

VIII Российская конференция  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ

МАРАКУЕВА О.В.  
ВОРОШНИН Д.В.

ООО «НУМЕКА»

- увеличение эффективности и уменьшение массы → увеличение аэродинамической нагрузки на лопатки, повышение вероятности возникновения нежелательных аэромеханических явлений
- исследование динамического поведения лопаток в нестационарном потоке – комплексная проблема
- одна из наиболее сложных задачи – анализ автоколебаний, в том числе флаттера
- прогнозирование флаттера:
  - критериальные оценки (напр., число Струхаля)
  - вероятностно-статистические подходы
  - численные подходы:
    - совместное решение газодинамики и твердотельной задачи
    - последовательное решение газодинамической и твердотельной задач или одной из них с использованием аналитических функций для другой (напр. энергетический метод)

**Цель** – отработка методов численного моделирования аэроупругого взаимодействия лопаток ГТД и нестационарного набегающего потока в ПК *Numeca Fine/Turbo*

## **Задачи:**

- разработка математических моделей двумерных профилей и трехмерных лопаток турбомашин, позволяющих провести численную оценку устойчивости к флаттеру
- проведение идентификации полученных результатов на основании открытых экспериментальных исследований по продувкам плоских решеток стандартных конфигураций
- сравнение различных подходов оценки устойчивости трехмерной лопатки (энергетический метод и связанная задача)

Колебание будет неустойчивым, если лопатка в результате полного цикла получит энергию от потока воздуха

Предполагается, что все лопатки колеблются по одной и той же форме, с одинаковой частотой и амплитудой (постановка соответствует случаю с наименьшей устойчивостью). Основное предположение - автоколебания происходят по собственным частотам и формам

## Алгоритм:

- определение собственных форм и частот колебаний лопатки без учета нестационарных газовых нагрузок
- выбор форм и частот, для которых наиболее вероятно возникновение автоколебаний
- задание закона движения лопатки: форма, частота, амплитуда, фазовый сдвиг между лопатками
- проведение нестационарного газодинамического анализа при заданном движении лопаток
- вычисление работы газа над лопаткой за один период колебаний. Проверка критерия флаттера

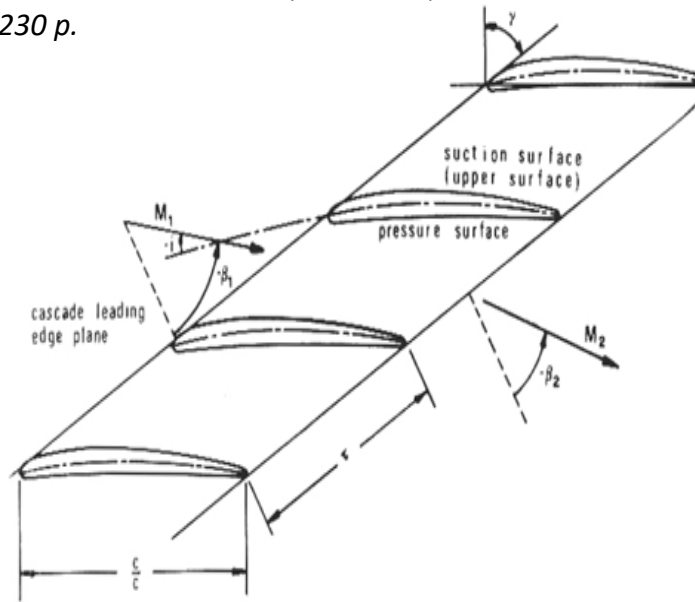
Критерий флаттера: коэффициент демпфирования  $\Xi = -A_{\text{газ}} = -\int_0^T \int_0^l (Fv + M\omega) ds dt$

- неустойчивость:  $\Xi < 0$
- устойчивость:  $\Xi \geq 0$

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОЙ РЕШЕТКИ ДОЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД

*Bolcs A. Aeroelasticity in Turbomachines – Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results / A. Bolcs, T.H. Fransson// Communication du LTAT-EPFL, Lausanne, Switzerland. –1986. – 230 p.*



Решётка из 11 лопаток с профилем NACA 65, совершающих заданные крутильные колебания относительно центра хорды:

$$\tilde{\alpha}_m(t) = \alpha^m(x, y)e^{i\{\omega(m)t\}},$$

$\alpha^m$  – амплитуда угла установки,  $\omega(m)$  – круговая частота

Положение максимальной толщины профиля	x	0.5
Отношение толщины к хорде	d	0.06
Хорда	c, м	0.1524
Отношение шага решетки к хорде профиля	$\tau$	0.75
Угол установки профиля	$\gamma$	55°
Кривизна профиля		10°
Высота лопатки	s, м	0.254

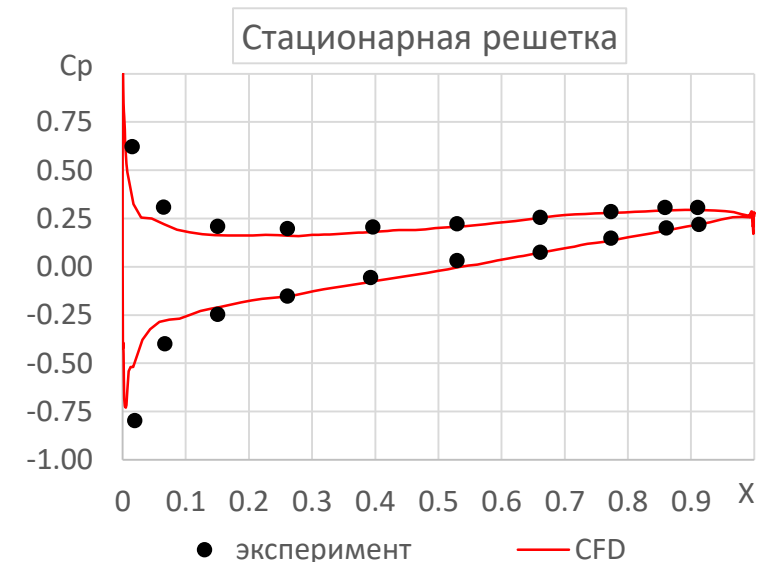
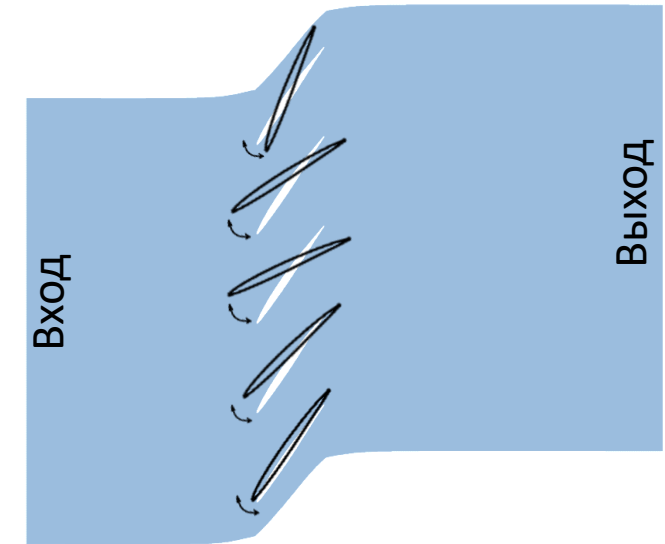
Число Маха на входе	$M_1$	0.18
Угол атаки	$i$	6°
Отношение статического давления к полному на входе	$p_1/p_{w1}$	0.979
Отношение статического давления на выходе к полному на входе	$p_2/p_{w1}$	0.9852
Угол потока на входе	$\beta_1$	62.5°
Амплитуда колебаний профилей	$\alpha$	2.0°
Частота колебаний профилей	f, Гц	15.5
Межлопаточный угол сдвига фаз	$\sigma$	$\pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ, 0^\circ, 180^\circ$

## Основные допущения:

- двумерный характер течения - моделирование проведено для плоского слоя толщиной в одну ячейку
- в модель включены только 5 из 11 лопаток, т.к. анализируются параметры только на средней лопатке

## Постановка:

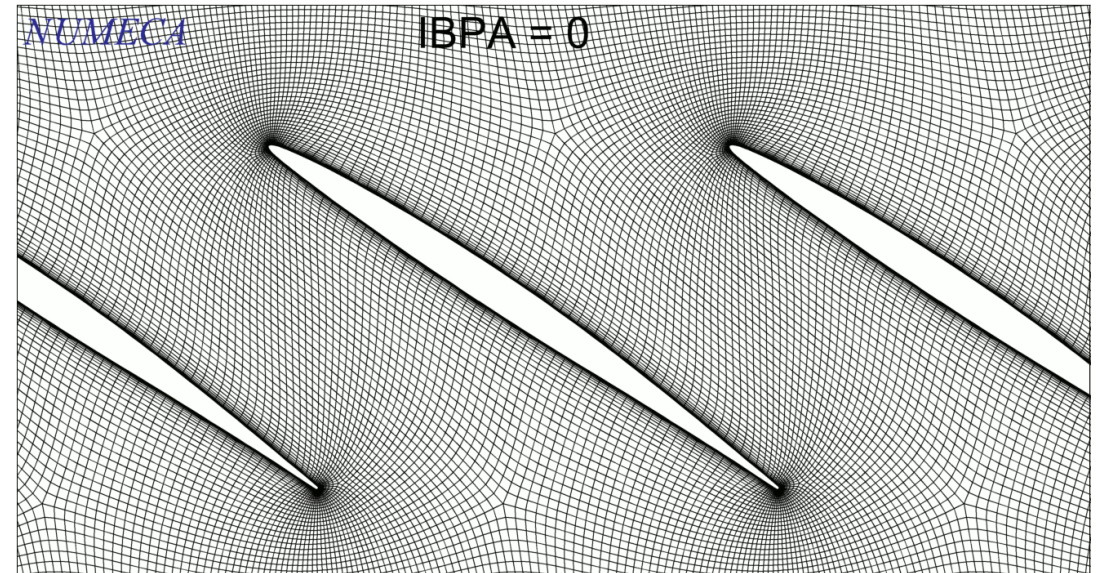
- МКО ПО Numeca Fine/Turbo v.13.1
- гексагональная сетка: 183 тыс. ячеек,  $y^+ < 1$
- термически совершенный газ, закон Сазерленда для  $\mu$
- RANS для неподвижной решетки
- URANS для колеблющихся профилей,  $\Delta t = 6.5 \cdot 10^{-4}$  с (100 шагов на период колебаний)
- SST модель турбулентности
- граничные условия:
  - на входе:  $P_0 = 101.3$  кПа;  $T_0 = 285.8$  К;  $V_x/|V| = 0.47$ ;  $V_y/|V| = 0.88$ .
  - на выходе:  $P = 99.7$  кПа.
  - стенки адиабатные





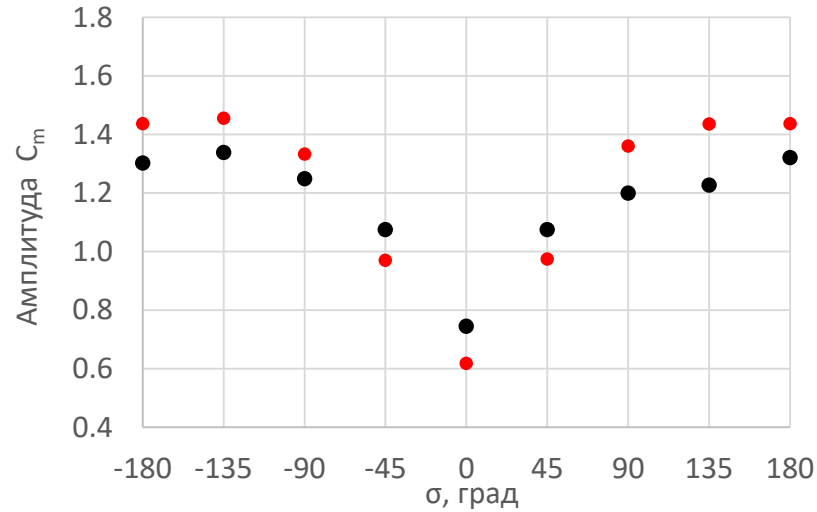
На каждом временном шаге проводится:

- деформация сетки (перемещение сеточных узлов) на основании заданного угла установки методом RBF
- проведение газодинамического расчета

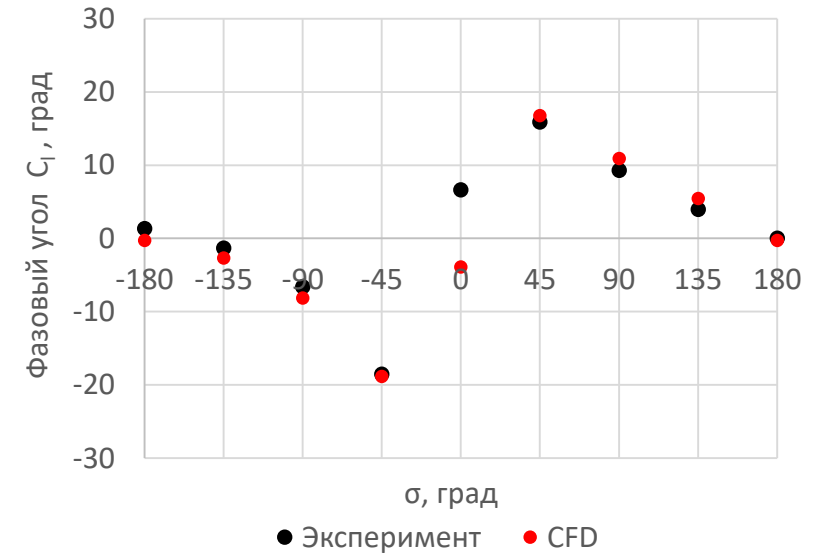
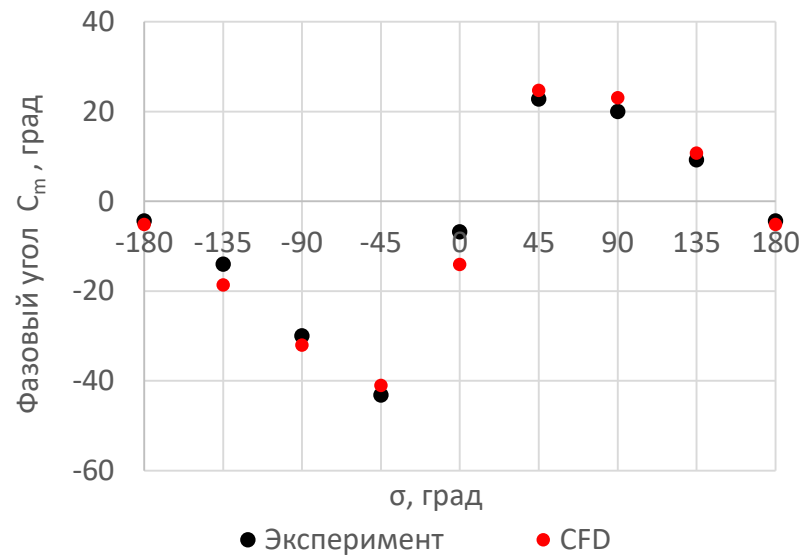
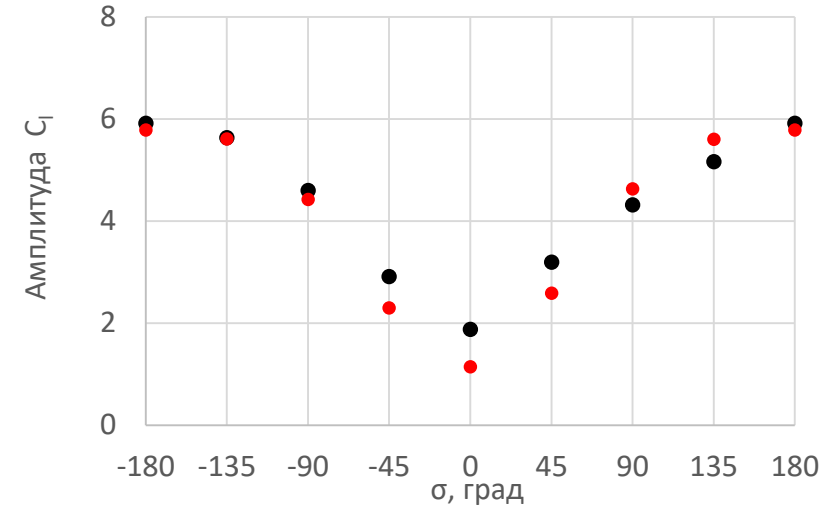




Коэффициент момента

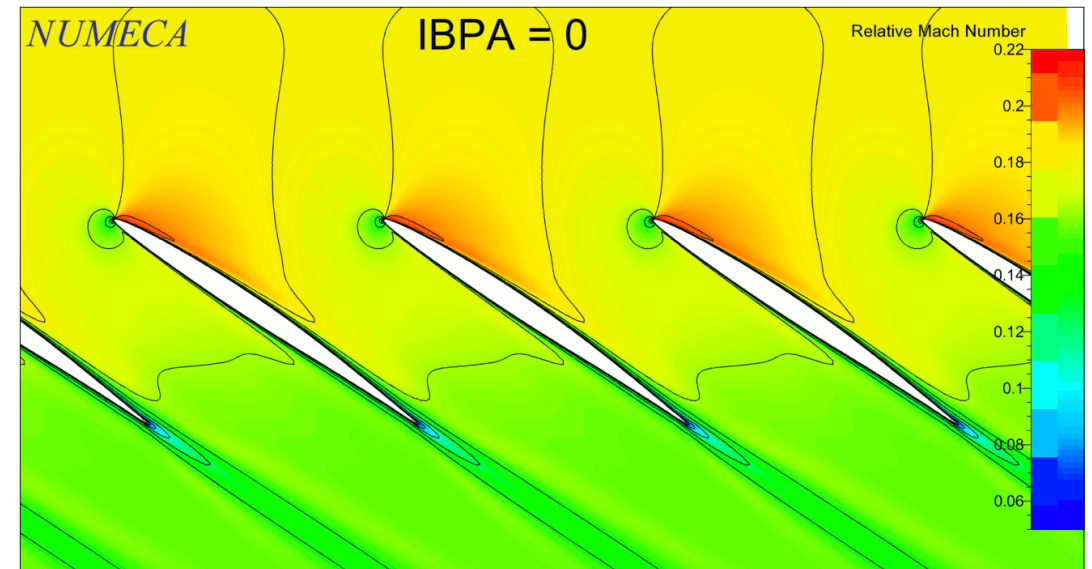
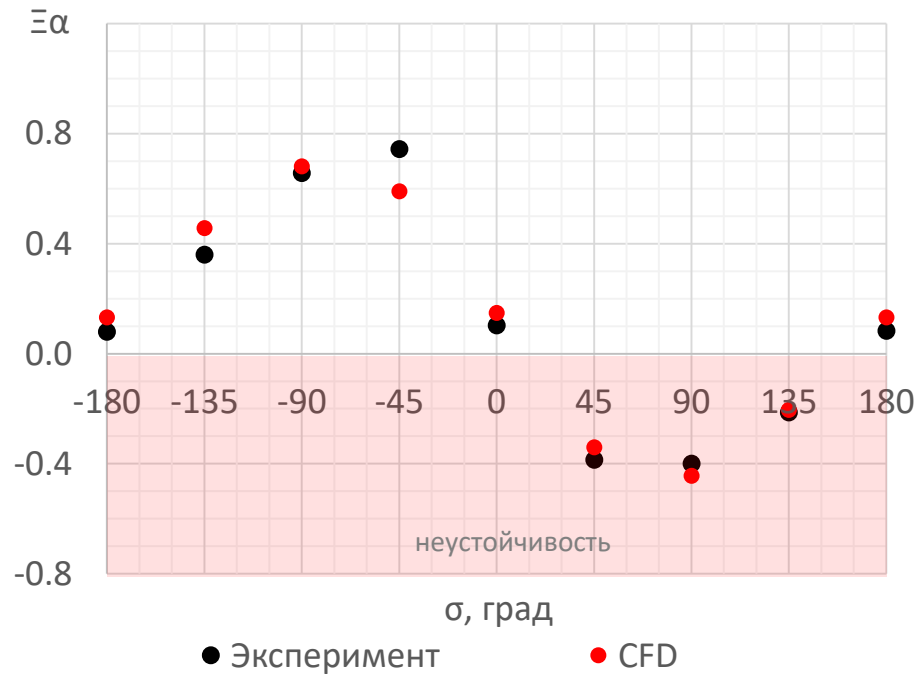


Коэффициент подъемной силы



Коэффициент аэродинамического демпфирования:

$$\xi_\alpha = -\tilde{c}_{w\alpha} / \pi\alpha^2 = -Im\{\tilde{c}_m\}$$



ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ  
РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В  
НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД  
СВЯЗАННАЯ ЗАДАЧА

## Рассматривается два подхода:

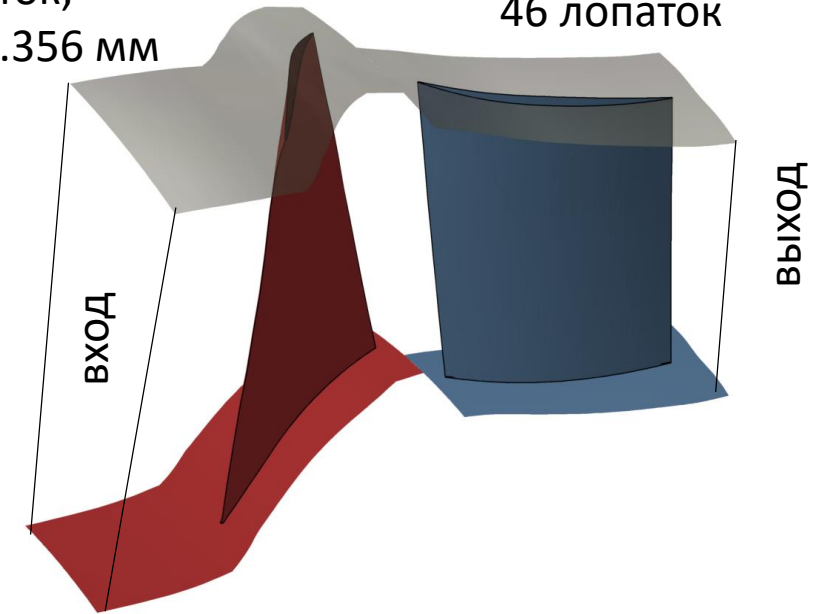
- колебания с заданием амплитуды на каждом временной шаге (энергетический метод) - NLH метод
- колебания с определением амплитуды на основании газодинамического расчета (связанная задача) – URANS

## Постановка:

- МКО ПО Numeca Fine/Turbo v.13.1
- гексагональная сетка:  $y^+ < 1$ , РК – 1.14 млн ячеек, НА – 730 тыс. ячеек
- термически совершенный газ, закон Сазерленда для  $\mu$
- SA модель турбулентности
- граничные условия:
  - на входе:  $P_0 = 101.3$  кПа;  $T_0 = 288.2$  К;  $V_z/|V| = 1$
  - на выходе:  $P$
  - стенки адиабатные
  - частота вращения  $N = 17188$  об/мин
- колебания РК по 1ой собственной форме → определена МКЭ

36 лопаток,  
зазор 0.356 мм

46 лопаток

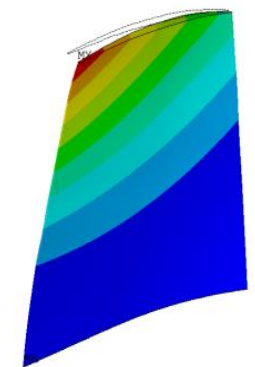


Материал: Maraging 200

1я форма  $f = 1141.3$  Гц



заделка



## Алгоритм:

- деформация сетки (перемещение сеточных узлов) на основании заданных перемещений
- проведение газодинамического расчета

## Постановка:

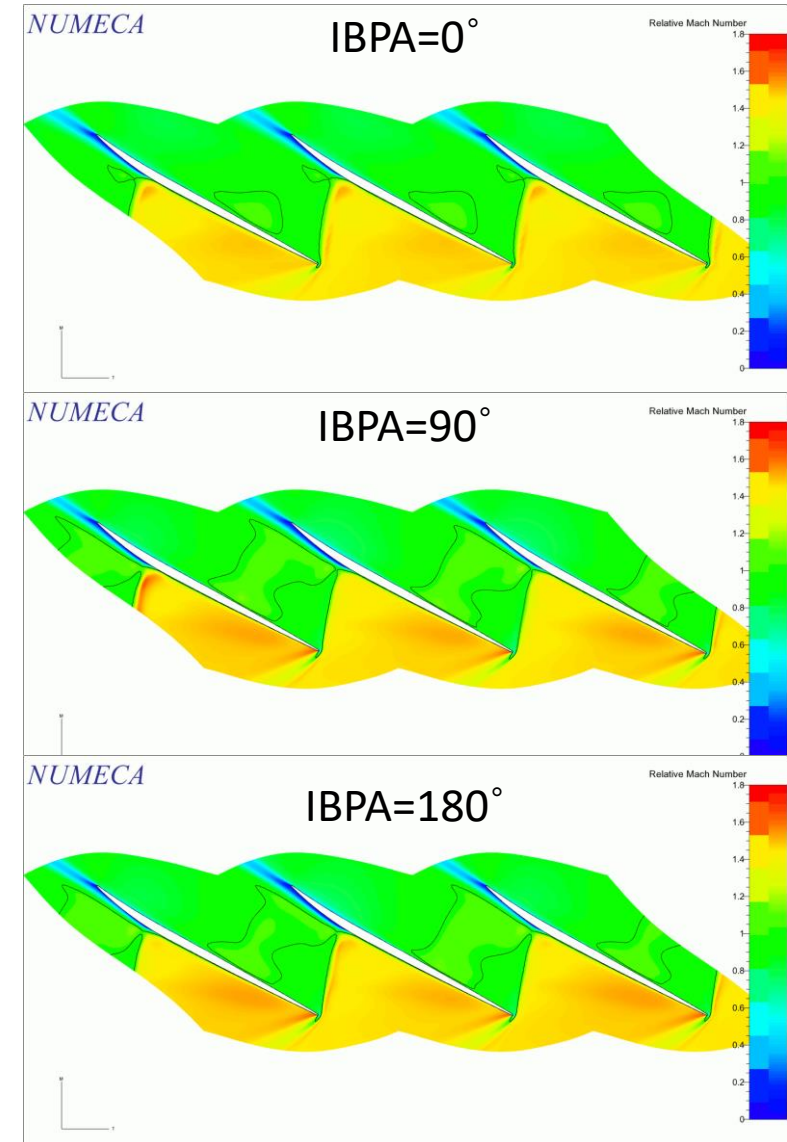
- Амплитуда - 0.7% от хорды= 0.4 мм
- Рабочая точка
- NLH 3h

## Параметры:

- межлопаточный угол сдвига фаз (IBPA)

$$\sigma = 2\pi \cdot \frac{n}{N_{\text{л}}}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \text{и т.д.},$$

$N_{\text{л}}$  – число лопаток



## Алгоритм:

- деформация сетки (перемещение сеточных узлов) на основании заданных перемещений
- проведение газодинамического расчета

## Постановка:

- Амплитуда - 0.7% от хорды= 0.4 мм
- Рабочая точка
- NLH 3h

## Параметры:

- межлопаточный угол сдвига фаз (IBPA)

$$\sigma = 2\pi \cdot \frac{n}{N_L}, \quad n = 1, 2, 3... \text{ и т.д.},$$

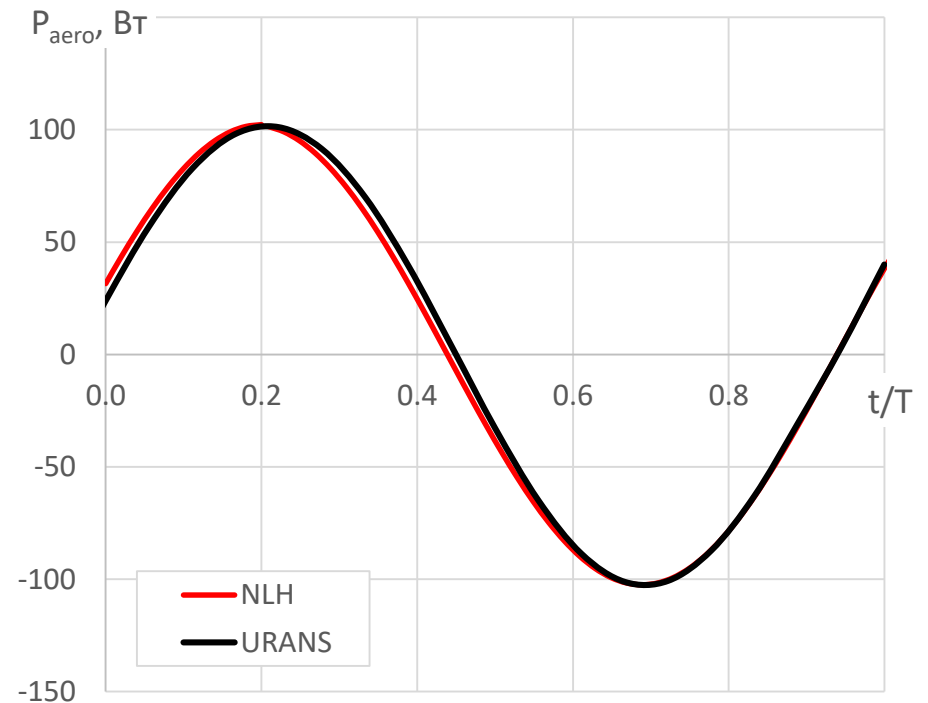
$N_L$  – число лопаток

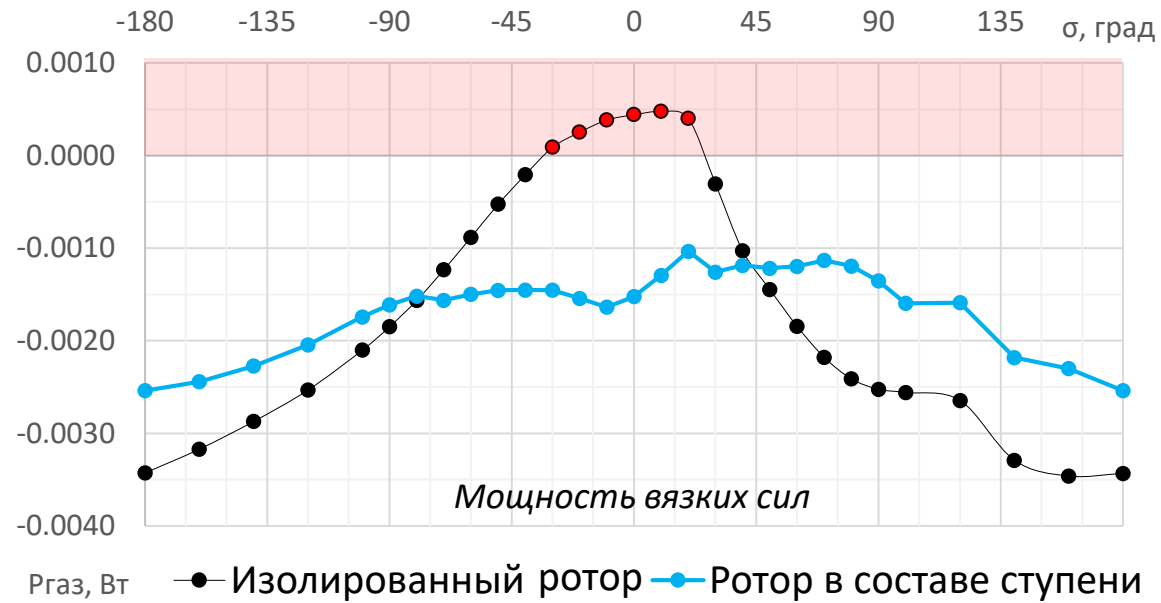
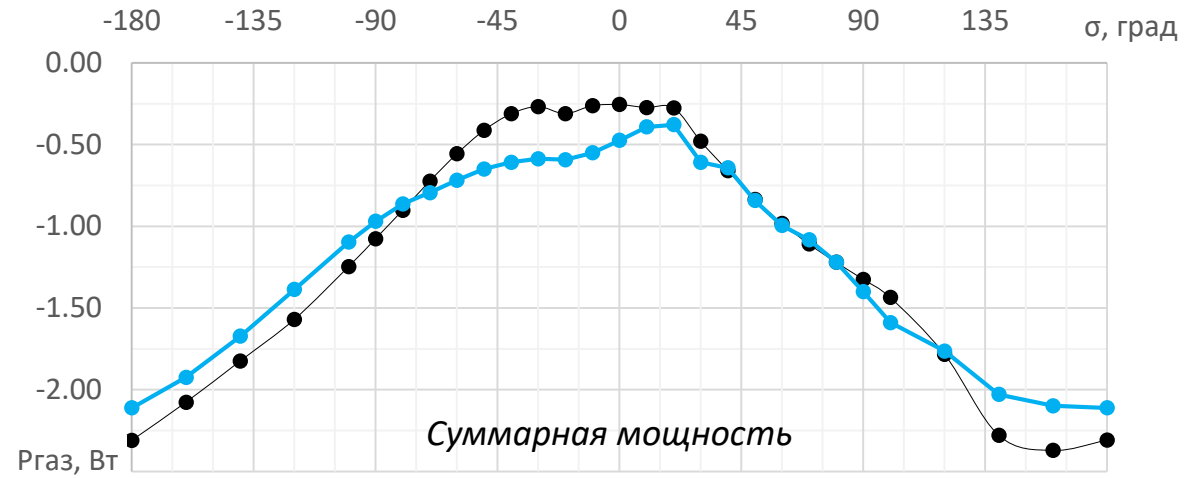
- критерий флаттера – мощность газовых сил

$$P_{\text{газ}} = \int (p\vec{n} + \tau\vec{n})\vec{V}_g dS$$

$\tau$  – вязкие напряжения,  
 $V_g$  – скорость деформации,  
 $S$  – поверхность лопатки

## Мощность газовых сил за период колебаний Изолированное РК, IBPA = 0







## Алгоритм:

- вычисление перемещений:

$$y_j''(t) + 2\omega_j \xi_j y_j'(t) + \omega_j^2 y_j(t) = F_j(t)$$

$$F_j(t) = \{\varphi_j\}^T \{F(t)\}$$

$$\{u(t)\} = \sum_{i=1}^n y_i(t) \{\varphi_i\}$$

$y(t)$  – вектор главных координат

$\xi$  – коэффициент демпфирования

$\omega$  – собственные частоты

$\{\varphi\}$  – собственные формы

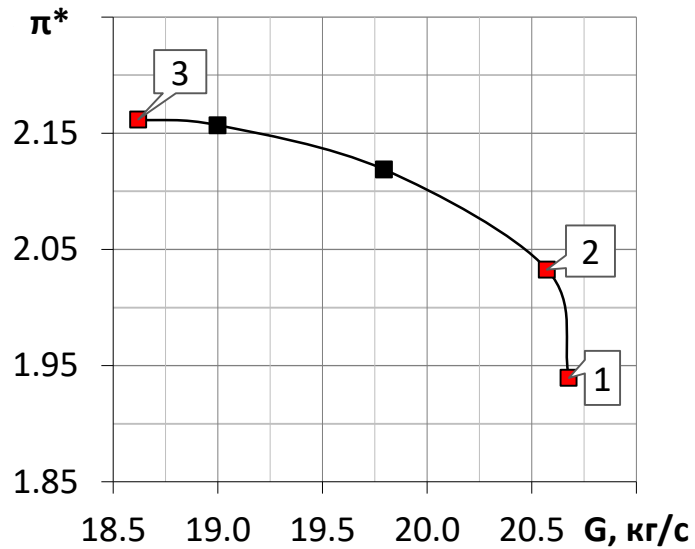
$\{u(t)\}$  – вектор узловых перемещений

$\{F(t)\}$  – внешние нагрузки

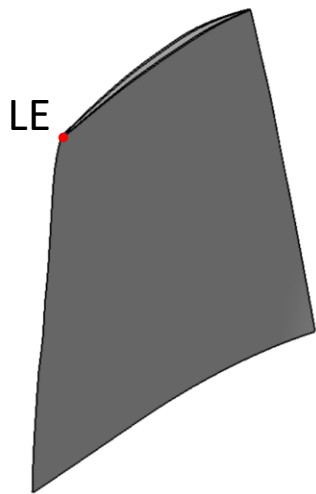
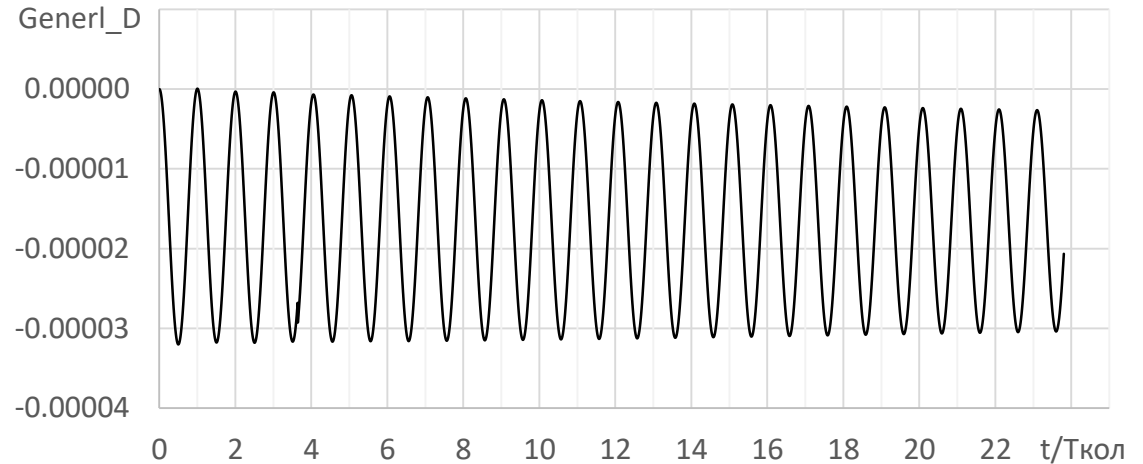
- деформация сетки (перемещение сеточных узлов)
- проведение газодинамического расчета

## Постановка:

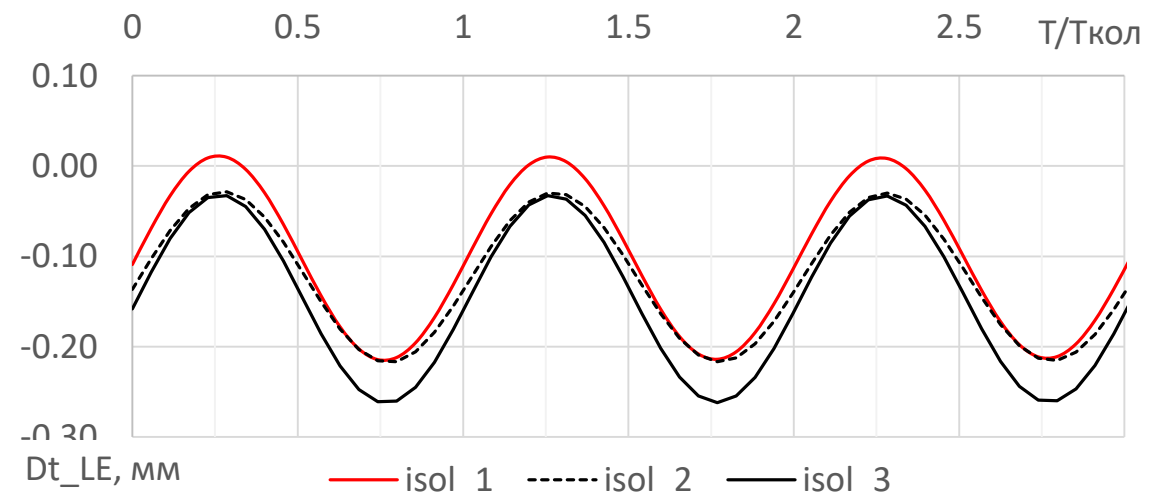
- URANS:  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}$  с (20 шагов на межлопаточный канал РК, 175 шагов на период колебаний)
- РК (с 1 и с 18 лопатками в секторе)
- ступень со скорректированным количеством лопаток 36 РК – 48 НА (вместо 46)



Обобщенные перемещения 18ти лопаток в точке №3

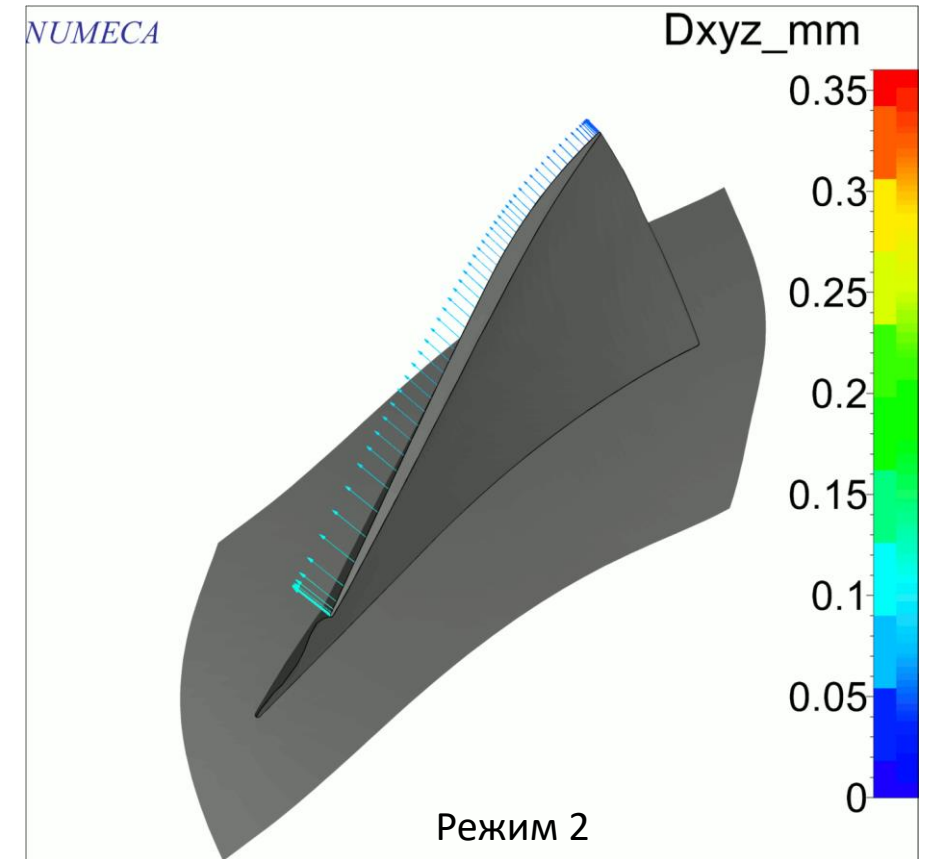


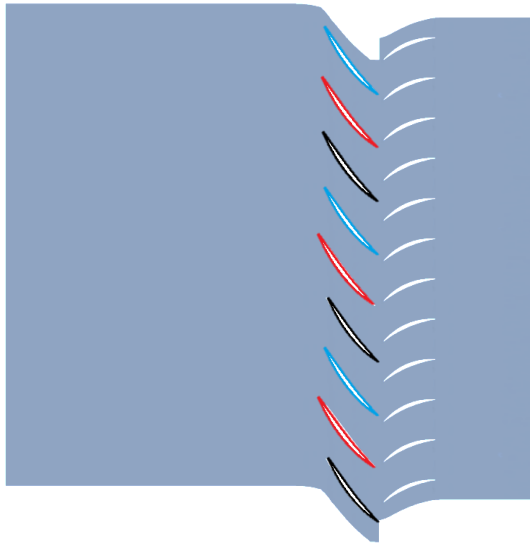
Перемещения передней кромки по окружности на трех режимах



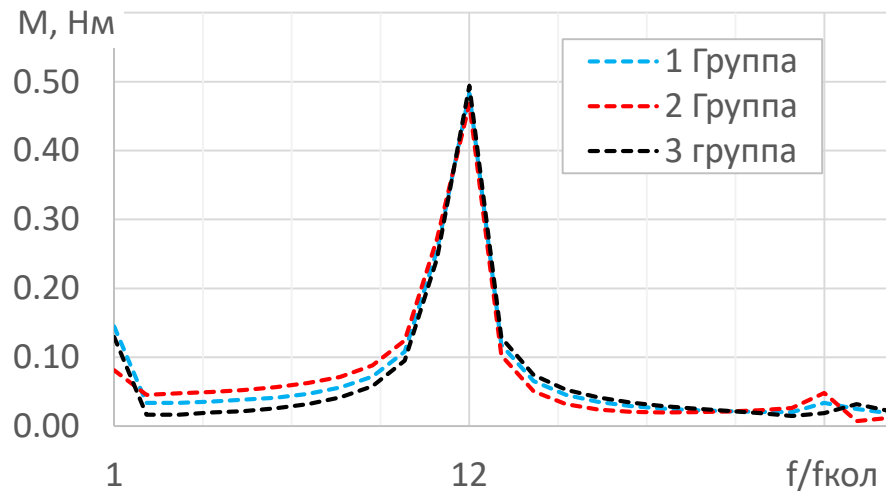
	max_  Dxyz , мм	$\bar{\eta}$ , %
Режим 1	0.348	83.25
Режим 2	0.353	84.40
Режим 3	0.424	78.75
Стац. лопатка режим 1	-	83.19
Стац. лопатка режим 2	-	84.42
Стац. лопатка режим 3	-	78.94

Радиальный зазор = 0.356 мм  
 $D_{LE}$  на периферии = 0.25 мм  
 Хорда на периферии = 56.5 мм





Фурье-разложение аэродинамического момента



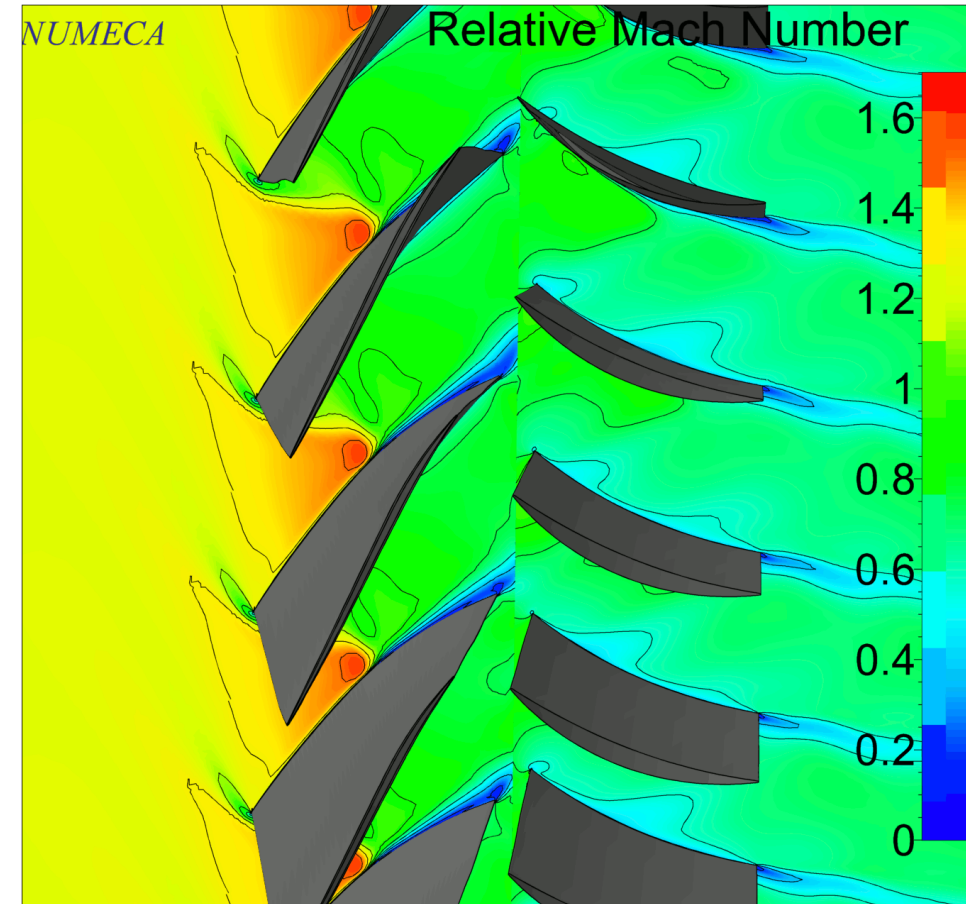
	max_ $ D_{xyz} $ , мм	$\bar{\eta}$ , %
Режим 1	0.348	83.25
Режим 2	0.353	84.40
Режим 3	0.424	78.75
Стац. лопатка режим 1	-	83.19
Стац. лопатка режим 2	-	84.42
Стац. лопатка режим 3	-	78.94
Режим 2 ступень	$\approx 0.356$	83.98
Стац. лопатка режим 2 ступень		83.97

## Ступень: 9 РК и 12 НА в секторе

Расчет	Время
STEADY-STATE	1
URANS	11.5
<b>URANS 2-way FSI</b>	<b>15.23</b>

## Ротор: 1 лопатка на сектор, 2ой режим (рабочая точка)

Расчет	Время
STEADY-STATE	1
URANS	8.8
NLH 1-way FSI	5.6
URANS 1-way FSI	9.6
<b>URANS 2-way FSI</b>	<b>10.2</b>



- Оработаны методы исследования аэроупругого поведения лопаток осевых компрессоров в нестационарном потоке воздуха. Показана эффективность применения NLH подхода при решении задачи флаттера
- Проведено исследование нестационарных характеристик потока при учете колебаний лопаток для плоской решетки с идентификацией результатов
- Исследовано аэроупругое поведение РК осевого компрессора с применением энергетического подхода и в связанной постановке. Проведена оценка влияния вязкостных эффектов и статорного венца на аэроупругое демпфирование

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!