

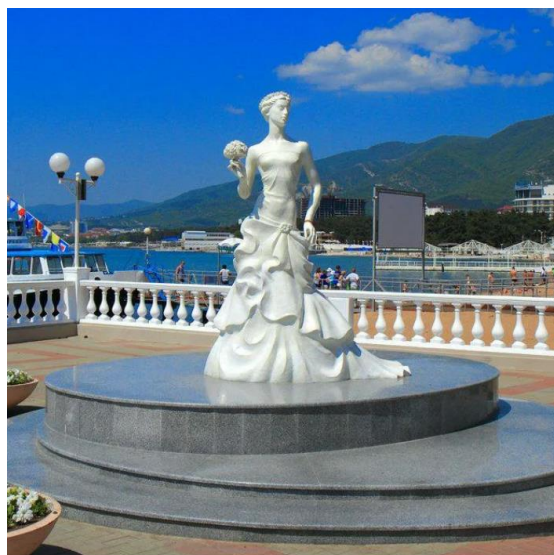


Расчетное исследование как неотъемлемая часть методики эксперимента в аэродинамических трубах

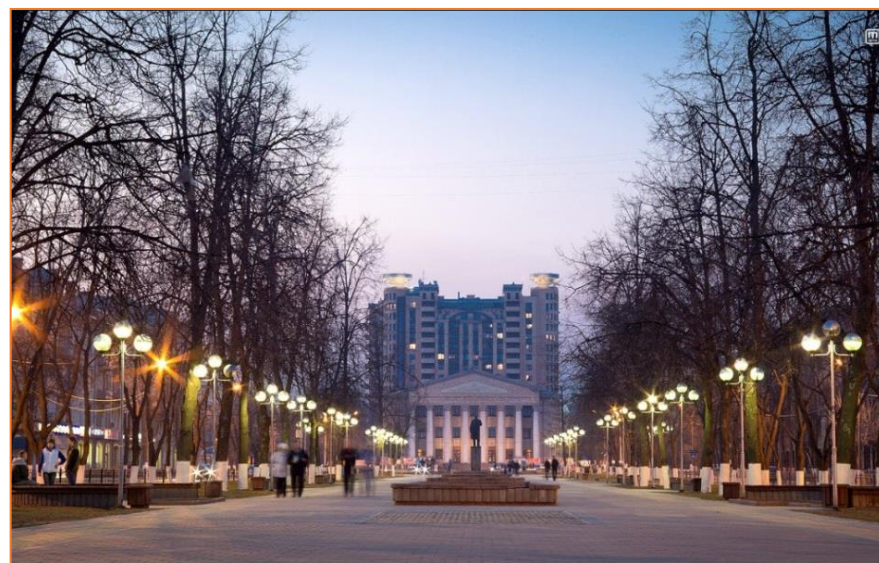
С. М. Босняков, М. Ф. Енгулатова, И. А. Курсаков,

С. В. Михайлов, В. А. Талызин

Геленджик



Жуковский



Дорожная карта

- **Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты**
- Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы
- Оценки реальных временных затрат
- Коррекция экспериментальных данных
- Физические факторы, многодисциплинарность, влияние числа Re
- Пример практического применения методики
- Заключение

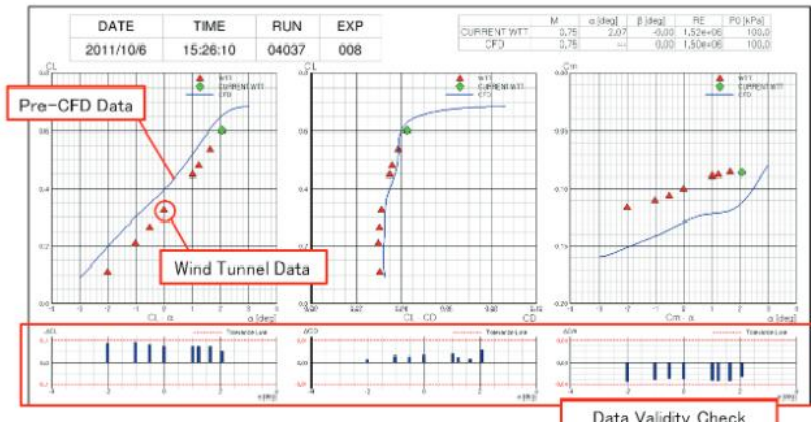
CFD группа в «экипаже» АДТ (Реализовано в ЦАГИ, EWT, JAXA, NASA)



(a) DLR-F6 model mounted in the test section of JAXA TWT1.



(b) Display setting for operation (balance, pressure sensor, PIV, PSP compared with CFD).



- Суперкомпьютер в АДТ
- Расчет в темпе эксперимента
- Сопряженные методики
- Восполнение и коррекция
- Выдача потребителю

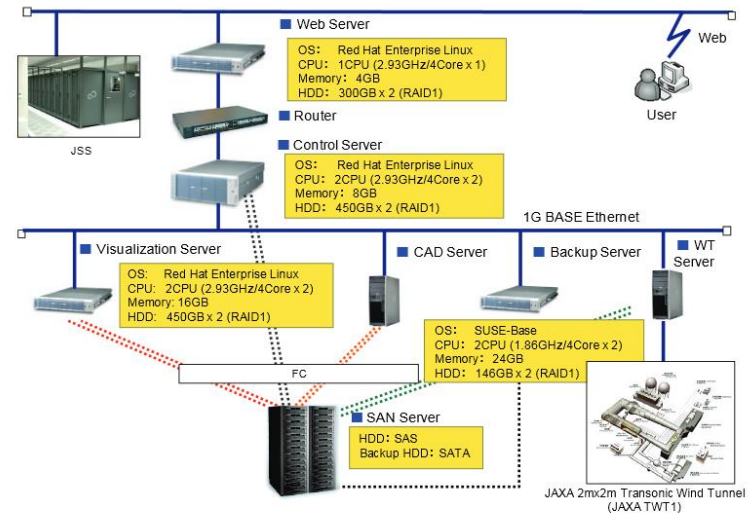
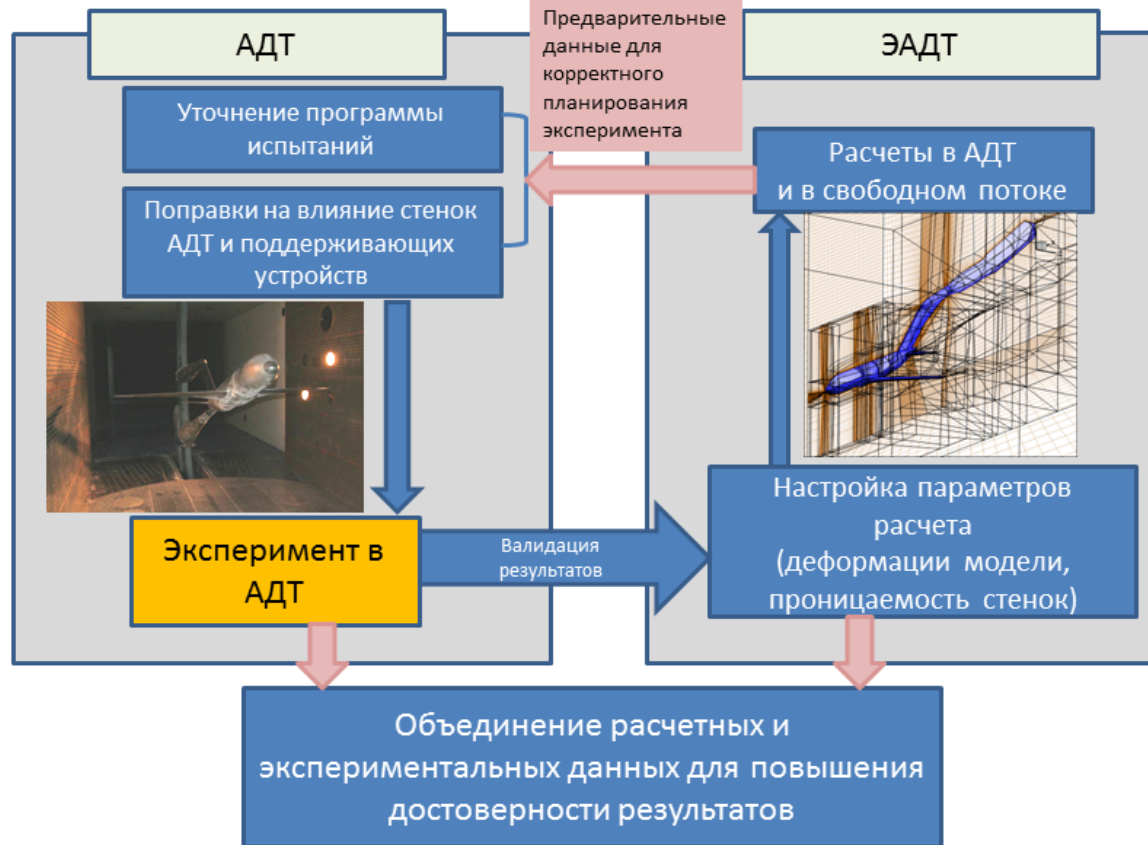
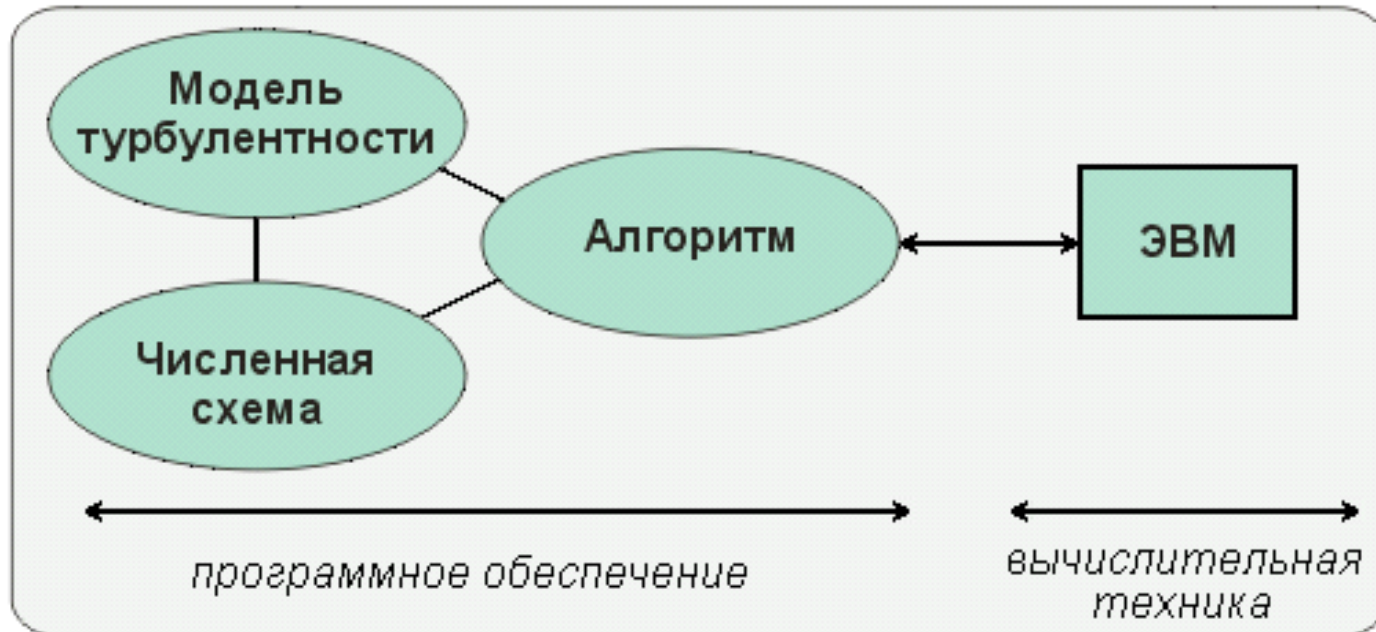


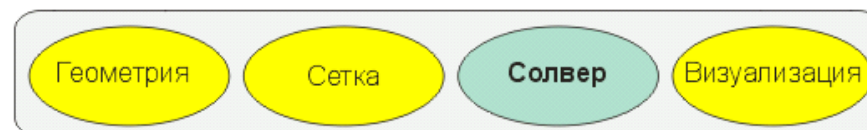
Схема взаимодействия ЭАДТ и АДТ



Компоненты Программного Обеспечения ЭАДТ



Программный продукт



Модуль многодисциплинарной оптимизации

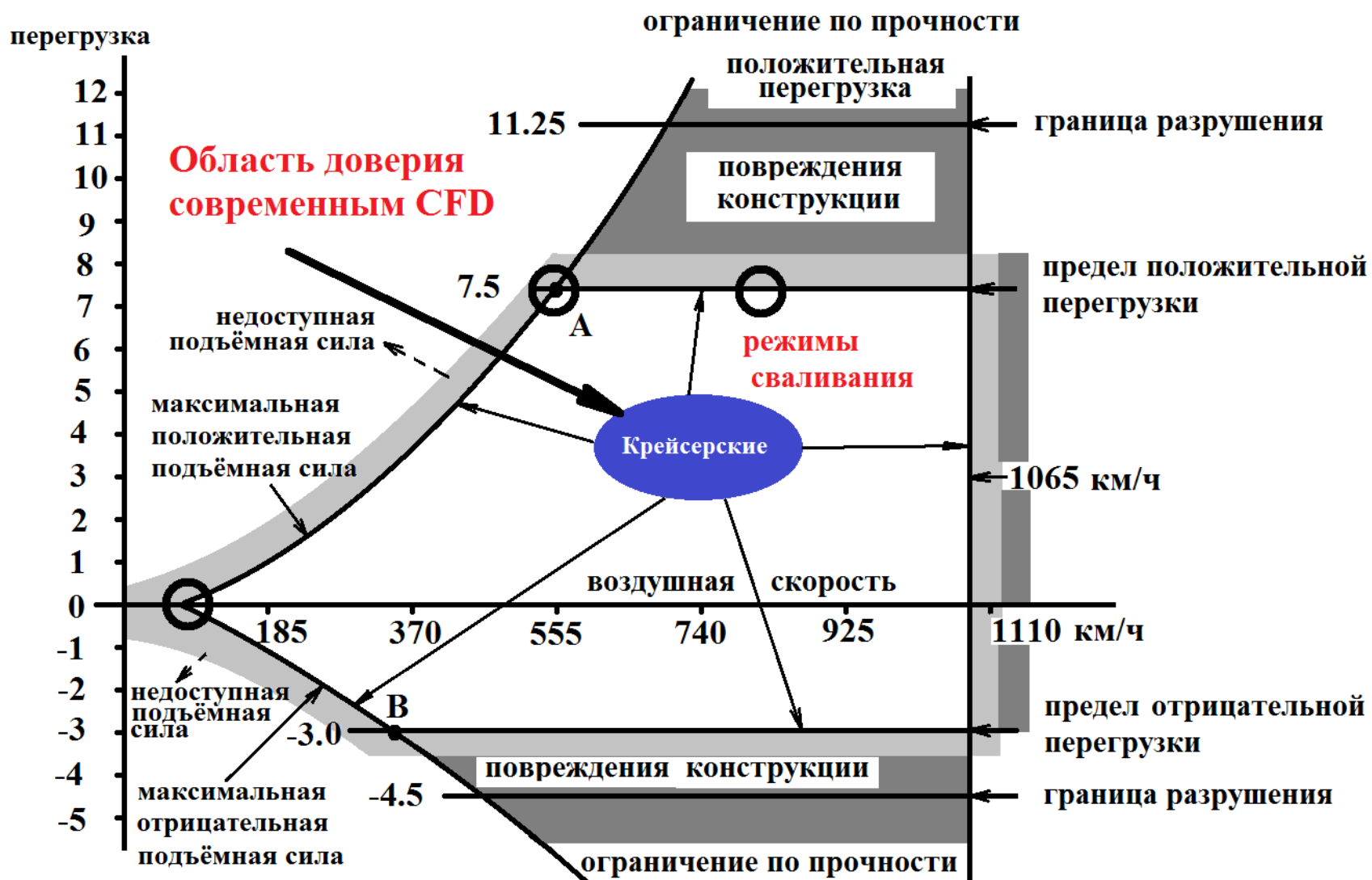


Под руководством А. Лысенкова (Н. Зленко, А. Савельев)

Дорожная карта

- Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты
- **Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы**
- Оценки реальных временных затрат
- Коррекция экспериментальных данных
- Физические факторы, междисциплинарность, влияние числа Re
- Пример практического применения методики
- Заключение

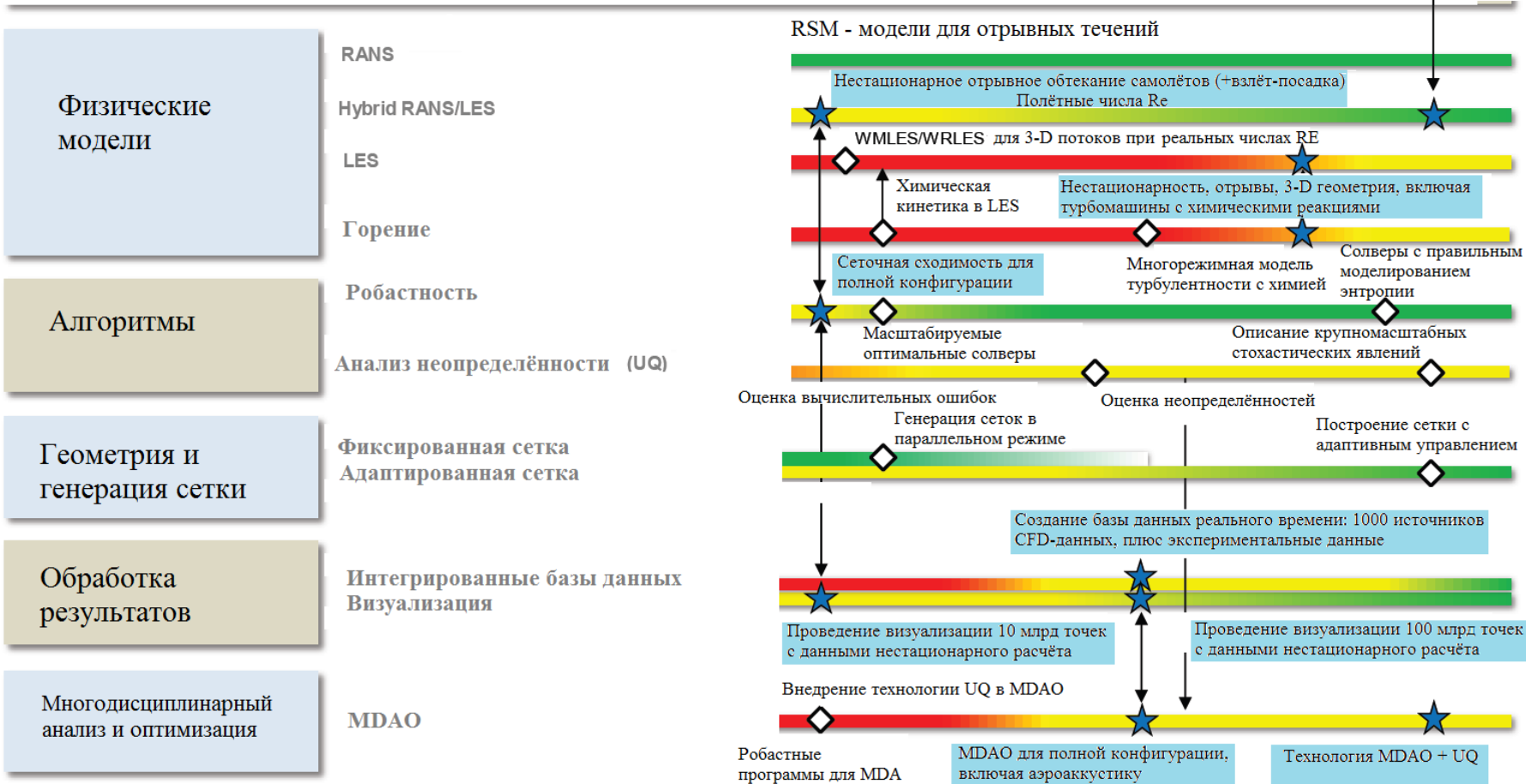
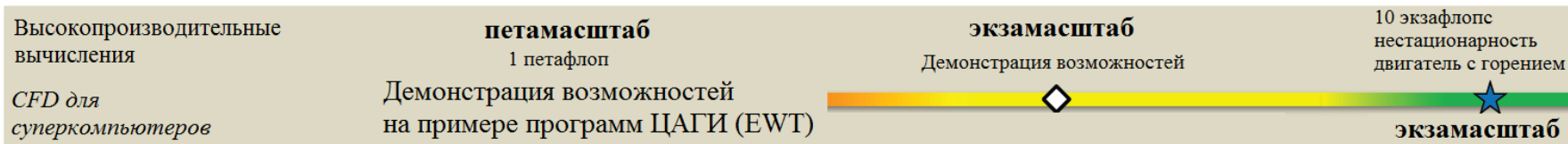
Пределы применимости технологии расчета



TRL низкий
 средний
 высокий

◇ Готовность технологии

★ Демонстрация технологии

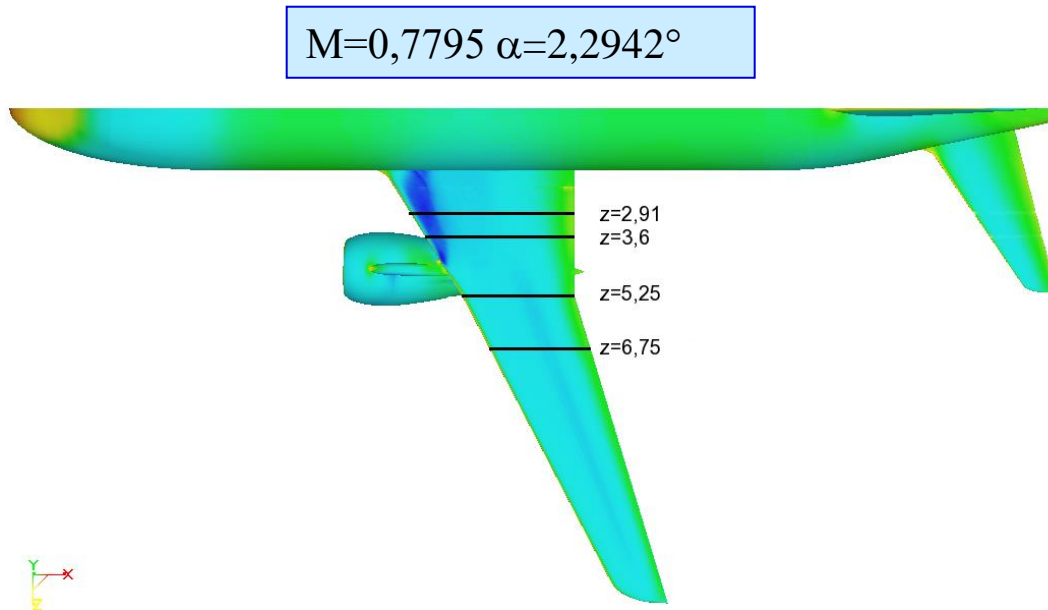


Дорожная карта

- Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты
- Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы
- **Оценки реальных временных затрат**
- Коррекция экспериментальных данных
- Физические факторы, многодисциплинарность, влияние числа Re
- Пример практического применения методики
- Заключение

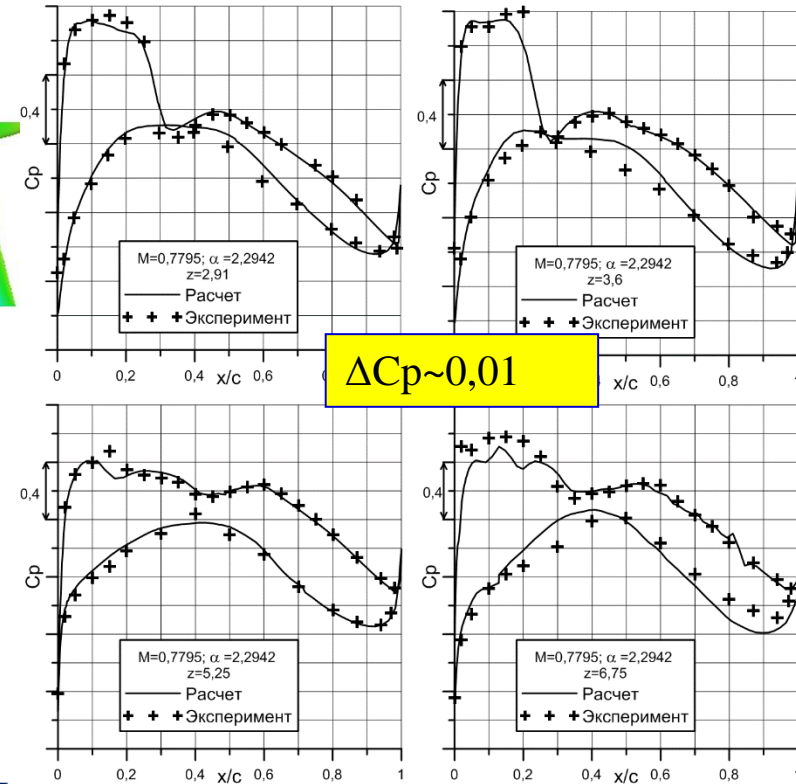
Моно-дисциплинарные задачи в нелинейной постановке

RANS, SST (Рутинные расчеты)



Крейсерский режим (безотрывное обтекание)

Компьютер ЦАГИ

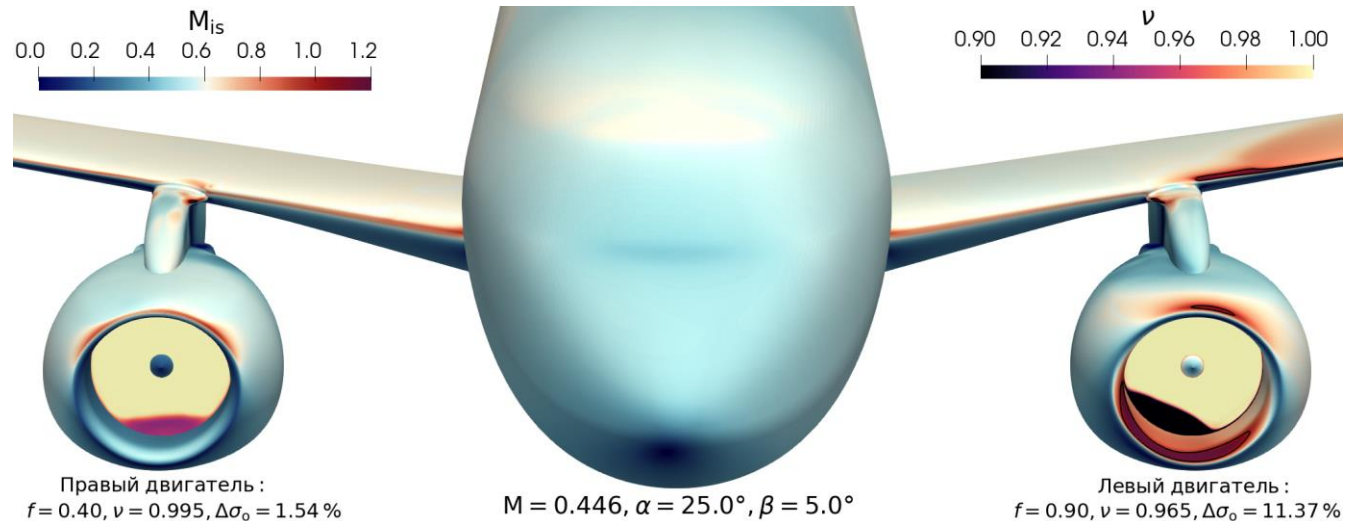


ЦАГИ-2018

CPU	RAM	Время	Всего	Scaling
500	0.35 TB	2 часа	Не ограничено	1.70

Монодисциплинарные задачи в нелинейной постановке

RANS, SST (рекордные расчеты)



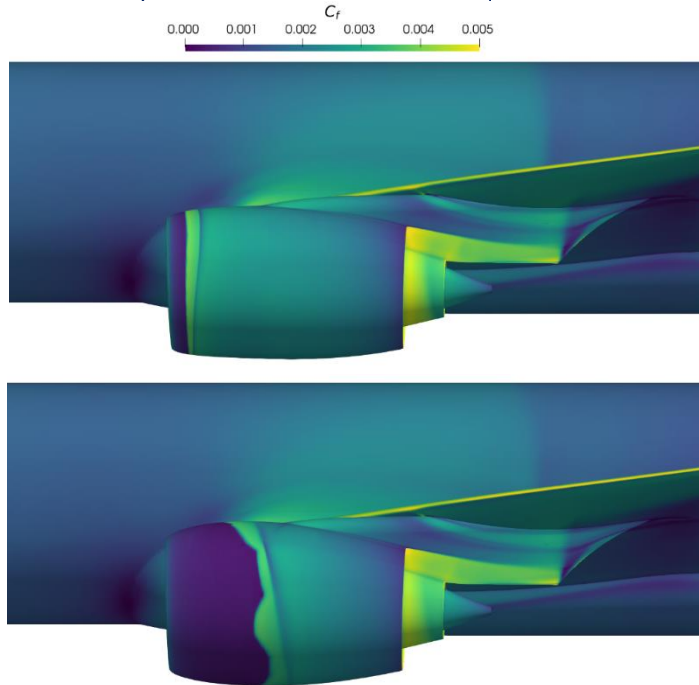
Ассиметричное обтекание за счет углов скольжения и режимов двигателей

Компьютер ВНИИЭФ

CPU	RAM	Время	Всего	Scaling
2 000	1 TB	5 часов	6 месяцев	1.75

ЦАГИ -2020

Монодисциплинарная оптимизация RANS, SA. Имитационная модель. EGO



Год	2020
Геометрия	Компоновка
Физ. модель	RANS + ЛТП
Целевая	Потери эфф. тяги ЛА
Ограничения	Сопло, ВЗ, C_u , $M_{кр}$
Режимы	5 шт.: крейсер (3 шт.), взлёт, бок. ветер
Сетка	60 млн ячеек

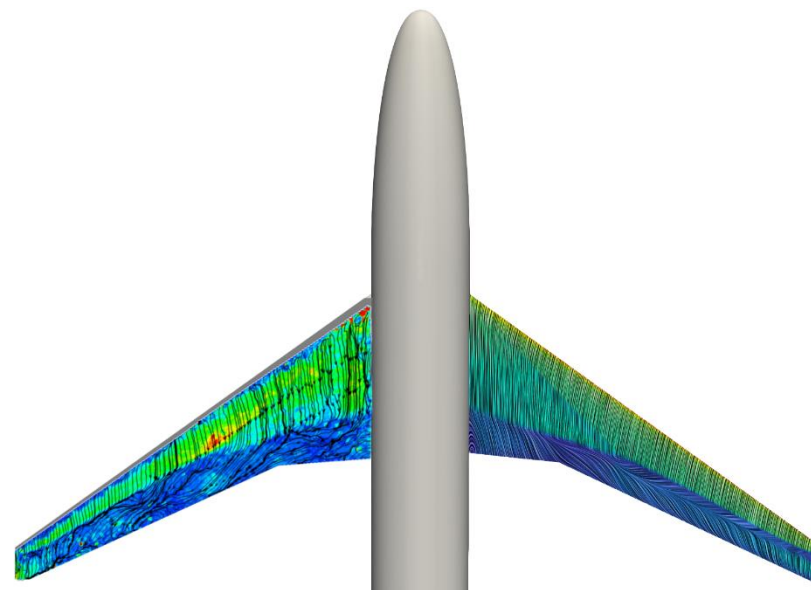
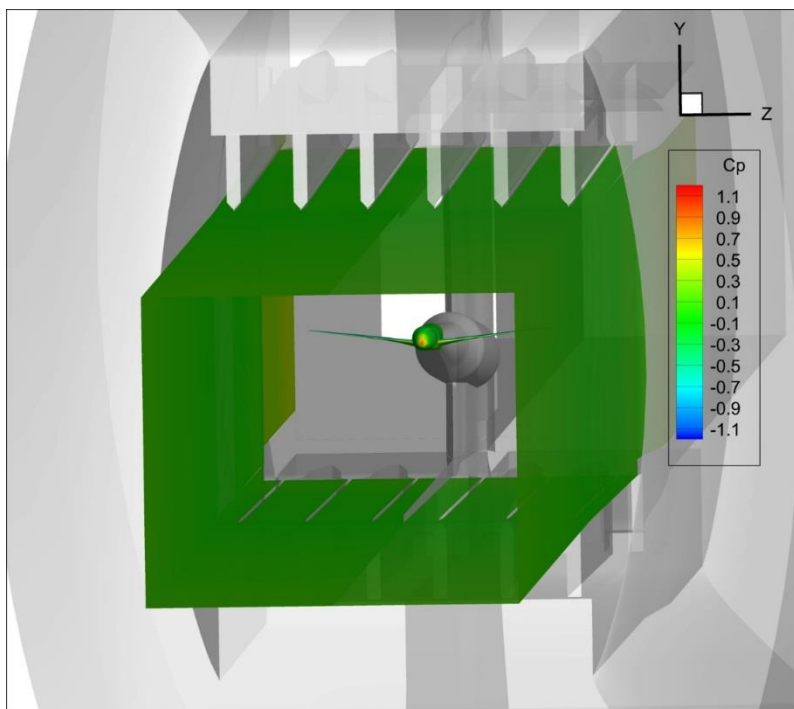
Компьютер ВНИИЭФ

CPU	RAM	Время	Всего	Scaling
2 000	0.5 TB	2 нед.	18 месяцев	1.65

ЦАГИ -2020

Многодисциплинарные задачи в нелинейной постановке

RANS, SST, аэроупругость



Обтекание модели в условиях АДТ

Компьютер ЦАГИ

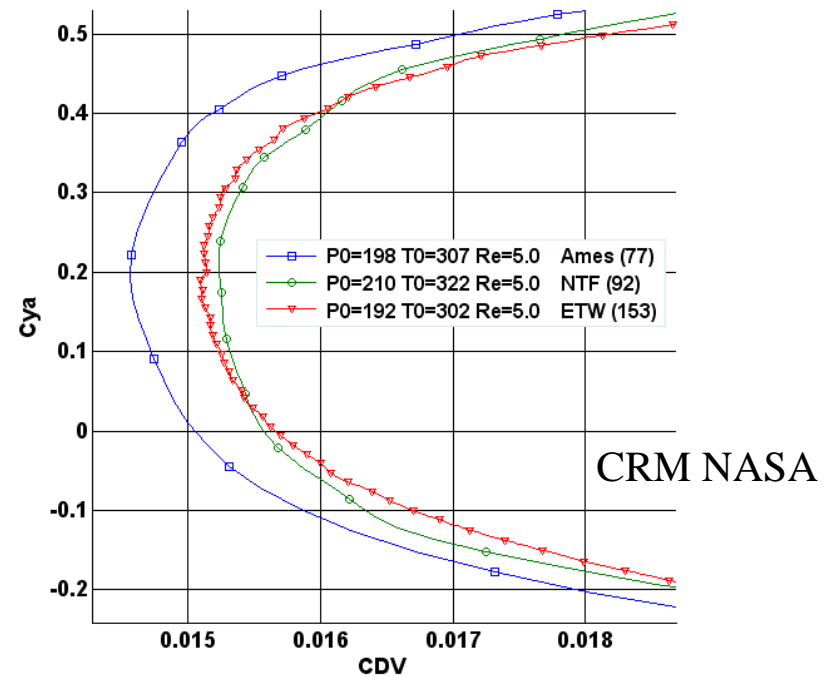
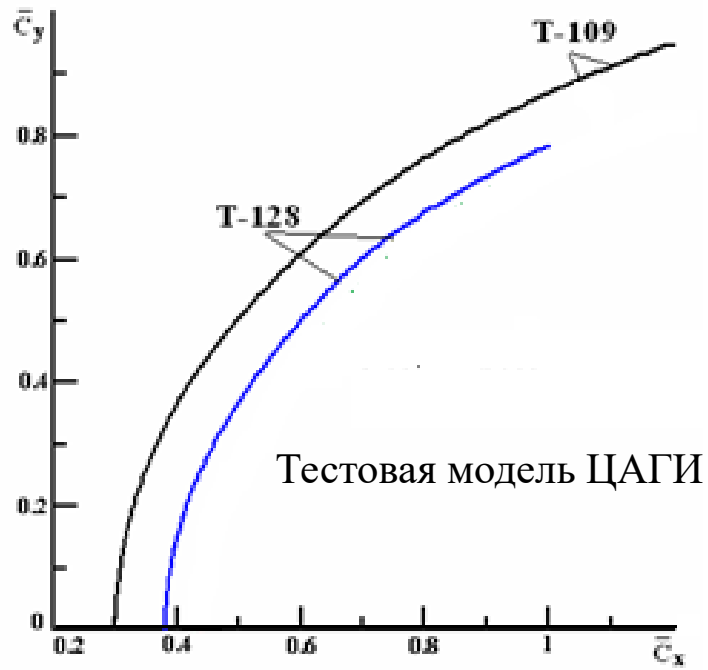
CPU	RAM	Время	Всего	Scaling
500	200 GB	5 часов	1 месяц	1.75

ЦАГИ - 2021

Дорожная карта

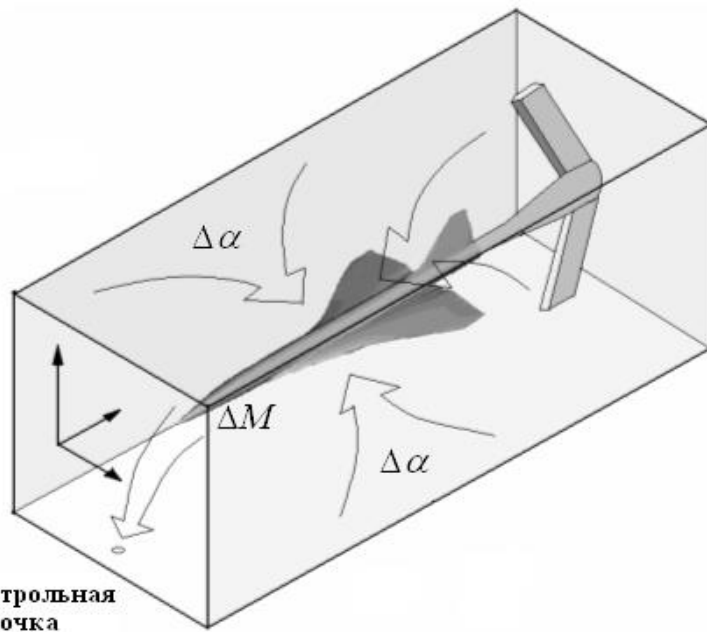
- Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты
- Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы
- Оценки реальных временных затрат
- **Коррекция экспериментальных данных**
- Физические факторы, многодисциплинарность, влияние числа Re
- Пример практического применения методики
- Заключение

Данные эксперимента в различных АДТ отличаются

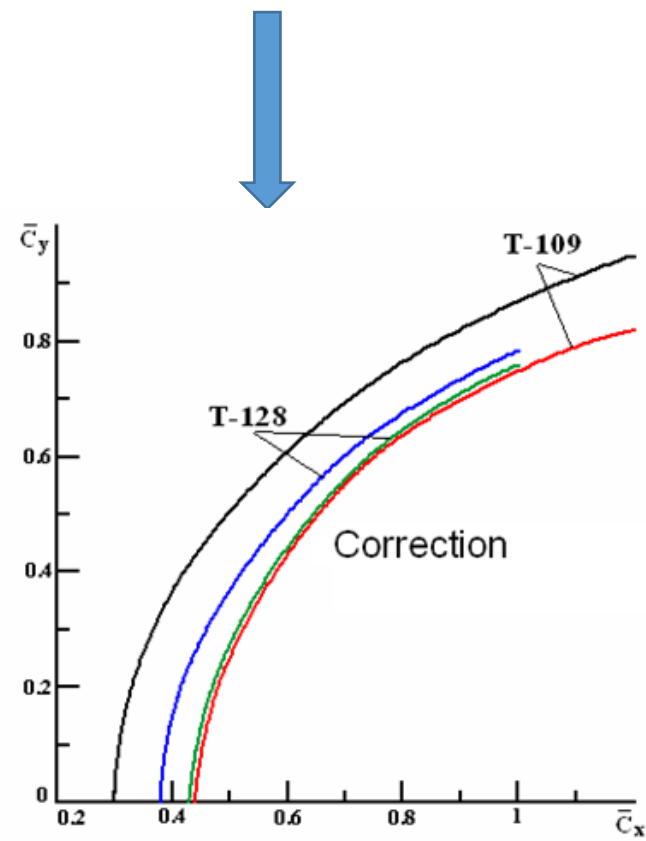


Коррекции эксперимента. Влияние стенок.

Коррекция

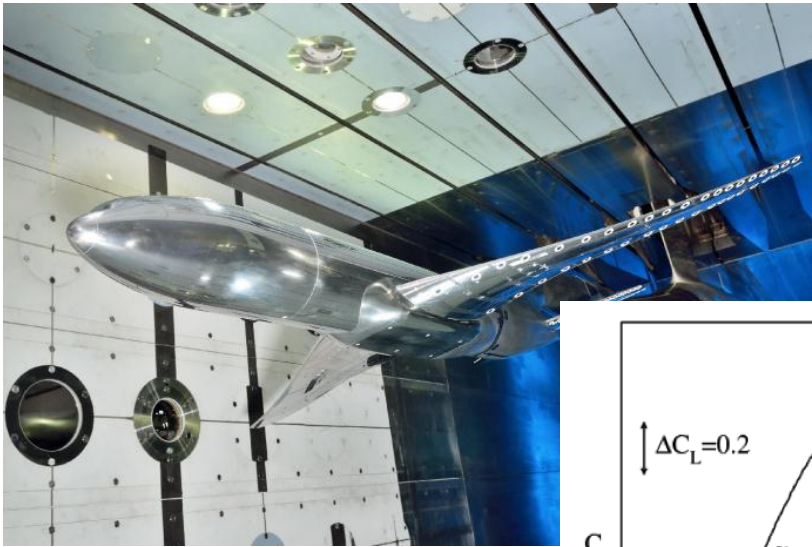


Изменение числа
M и угла атаки

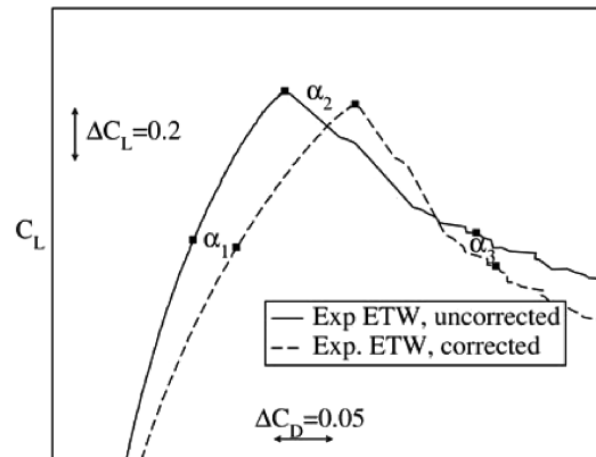


Методику разработали А.Р. Горбушин, С.А. Глазков (ЦАГИ)

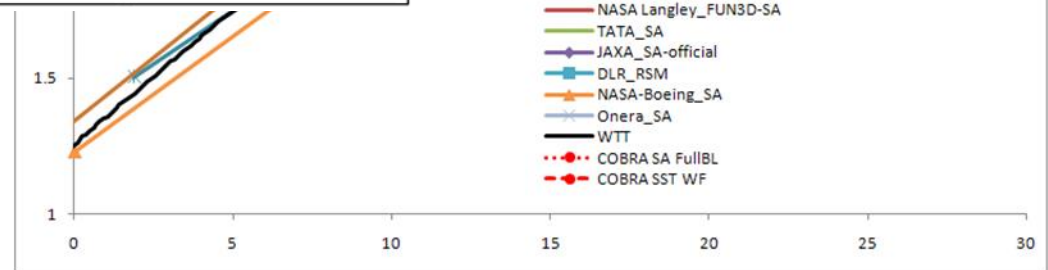
Коррекции эксперимента. Влияние стенок.



(Фотография с сайта ETW)

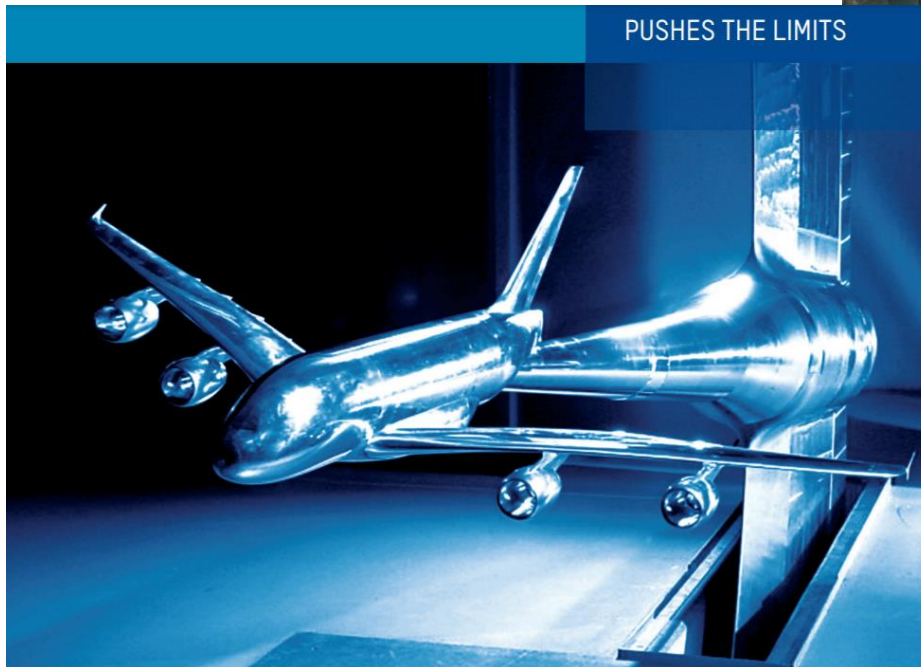


Стенки АДТ занижают значения максимальной подъемной силы и угла атаки.



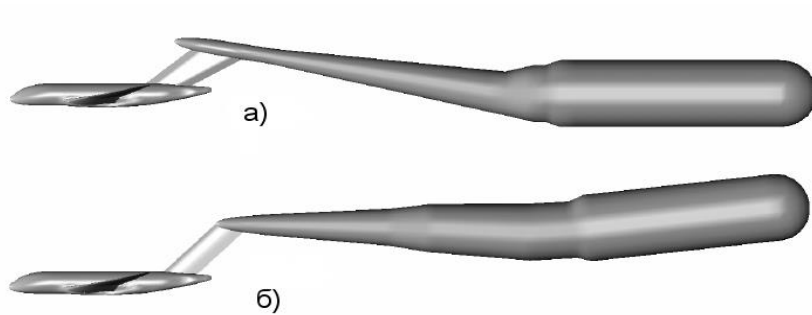
Данные HLPW-2

Коррекция эксперимента. Общий вид модели на державке



Модель в крейсерской конфигурации на державке
(фотография с сайта ETW)

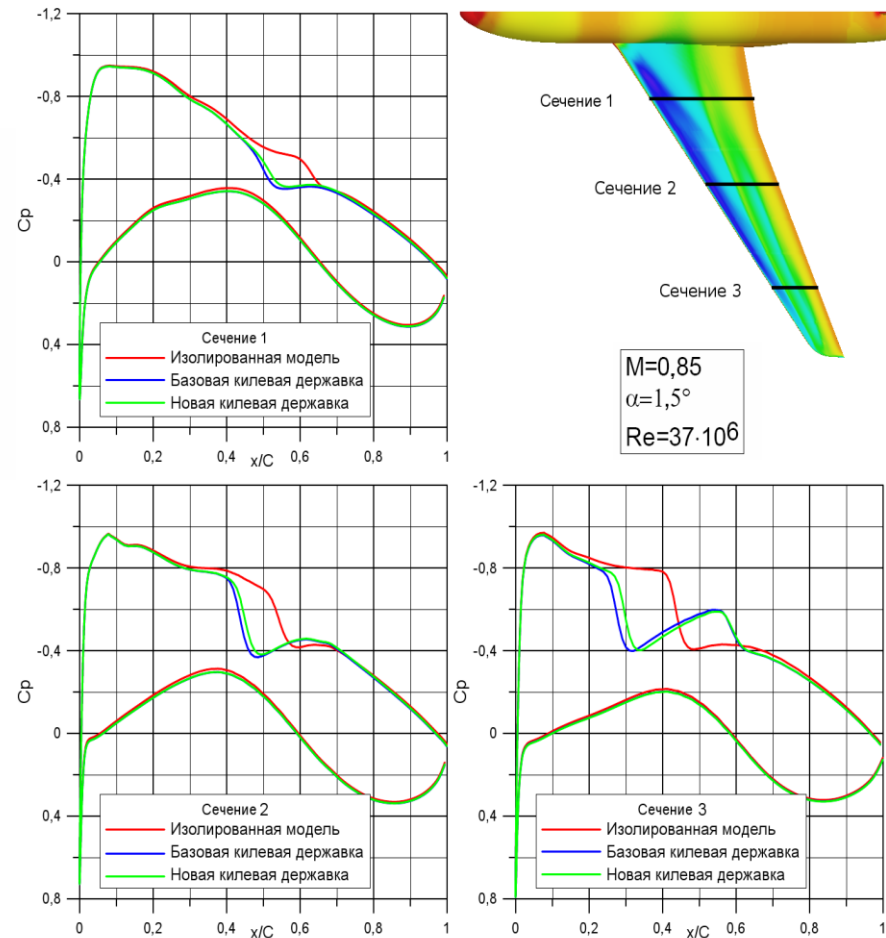
Коррекция эксперимента. Влияние державки на модель



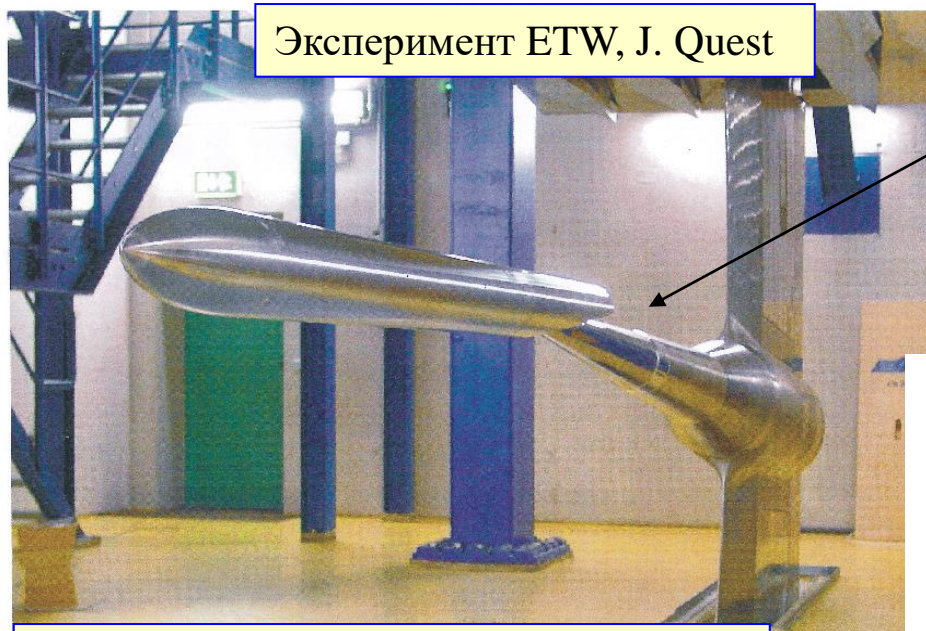
$$dC_x = 0.0017; \quad dC_y = 0.0180$$

$$\Delta M \approx 0,004$$

Расчет И.А. Курсакова



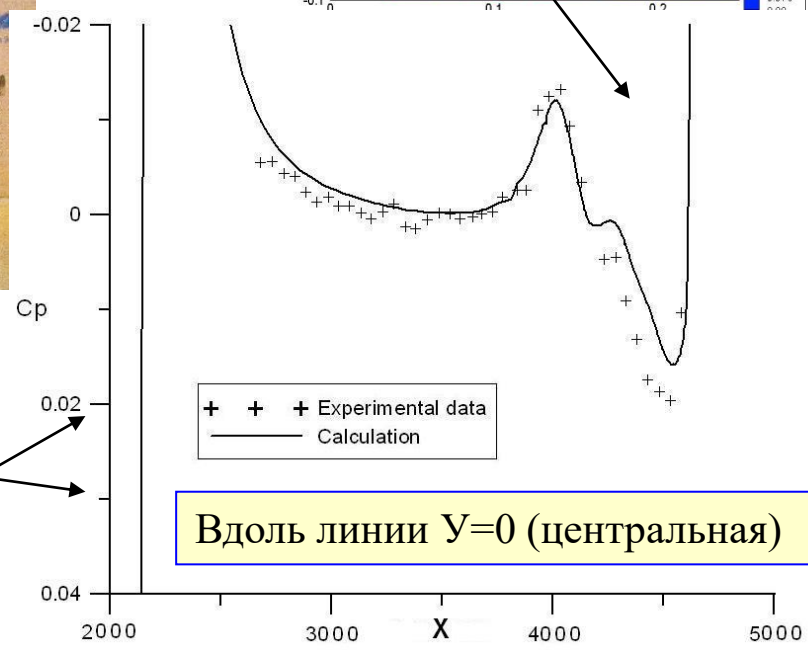
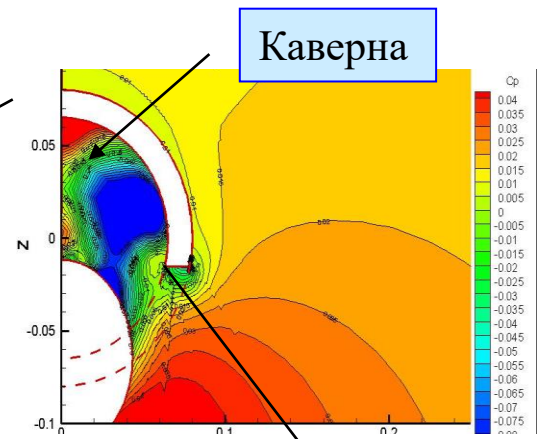
Коррекция эксперимента. Влияние каверны на модель



Эксперимент ETW, J. Quest

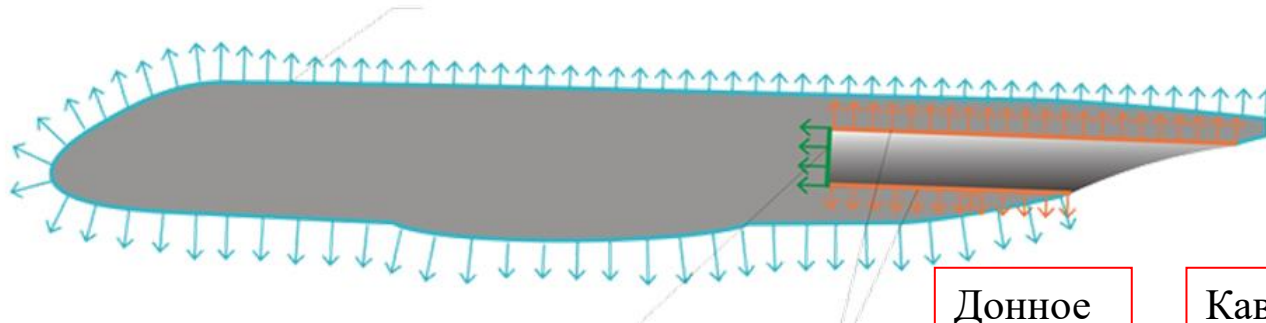
Число $M=0.85$, углы 0, 2.5, 5 градусов

Цена деления 0.01 !!!



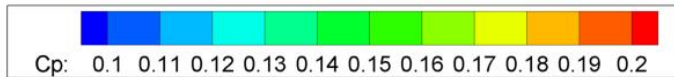
Вдоль линии $Y=0$ (центральная)

Коррекции эксперимента. Влияние каверны на модель

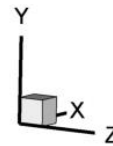


Донное

Каверна



Mach=0.8018, alpha=2.492

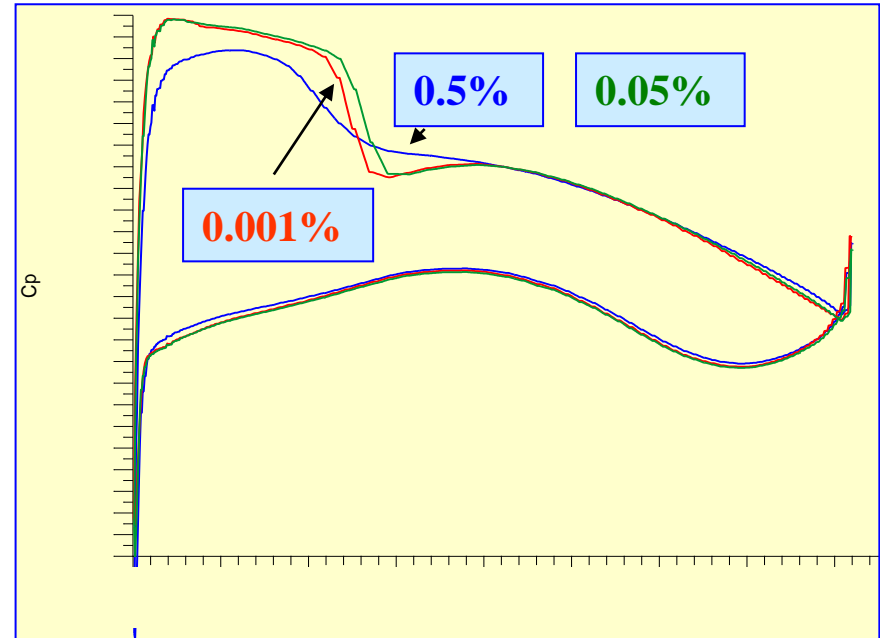
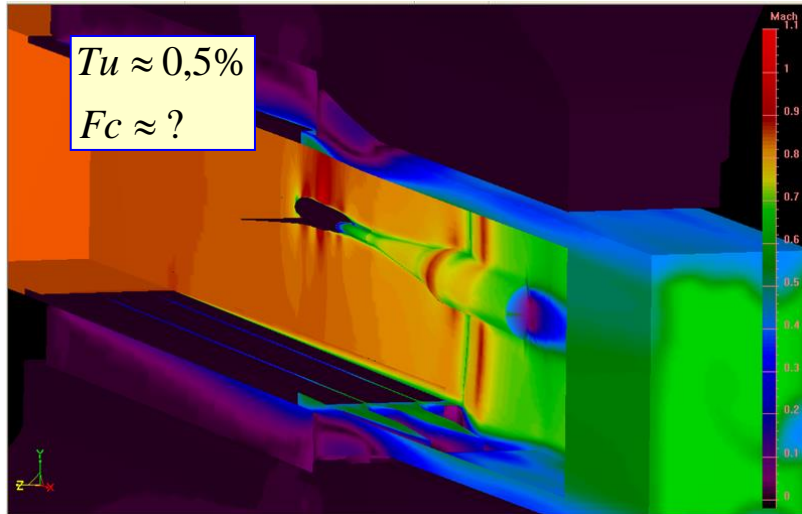


M	α [°]	$C_{x_{\text{дон}}}$	$DC_{x\alpha}$	$DC_{y\alpha}$
0.70	-1.25	0.00233	0.00009	0.0091
0.70	2.50	0.00228	0.00067	0.0089
0.80	-1.25	0.00245	0.00009	0.0096
0.80	2.50	0.00240	0.00070	0.0094
0.88	-1.25	0.00253	0.00009	0.0099
0.88	2.50	0.00244	0.00071	0.0095

Дорожная карта

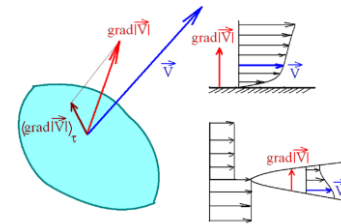
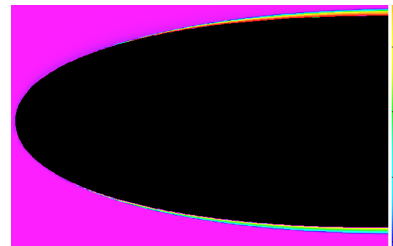
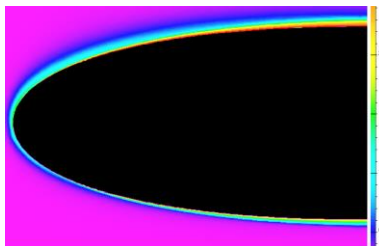
- Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты
- Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы
- Оценки реальных временных затрат
- Коррекция экспериментальных данных
- **Физические факторы, многодисциплинарность, влияние числа Re**
- Пример практического применения методики
- Заключение

Физические факторы. Влияние турбулентности



0.5%

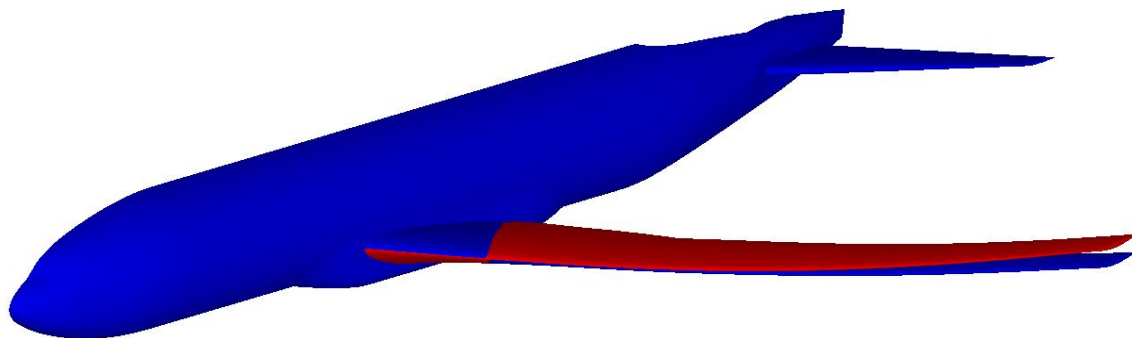
0.001%





Физические факторы. Параметр подобия по аэроупругости

Деформация зависит от материала модели и увеличивается с ростом скоростного напора q .



В классических АДТ, как правило, необходимость увеличивать скоростной напор приводит к нарушению условия геометрического подобия.

В криогенных АДТ при уменьшении температуры появляется возможность выполнения условия по геометрическому подобию. Для этого различные испытания проводятся при $q/E = \text{const}$, где q - скоростной напор
 E - модуль Юнга

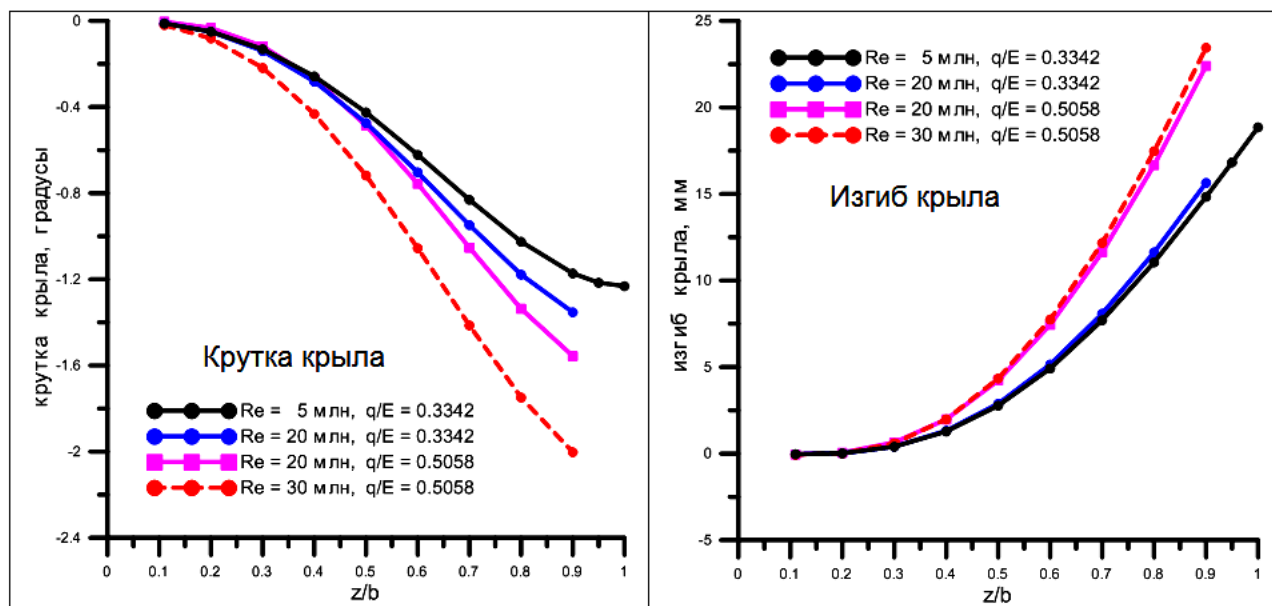
Возможность изменять одновременно давление и температуру в криогенных АДТ позволяет разделить влияние числа Re и аэроупругих эффектов



Маркеры STP для измерения деформаций в эксперименте



Физические факторы. Крутка и изгиб крыла модели



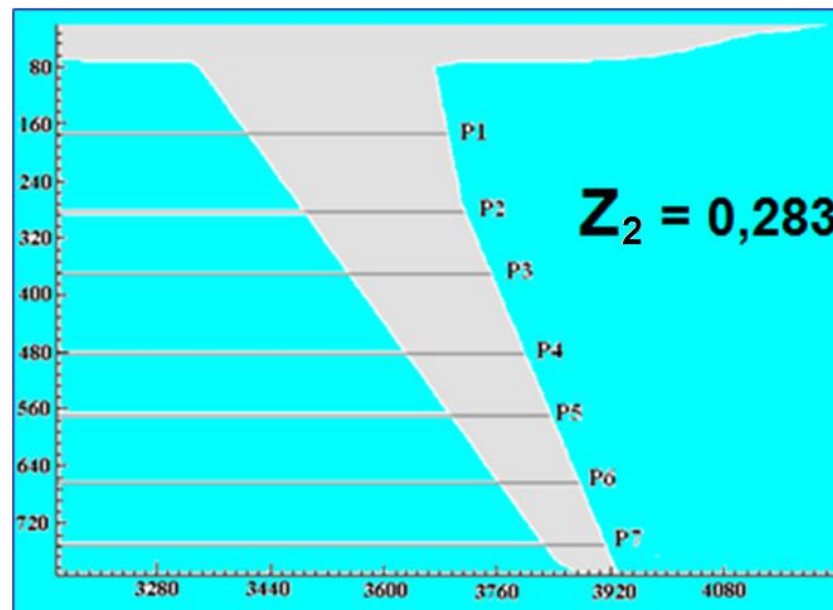
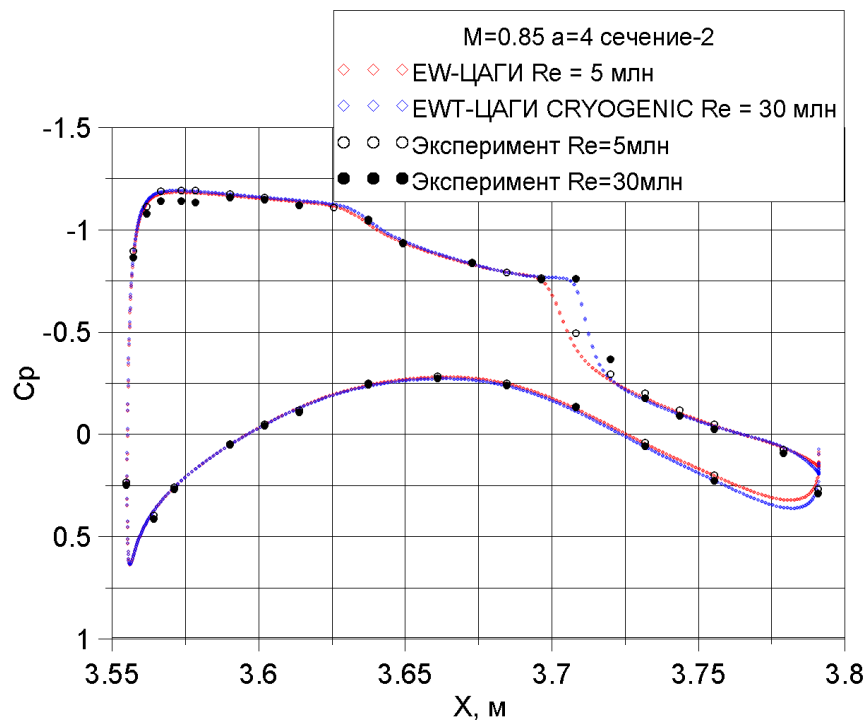
Сравнение влияния деформаций различных типов для $Re = 5$ млн

	Без деформации	Крутка	Крутка+изгиб
C_x	0.0443	0.0397	0.0393
C_y	0.648	0.627	0.625



Физические факторы. Влияние числа Re

Сопоставление расчетов с экспериментальными данными ETW
для $M=0.85$, $\alpha=4^\circ$, $Re=5$ млн и $Re=30$ млн

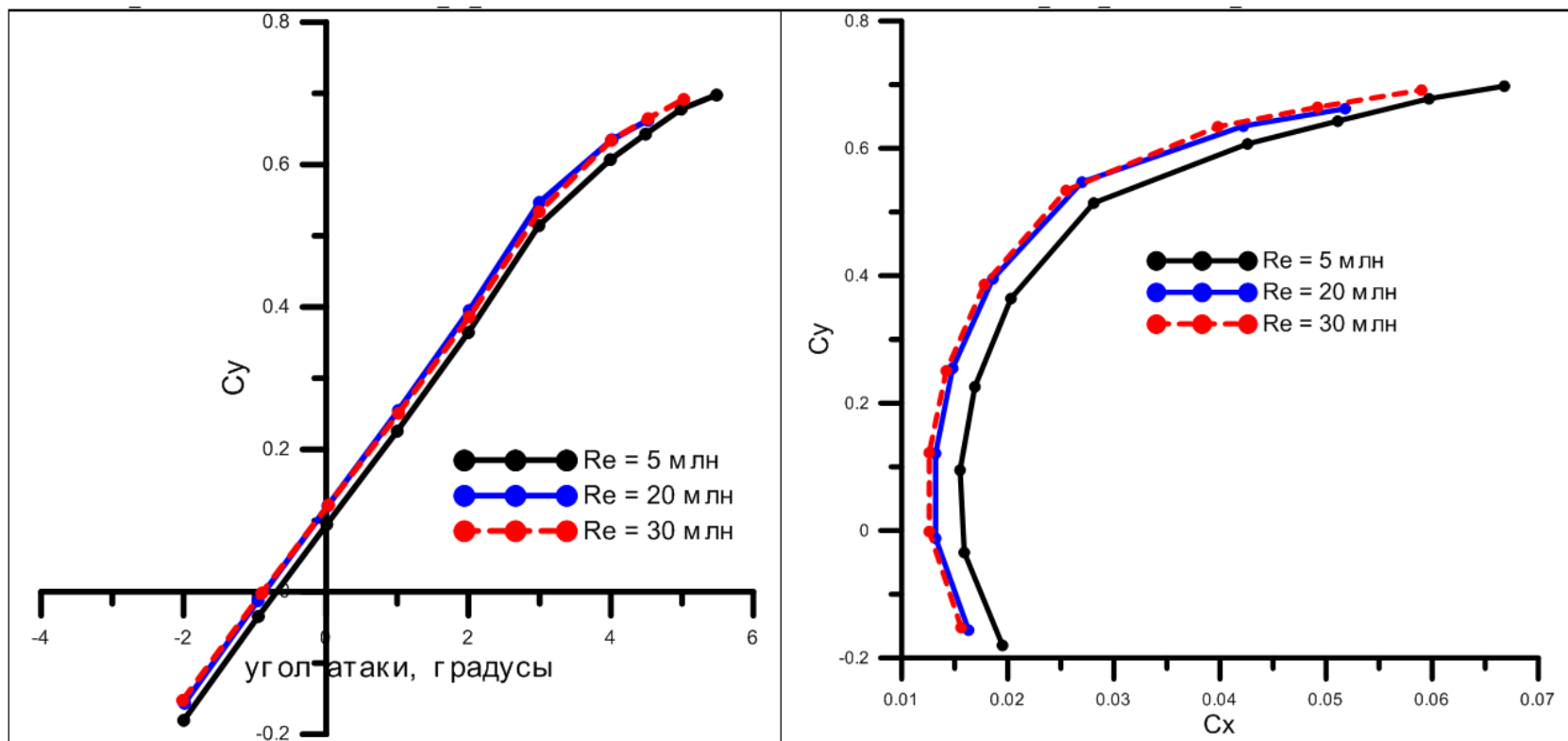


Экспериментальные данные получены в ETW по проекту ESWIRP при участии ЦАГИ



Физические факторы. Влияние числа Re на характеристики

$M=0.85$, $\alpha=-2^\circ \dots 5^\circ$, $Re=var$



Эксперименты для $Re = 5$ млн и $Re = 30$ млн проводились при одном значении параметра q/E .
При $Re=5$ млн использовался турбулизатор

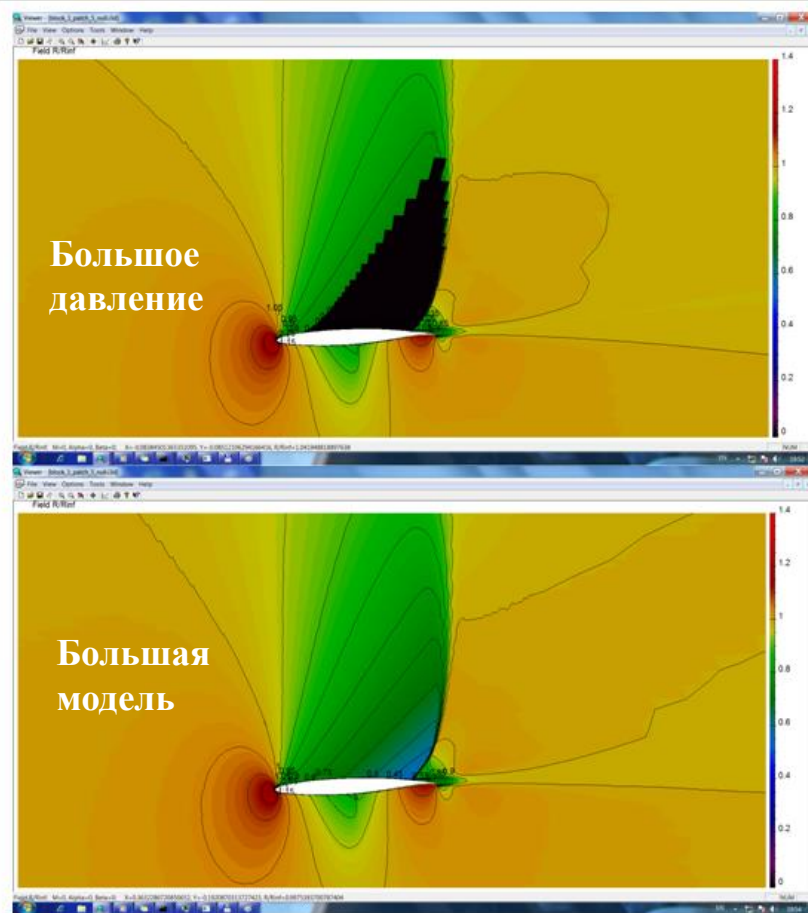
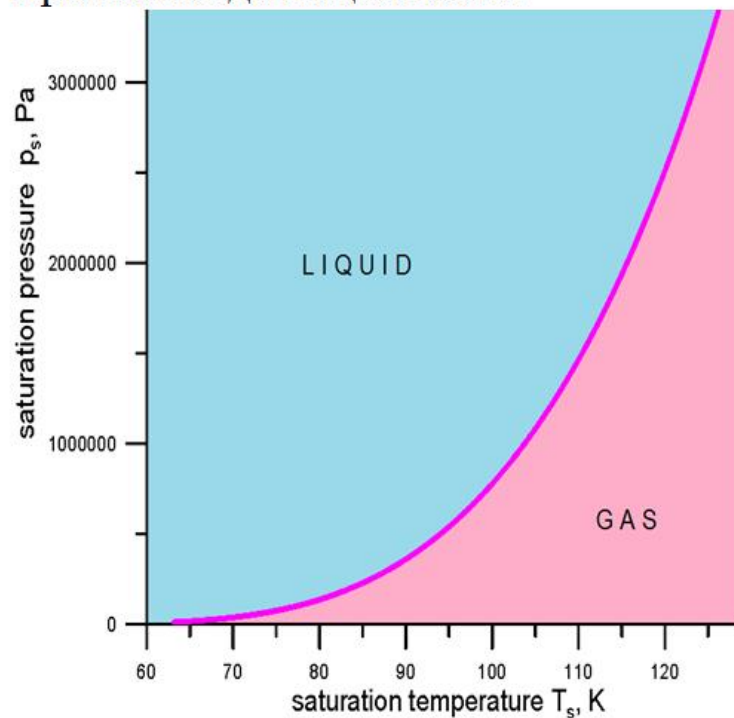


Физические факторы. Конденсация. $M=0.85$, $Re=85$ млн.

Два способа увеличить Re :

- повысить давление
- увеличить размер модели

Кривая конденсации азота:

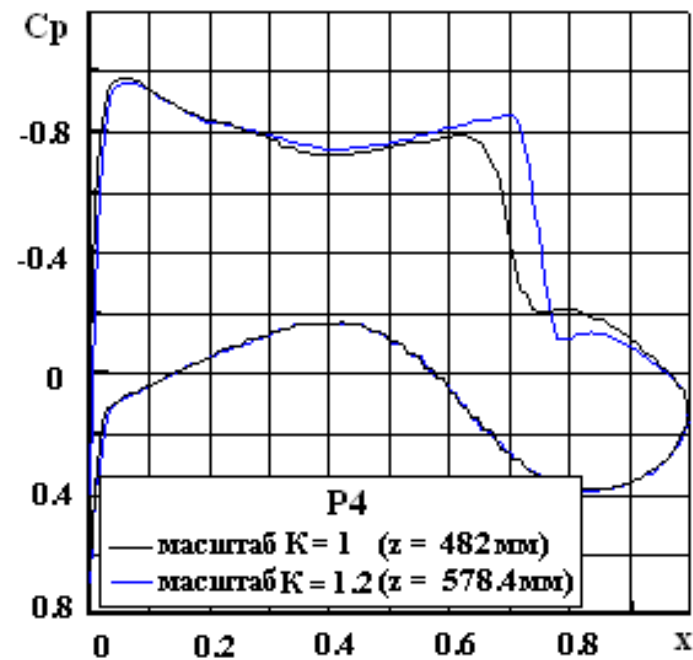
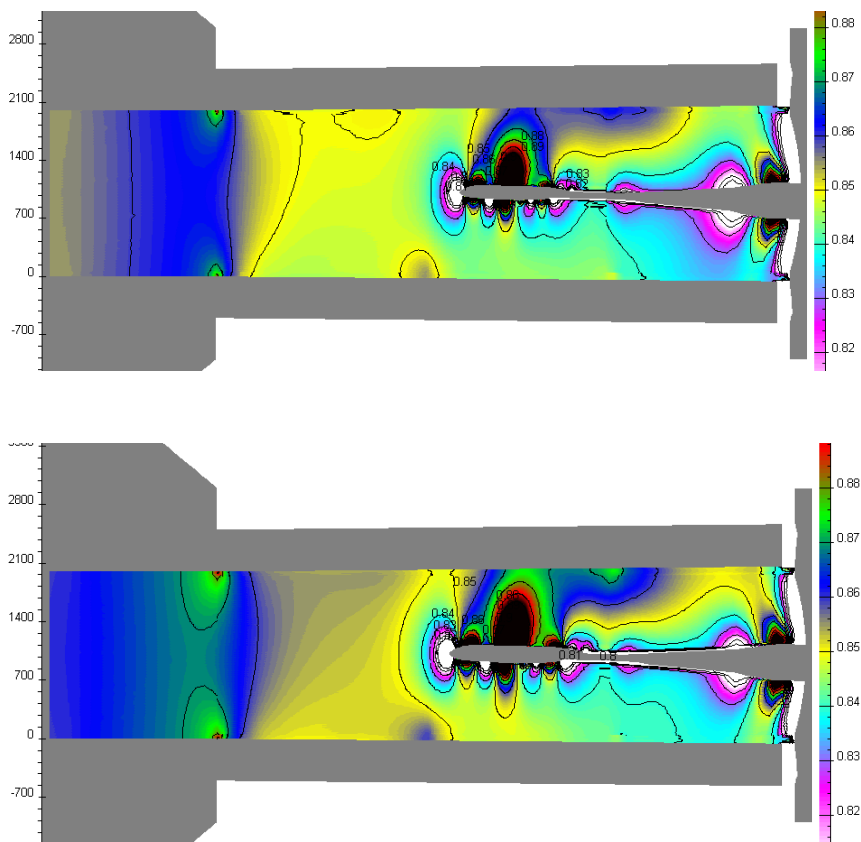


Дорожная карта

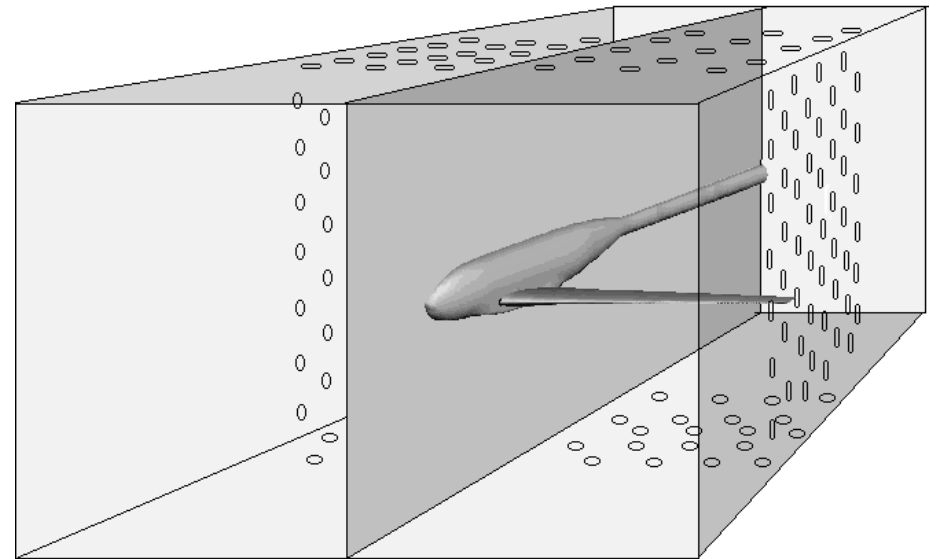
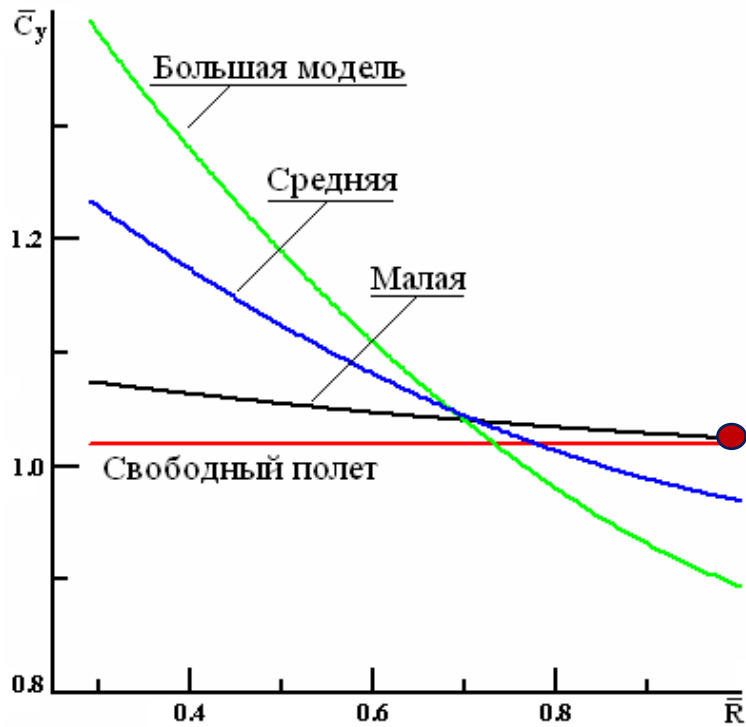
- Мотивация, ЭАДТ, принципы и компоненты
- Требования к компьютеру, пределы применимости, перспективы
- Оценки реальных временных затрат
- Коррекция экспериментальных данных
- Физические факторы, многодисциплинарность, влияние числа Re
- **Пример практического применения методики**
- Заключение

Практическое применение. Влияние блокировки АДТ

$M=0.85$, $\alpha=2^\circ$

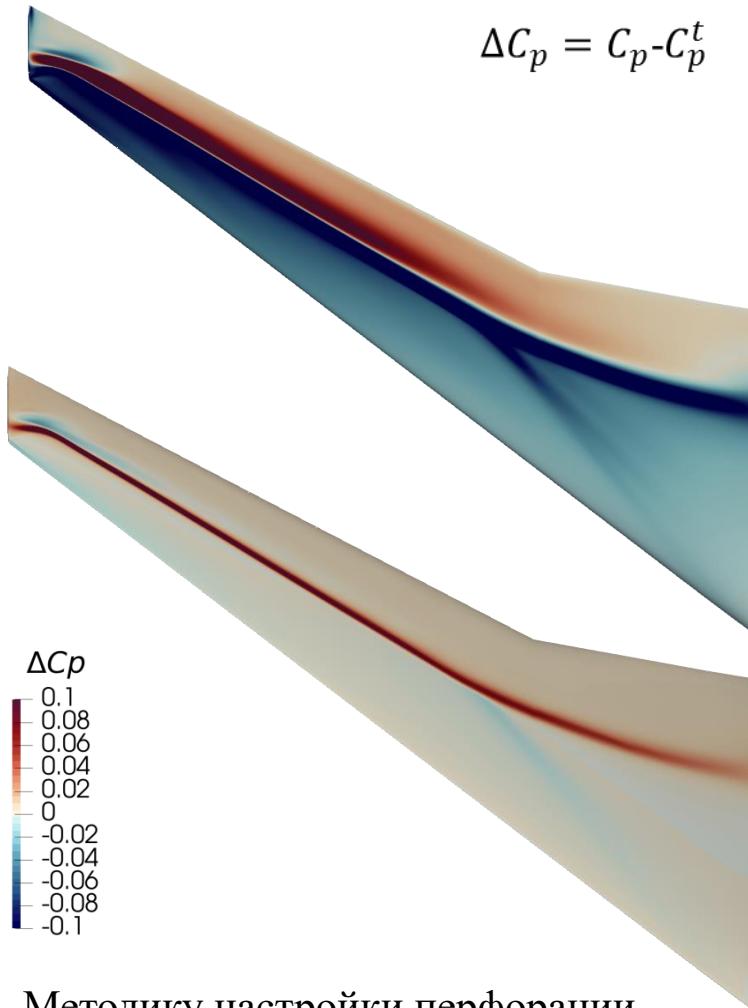
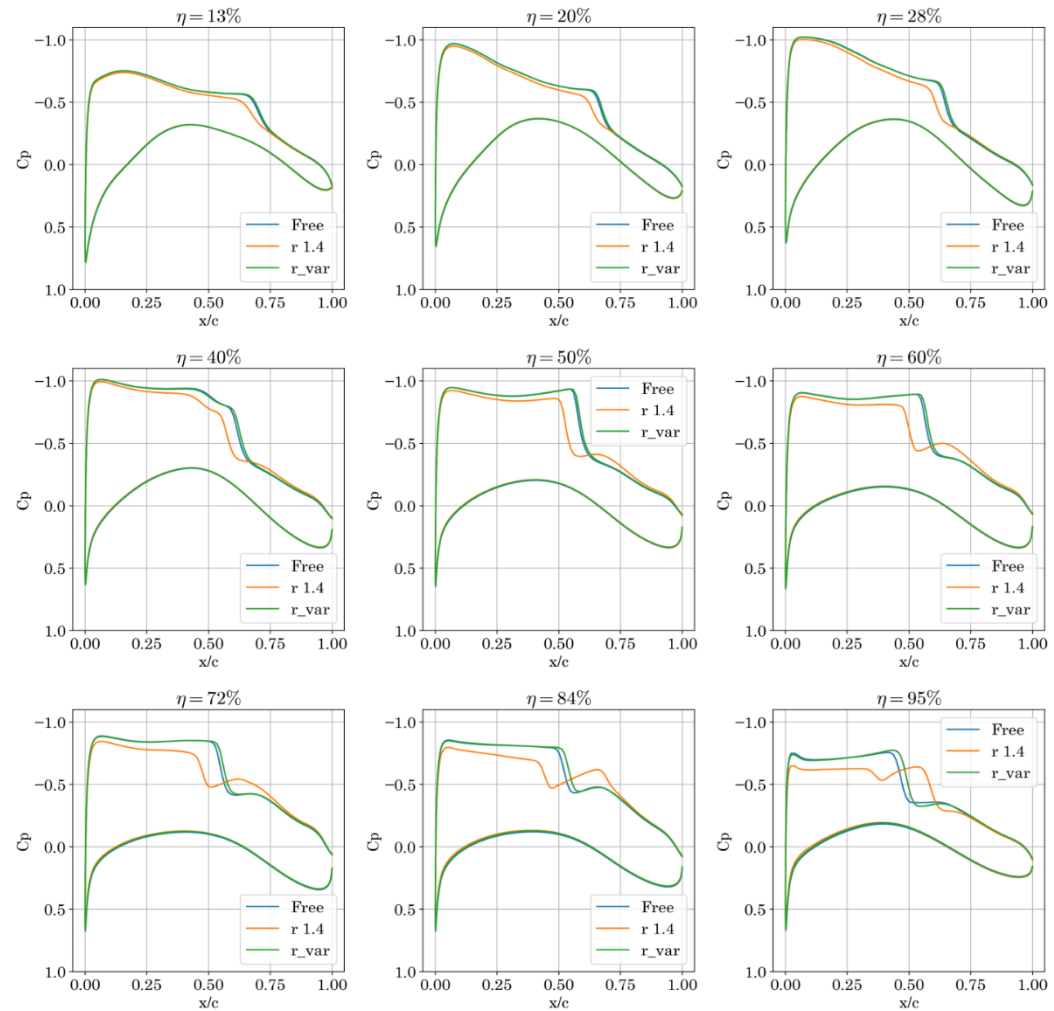
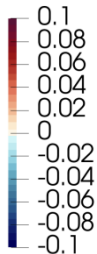


Практическое применение. Выбор проницаемости стенок



Практическое применение. Настройка перфорации АДТ

$$\Delta C_p = C_p - C_p^t$$


 ΔC_p


Методику настройки перфорации
Разработали А. Горбушин, А. Семенов

Заключение

- Вычислительная методика ЭАДТ является неотъемлемой частью экспериментального цикла
- Вычислительная программа ЭАДТ привязывается к конкретному эксперименту и обладает заданным функционалом. Переход в новую АДТ требует разработки новой ЭАДТ.
- Вычислительная методика ЭАДТ включает в себя элементы оптимизации и междисциплинарности. В настоящее время сочетаются различные модели среды (воздух или азот), а также аэродинамики и аэроупругости.
- Вычислительная методика ЭАДТ прошла полный цикл верификации и валидации, что позволяет использовать эту методику в промышленных АДТ.