

ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ **EWT-ЦАГИ**: РЕШАТЕЛЬ **ROS** ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ



ЛЫСЕНКОВ АЛЕКСАНДР

ФГУП «ЦАГИ»

e-mail: lysenkov@tsagi.ru

СОДЕРЖАНИЕ

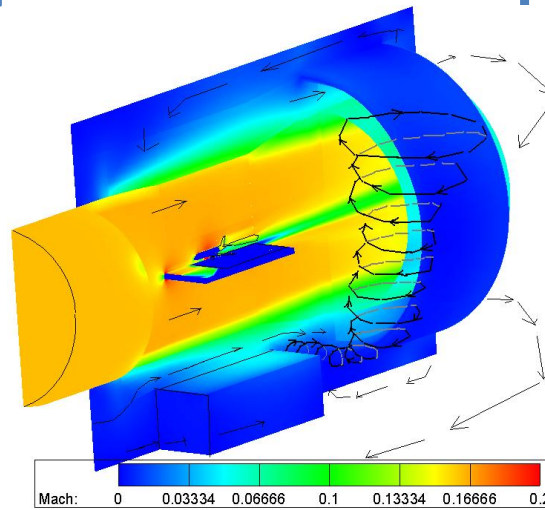
- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- Актуальность задачи
- Расчетный метод
- Тестирование
- Оптимизация
- Планы

СОДЕРЖАНИЕ

- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- Актуальность задачи
- Расчетный метод
- Тестирование
- Оптимизация
- Планы

Характеристики EWT–ЦАГИ

- ☐ Структурированная сетка
- ☐ Явная и неявная схема ЦАГИ, основанная на ГКР схеме
- ☐ Эйлер, Навье-Стокс, Рейнольдс
- ☐ Модели турбулентности ЦАГИ основанные на q - ω , SST, SA, RSM
- ☐ Метод больших вихрей
- ☐ Стационарный и нестационарный решатели
- ☐ Локальный, глобальный, дуальный, дробный шаги по времени
- ☐ Акустическая программа
- ☐ MPI, многопоточность



IDiHOM

DeSiReH

FLIRET

Telfona

TILDA

SARISTU
SMART INTELLIGENT AIRCRAFT STRUCTURES

AGILE

EWT – Electronic Wind Tunnel

Задачи 2016г.

- **Tilda**, Towards Industrial LES/DNS in Aeronautics - Paving the Way for Future Accurate CFD - конечно-элементные схемы высокого порядка аппроксимации, DG (**Руководители: С.М. Босняков, А.В. Волков**)
 - ☐ Неструктурированные сетки
 - ☐ Новый решатель (с нуля)
 - ☐ Расчеты с большим количеством потоков (от 10000)
 - ☐ Высокий порядок
- **AGILE**, Aircraft 3rd Generation MDO for Innovative Collaboration of Heterogeneous Teams of Experts - Внедрение различных инструментов в междисциплинарную оптимизацию (**Руководители: А.В. Лысенков, К.С. Анисимов**)
 - ☐ Автоматическое построение и перестроение мат. модели (структурированные расчетные сетки)
 - ☐ Модификация методик оптимизации
 - ☐ Междисциплинарные задачи
- **Схема MP-WENO** – применение к практическим задачам (**Михайлов С.В., Савельев А.А.**)

Оптимизация в 2016 году

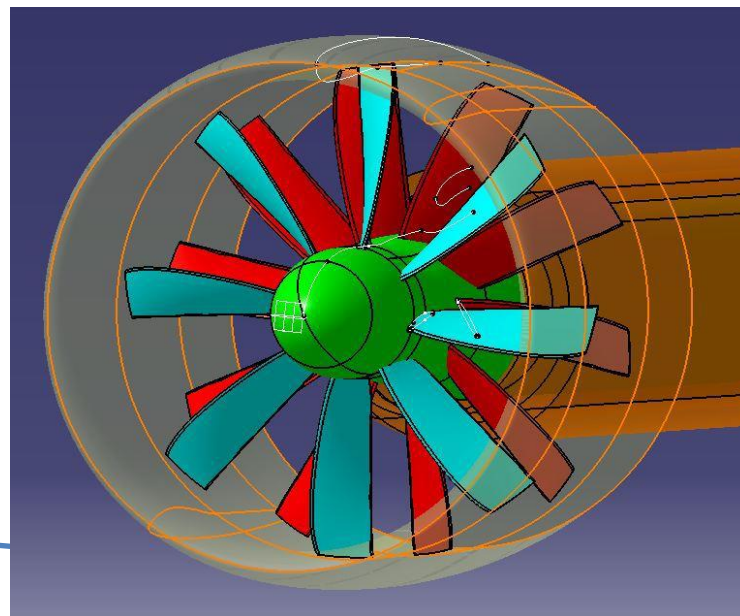
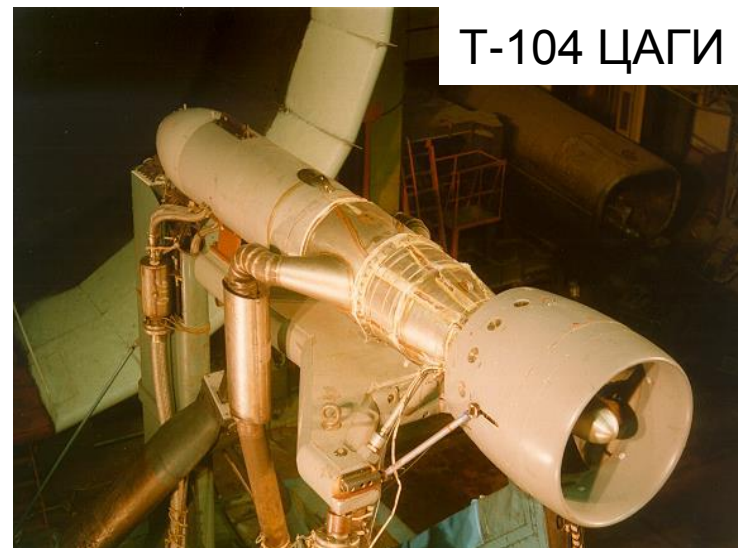
- ☐ Воздушный винт
- ☐ Мотогондола ТРДД
- ☐ Пилон ТРДД
- ☐ Тематическое крыло
- ☐ S-образный канал

СОДЕРЖАНИЕ

- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- **Актуальность задачи**
- Расчетный метод
- Тестирование
- Оптимизация
- Планы

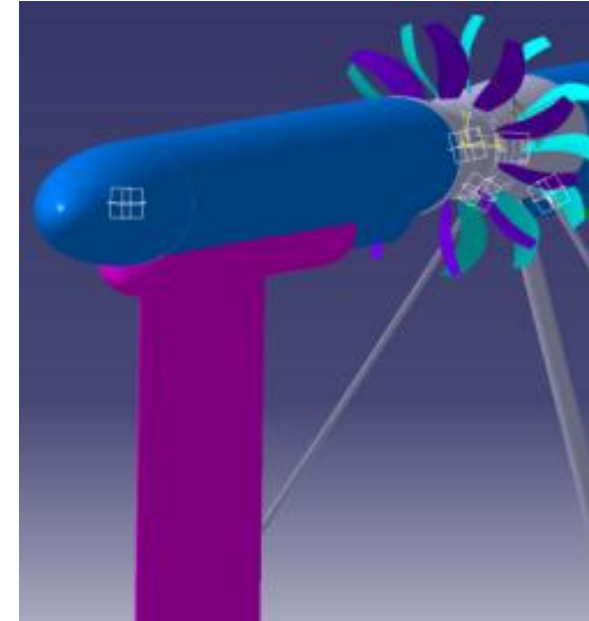
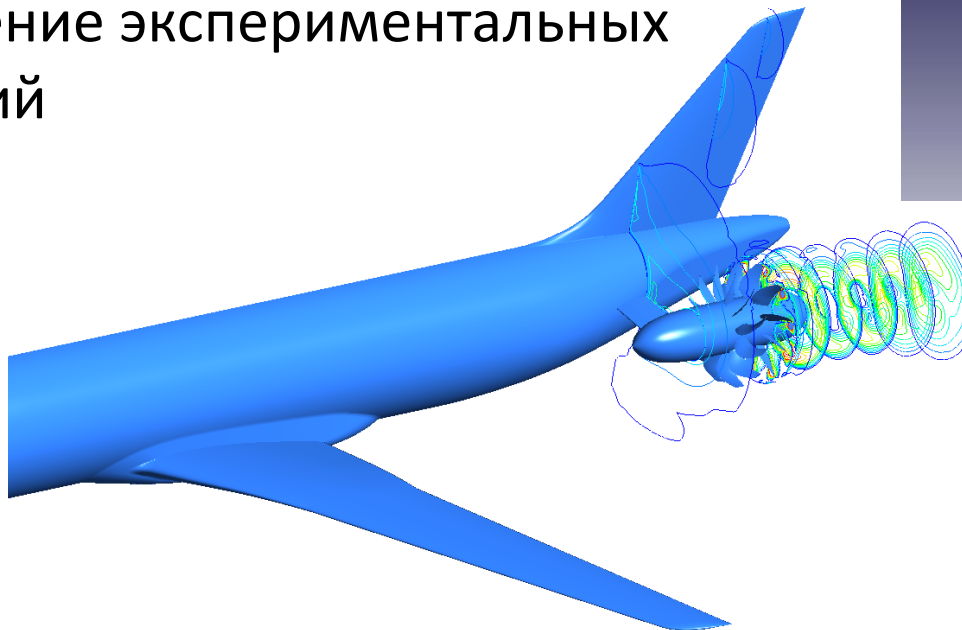
Моделирование крупномасштабного стенда

- Восполнение данных
- Расчет недостижимых в АДТ режимов
- Оптимизация лопаток
- Визуализация
- Исследование интерференции с АДТ



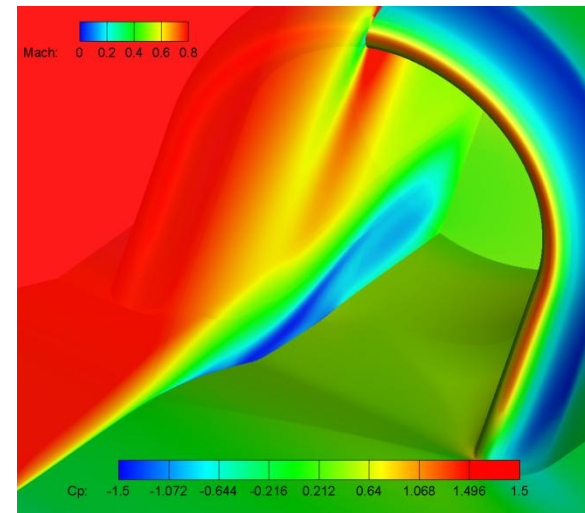
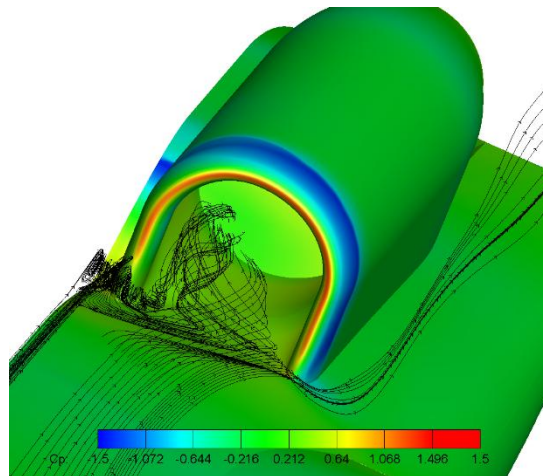
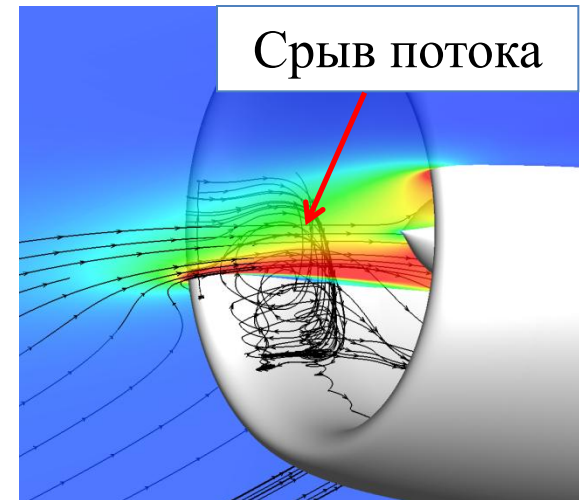
Интерференция БРОР с планером

- Влияние планера и пилона на характеристики винта
- Средства управления потоком для уменьшения неравномерности потока, набегающего на винт
- Сопровождение экспериментальных исследований



Отрыв потока в воздухозаборнике

- На течение в воздухозаборнике влияет вентилятор
- Особое значение имеет режим бокового ветра на режиме взлёта
- Необходимо как численно, так и экспериментально моделировать вентилятор



СОДЕРЖАНИЕ

- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- Актуальность задачи
- Расчетный метод (решатель RoS)
- Тестирование
- Оптимизация
- Планы

Уравнения во вращающейся системе координат для абсолютной скорости

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial \vec{F}_r}{\partial x_i} = \vec{W}_r \quad \vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \\ \rho k \\ \rho \varpi \end{bmatrix}, \quad \vec{F}_r = \vec{F} - (\vec{\Omega} \times \vec{R})\vec{U} \quad \vec{W}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho(V_y w - V_z v) \\ -\rho(-V_x w + V_z u) \\ -\rho(V_x v - V_y u) \\ 0 \\ S(k) \\ S(\omega) \end{bmatrix}$$

Поток через грани вращающейся сетки

Поправка на силу Кориолиса

Для вращения вокруг оси X:

$$V_x = 0, \quad V_y = -z\omega, \quad V_z = y\omega$$

Вводятся дополнительные члены в вычисление потоков, связанные с потоком из-за вращения сетки.
В источниковых членах поправка на силу Кориолиса.

Особая благодарность:
к.ф.м.н. Власенко В.В.
к.ф.м.н. Титареву В.А.

Неявная схема, сглаживатель для получения стационарного

$$\frac{\vec{u}_{i,j,k}^{n+1} - \vec{u}_{i,j,k}^n}{\tau^n} + \frac{1}{V_{i,j,k}} \cdot \left[\sum_{i,j,k} \left(\vec{F}_{i+1/2} - \vec{F}_{i-1/2} \right) \right]^{n+1} - \vec{W}_{i,j,k} = 0$$

«явная» часть

Линеаризация Рунге

$$u^{n+1} = u^n - \frac{\tau^n}{V_i} \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}}^n - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}}^n \right) + \left(-RM_{i-1}^n \Delta \vec{u}_{i-1} + RM_i^n \Delta \vec{u}_i + RM_{i+1}^n \Delta \vec{u}_{i+1} \right) - \vec{W}_{i,j,k}$$

СЛАУ:

$$-RM_{i-1}^n \Delta \vec{u}_{i-1} + \left[1 + \frac{\tau^n}{V_i} RM_i^n \right] \Delta \vec{u}_i + RM_{i+1}^n \Delta \vec{u}_{i+1} = -\frac{\tau^n}{V_i} \left(\vec{F}_{i+\frac{1}{2}}^n - \vec{F}_{i-\frac{1}{2}}^n \right) - \vec{W}$$

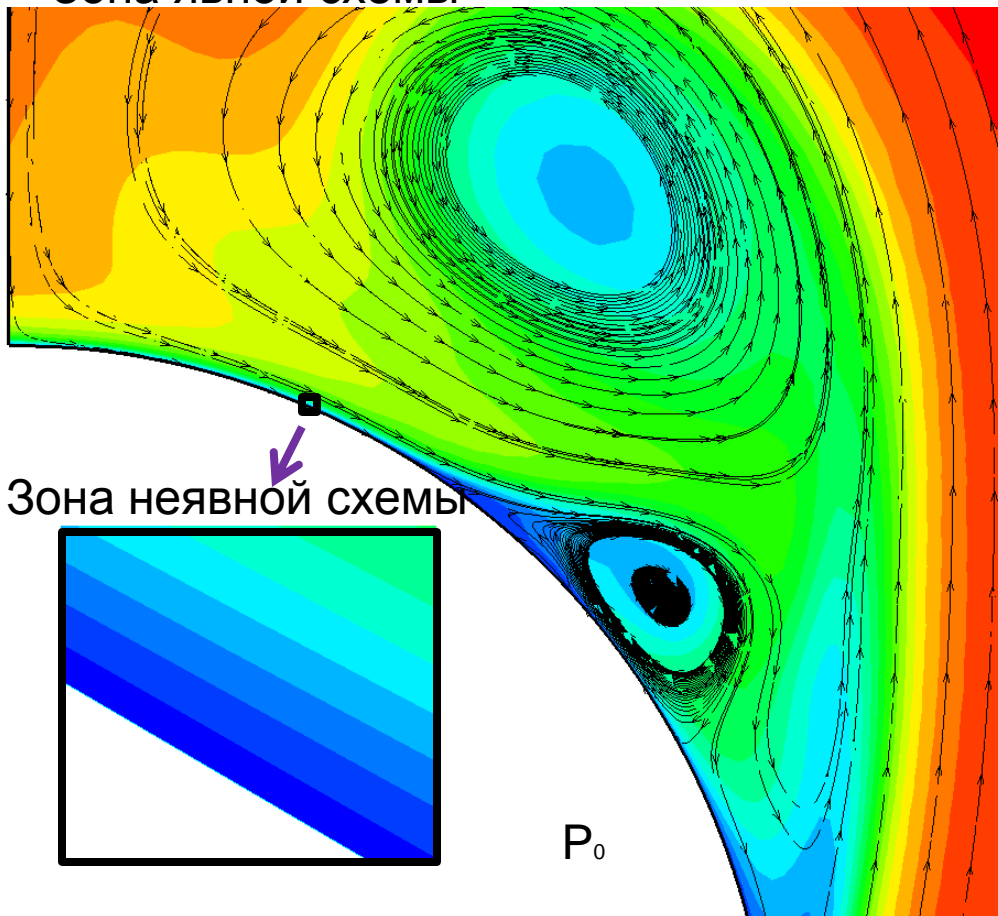
Решение методом Гауса-Зейделя
Схема локально неявная

$$\vec{u}_i^{n+1} = \vec{u}_i^n + \Delta \vec{u}_i$$

Автор реализации
Кажан Е.В.

Зональный подход

Зона явной схемы



Зона неявной схемы

Неявные схемы:

- Большие вычислительные затраты на шаг
- CFL может быть больше 1
- Эффективны только при больших CFL

Результат: проглатывает крупномасштабные процессы

Зональный подход:

- Квазистационарность мелкомасштабных процессов
- Правильное описание крупномасштабных процессов
- Пограничный слой подстраивается под крупномасштабные процессы

Выделение зон:

- Основной поток – явная схема
- Тонкий слой около стенки - неявная

Модификации решателя RoS (стационарный)

- Решение задачи Римана о распаде произвольного разрыва на подвижной сетке
- Модификация граничных условий:
 - условие прилипания – задается скорость вращения
 - условие непротекания –
условие ставится для $V = V_{flow} - V_{side}$
 - условие «Риман» – при определении направления потока учитывается скорость вращения сетки
- Для явной схемы коррекция на шаг по времени
- Для неявной схемы модифицируются матрицы Роу
- Применяется комбинированный шаг по времени
- Для объектов вращающихся с разной скоростью применяются семейства

СОДЕРЖАНИЕ

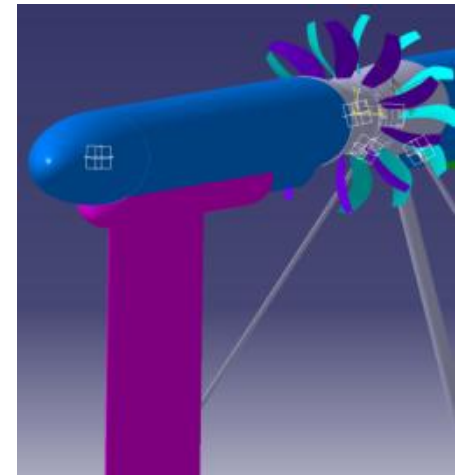
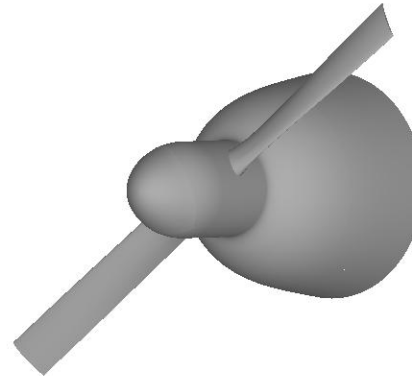
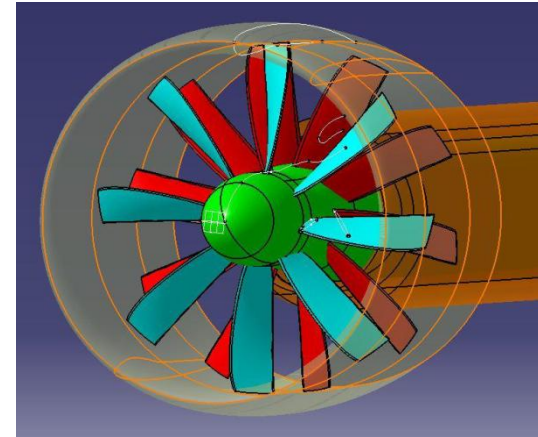
- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- Актуальность задачи
- Расчетный метод
- **Тестирование**
- Оптимизация
- Планы

Тестовые случаи

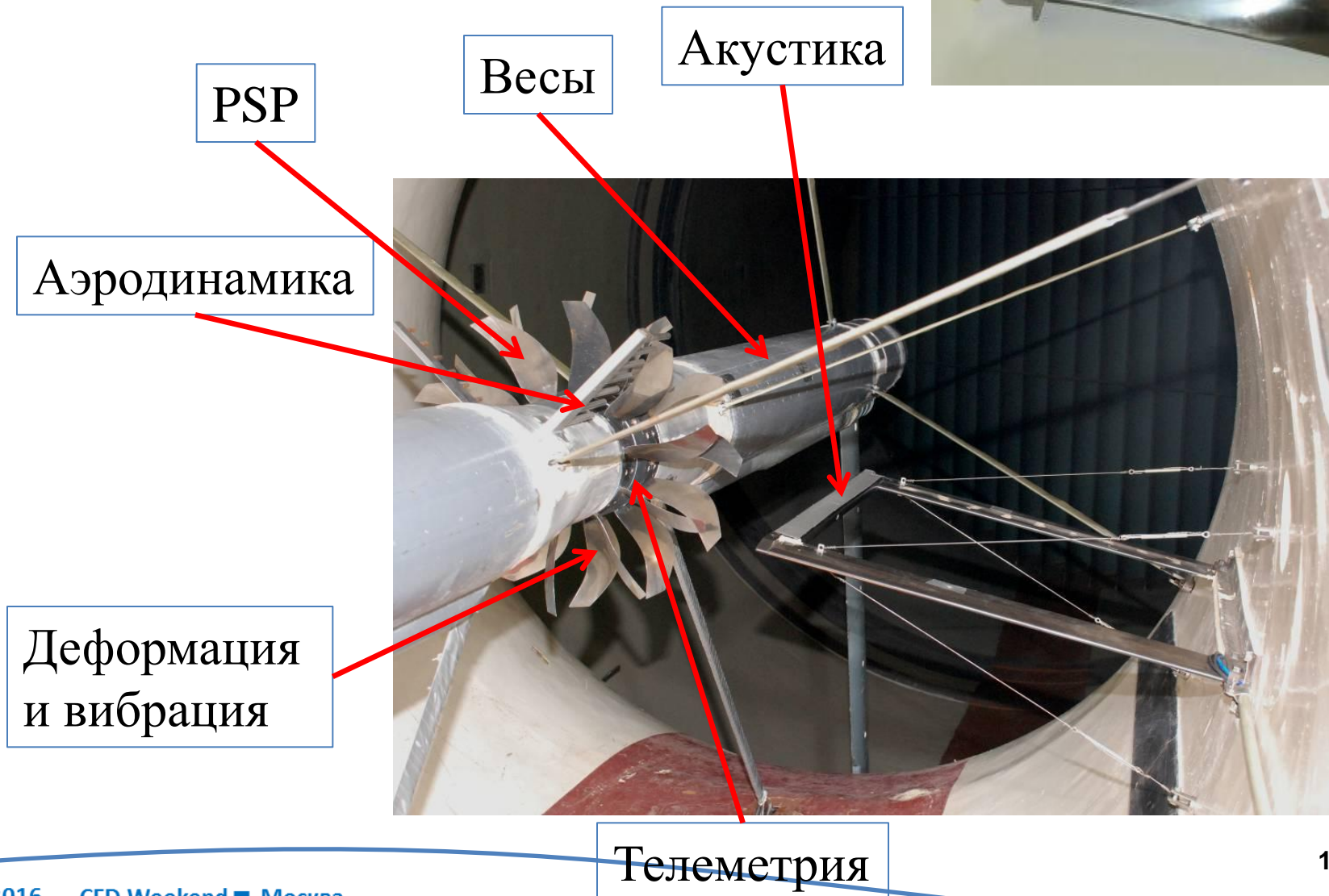
По экспериментальным данным созданы тестовые случаи:

- ☐ Шестилопастной винт ($D=0.8$ м)
- ☐ Двухлопастной винт ($D=2.9$ м)
- ☐ Биротативный винт ($D=0.32$ м)
- ☐ Биротативный винтовентилятор ($D=0.72$)

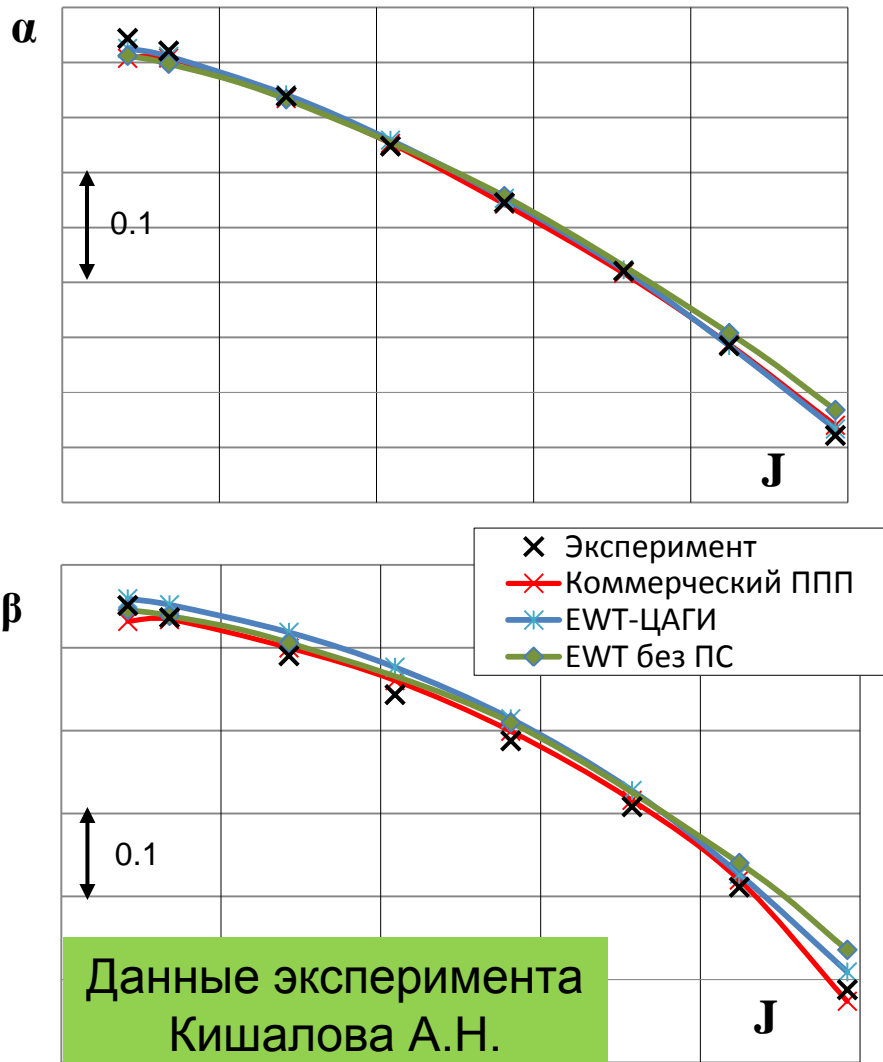
Расчетные методы должны
верифицироваться



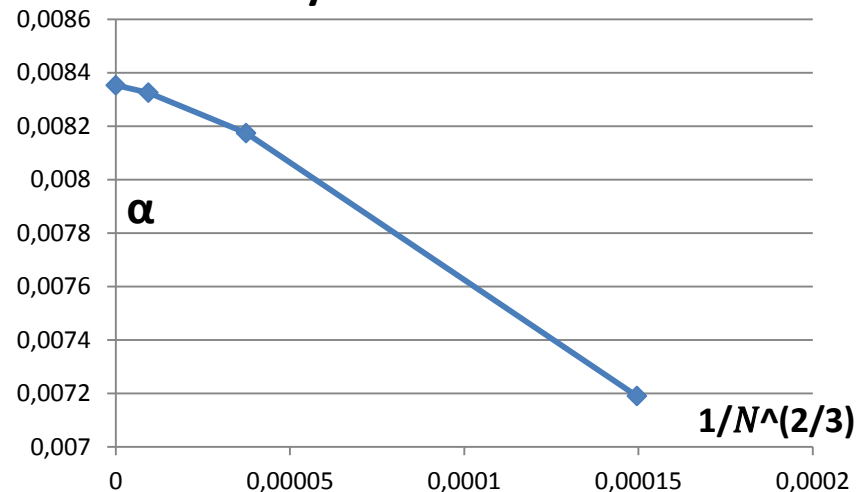
Измерительное оборудование



Шестилопастной винт



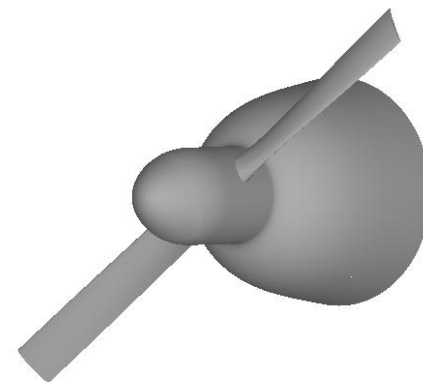
Экстраполяция по Ричардсону на нулевой шаг сетки



$$\alpha = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad \beta = \frac{2\pi M}{\rho n^2 D^5} \quad J = \frac{V}{nD}$$

Точность на большинстве рассмотренных режимах – 3 - 4 %

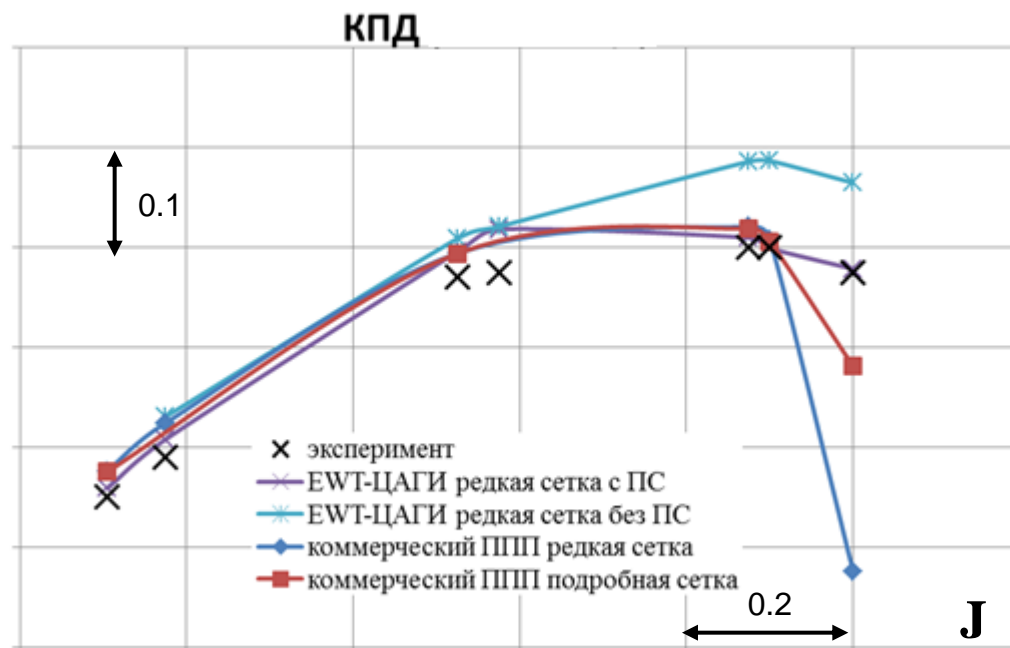
Двухлопастной винт



- Двухлопастной винт
- Тонкие профили
- Малые скорости
- Без кольца точность расчета КПД винта составляет ~ 4%

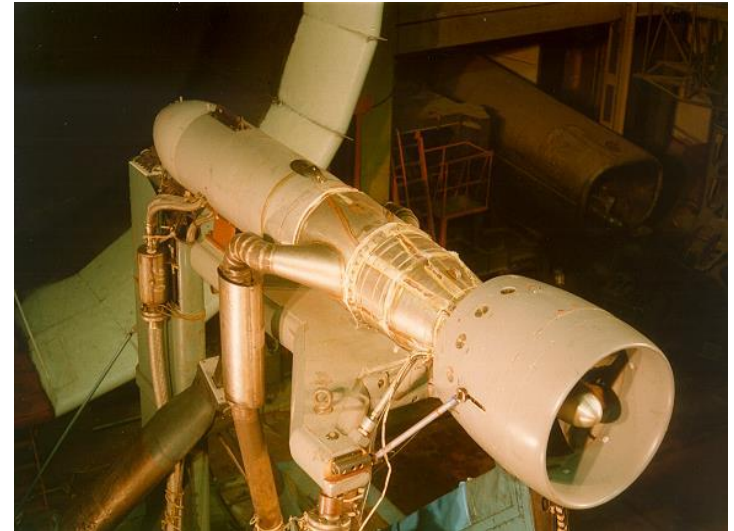
$$\eta = \frac{C_T}{C_P} J$$

Данные эксперимента
С.П. Острохова



Биротативный винтовентилятор в мотогондоле

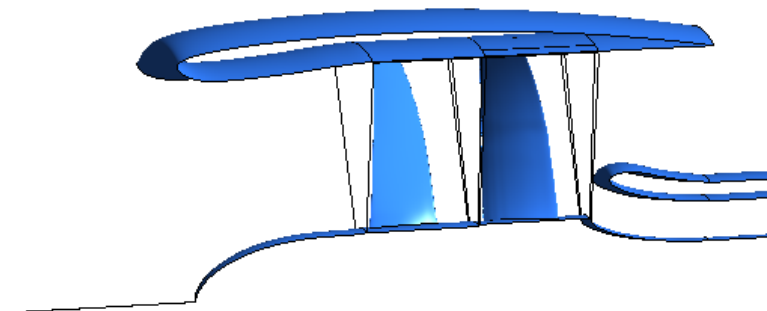
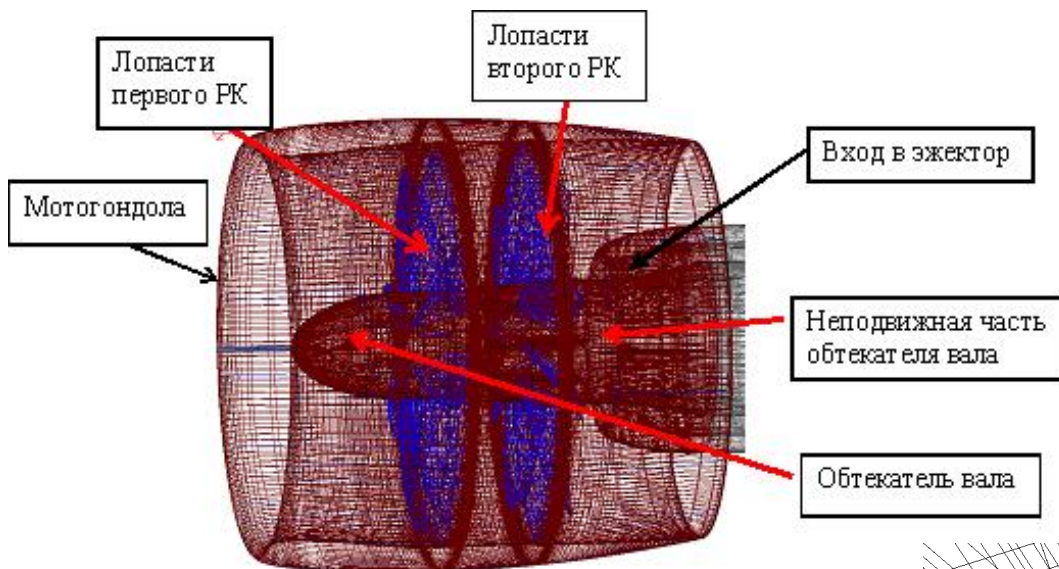
- соответствует реальному экспериментальному ТРДД НК-93 со сверхбольшой степенью двухконтурности
- масштаб 1:4
- взлётно-посадочные режимы
- получены следующие характеристики:
 - ❑ расход через двигатель (через каждый контур),
 - ❑ степень повышения давления винтовентилятора,
 - ❑ полное давление на входе в двигатель



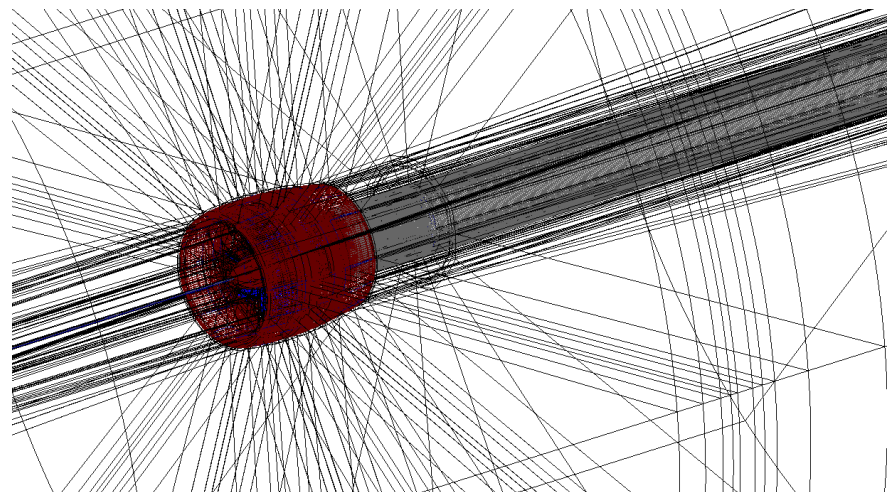
Эксперимент В.О. Акинфиев,
И.Ф. Кабанец, В.Ф. Курицын

Приемлемым будет считаться отличие от эксперимента по интегральным характеристикам винтовентилятора не более 3-4%, по характеристикам воздухозаборника - 1%.

Математическая модель

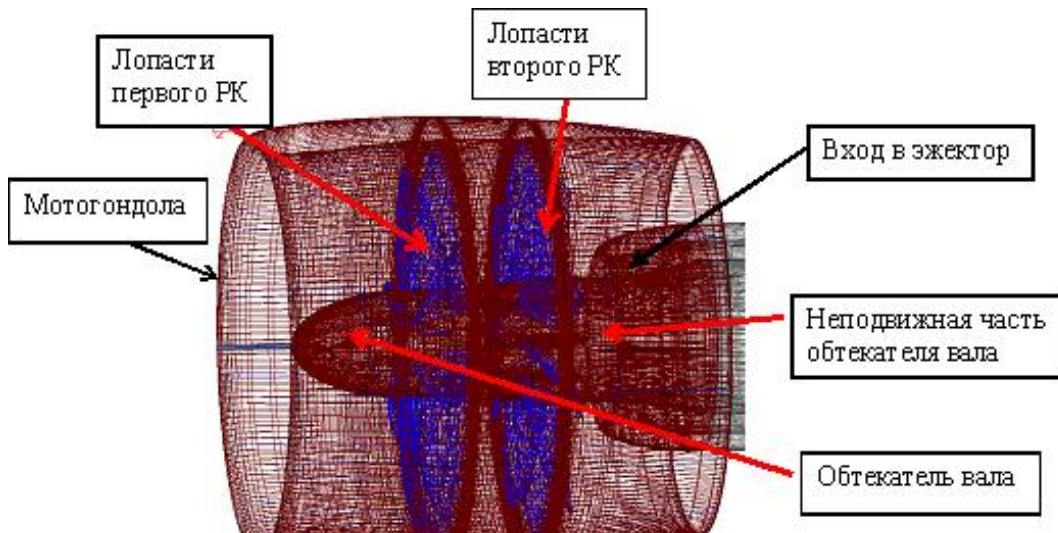


Тип сетки	Количество ячеек в полной расчётной области
Редкая	1.2 млн.
Средняя	10 млн.
Подробная	79 млн.



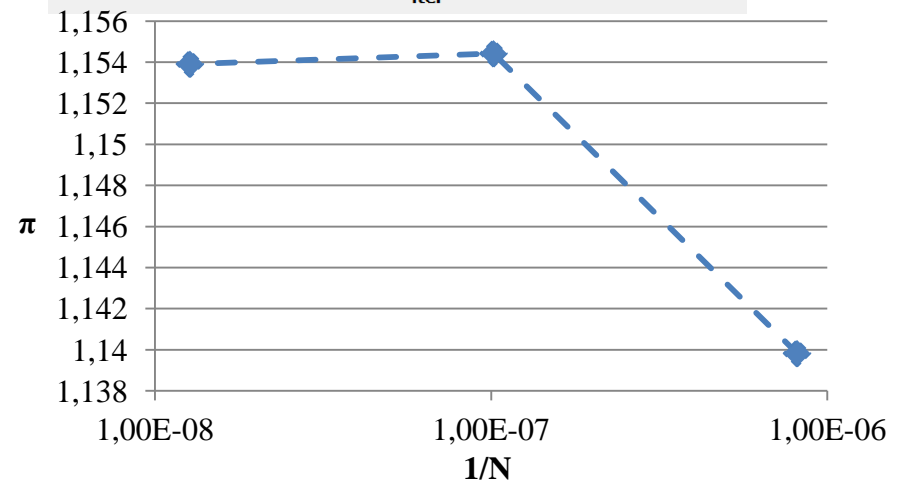
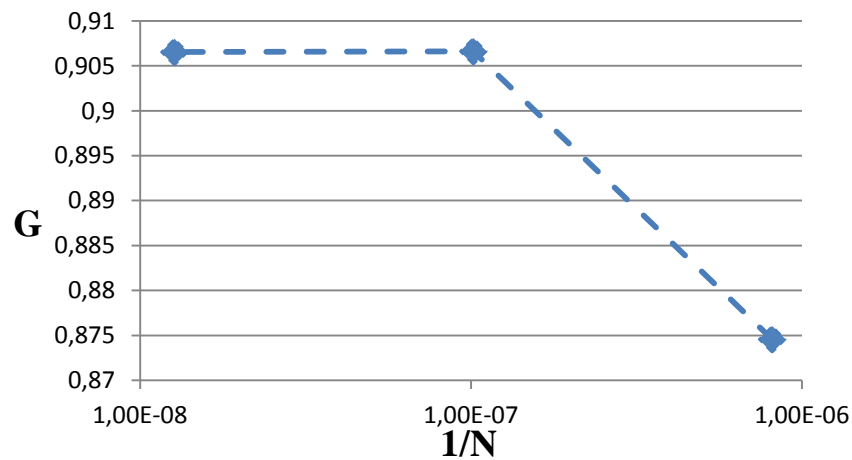
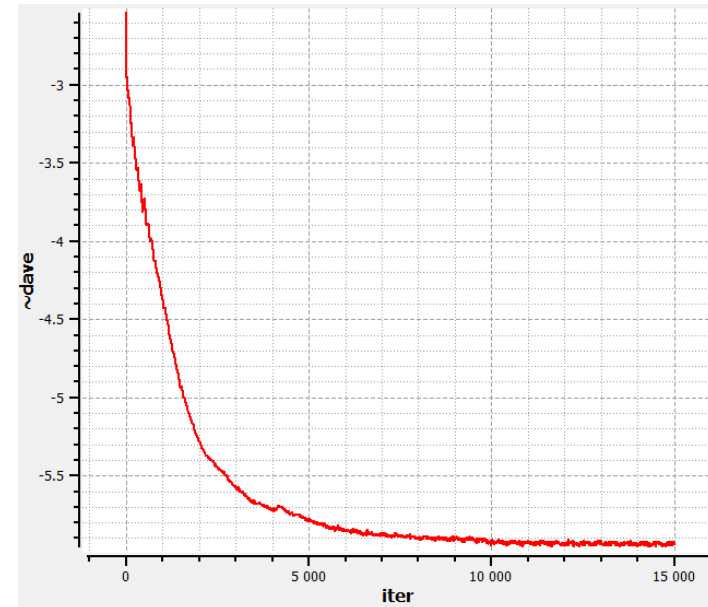
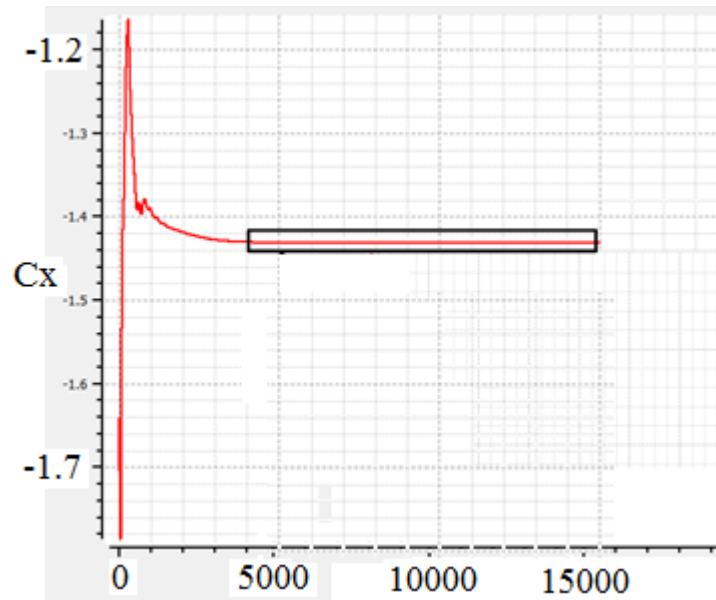
Павлик С.В.

Математическая модель

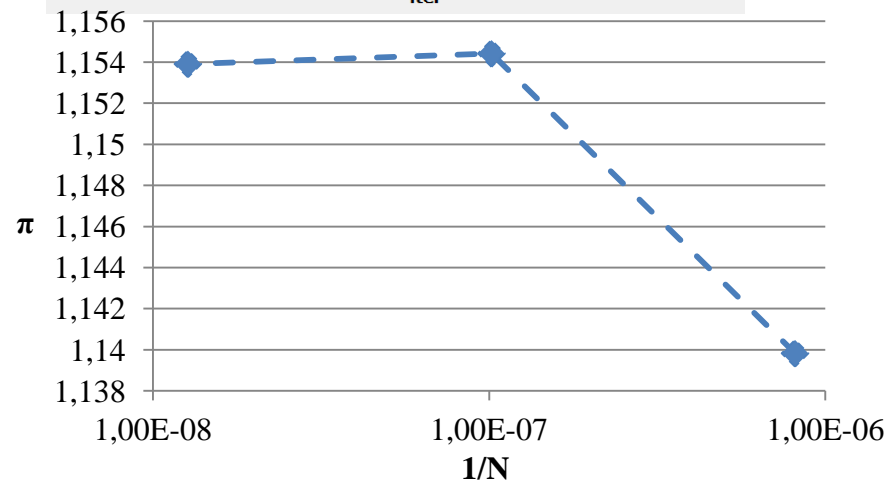
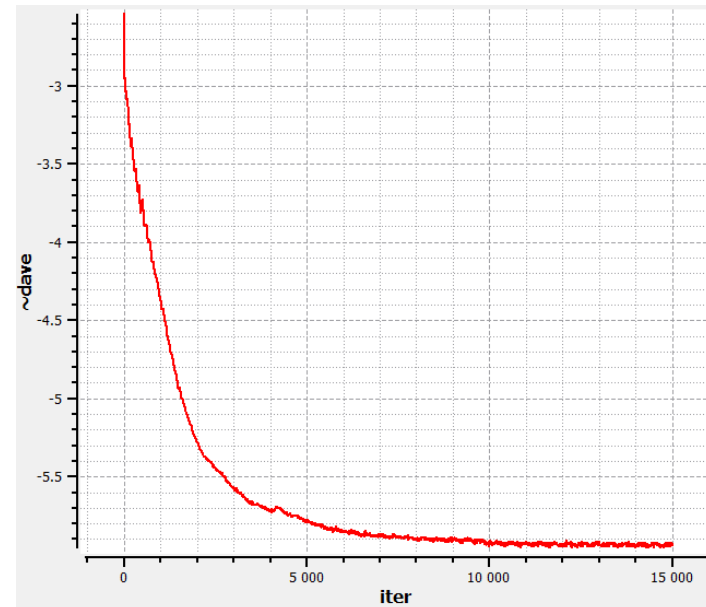
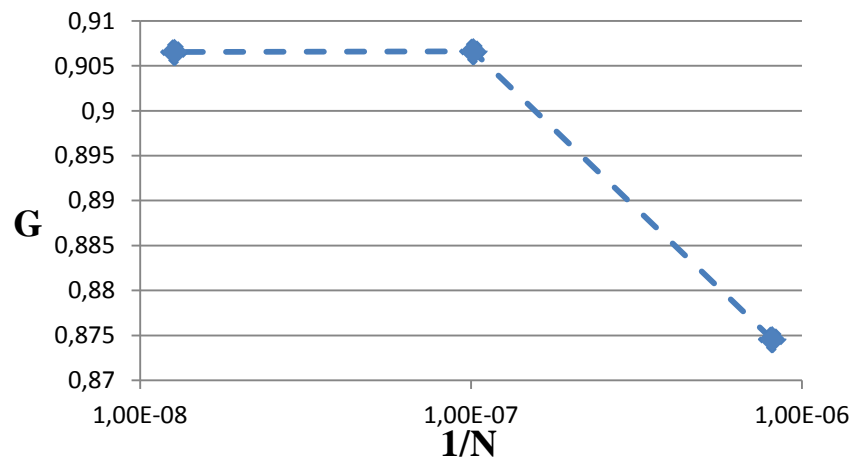
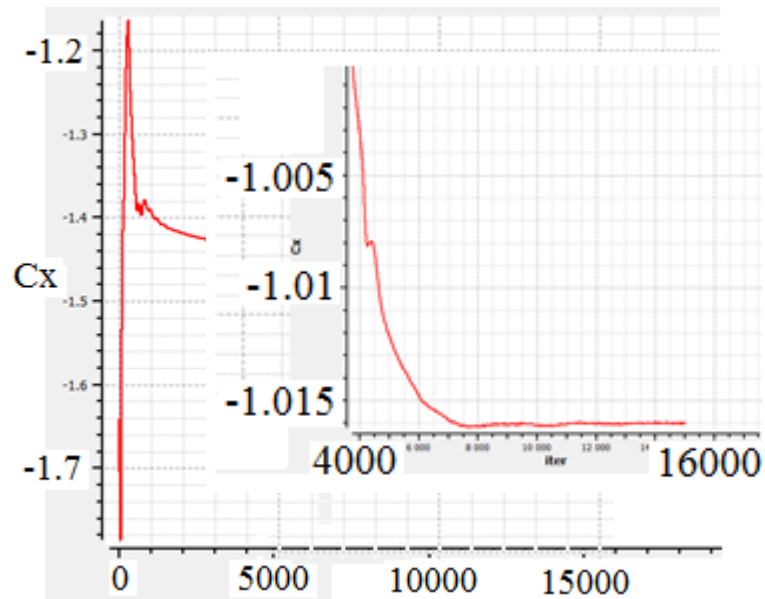


ГУ КПП	ГУ ЕВТ-ЦАГИ	Поверхности, на которых поставлено ГУ
Условия несогласованной стыковки	Connect	На гранях с разрывом скорости вращения
Периодичность	-	Грани сектора расчётной области
Симметрия	-	Грани сектора расчётной области на плоскости симметрии
Условие прилипания	Solid_Insulated	Лопастей, обтекатель вала, мотогондола
Условие непротекания	Wall	Неподвижная часть обтекателя вала
Скорость на входе	Riemann	передняя грань дальнего поля расчётной области
Среднее давление на выходе	Riemann	задняя грань дальнего поля расчётной области
Втекание и вытекание из расчётной области	Riemann	Верхняя, нижняя, боковая грани дальнего поля расчётной области
Расход	Engine_intake	Вход в эжектор

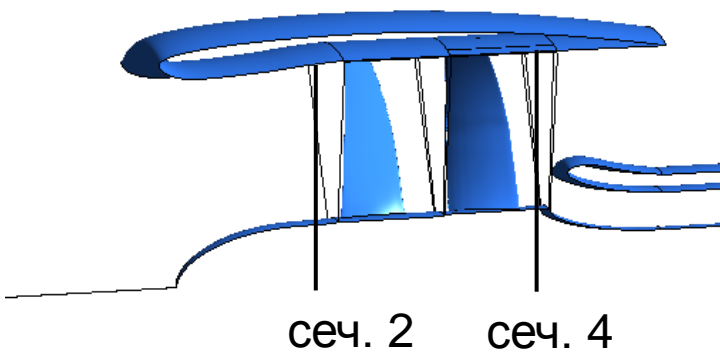
Верификация



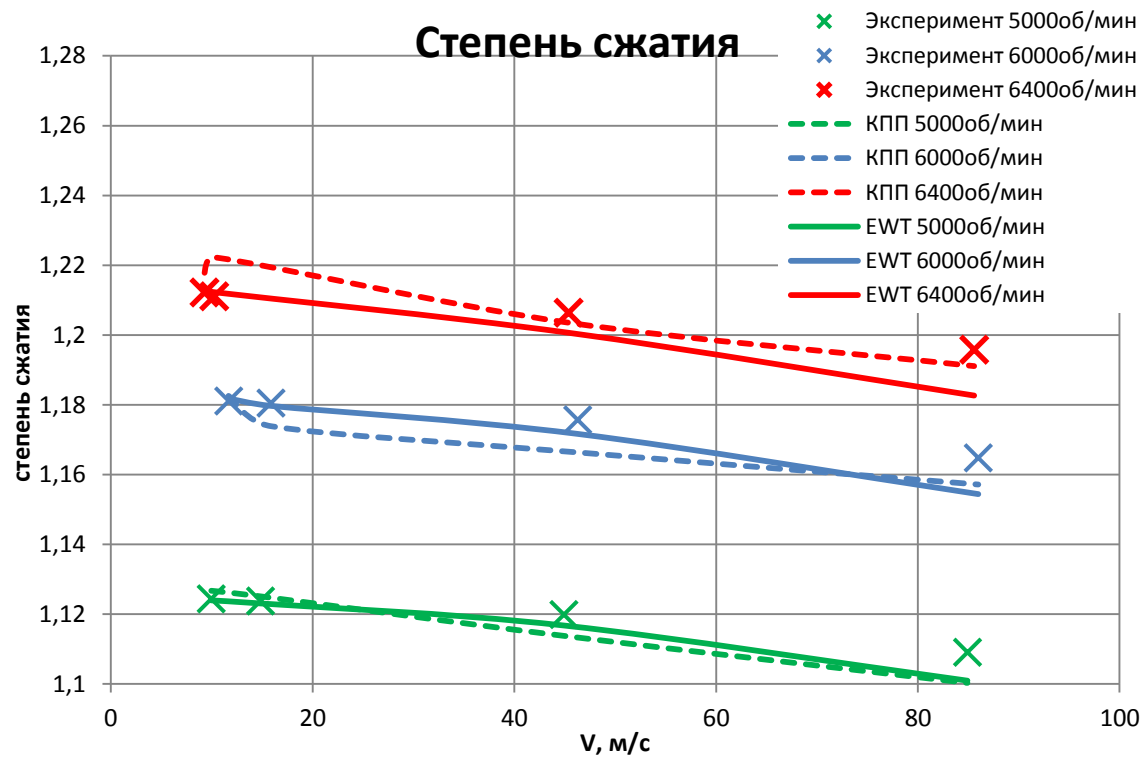
Верификация



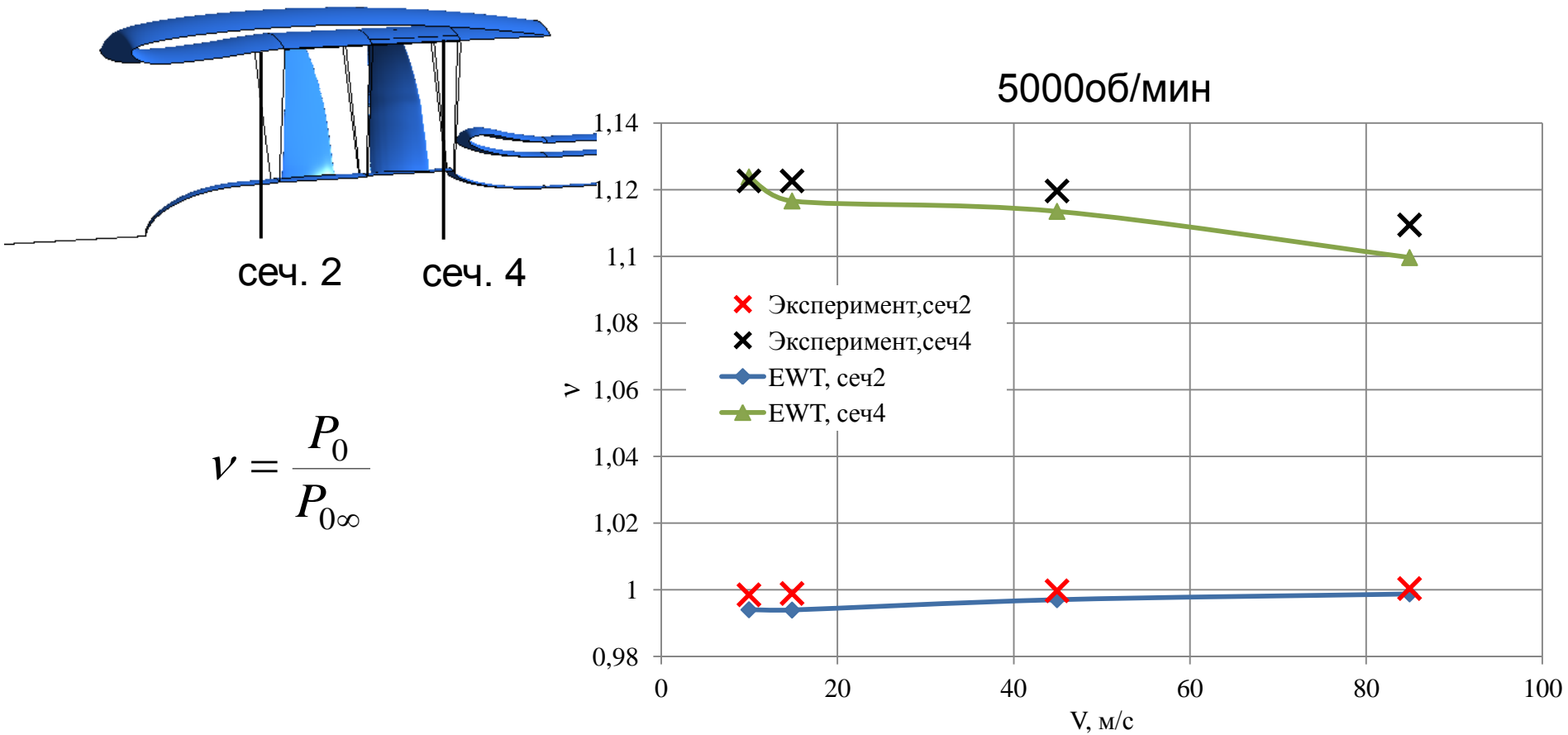
Валидация, степень сжатия



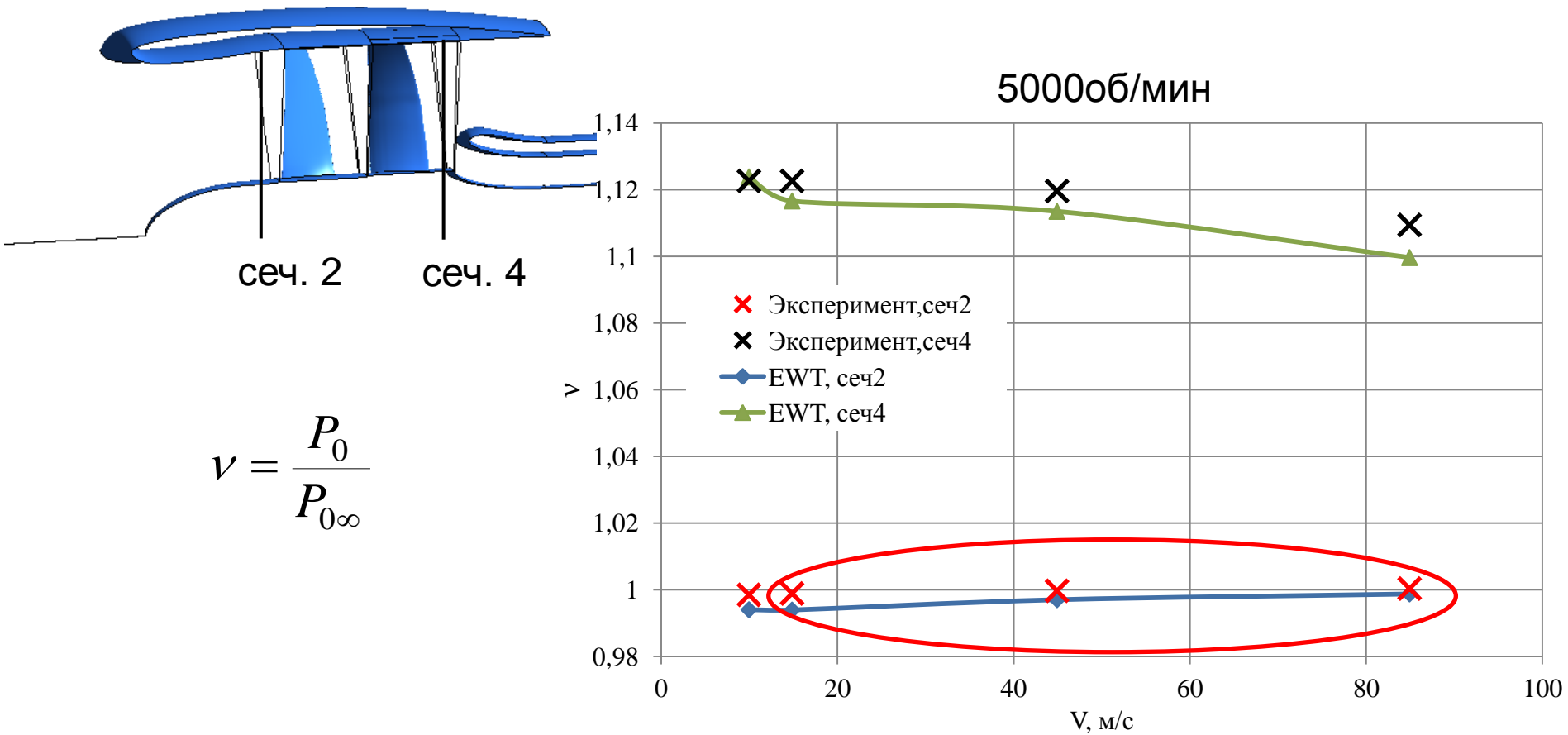
$$\pi = \frac{P_{04}}{P_{02}}$$



Валидация, коэффициент восстановления полного давления



Валидация, коэффициент восстановления полного давления

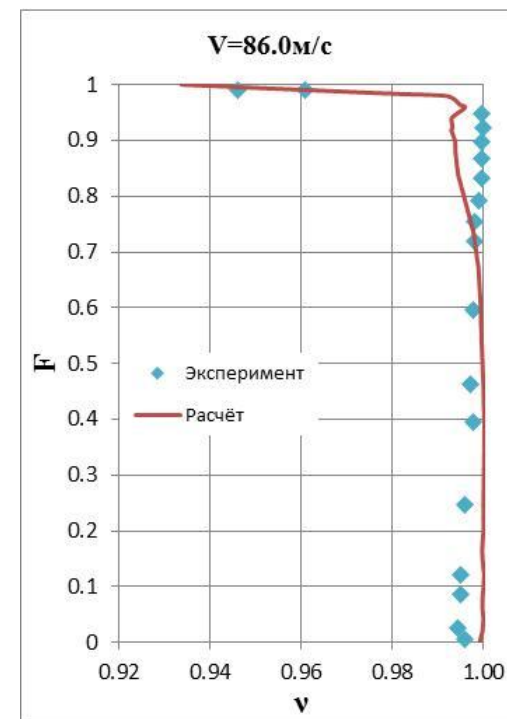
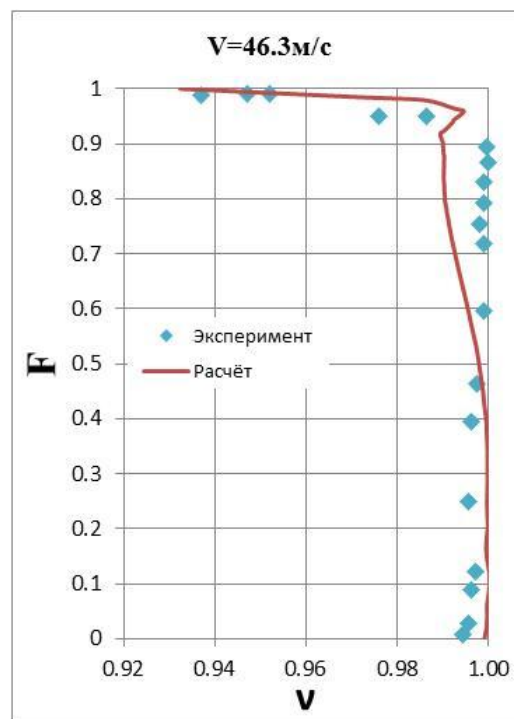
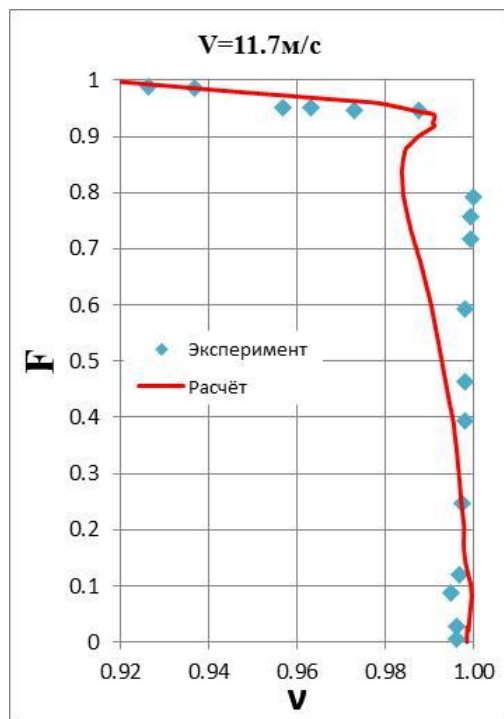


Валидация, распределение коэффициента восстановления полного давления

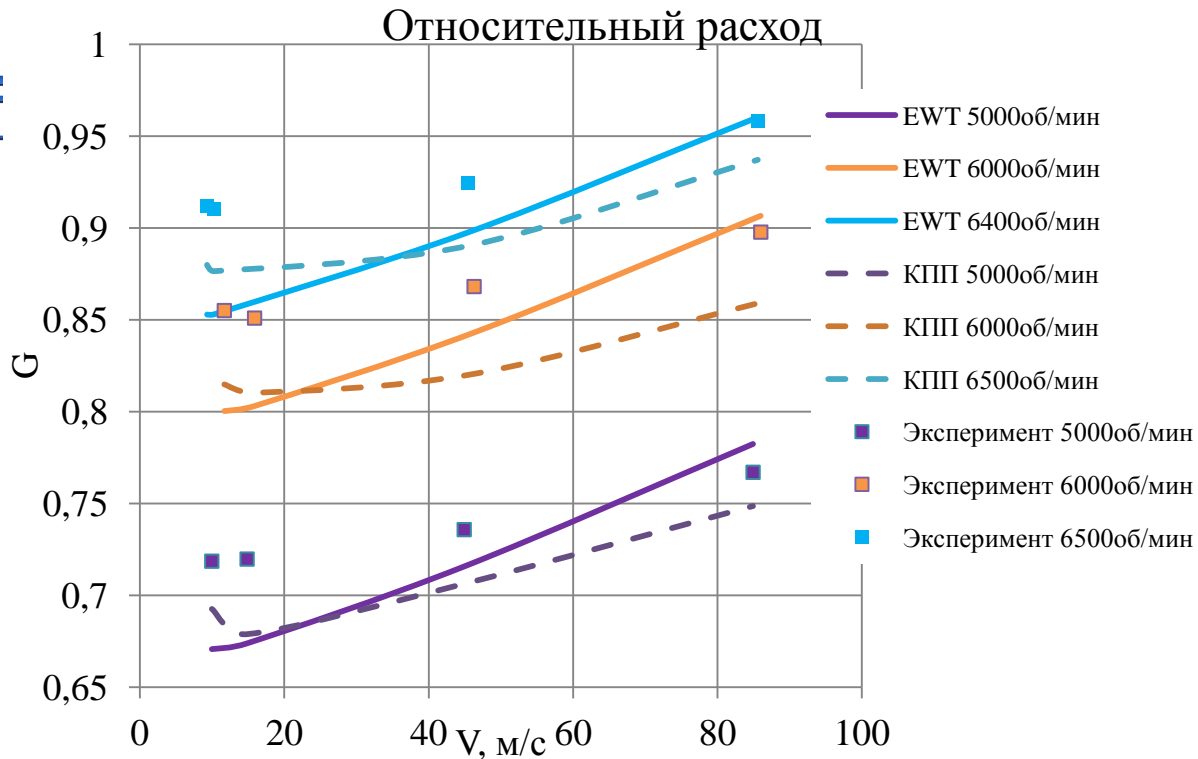
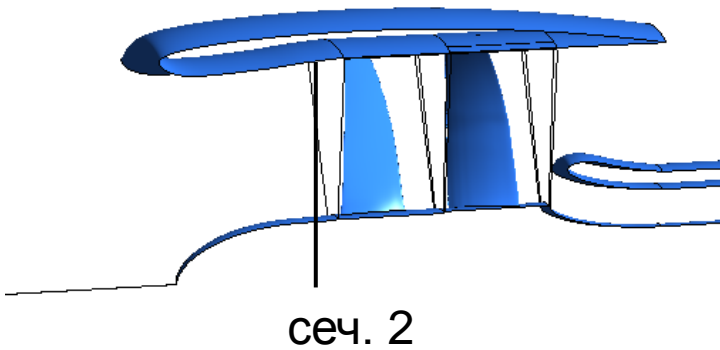
Сечение 2

$$F_j = \frac{r_j^2 - r_{\text{внутр.гран.струи}}^2}{r_{\text{наруж.гран.струи}}^2 - r_{\text{внутр.гран.струи}}^2}$$

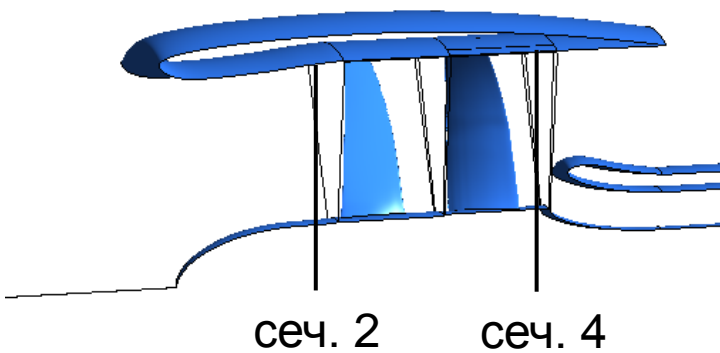
$$\nu = \frac{P_0}{P_{0\infty}}$$



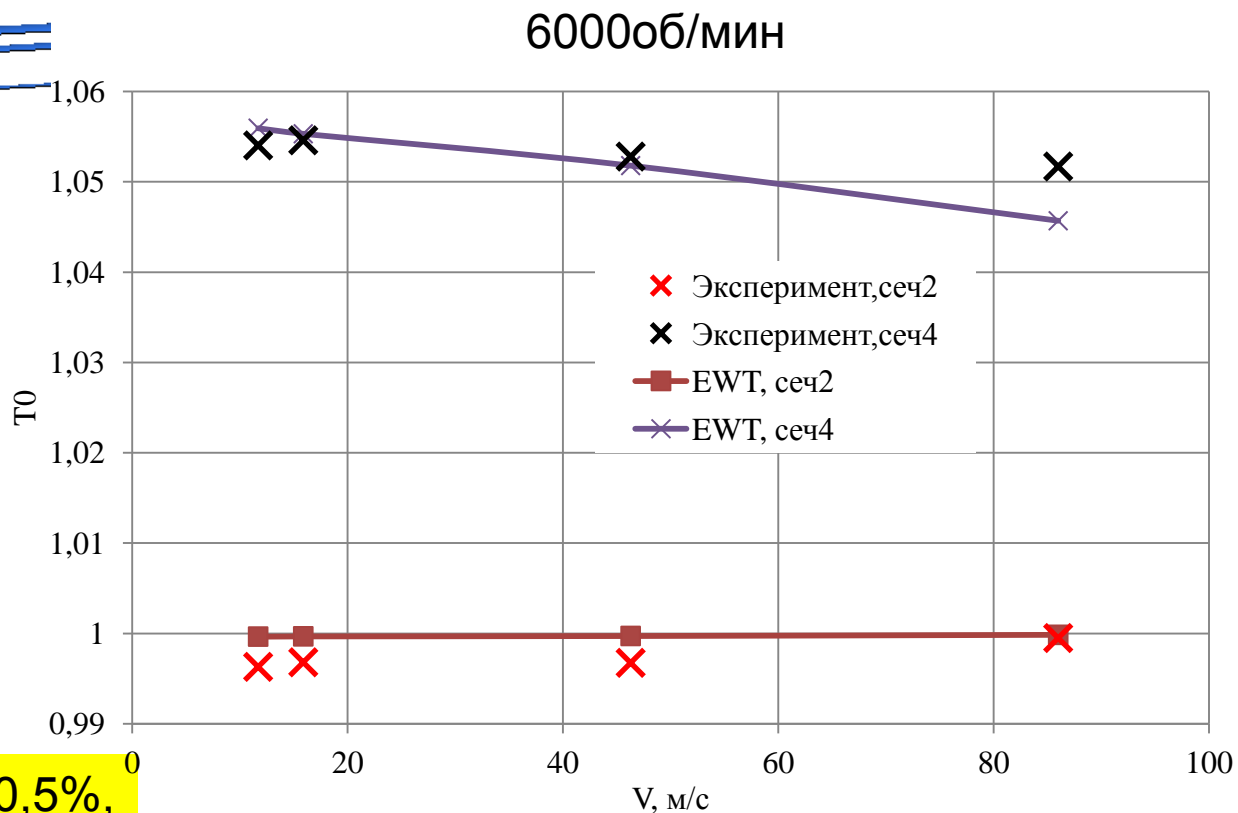
Валидация, относительный расход



Валидация, относительная полная температура

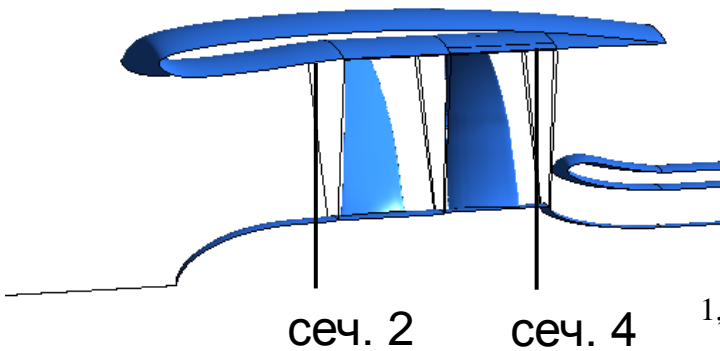


$$T0 = \frac{T_0}{T_{0\infty}} \quad \eta = \frac{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\frac{T_{04}}{T_{02}} - 1}$$



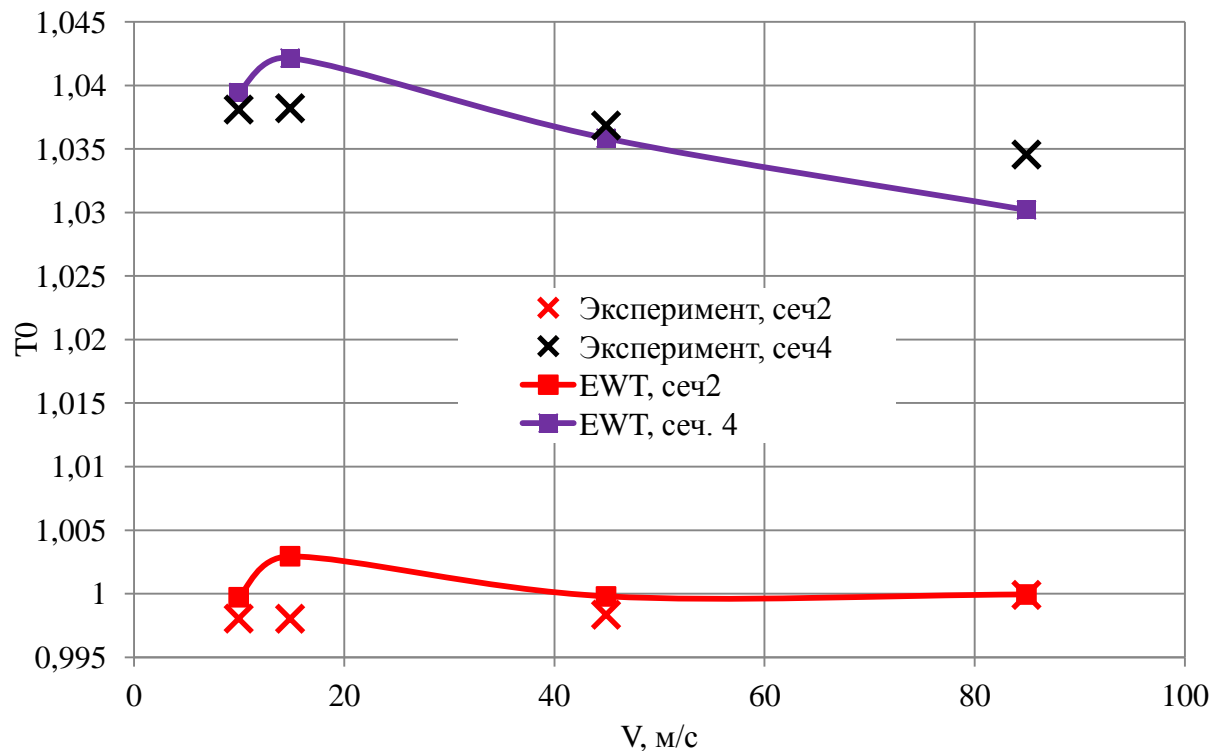
Ошибка в определении $T0$ в 0,5%,
приводит к ошибке в КПД 10%

Валидация, относительная полная температура



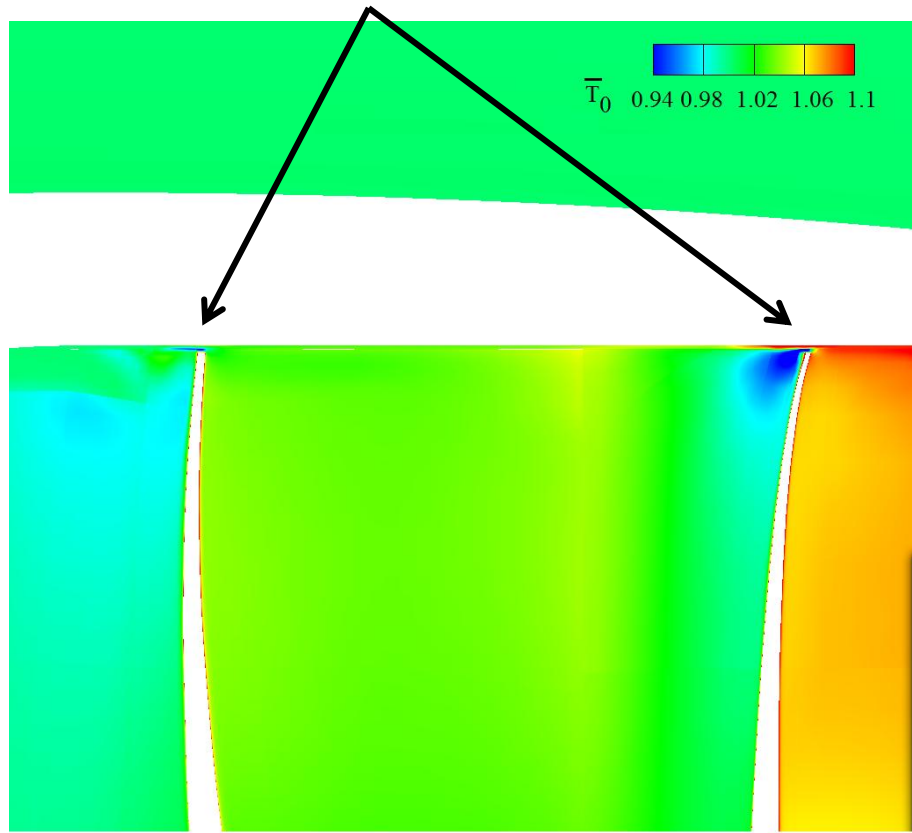
$$T0 = \frac{T_0}{T_{0\infty}}$$

5000об/мин

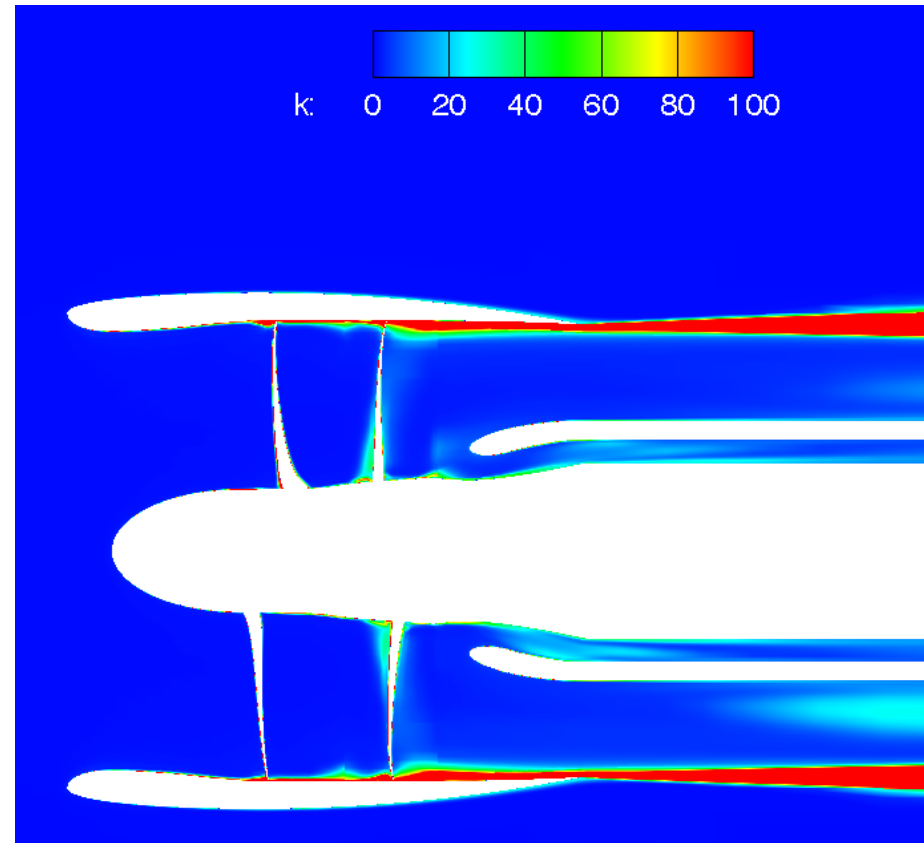


Замечание к решению

Зазор между лопастью и МГ



Поле кинетической энергии турбулентности



СОДЕРЖАНИЕ

- Краткое описание пакета и достижения в 2016г.
- Актуальность задачи
- Расчетный метод
- Тестирование
- **Оптимизация**
- Планы

Оптимизация воздушного винта с учетом акустических характеристик



Благодарность
А.А. Савельеву

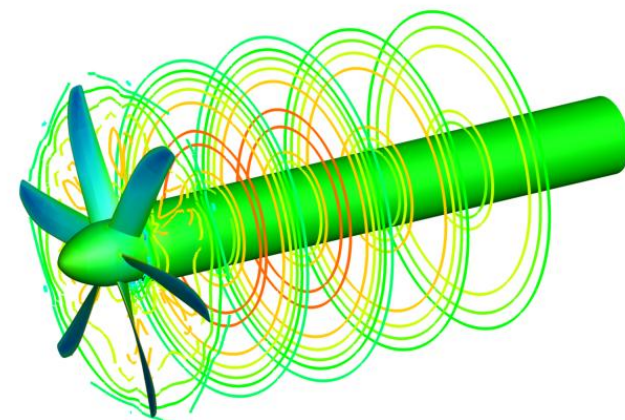


Схема оптимизационного процесса

- ☐ Решатель RoS для расчета аэродинамических характеристик винта (RANS+SST)
- ☐ Оценка шума винта по эмпирической формуле
- ☐ Ограничения второго рода - ограничения на получаемые характеристики
- ☐ Алгоритм EGO (Efficient Global Optimization) — алгоритм глобальной оптимизации с имитационной моделью, построенной по методу кригинга

Результаты оптимизации

Целевая функция - КПД винта

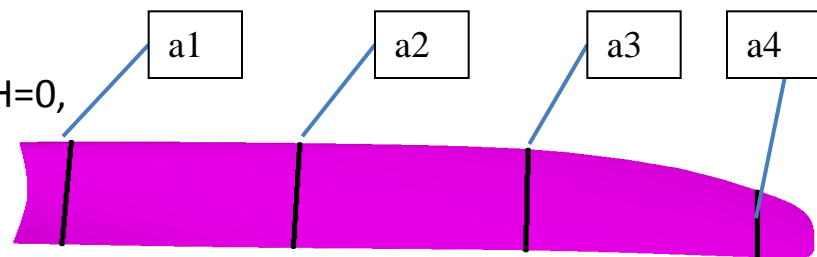
Углы установки профилей α_1 - α_4 – изменяемые геометрические параметры оптимизации (от -4° до $+4^\circ$).

Оптимизация модели винта $D=0.8\text{м}$ на взлетном режиме ($H=0$, $V=140\text{км/ч}$):

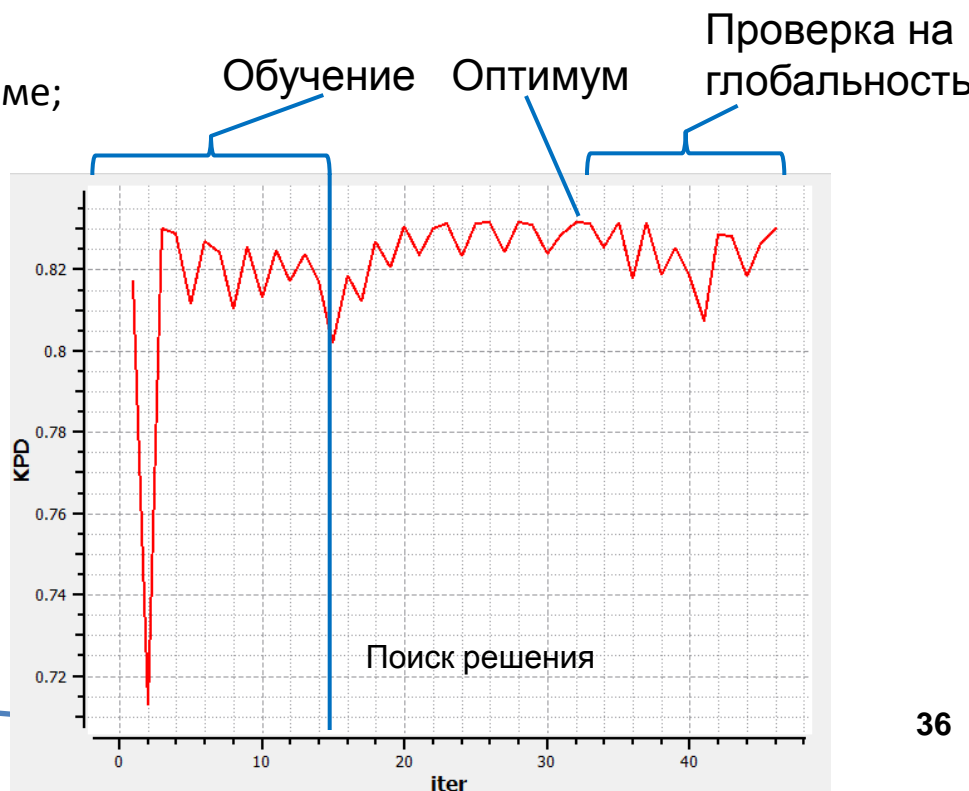
- ☐ Без ограничений улучшение КПД – 5%;
- ☐ С ограничениями улучшение КПД – 1.2%.

Оптимизация натурального винта $D=3.9\text{м}$ на крейсерском режиме ($H=6\text{км}$, $V=500\text{км/ч}$):

- ☐ Ограничения по тяге и шуму на взлетном режиме;
- ☐ Улучшение КПД на 0.3%.



		Базовый винт	Опт. винт
Крейсерский режим	C_t	0.242	0.256
	C_p	0.778	0.824
	η	0.83	0.832
Взлетный режим	C_t	0.359	0.369
	C_p	0.322	0.333
	η	0.684	0.678
	L, дБ	48.4	48.6



Планы

- **Дальнейшее «наполнение» нового решателя, проект Tilda**
- Нестационарный решатель во вращающейся системе координат
- Учет ламинарно-турбулентного перехода в расчетах
- Улучшение автоматического перестроения структурированной расчетной сетки
- Ускорения процесса оптимизации



Лысенков Александр Валерьевич,
к.т.н., доцент, и.о. нач. отдела НИО-1 ЦАГИ
тел.: (495) 556-35-16
e-mail: lysenkov@tsagi.ru

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

