



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И АКУСТИКИ ИЗОЛИРОВАННОГО ВИНТА ДРОНА

В.Г. Бобков, А.В. Горобец, Т.К. Козубская
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

Ш. Жанг, С. Жонг
*Aerodynamics Acoustics and Noise Control Technology Centre (AANTC),
Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, aexzhang@ust.hk*

При поддержке гранта BRICS RFFI 19-51-800001

Содержание

1. Цель работы – зачем это все?
2. Инструментарий NOISEtte:
 - математическая модель + схема
 - вращающаяся система координат
3. Винт дрона
 - постановка эксперимента/задачи
 - постановка вычислительного эксперимента
4. Результаты
 - аэродинамика
 - акустика
5. Заключение



Цель работы



Инструментарий: CFD-пакет NOISEtte

● Неструктурированные сетки

Гибридные сетки (элементы до 6 граней)

● Схемы повышенной точности

EBR схемы с квазиодномерной реконструкцией

● Римановские солверы:

Роу, Русанов, HLLC, HLLE, Годунов

● Маломаховые течения

Предобуславливатель Туркеля, коррекция скачка нормальной скорости

● Разрывные решения

- WENO-EBR схемы
- MUSCL-TVD EBR схемы

● Интегрирование по времени

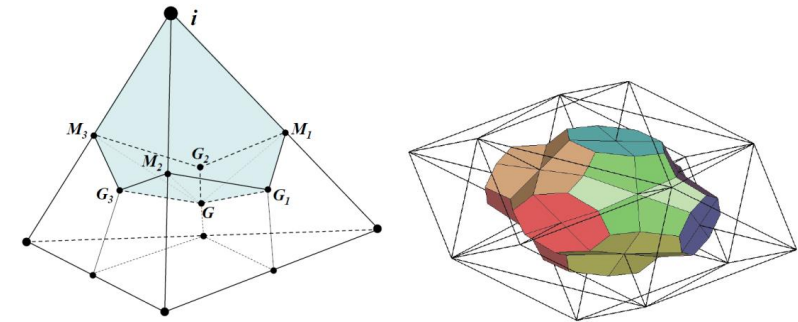
- Явная схема (Рунге-Кутта 1 – 4-го порядка)
- Неявная схема 1-2 порядка

● Решатели СЛАУ

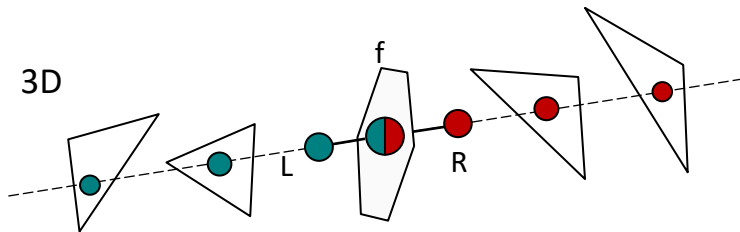
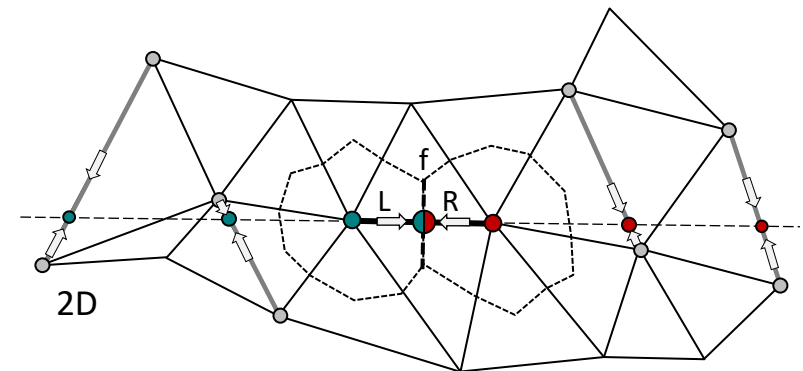
Предобусловленный BICG-Stab, ILU0

● Граничные условия

Твердые стенки, неотражающие, периодические, ...



Контрольные объемы



Gorobets A. Parallel Algorithm of the NOISEtte Code for CFD and CAA Simulations, Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. Vol. 39, No. 4. P. 524--532. DOI: 10.1134/S1995080218040078

Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.В., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISEtte для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики, Вычислительные методы и программирование, т.13 (2012), стр. 110-125.

Инструментарий: CFD-пакет NOISEtte

Уравнения Навье-Стокса во вращающейся неинерциальной системе координат

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{u}' = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho \mathbf{u}'}{\partial t} + \operatorname{Div} \rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}' + \nabla p = \operatorname{Div} \mathbf{S} - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}') \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{u}' (E + p) = \operatorname{div} \mathbf{q} + \operatorname{div} \mathbf{S} \mathbf{u}' \end{array} \right.$$

Уравнения Навье-Стокса во вращающейся неинерциальной системе координат, **записанная относительно скорости \mathbf{u}'**

Уравнения Навье-Стокса во вращающейся неинерциальной системе координат, **записанная относительно абсолютной скорости \mathbf{u}**

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho (\mathbf{u} - \mathbf{V}) = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \operatorname{Div} \rho (\mathbf{u} - \mathbf{V}) \otimes \mathbf{u} + \nabla p = \operatorname{Div} \mathbf{S} - \rho(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u} - \mathbf{V}) E + \operatorname{div} \mathbf{u} p = \operatorname{div} \mathbf{q} + \operatorname{div} \mathbf{S} \mathbf{u} \end{array} \right.$$

Инструментарий: CFD-пакет NOISEtte

- Уравнения Навье-Стокса во вращающейся неинерциальной системе координат¹
- SA RANS турбулентности + закон стенки²
- Гибридная модель турбулентности SA DDES ($\Delta = \Delta_{SLA}$ – Shear Layer Adapted)³
- Модифицированная формулировка «1A» Farassat'a для уравнения FWH⁴

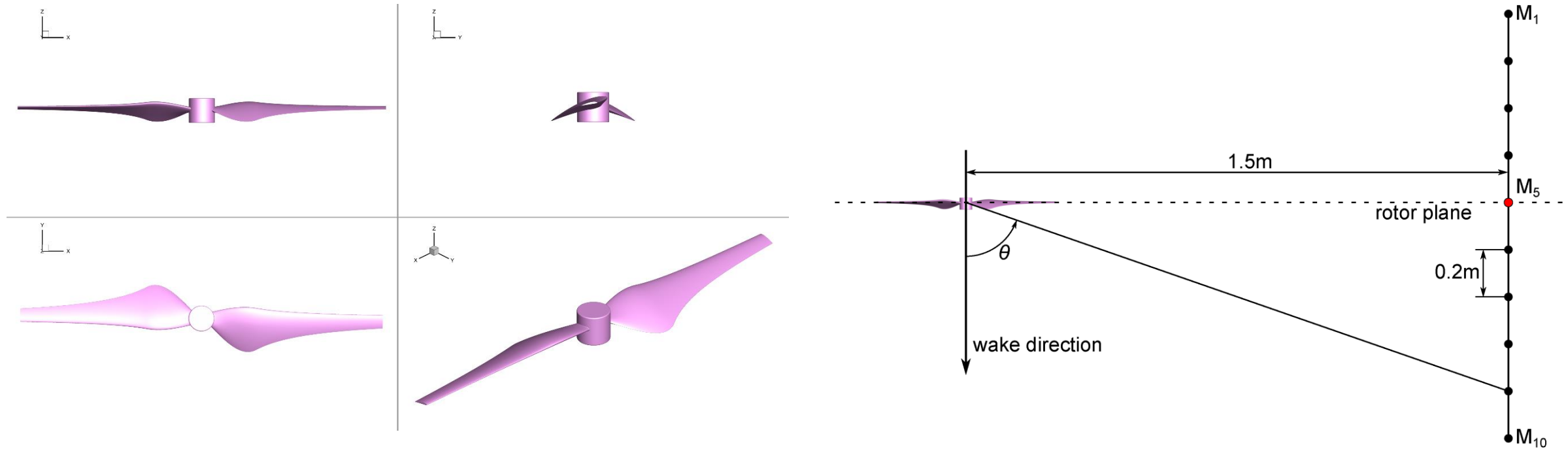
¹ Абалакин И.В., Аникин В.А., Бахвалов П.А., Бобков В.Г., Козубская Т.К. Численное исследование аэродинамических и акустических свойств винта в кольце // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2016, №3, с. 130-145, DOI: 10.7868/S0568528116030026

² Knopp T. Universal Wall Functions for Aerodynamic Flows: Turbulence Model Consistent Design, Potential and Limitations In book: MEGADESIGN and MegaOpt, NNFM 107, 55-71

³ Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A. An Enhanced Version of DES with Rapid Transition from RANS to LES in Separated Flows // Flow Turb. Comb., 2015, **95**(4), 709-737,

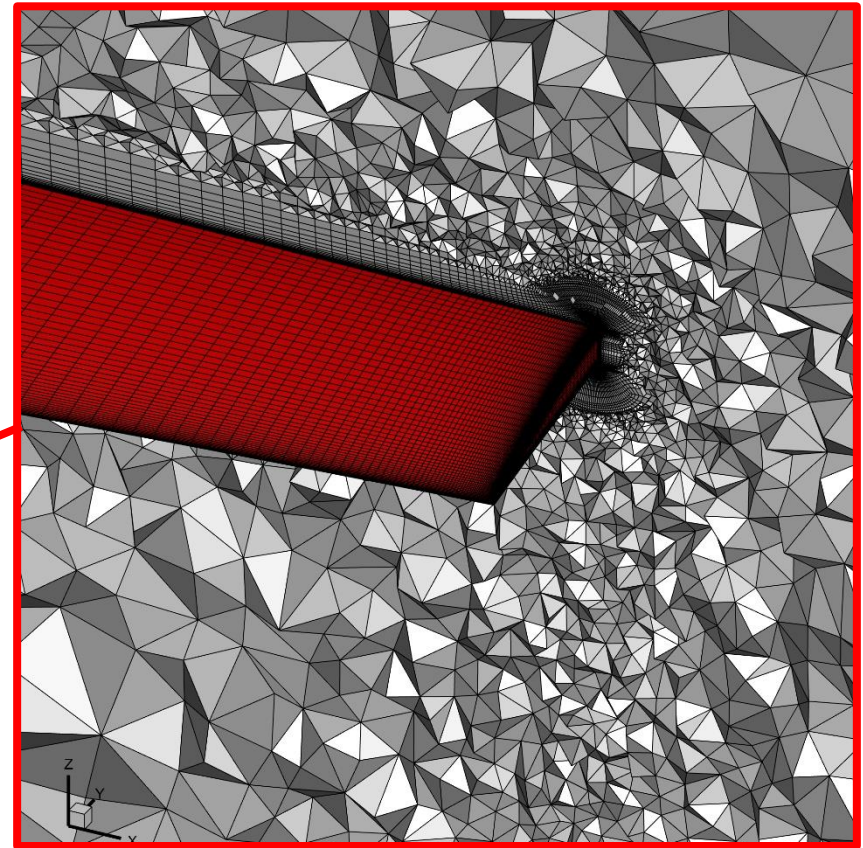
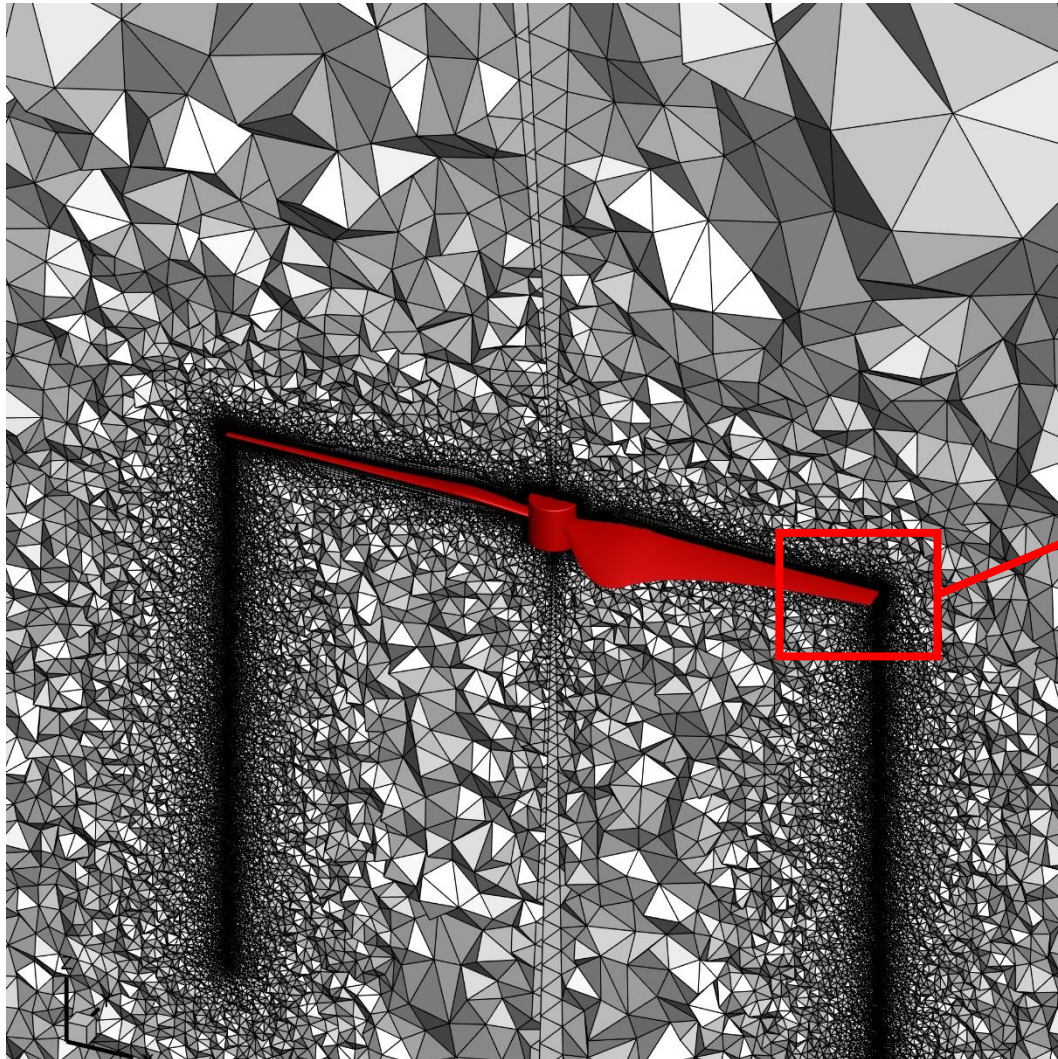
⁴ Бахвалов П.А., Бобков В.Г., Козубская Т.К. Технология расчёта акустических пульсаций в дальнем поле при расчёте во вращающейся системе координат // Матем. модел. 2017, т. 29, №7, с. 94-108

Постановка задачи



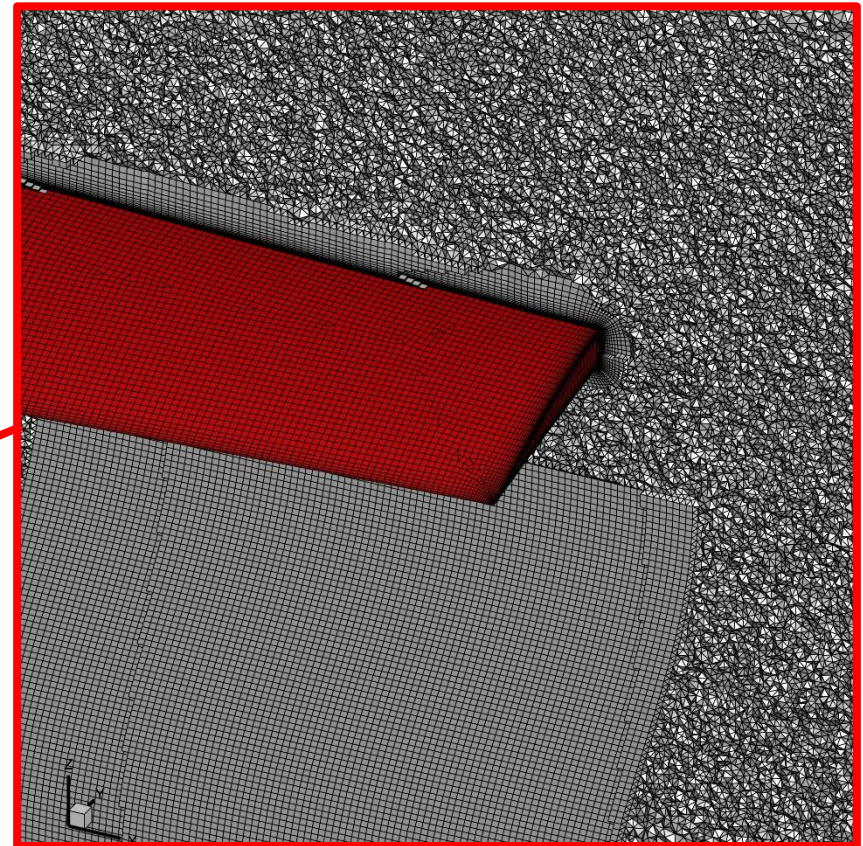
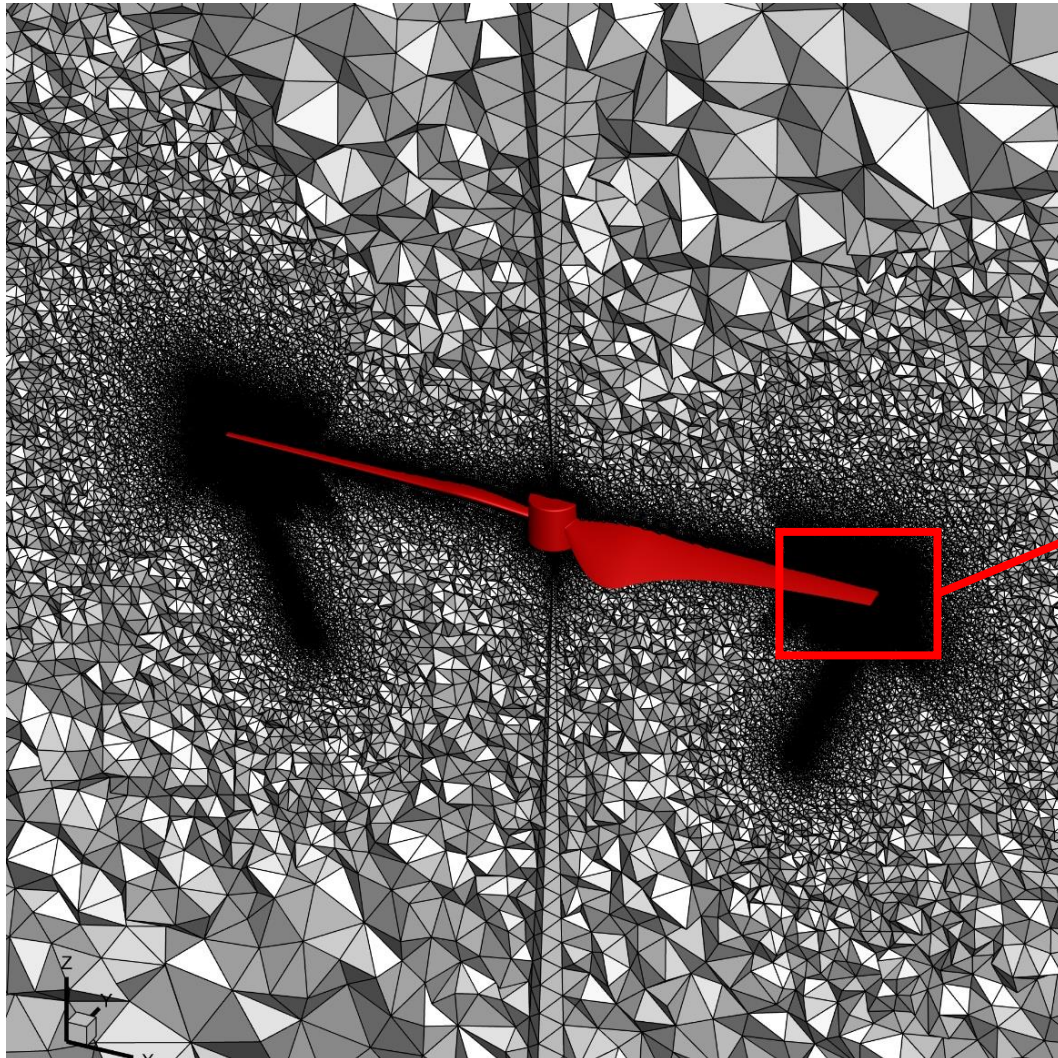
Радиус 12 см, хорда 32мм, NASA4412, кутка $\sim 40^\circ$, частота вращения 60, 90, 120 об/с
Re: 9.54×10^5 , 14.22×10^5 , 19.03×10^5

Расчетные сетки



Сетка для RANS-расчета:
гибридная неструктурированная
4.5М узлов, 23М элементов

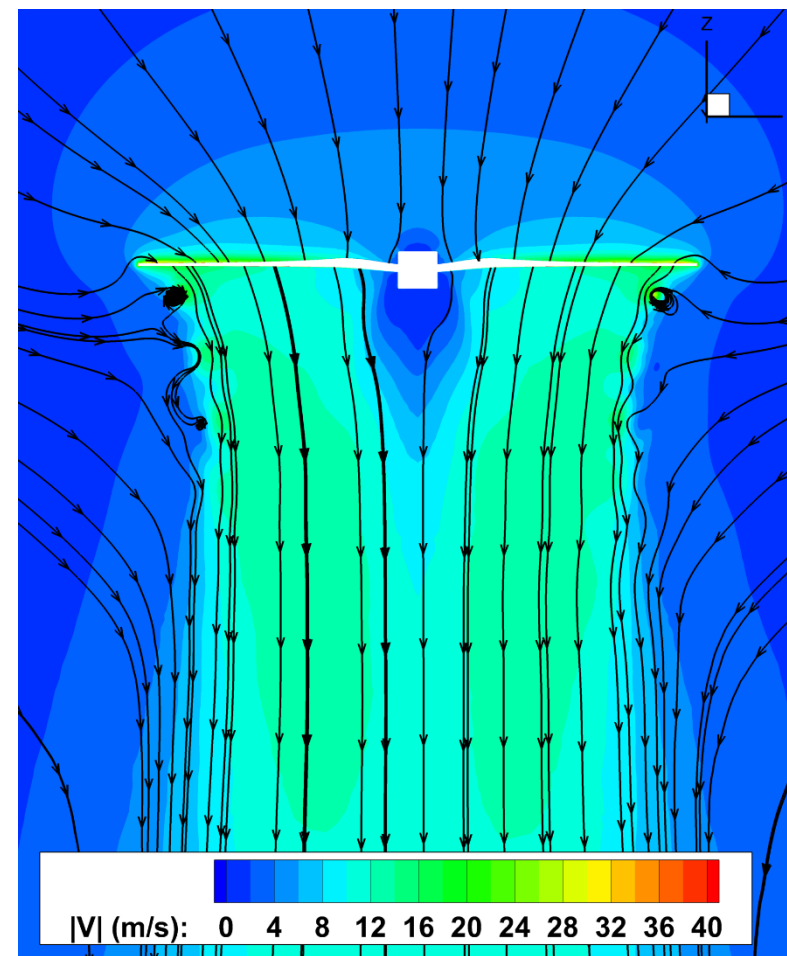
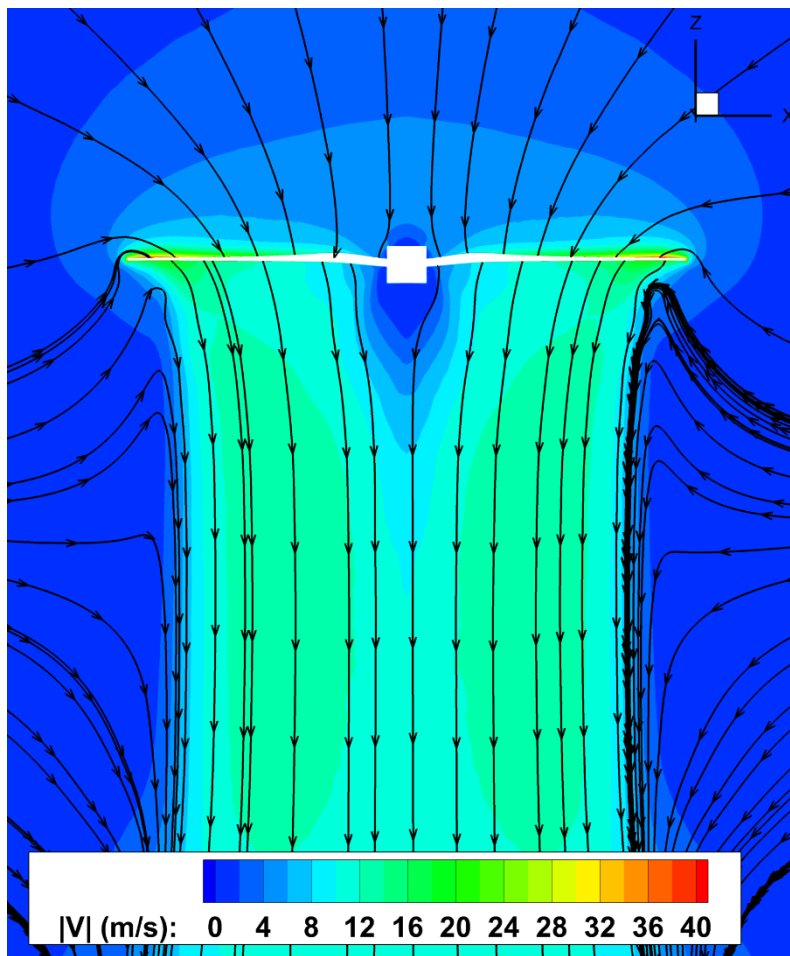
Расчетные сетки



Сетка для IDDES-расчета:
гибридная неструктурированная
60М узлов, 200М элементов



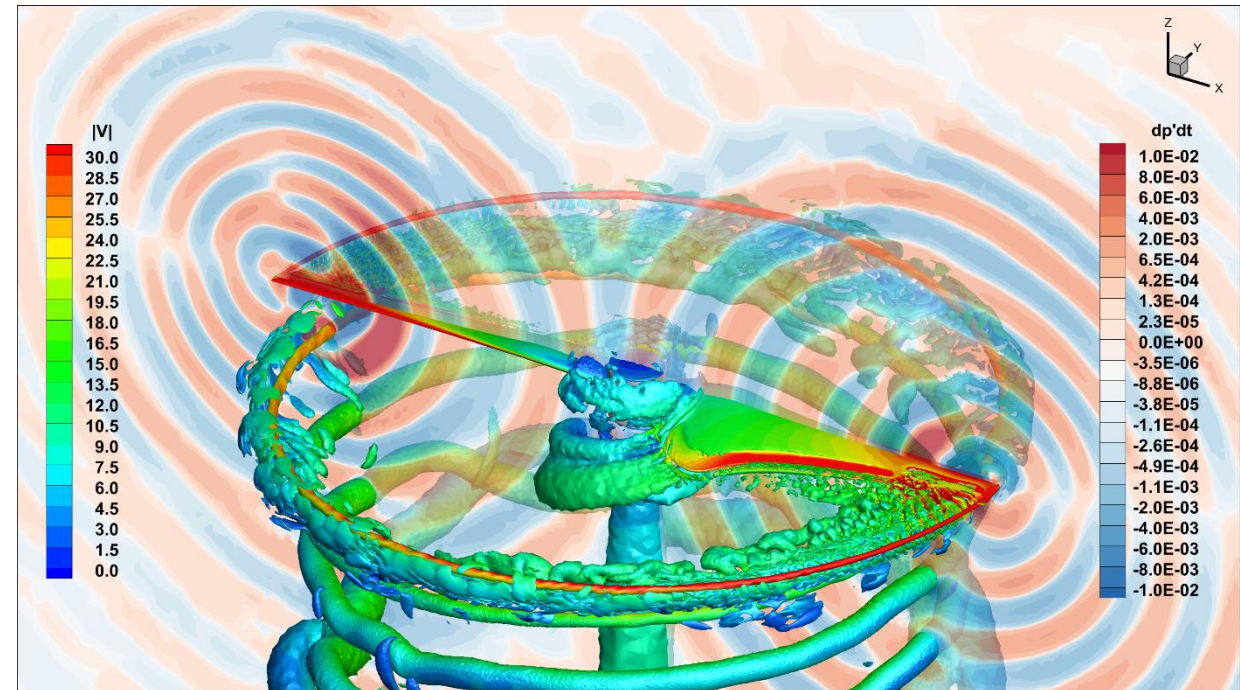
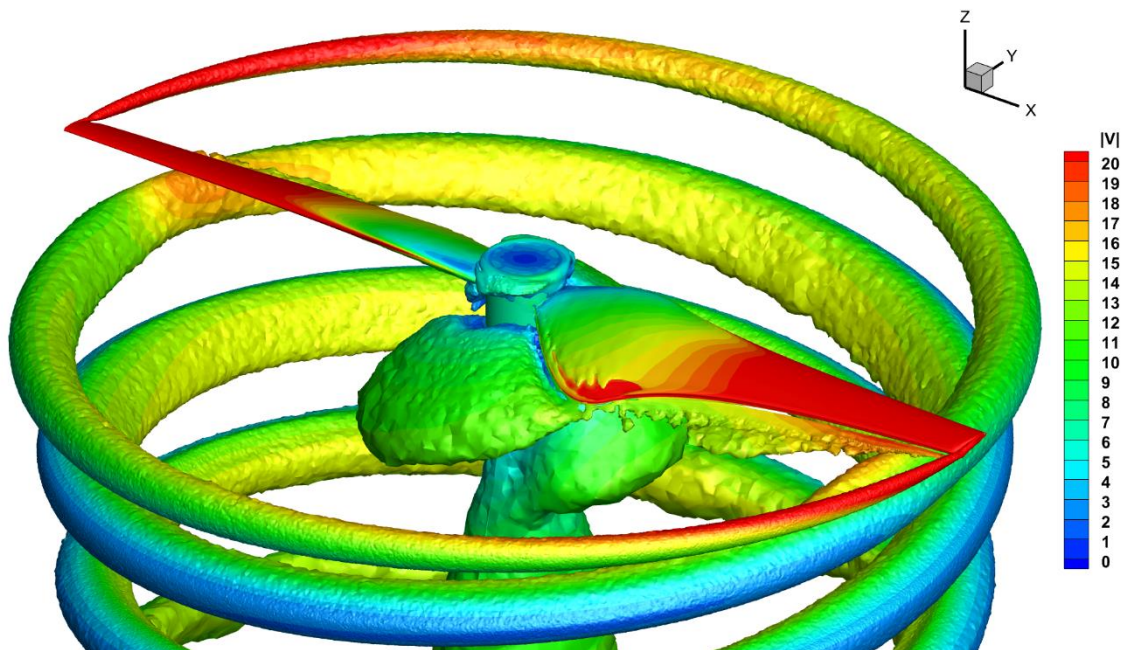
Результаты: аэродинамика



Поле скорости и линии тока в поперечном сечении, 120 об/с:
результаты RANS(слева) и IDDES(справа) расчетов

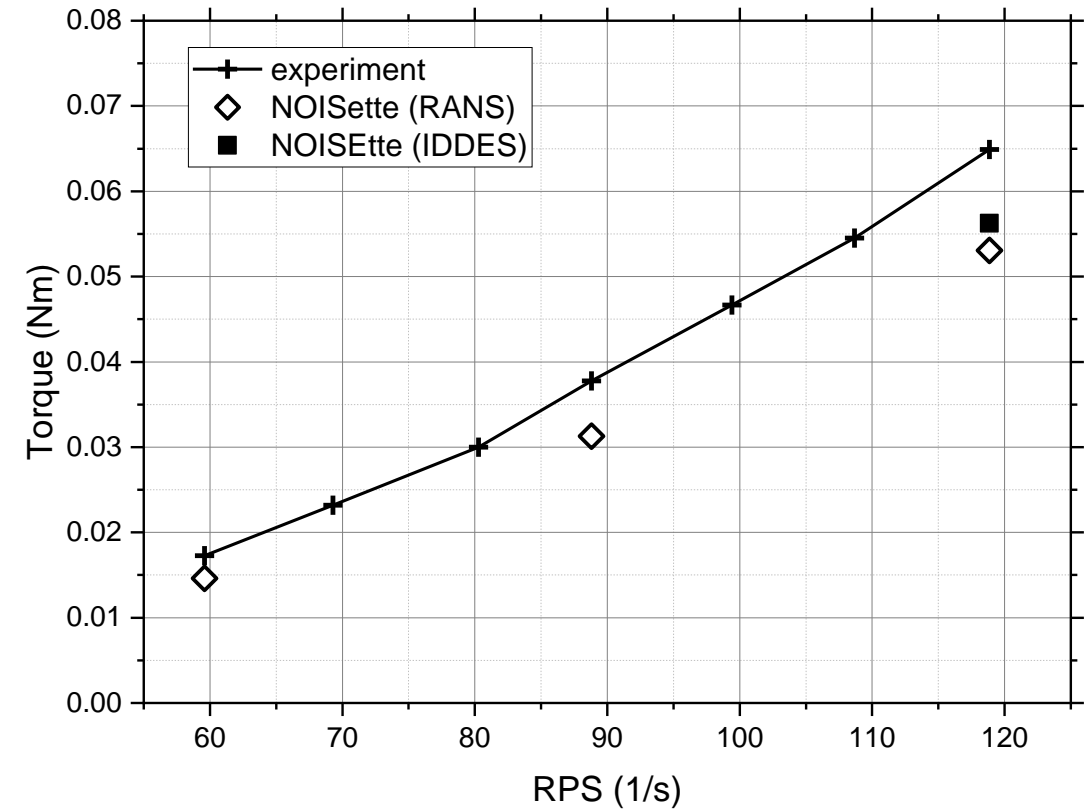
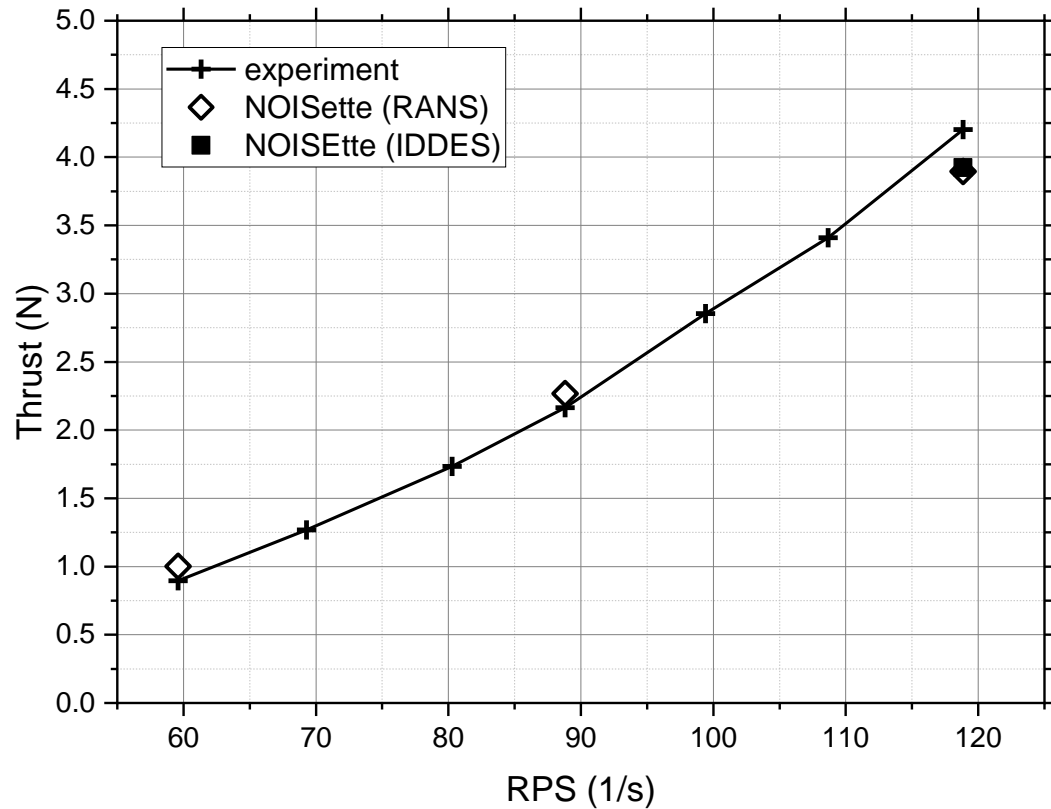


Результаты: аэродинамика



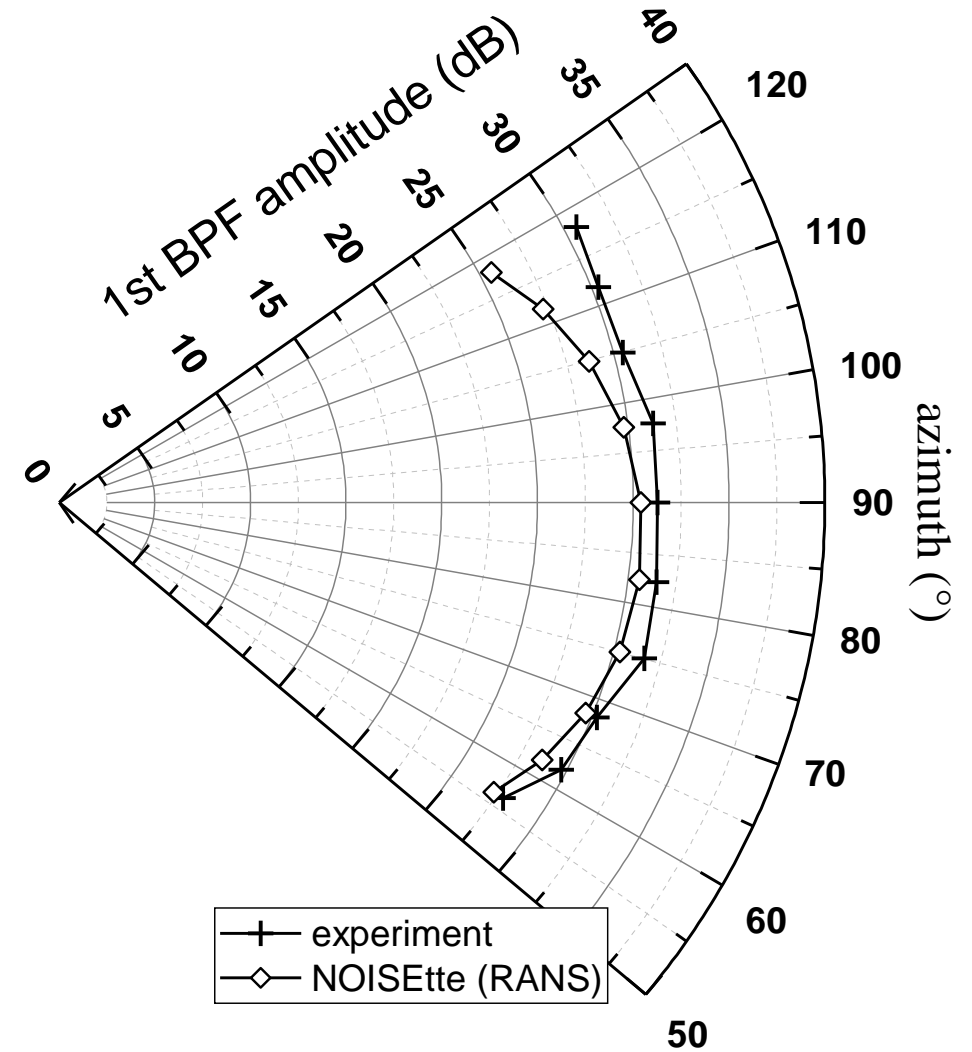
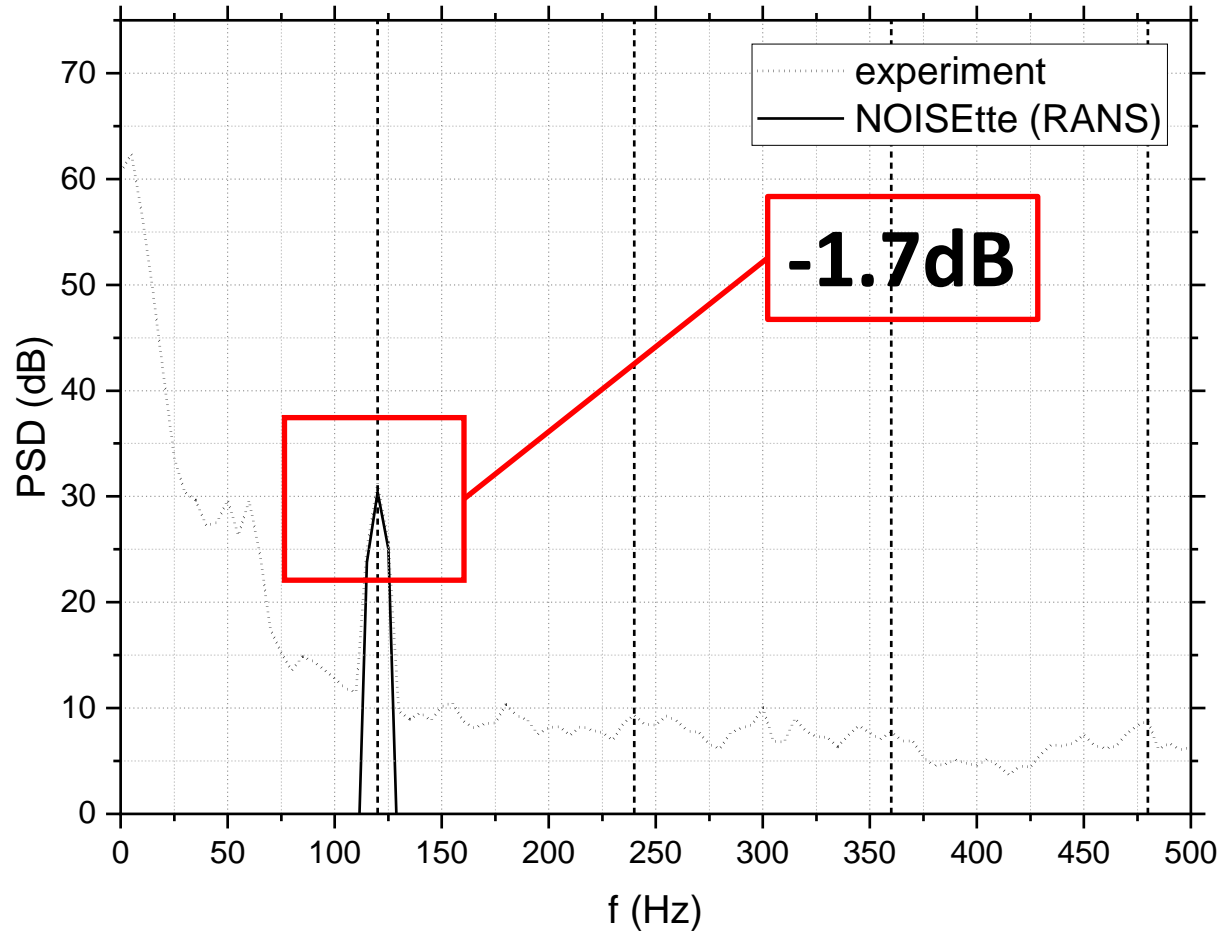
Турбулентные структуры (изоповерхность Q-критерия), 120 об/с:
результаты RANS(слева) и IDDES(справа) расчетов

Результаты: аэродинамика



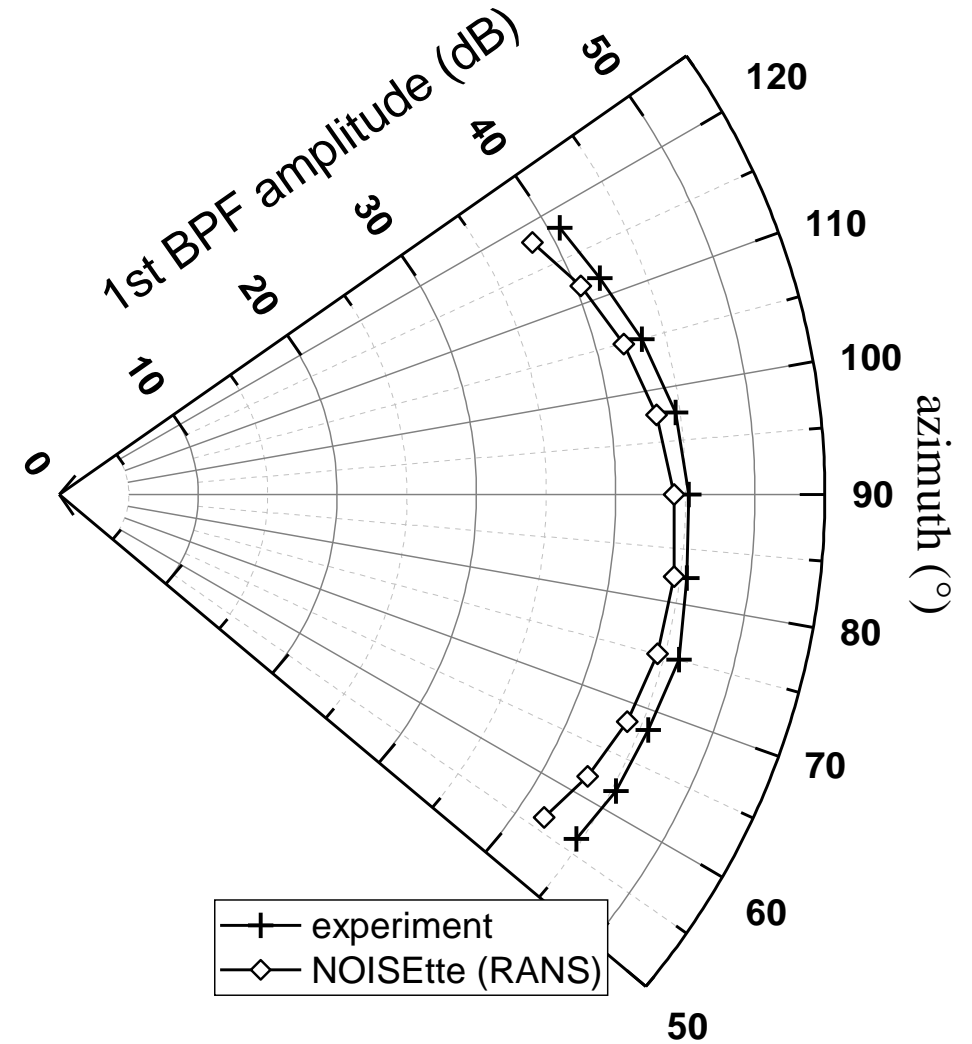
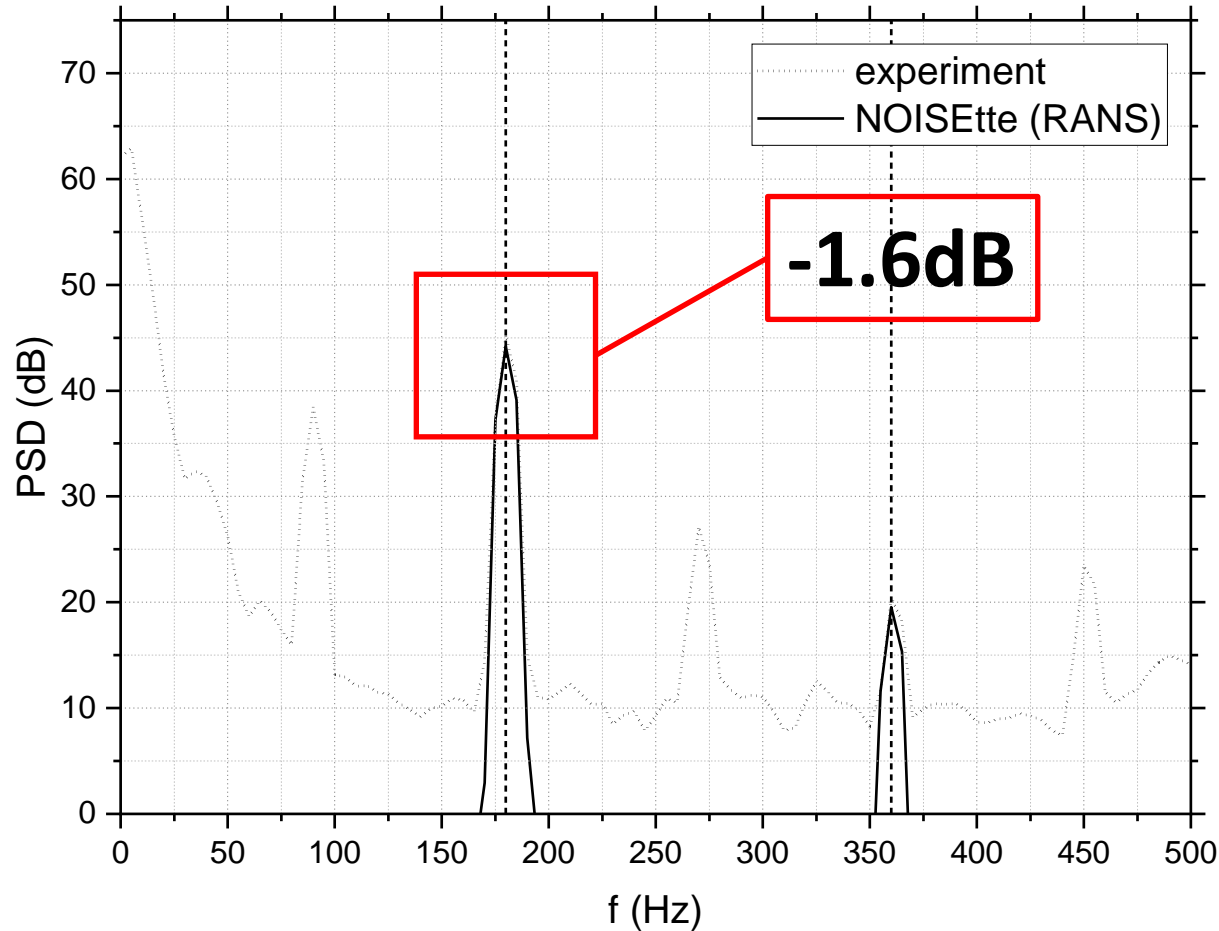
Сила тяги (слева) и крутящий момент винта (слева)

Результаты: акустика



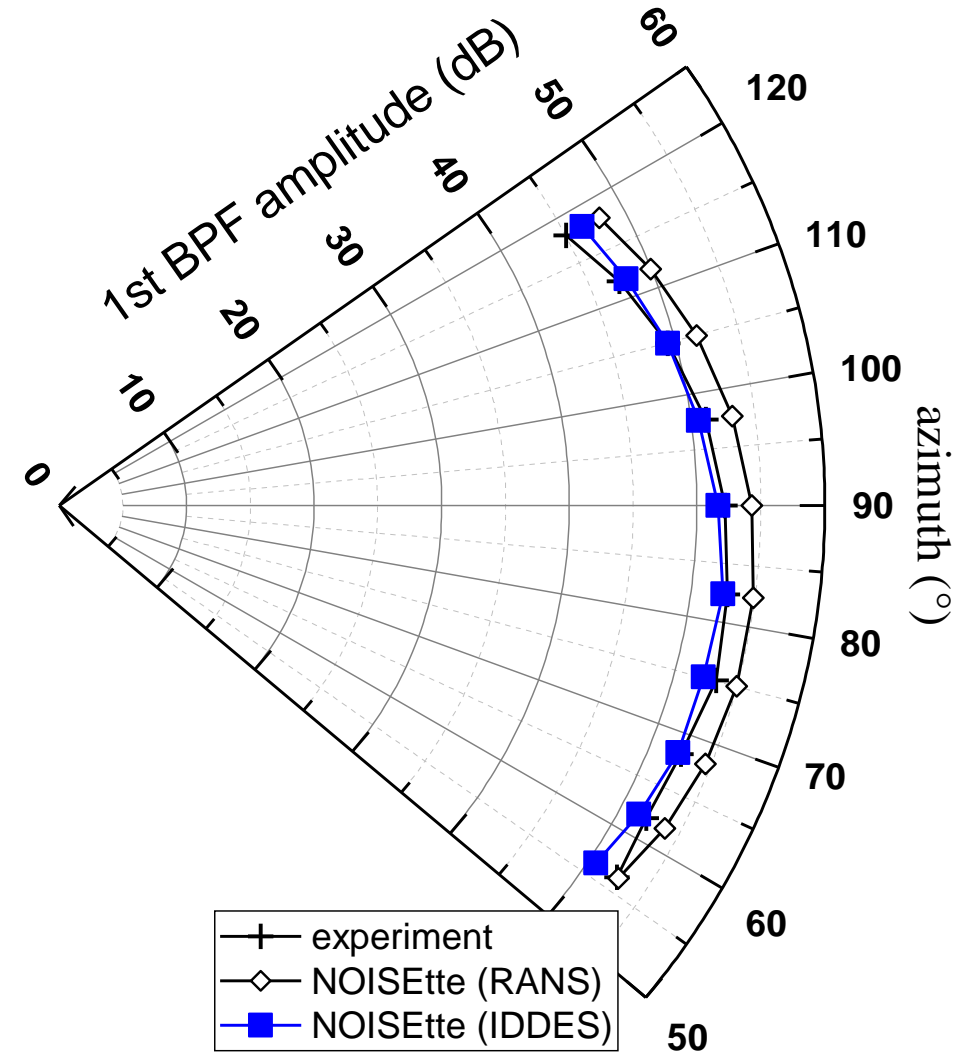
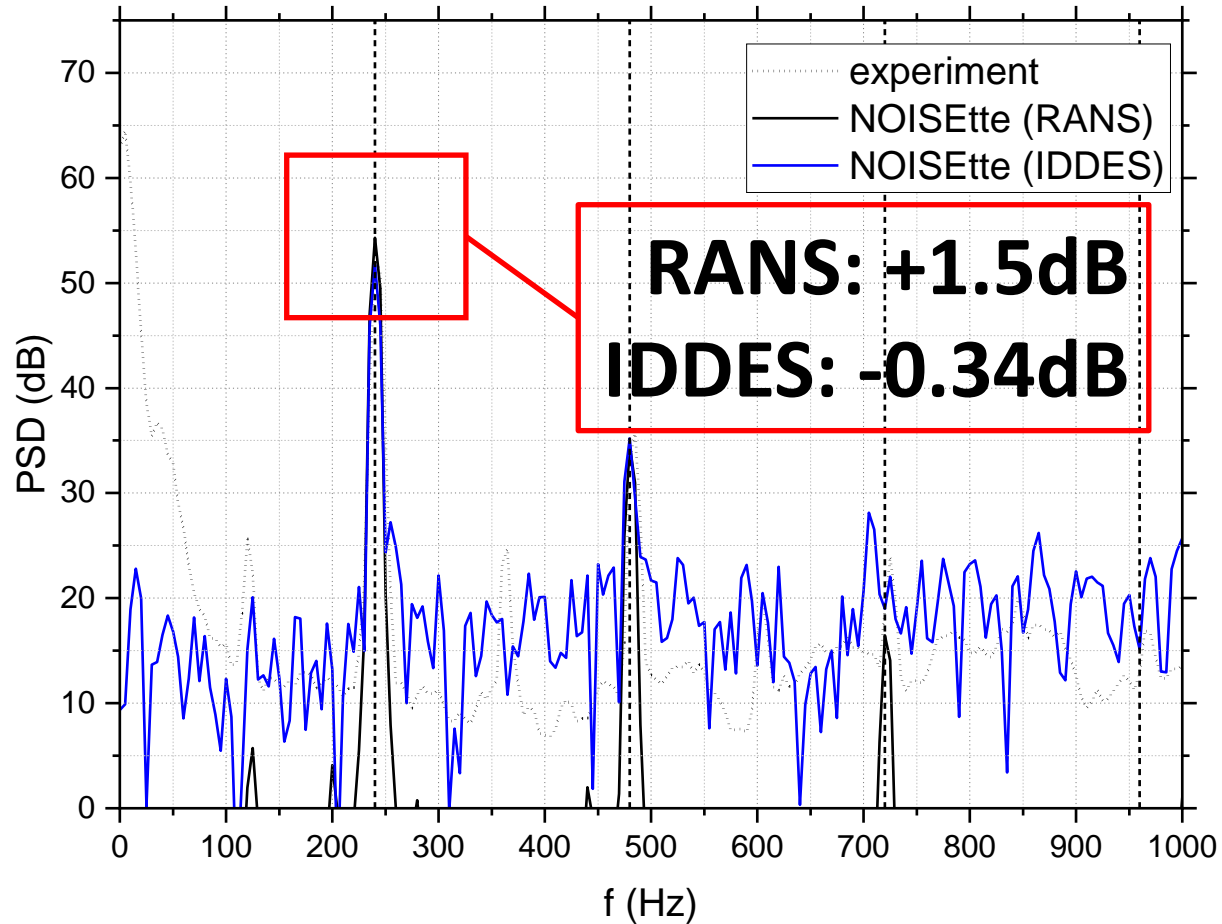
Спектр и диаграмма направленности уровня звукового давления первой частоты следования лопастей в точке M5: сравнение результата RANS расчета с экспериментальными данными (60 об/с)

Результаты: акустика



Спектр и диаграмма направленности уровня звукового давления первой частоты следования лопастей в точке M5: сравнение результата RANS расчета с экспериментальными данными (90 об/с)

Результаты: акустика



Спектр и диаграмма направленности уровня звукового давления первой частоты следования лопастей в точке М5: сравнение результата RANS и IDDES расчетов с экспериментальными данными (120 об/с)

Заключение

Проведенные численные эксперименты маломасштабного винта показали что

- ✓ согласованность уровня звукового давления на 1BPF в **RANS**-расчете убывает с удалением от плоскости вращения винта; разница в амплитуде 1BPF в плоскости вращения винта составляет около **+1.5dB**
- ✓ уровень звукового давления на 1BPF **IDDES**-расчета хорошо согласуется с экспериментальными данными во всем диапазоне; разница в амплитуде 1BPF в плоскости вращения винта составляет **-0.34dB**



Спасибо за внимание!