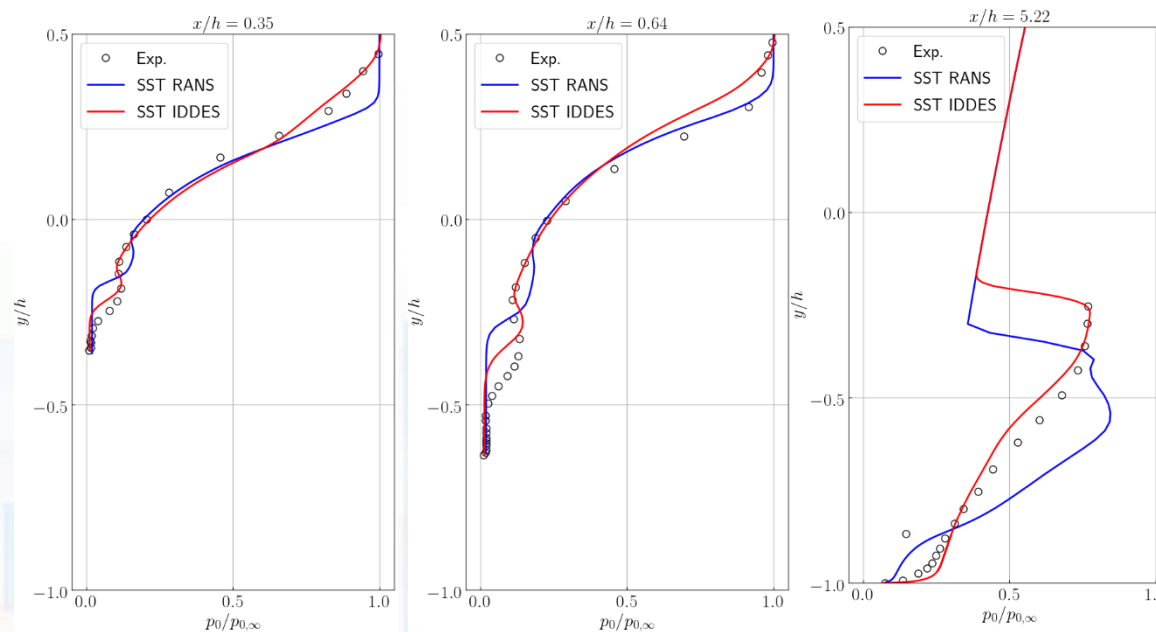
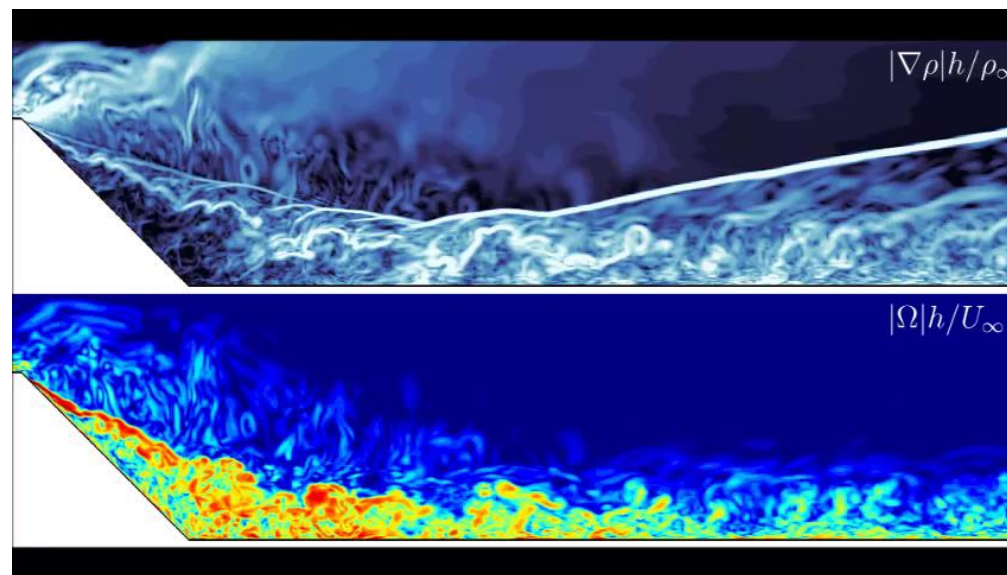
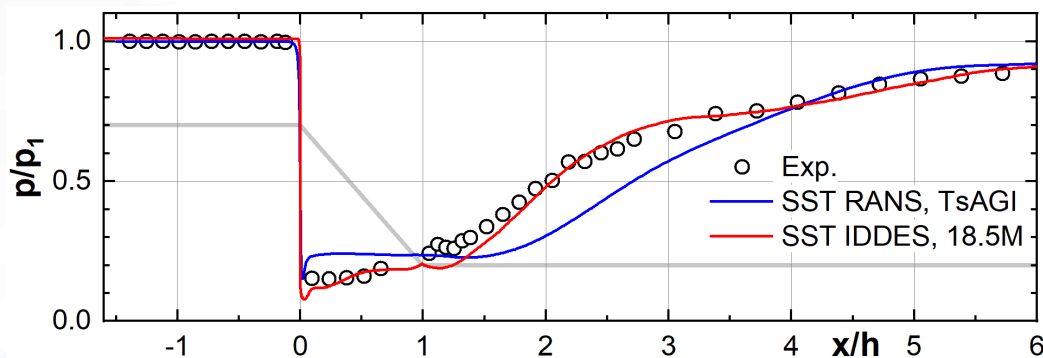
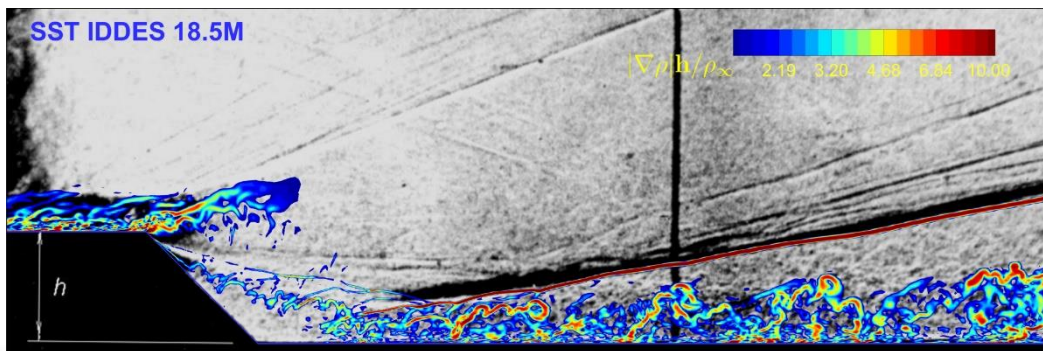
## Винт Caradonna&Tung, 1981





# Пример «нашего» кейса для валидации: сверхзвуковое обтекание наклонного обратного уступа, $M=3$

Эксперимент А.А. Желтоводова, ИТПМ СО РАН  
по заказу ЦАГИ (С.М. Босняков)



## 9. Российские конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике»

Проблем и вопросов, связанных с вычислительным экспериментом в аэроакустике и нестационарной аэродинамике много..

Именно их обсуждению посвящены регулярные

**Российские конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике»**,

проходящие в г. Светлогорске Калининградской области, начиная **с 2006 года**

Под тёплой крышей

**Всероссийского Аэроакустического Форума**

в Геленджике –

**Восьмая** такая конференция.



Фото: А.В. Горобец

## 9. Российские конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике»

С 2010 года к российским конференциям в Светлогорске добавляется  
Международный симпозиум “Computational Experiment in Aeroacoustics” (CEAA Workshops)

С 2022 года – “Computational Experiment in Aeroacoustics and associated Aerodynamics” (CEAA Workshops)

**Приглашенные лекторы** в разные годы:

В.Ф.Копьев, О.В.Руденко, М.Х.Стрелец, (Россия),  
Y.Guo, S.Lele, Ph.Morris, Ch-W.Shu, P.Spalart, Ch.Tam, (США),  
S.Rienstra (Нидерланды),  
R.Ewert, J.Delfs (Германия),  
E.Toro (Италия),  
N.Peake (Великобритания), X.Zhang (Великобритания, Гонконг),  
B.Demaret, Ph.Lafon (Франция),  
M.Abom (Швеция)

## 9. Российские конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике»

▲ Не защищено | ceaa-w.imamod.ru ☆



■ **Main**

■ News

■ Important dates

■ Abstract submission

■ Workshop details

■ Venue

**Sixth&Seventh International Workshop  
"Computational Experiment  
in Aeroacoustics and associated Aerodynamics"  
CEEA 2020-2022**

September 19 - September 24, 2022  
Svetlogorsk, Russia



# VIII Российская конференция ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ





# VIII Российская конференция ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ





**Спасибо!**

**Успехов Форуму и его участникам!**

Доклад подготовлен в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020—2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение от 8 декабря 2020 г. № 075-11-2020-023).