



Диссертация на соискание учёной степени магистра по направлению 151600 «Прикладная механика»

Конечно-элементное моделирование и исследование “вилочной” турбинной лопатки предпоследней ступени для двухъярусного цилиндра низкого давления с выхлопом Баумана

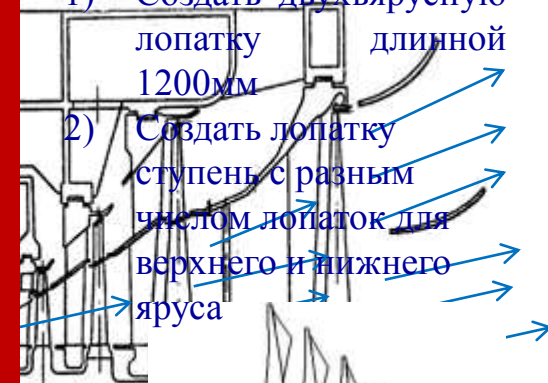
Выполнил студент гр. 6055/12
Руководитель, к.т.н., проф.
Соруководитель, асс.:

В.В. Ильин
А.И. Боровков
В.С. Модестов

Общая информация

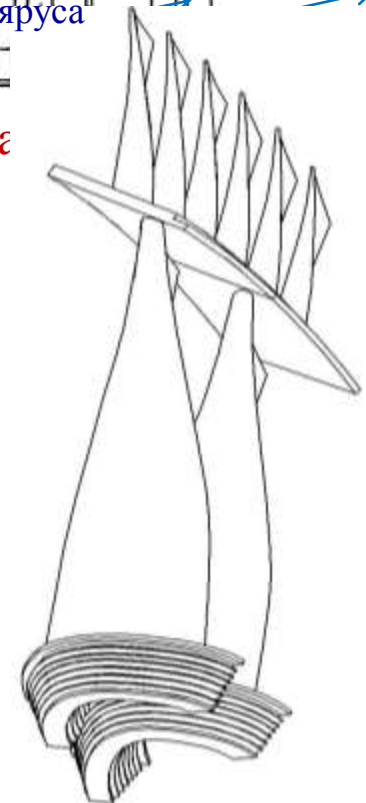
Цели:

- 1) Создать двухъярусную лопатку длиной 1200мм
- 2) Создать лопатку ступень с разным числом лопаток для верхнего и нижнего яруса

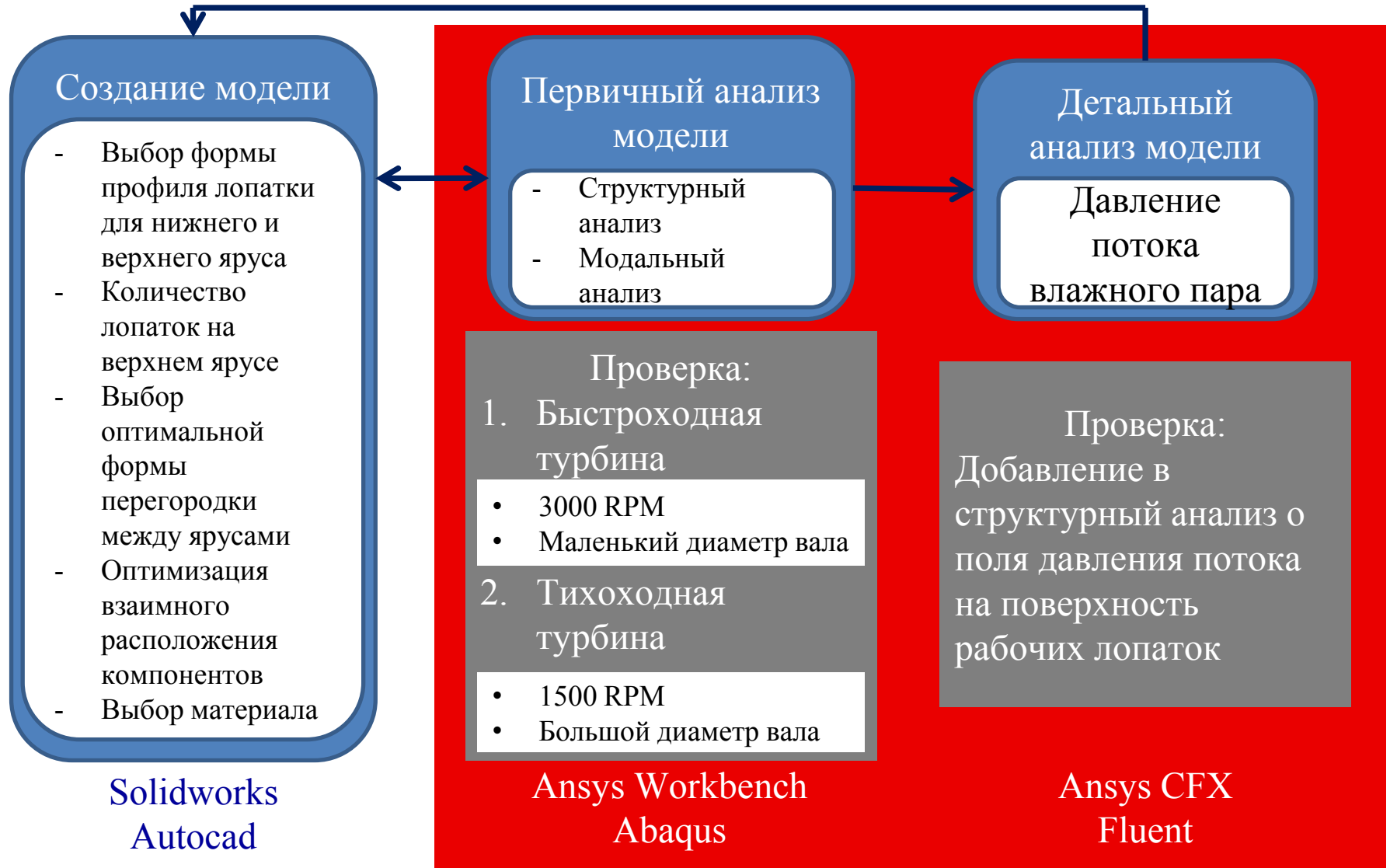


ярус

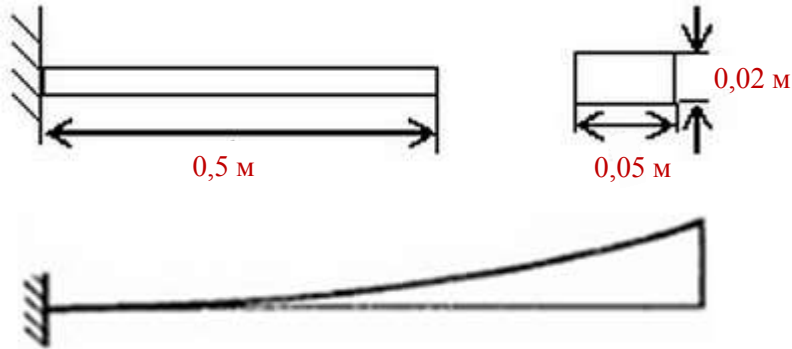
Б



Структура работы



Задача нахождения собственных форм и частот предварительно растянутого стержня под действием растягивающего усилия

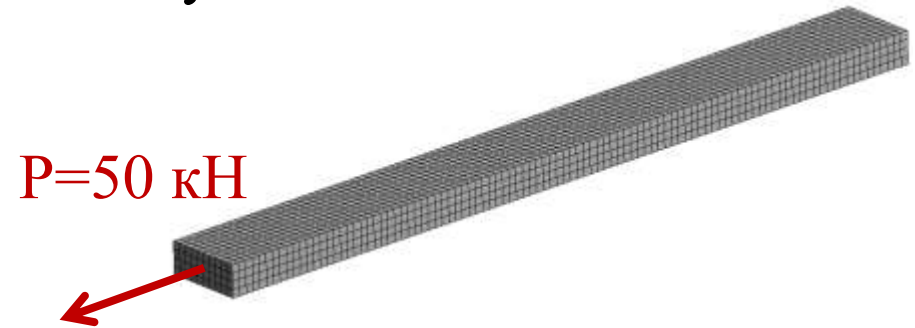


Первая свободная частота стержня
без растягивающего усилия:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_1}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}} = 67$$

Первая свободная частота стержня
без растягивающего усилия:

$$f_1^* = f_1 \sqrt{1 + \frac{5PL^2}{14EJ}} = 85,804$$

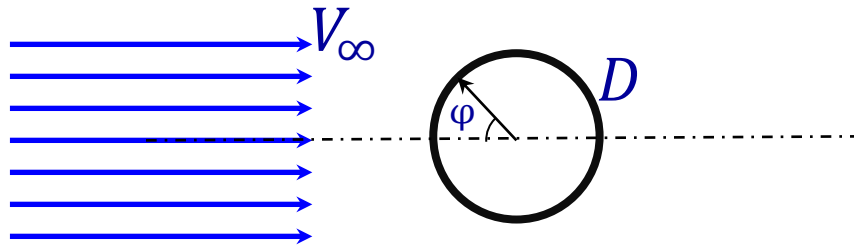


Результат численного моделирования
Первая форма собственных колебаний



	Численное решение	Аналитическое решение	$\delta = 100\% * f_{1ч} - f_{1а} / f_{1а} $
Балка без усилия	67,033	67	0,05%
Балка с усилием	85,839	85.804	0,04%

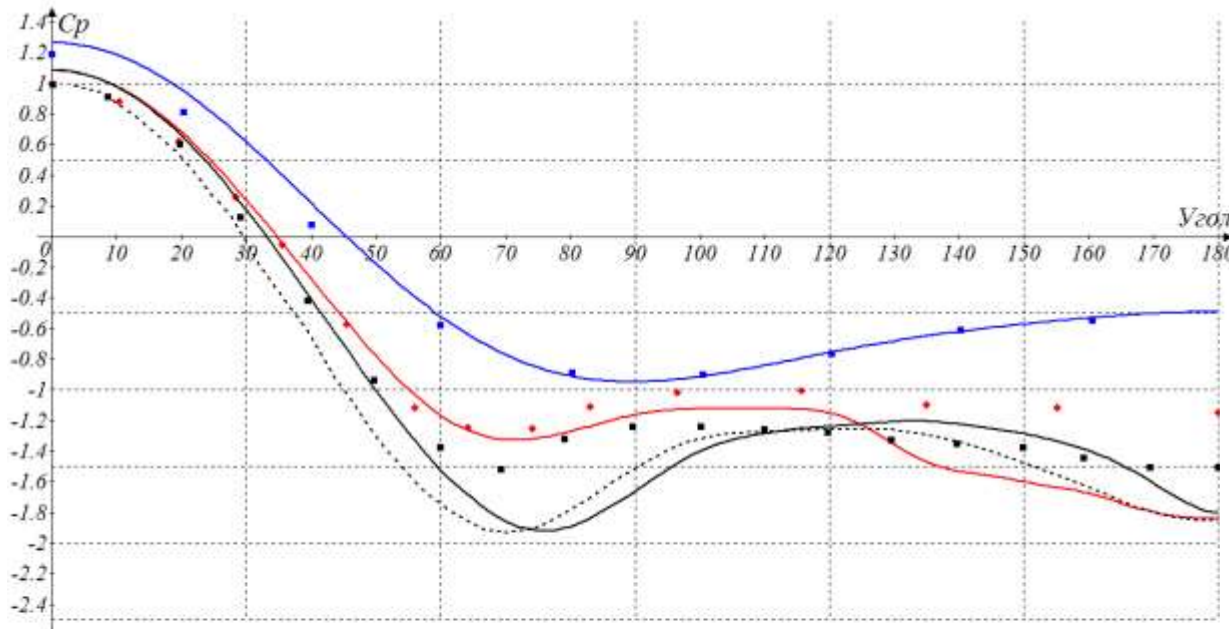
Задача обтекания потоком вязкой несжимаемой жидкости цилиндра бесконечной длины. Результаты для разных чисел Рейнольдса



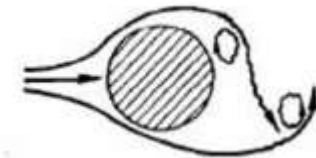
$$Re = \frac{V_{\infty} D}{\nu}$$

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2}}$$

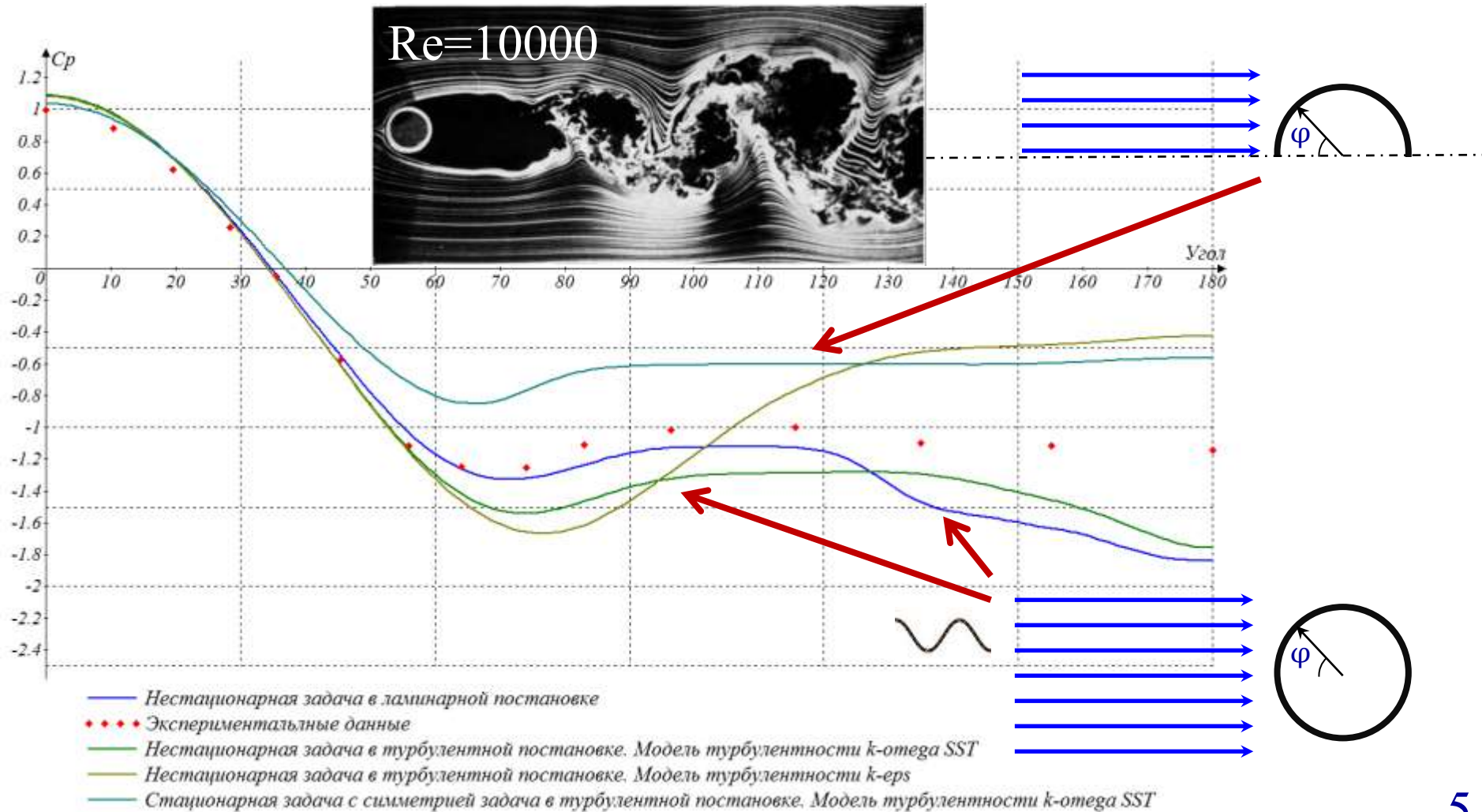
300 ≤ Re ≤ 400000



- Нестационарная задача в ламинарной постановке
- Экспериментальные данные Re=10000 University of Nottingham
- ■ ■ ■ ■ Экспериментальные данные Re=48000 Texas A&M University
- ■ ■ ■ ■ Экспериментальные данные Re=40 Technische Universität Berlin
- Стационарная задача в ламинарной постановке Re = 40
- Нестационарная задача в турбулентной постановке Re = 48 000 (k-omega SST)
- Результаты моделирования Берлинского Технического университета Re = 48 000 Technische Universität Berlin

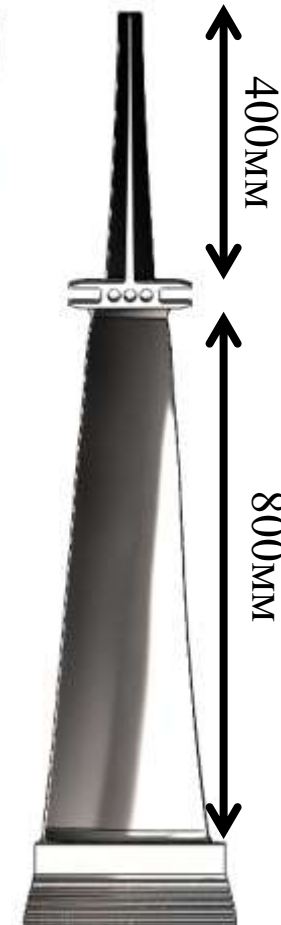


Задача обтекания потоком вязкой несжимаемой жидкости цилиндра бесконечной длины. Результаты для разных постановок задачи



Создание рабочей лопатки

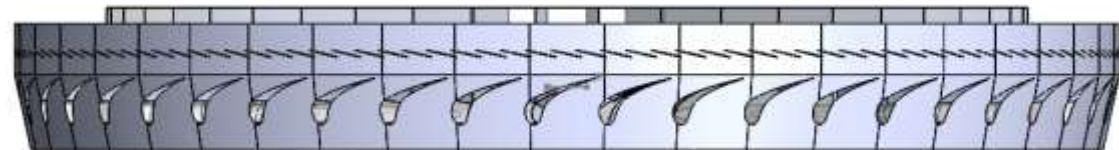
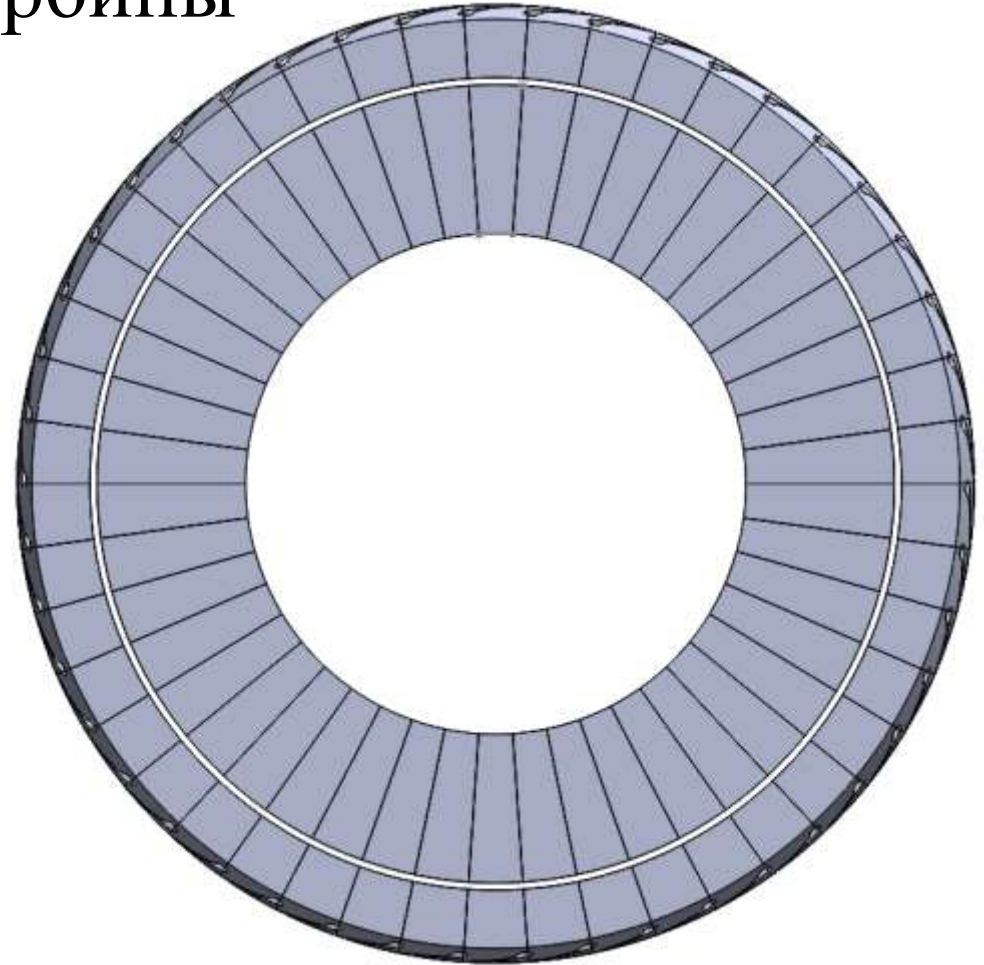
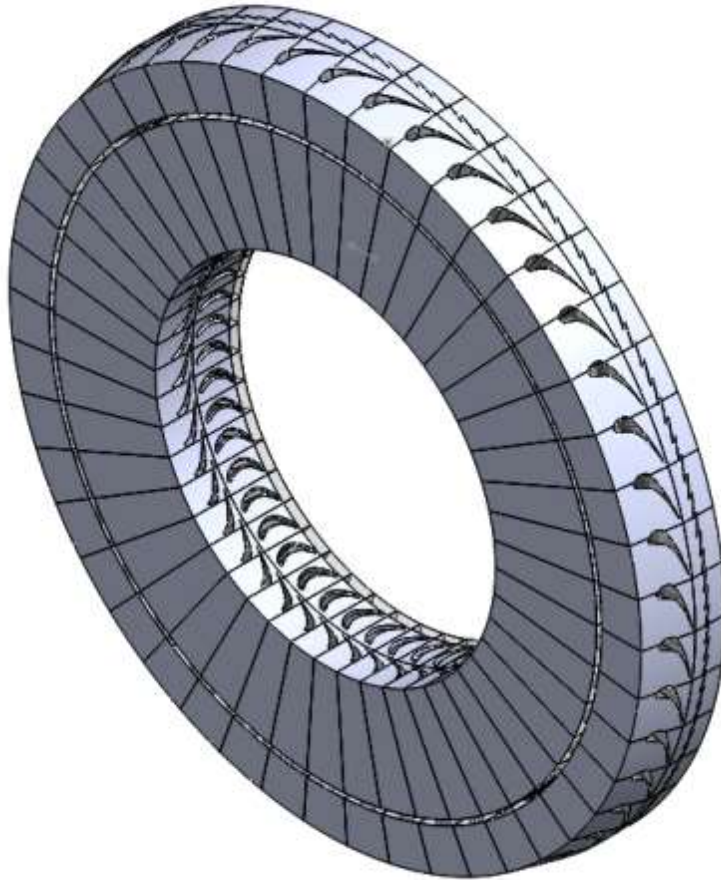
Лопатки ЦКТИ и ЛМЗ



- 1) Верхний ярус создавался на основе верха рабочей лопатки 1200 последней ступени пр-ва ЛМЗ
- 2) Нижний ярус на основе экспериментальной лопатки тихоходной турбины 1972г. пр-ва ЦКТИ



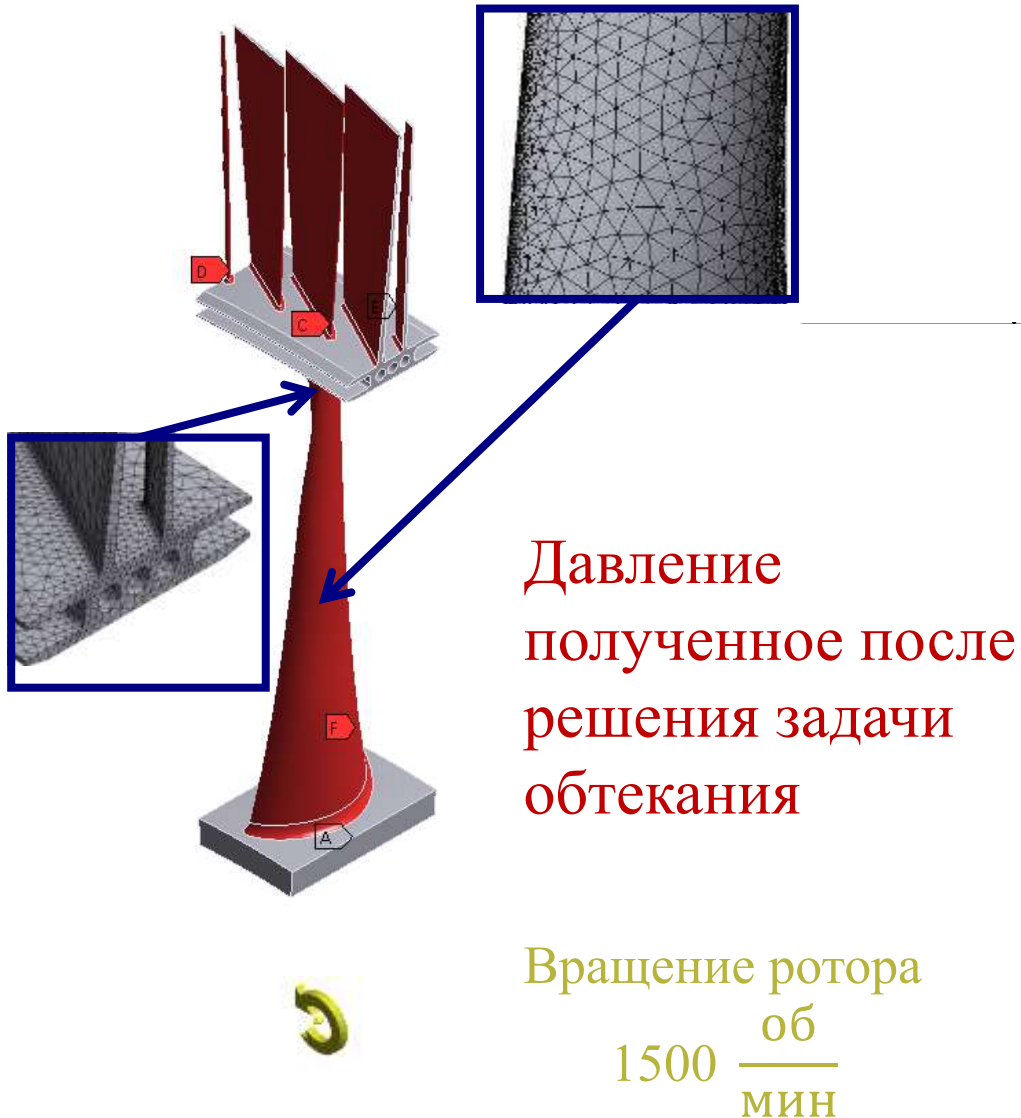
Пример модели рабочей ступени тихоходной турбины



Для правильного описания процесса обтекания пара был сконструирован направляющий аппарат.

Таким образом была сконструирована предпоследняя ступень паротурбины целиком.

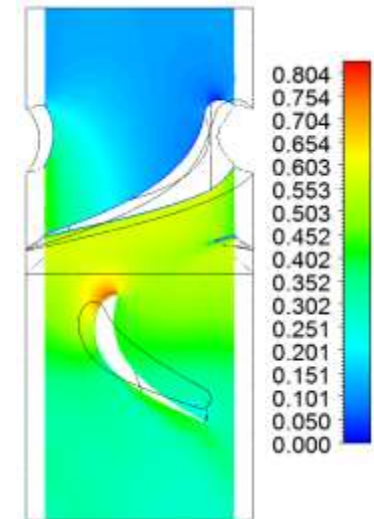
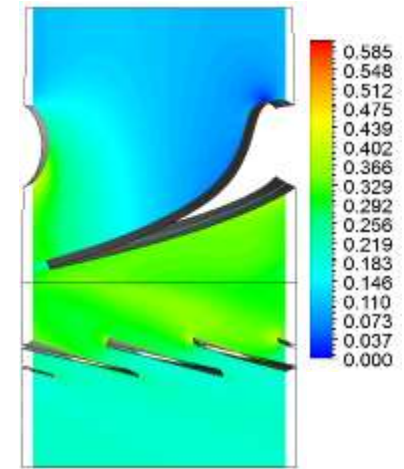
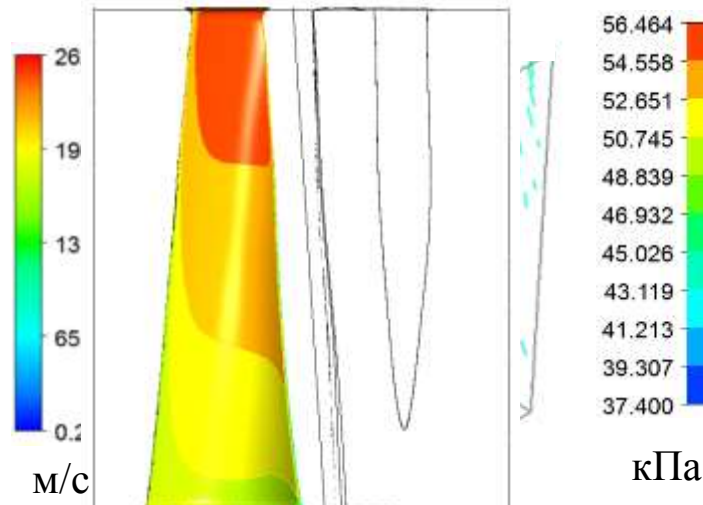
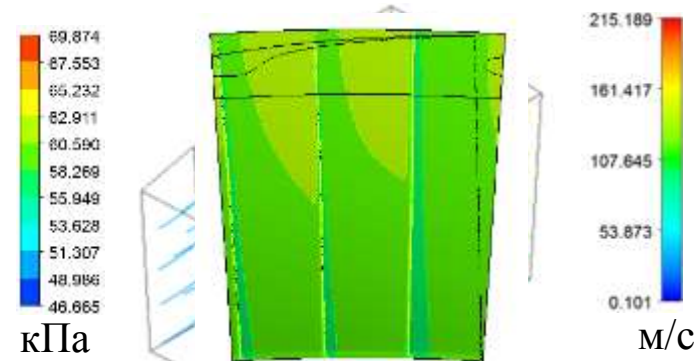
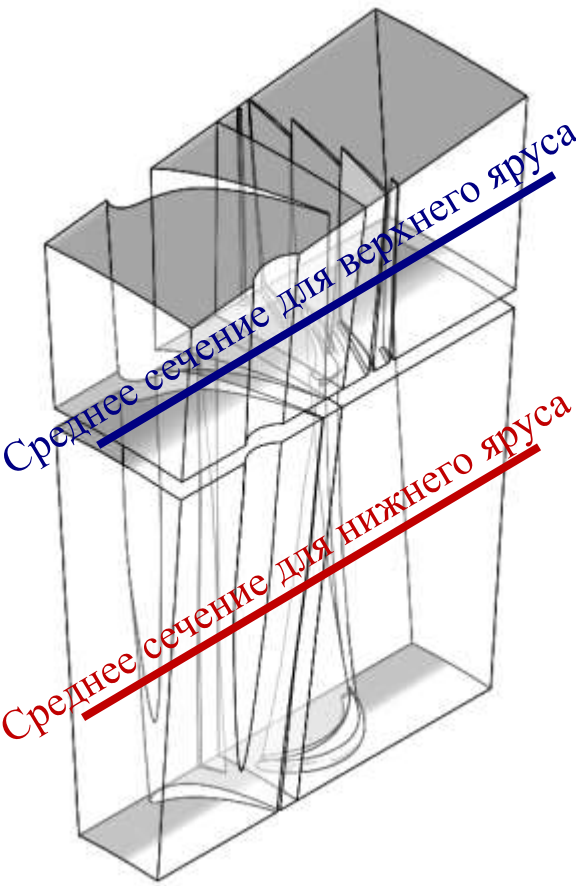
Схема решения задачи



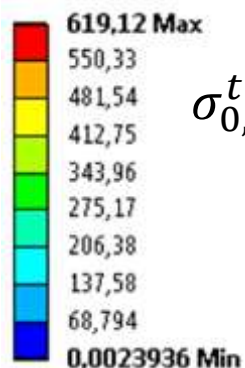
Решение аэродинамической задачи о нахождении давления потока на рабочую лопатку

Поля распределения давления на поверхности рабочей лопатки

Числа Маха в средних сечениях

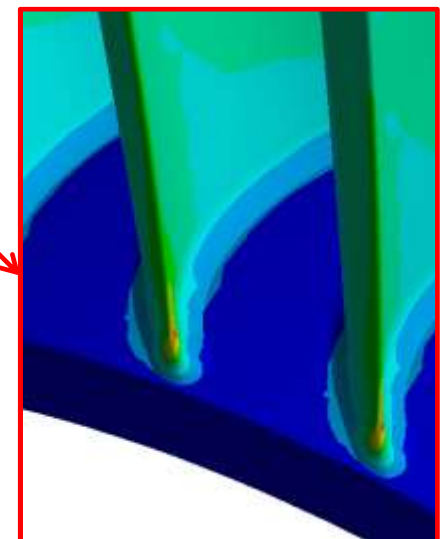
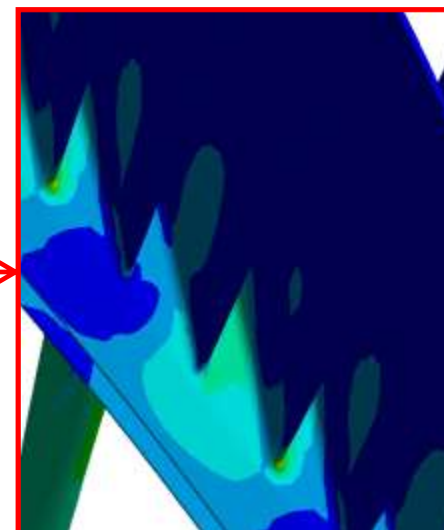
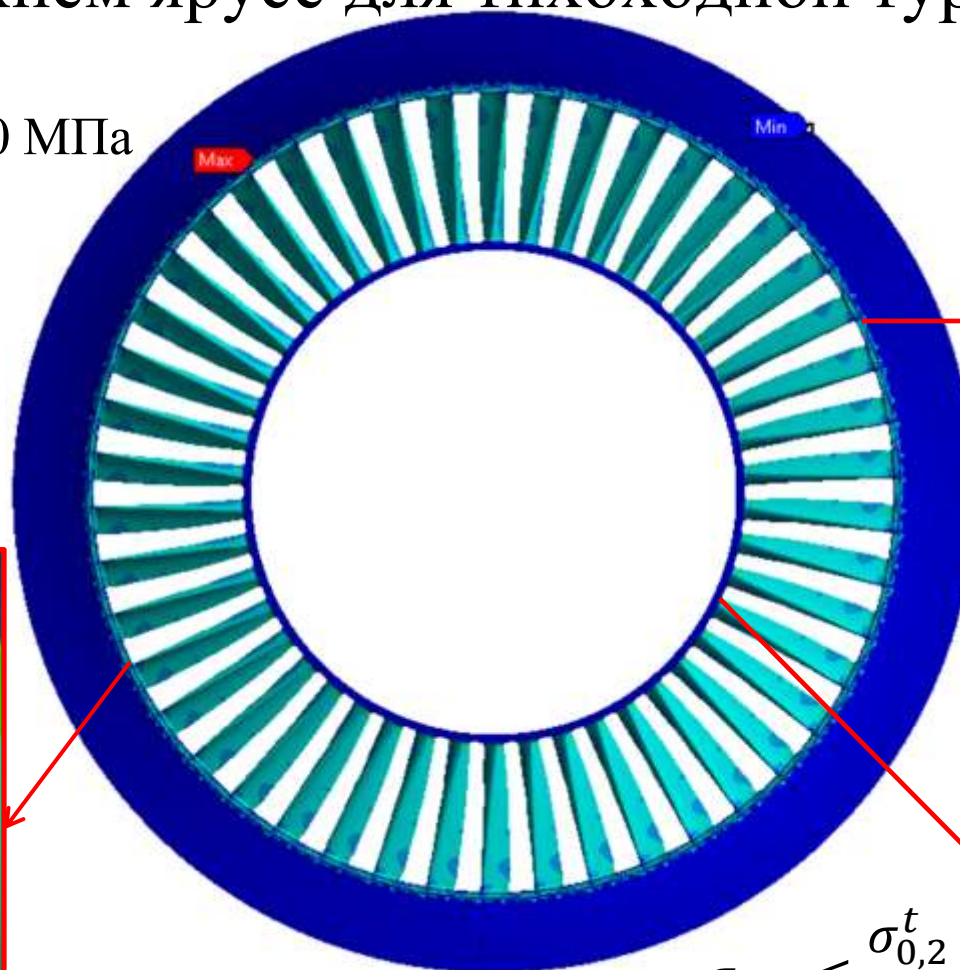


Результаты для лопатки с утроенным оперением на верхнем ярусе для тихоходной турбины



МПа

$$\sigma_{0,2}^t = 1030 \text{ МПа}$$



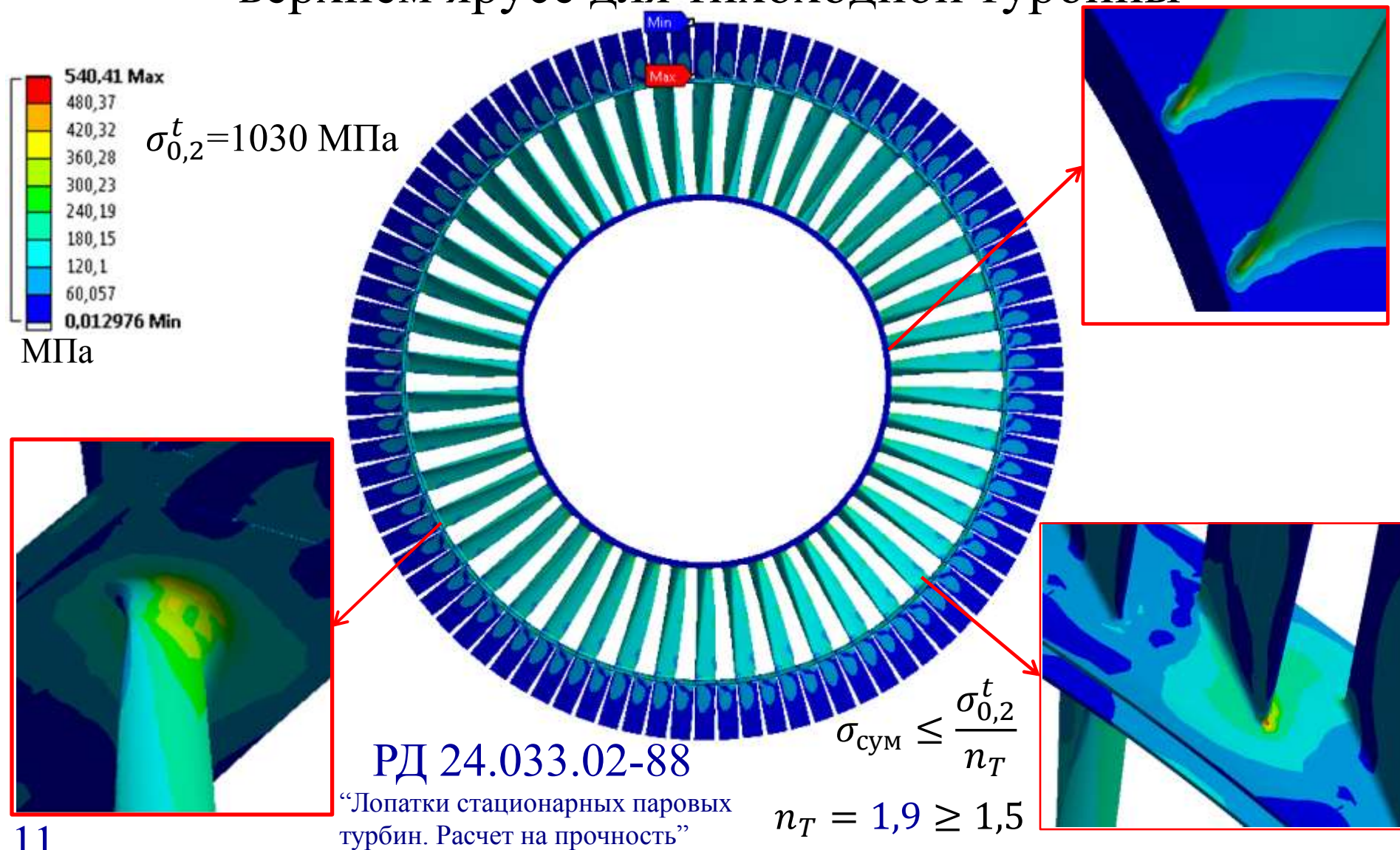
РД 24.033.02-88

“Лопатки стационарных паровых турбин. Расчет на прочность”

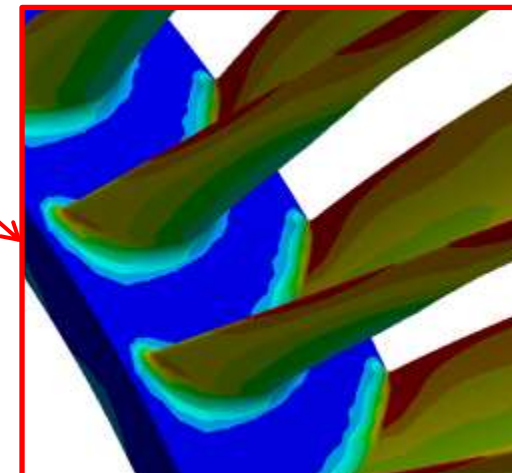
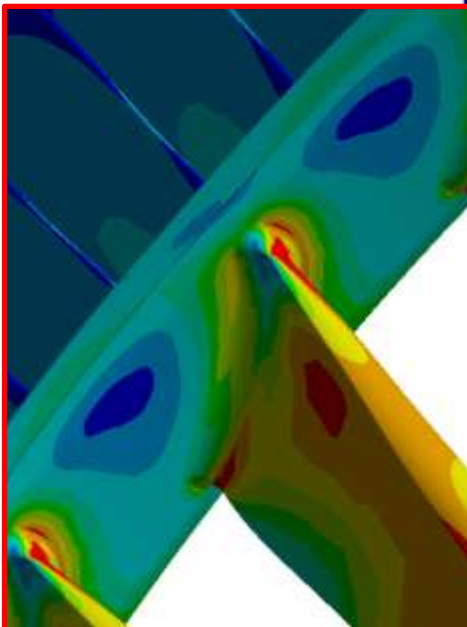
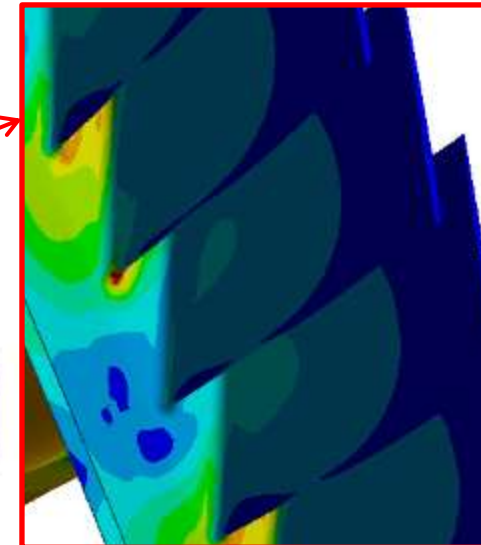
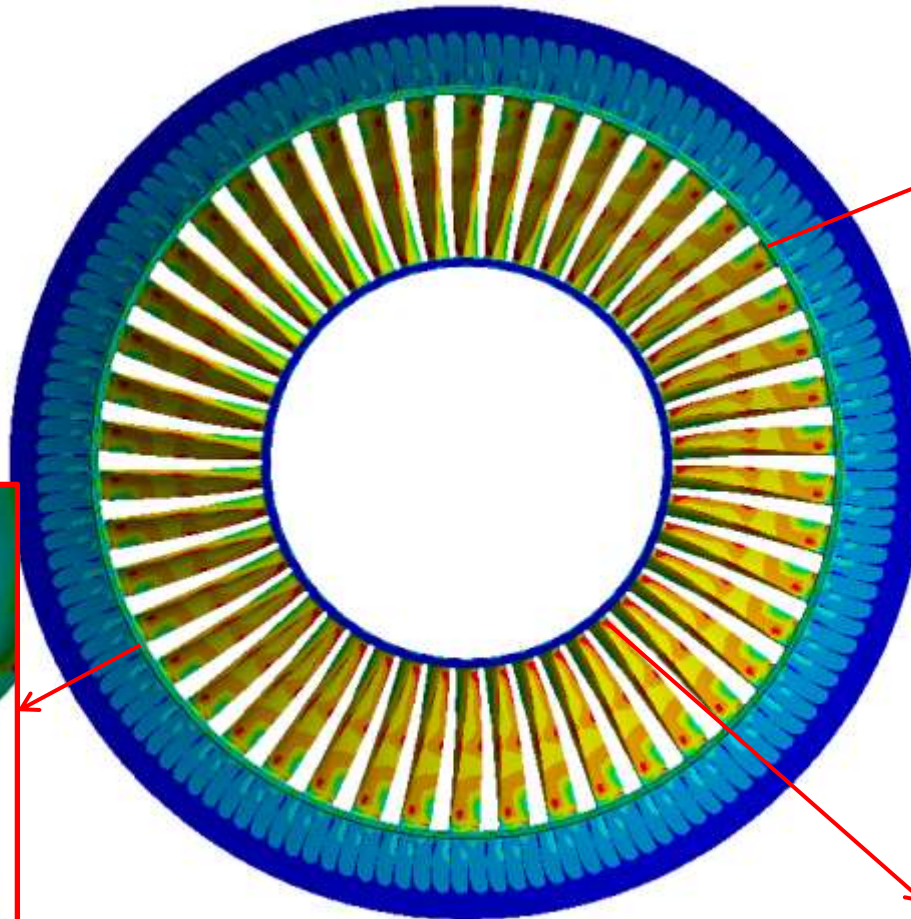
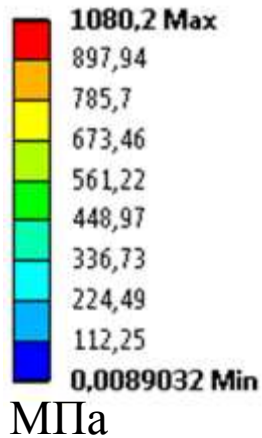
$$\sigma_{\text{сум}} \leq \frac{\sigma_{0,2}^t}{n_T}$$

$$n_T = 1,66 \geq 1,5$$

Результаты для лопатки с утроенным оперением на верхнем ярусе для тихоходной турбины



Результаты для лопатки с утроенным оперением на верхнем ярусе для быстроходной турбины



$$\sigma_{0,2}^t = 1030 \text{ МПа}$$

Использовался материал с
билинейной моделью упрочнения

Модальный анализ рабочего колеса с утроенным верхним ярусом

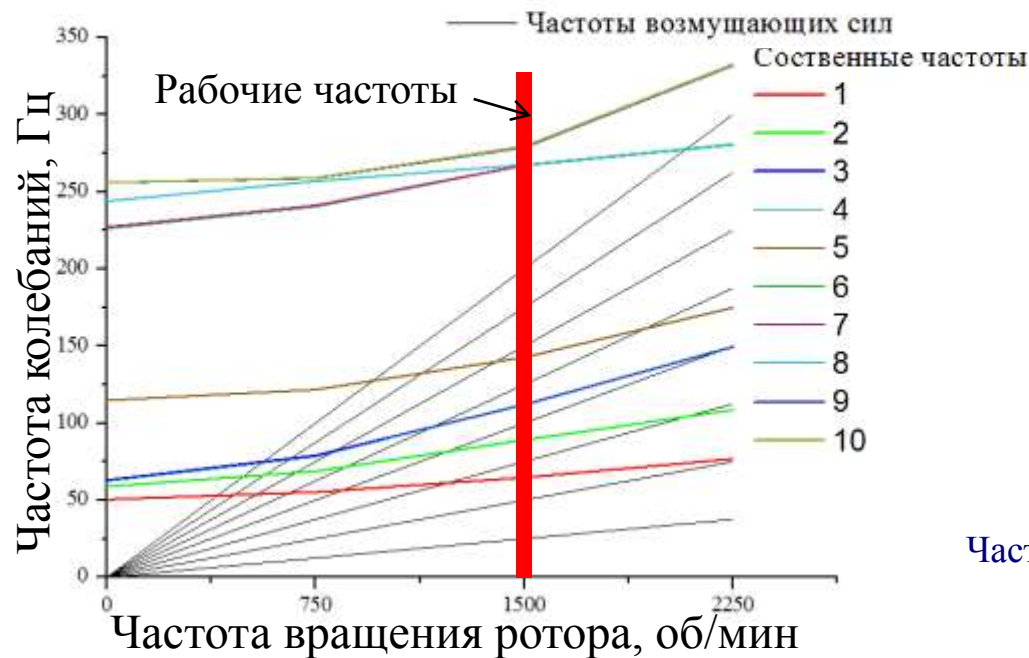
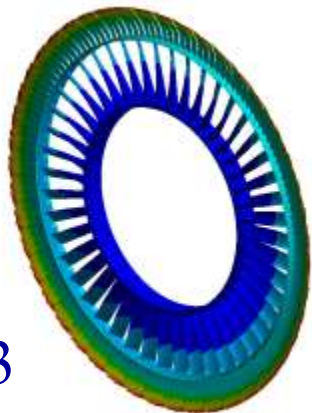


Таблица собственных частот

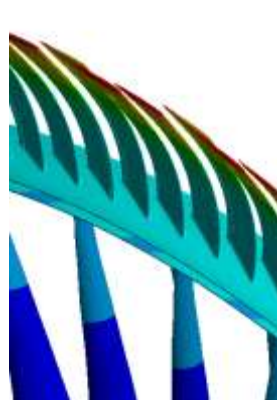
Собственная частота	Частота вращения ротора турбины (об/мин)			
	0	750	1500	2250
1	50,433	55,195	64,6	76,758
2	58,821	68,697	89,008	108,52
3	62,945	78,996	112,	149,41
4	62,224	78,063	112,06	149,49
5	114,73	121,65	142,53	174,86
6	226,21	240,37	267,12	280,44
7	227,06	241,15	267,2	280,85
8	243,85	256,86	267,43	280,87
9 (Крутильная)	255,92	258,87	278,66	331,95
10 (Крутильная)	256,1	259,08	279,38	332,56

Частота возмущающих сил, вызванная кромочными следами - 3450 Гц

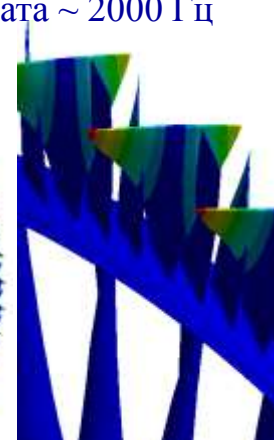
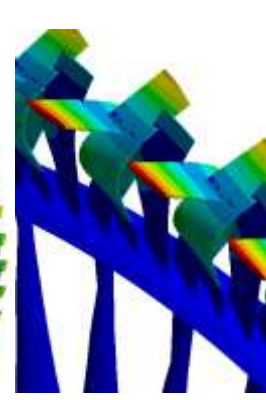
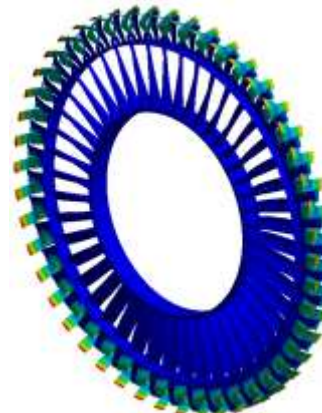
Частота схода вихрей с лопаток направляющего аппарата ~ 2000 Гц



Колебания первого типа



Колебания второго типа



Модальный анализ рабочего колеса с удвоенным верхним ярусом

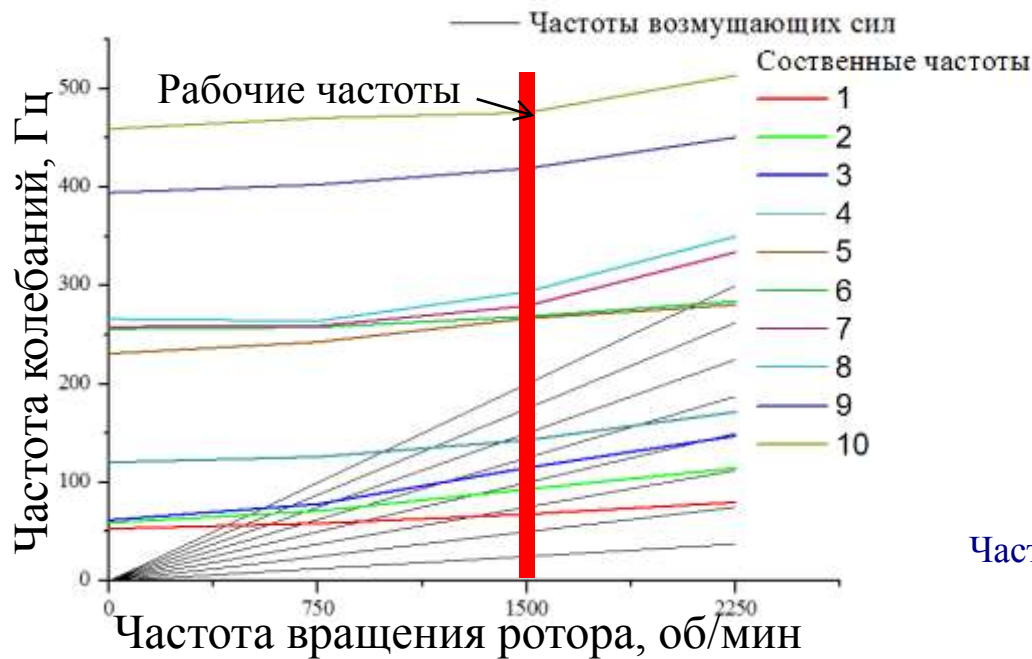
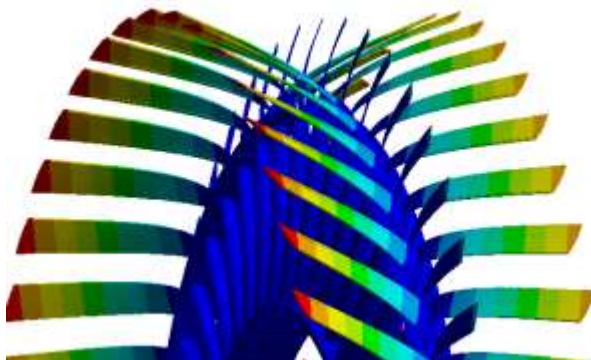


Таблица собственных частот

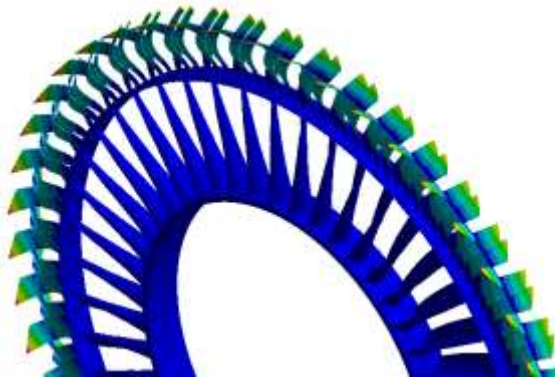
Собственная частота	Частота вращения ротора турбины (об/мин)			
	0	750	1500	2250
1	53,149	58,664	67,895	80,053
2	59,245	71,209	93,204	114,72
3	61,912	78,194	115,04	147,49
4	120,63	126,18	143,1	171,75
5	231,01	242,75	266,64	280,5
6(Крутильная)	256,12	257,75	268,63	284,03
7	258,37	259,21	279,39	334,02
8(Крутильная)	265,99	264,03	293,76	350,1
9	394,39	402,5	418,94	450,74
10	458,98	470,1	475,58	513,36

Частота возмущающих сил, вызванная кромочными следами - 2300 Гц

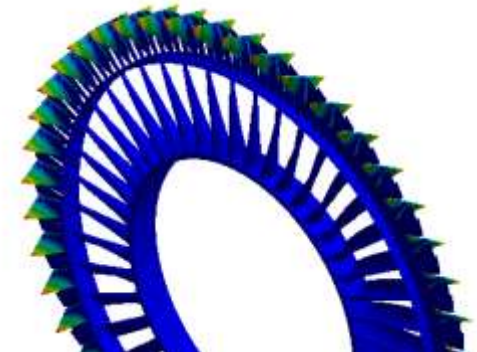
Частота схода вихрей с лопаток направляющего аппарата ~ 2000 Гц



Колебания первого типа



Колебания второго типа





Заключение

- Двухъярусные лопатки “вильчатого” типа с утроенным и удвоенным оперением на верхнем ярусе ЦНД для тихоходной турбины выдерживают напряжения, вызванные рабочими усилиями, возникающими во время их эксплуатации. С точки зрения прочностного анализа данные конструкции выдерживают все требования руководящих документов, которые предъявляются к данному типу рабочих узлов. На основании анализа полученных результатов можно утверждать, что работы по исследованию и проектированию лопаток данного типа в ОАО “НПО ЦКТИ” будут продолжены.
- Двухъярусные лопатки “вильчатого” типа с утроенным оперением на верхнем ярусе ЦНД для быстроходной турбины не выдерживают напряжений, вызванных рабочими усилиями, возникающими во время их эксплуатации, и не соответствуют требованиям, предъявляемым к данному типу рабочих узлов. На основании полученных результатов можно утверждать, что данные лопатки, несмотря на использования современных титановых сплавов, в настоящее время не могут быть использованы на практике. По видимому, применение в будущем композитных материалов, наряду с кардинальным изменением формы профилей и перегородок будут способствовать созданию рабочих узлов подобного типа.

Спасибо за внимание!