



# Конечно-элементное моделирование и исследование пространственного напряженно-деформированного состояния гребного винта

Выполнил студент гр. 6055/12

А.М. Лобачёв

Руководитель, к.т.н., профессор

А.И. Боровков

Соруководитель, ассистент

В.С. Модестов



# Содержание

## Цели работы:

- Конечно-элементное моделирование и исследование пространственного напряженно-деформированного состояния гребного винта;
- Анализ аналитического подхода к решению задач прочности гребных винтов.

## Задачи, решаемые в работе:

- Освоение методики передачи граничных условий из задач гидромеханики в задачи МДТТ
- Получение пространственного напряженно-деформированного состояния масштабной модели винта для режима работы в свободной воде;
- Получение пространственного напряженно-деформированного состояния винта натуральных размеров для режима работы в открытой воде;
- Получение пространственного напряженно-деформированного состояния винта натуральных размеров для режима работы за корпусом судна
- Аналитическое исследование указанных выше случаев, сравнение аналитических результатов с конечно-элементным решением

# Введение



Гребной винт



Кавитационная эрозия



Электрохимическая коррозия

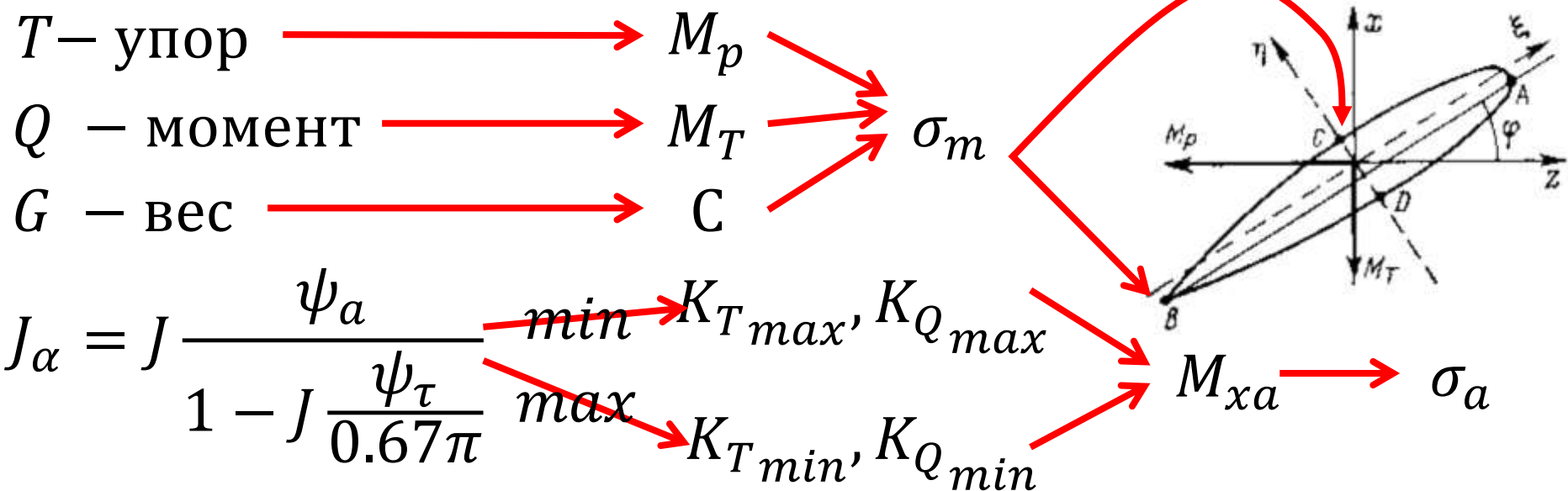




# Аналитические основы прочности гребных винтов

## Основные допущения и сущность методики\*

- Лопасть движителя (винта) представляет собой заделанный на конце консольный *прямой* стержень с переменной площадью поперечных сечений, подверженный косому изгибу от действия внешних сил;
- Сечения, на которых производят расчет – цилиндрические, спрямленные на плоскости, перпендикулярные образующей лопасти;
- Одна из главных центральных осей инерции сечения параллельна его хорде;



\*Справочник по теории корабля под ред. Войтунского. Ленинград, «Судостроение» 1985

# Задача о модельном винте в свободном потоке

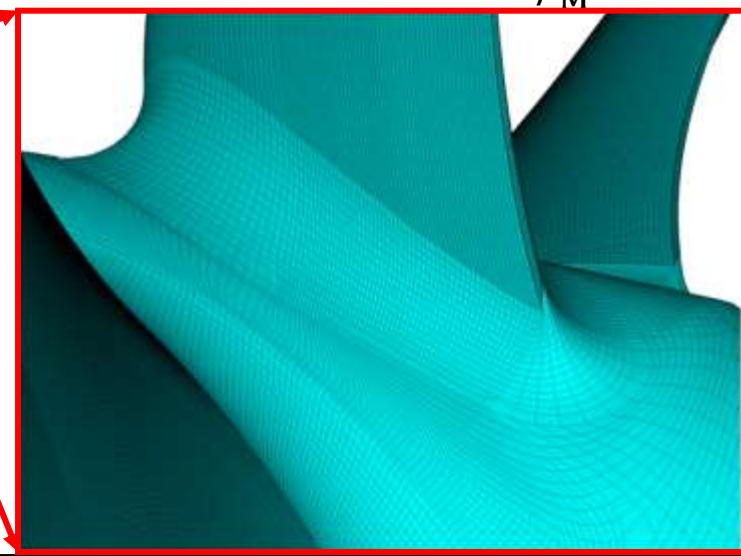
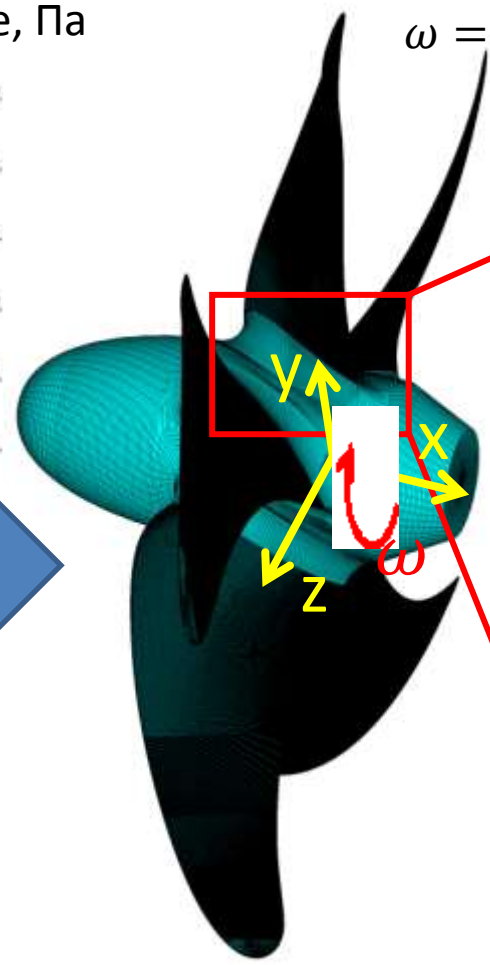
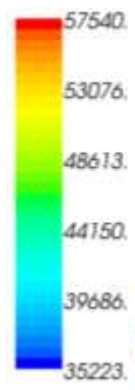
$J = 0.67$

## Постановка задачи

Материал:  
 Дюралюминий Д16  
 $E = 7.2 \cdot 10^4$  МПа  
 $\nu = 0.31$   
 $\sigma_{0.2} = 285$  МПа  
 $\rho = 2800$  кг/м<sup>3</sup>

Давление, Па

$\omega = 58.28$  рад/с



ICEM CFD, ANSYS 13

Star-CCM+ 7.02

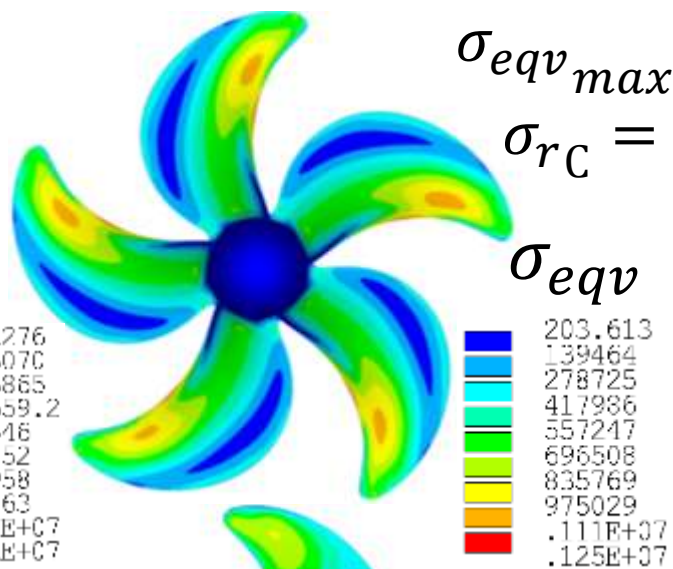
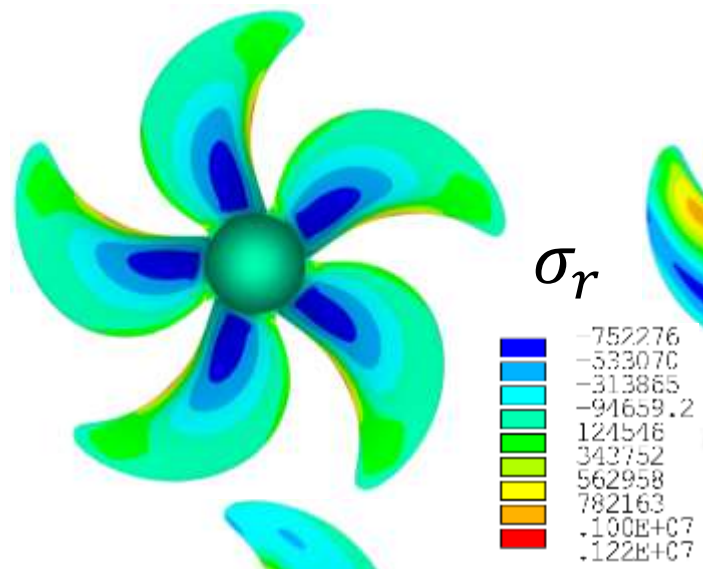
Число узлов (NN)	4888939
Число элементов (NE)	4429750
Число степеней свободы (NDF)	19555756

# Задача о модельном винте в свободном потоке

Результаты КЭ расчета для случая задачи без учета вращения

$n_s$  – нормативный коэффициент запаса статической прочности\*

поверхность засасывающая  
 нагнетающая



$\sigma_{eqv_{max}} = 1.25 \text{ МПа}$   
 $\sigma_{rC} = -0.75 \text{ МПа}$

$n_s = 5.28$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 380$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 228$

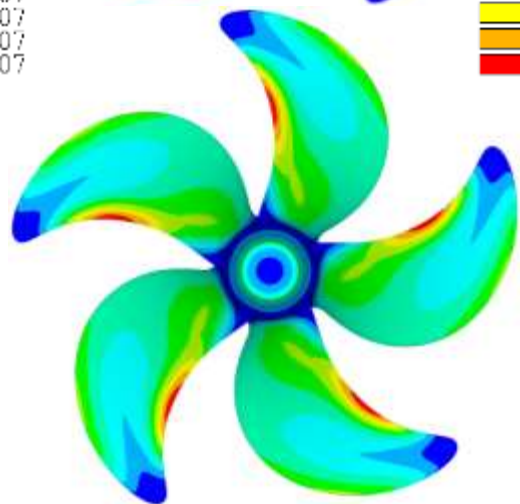
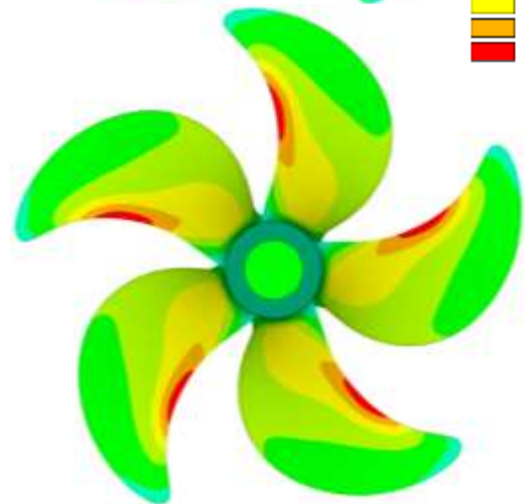
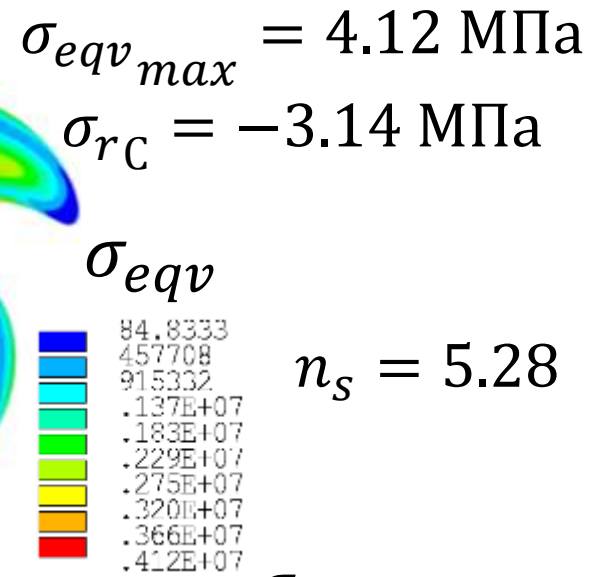
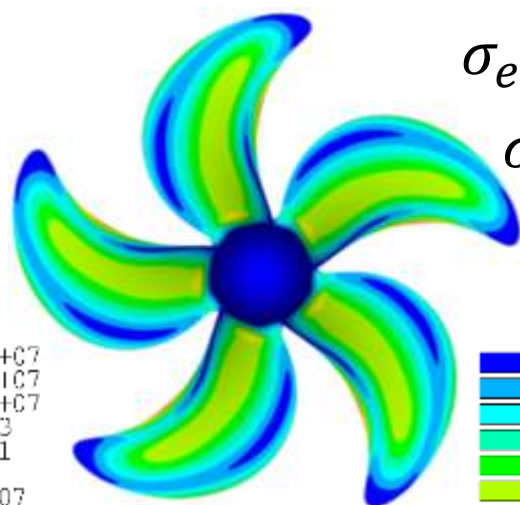
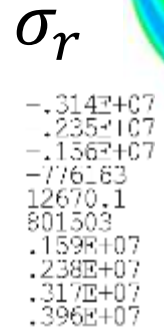
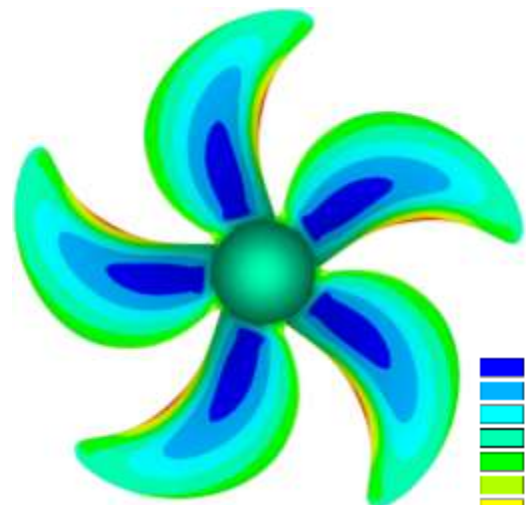
\*Ф. М. Кацман, Г. М. Кудреватый, «Конструирование винто-рулевых комплексов. Судостроение. Ленинград 1974

# Задача о модельном винте в свободном потоке

## Результаты КЭ расчета для случая задачи с учетом вращения

Напряжения по Мизесу: 
$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)]}$$

поверхность засасывающая  
 нагнетающая

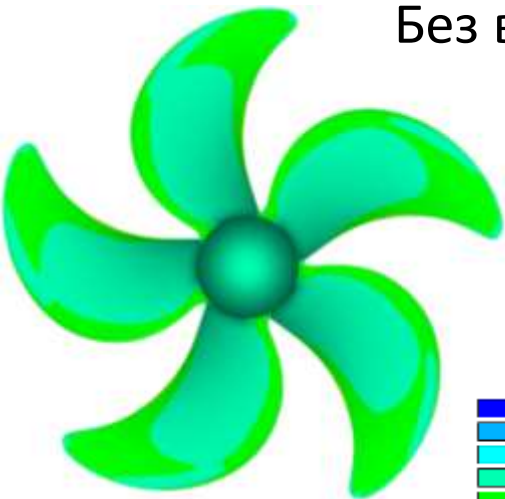




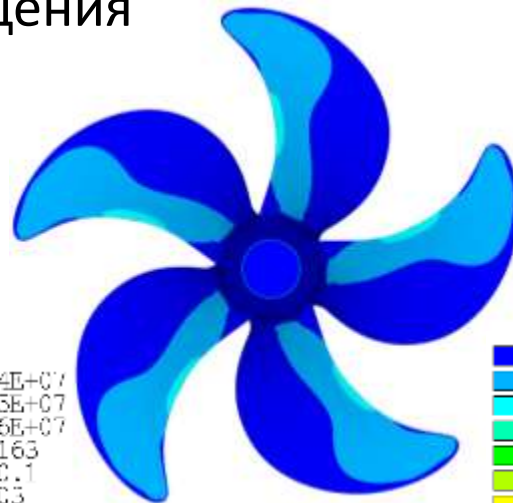
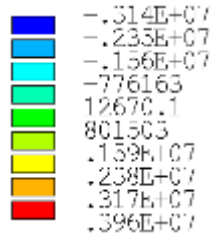
# Задача о модельном винте в свободном потоке

## Анализ результатов КЭ расчета

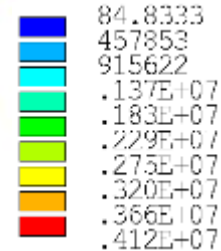
Без вращения



$\sigma_r$

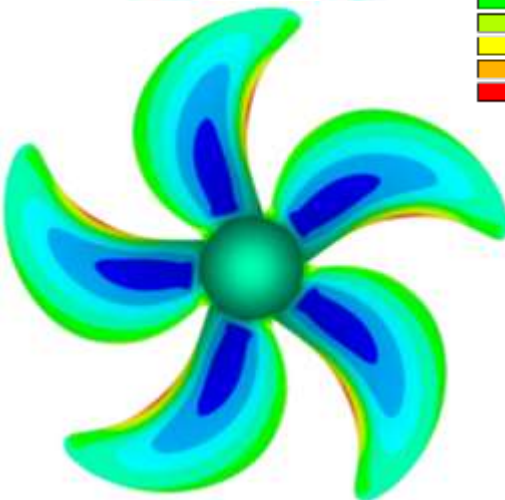


$\sigma_{eqv}$

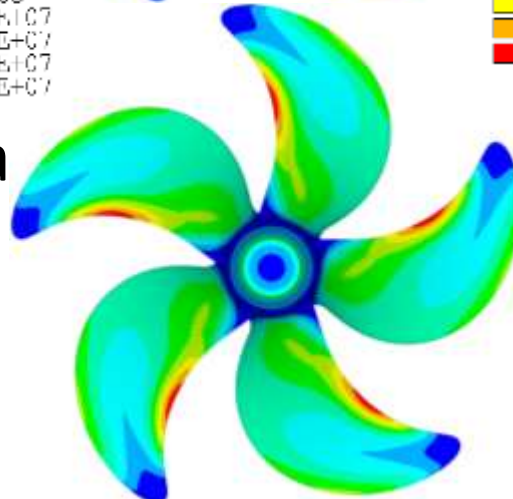


Па

Па

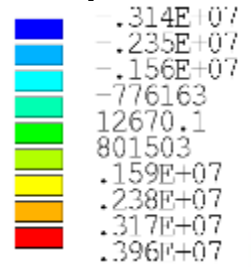


С вращением



# Задача о модельном винте в свободном потоке

## $\sigma_r$ Сравнение с аналитическим решением

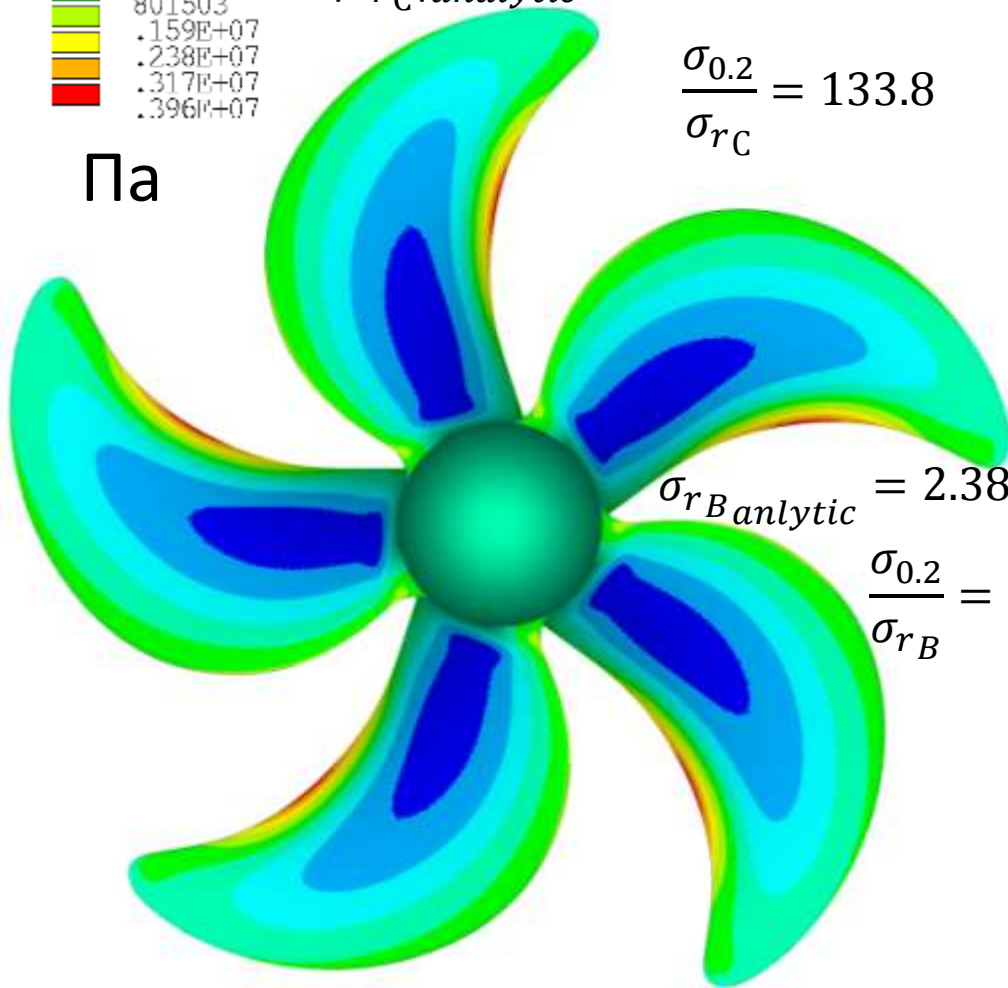


$|\sigma_{rC}|_{fea} = 3.14 \text{ МПа} \quad n_s = 5.28$

$|\sigma_{rC}|_{analytic} = 2.13 \text{ МПа}$

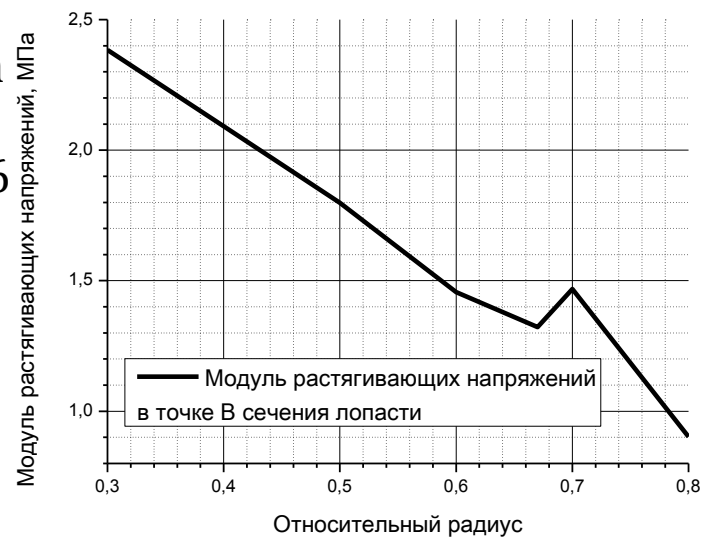
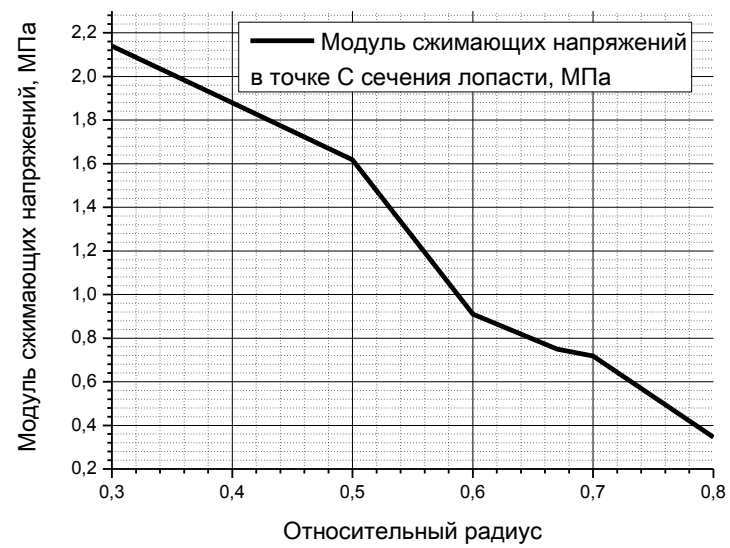
$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 133.8$

Па



$\sigma_{rB analytic} = 2.38 \text{ МПа}$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rB}} = 90.76$



# Задача о натурном винте в свободном потоке

$J = 0.67$

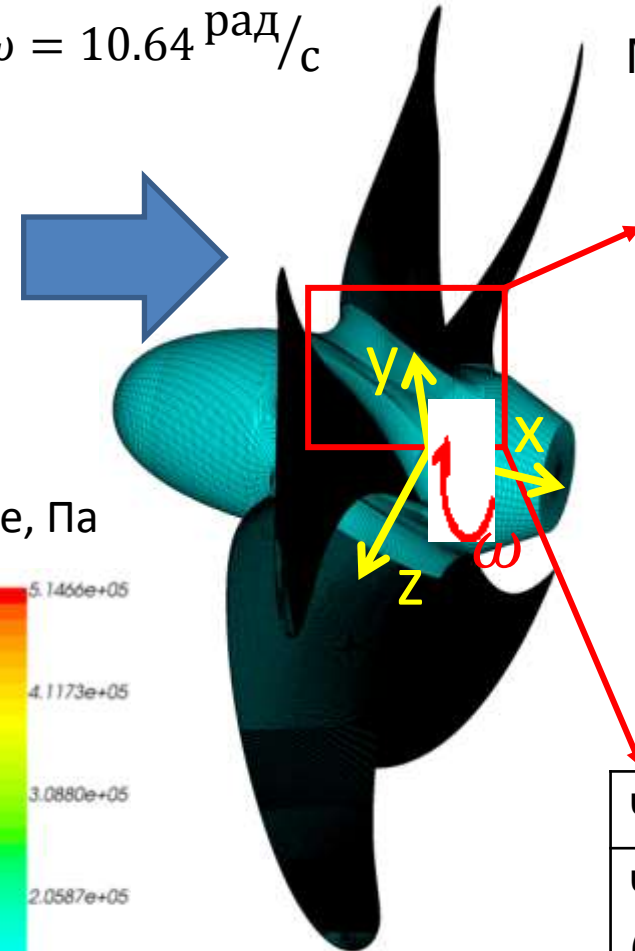
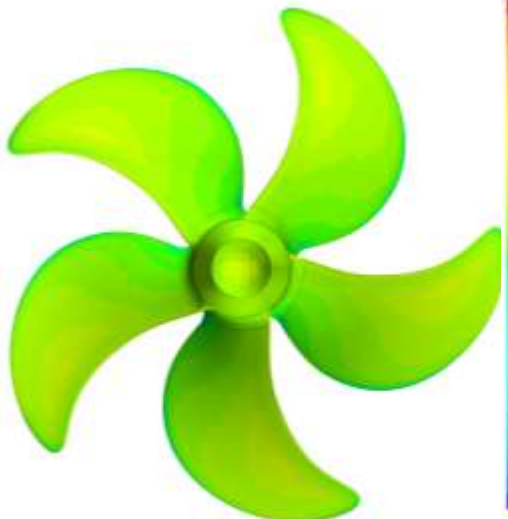
## Постановка задачи

Бронза БрА9Ж4Н4  
 $E = 1.13 \cdot 10^5$  МПа  
 $\nu = 0.35$   
 Материал:  
 $\sigma_{0.2} = 245$  МПа  
 $\rho = 7500$  кг/м<sup>3</sup>  
 $\sigma_{-1} = 175$  МПа

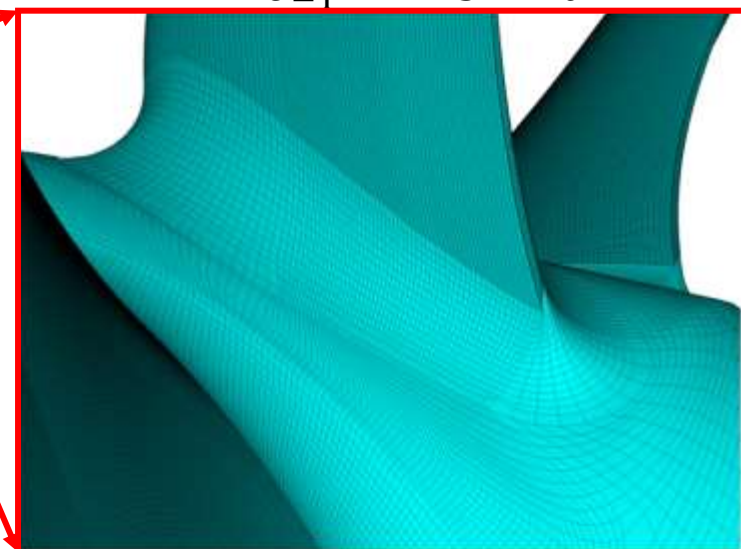
$\omega = 10.64$  рад/с



Давление, Па



Материал:



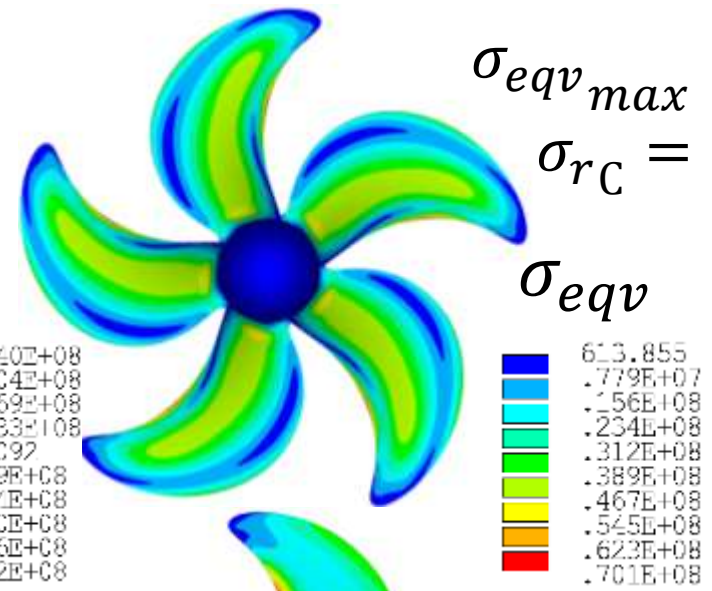
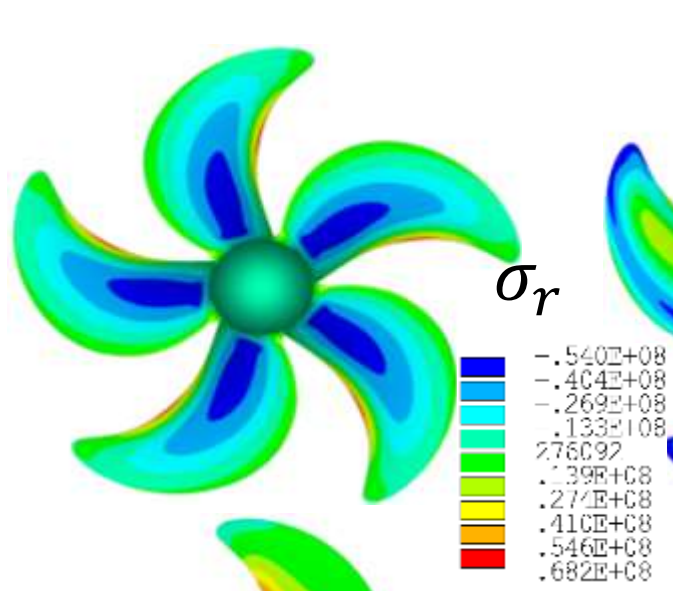
Число узлов (NN)	4888939
Число элементов (NE)	4429750
Число степеней свободы (NDF)	19555756



# Задача о натурном винте в свободном потоке

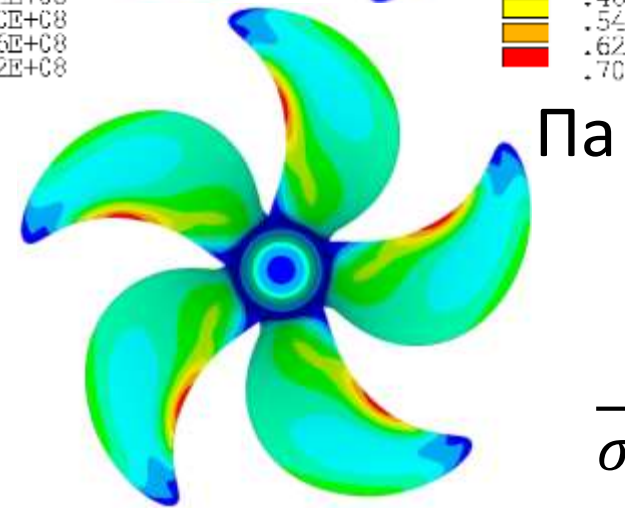
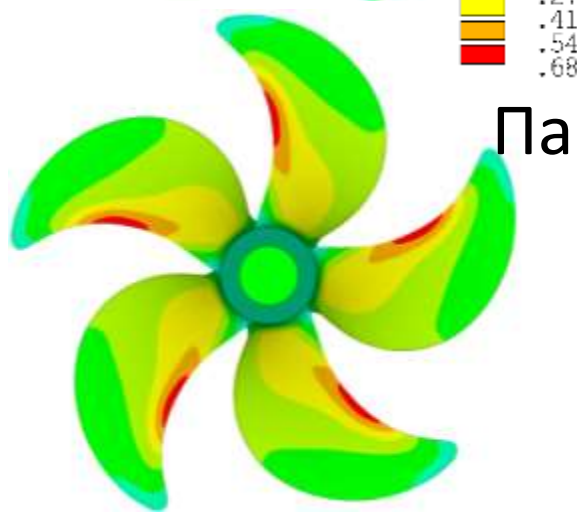
## Результаты КЭ расчета для случая задачи без учета вращения

ПОВЕРХНОСТЬ  
 засасывающая  
 нагнетающая



$\sigma_{eqv_{max}} = 70.1 \text{ МПа}$   
 $\sigma_{rC} = -54 \text{ МПа}$

$n_s = 3.47$



$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 4.54$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 3.50$

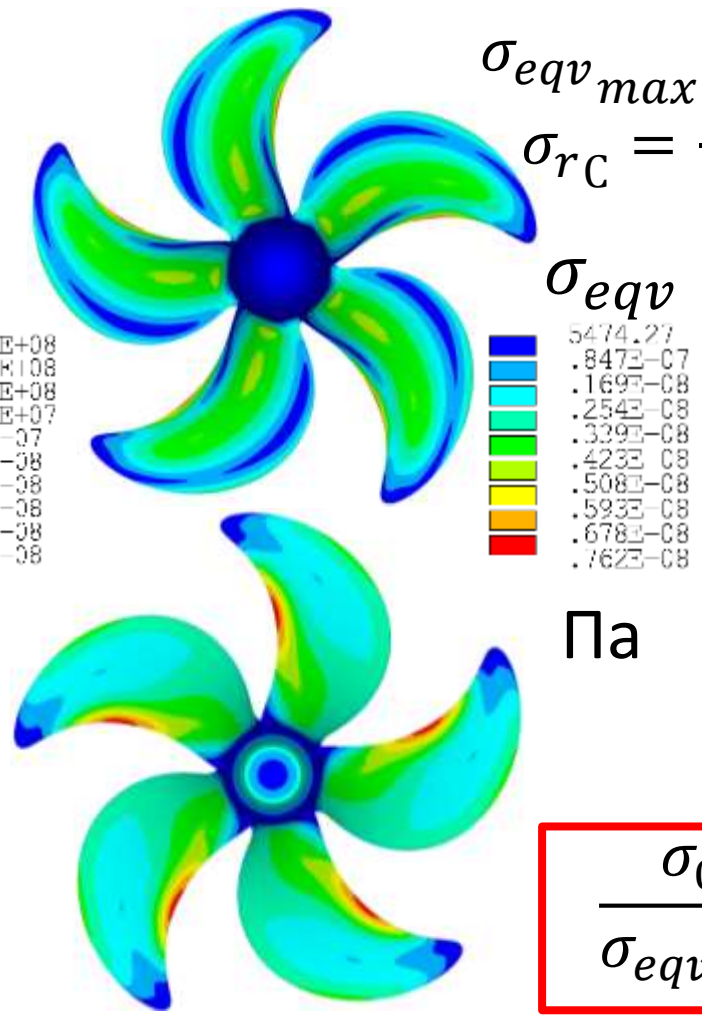
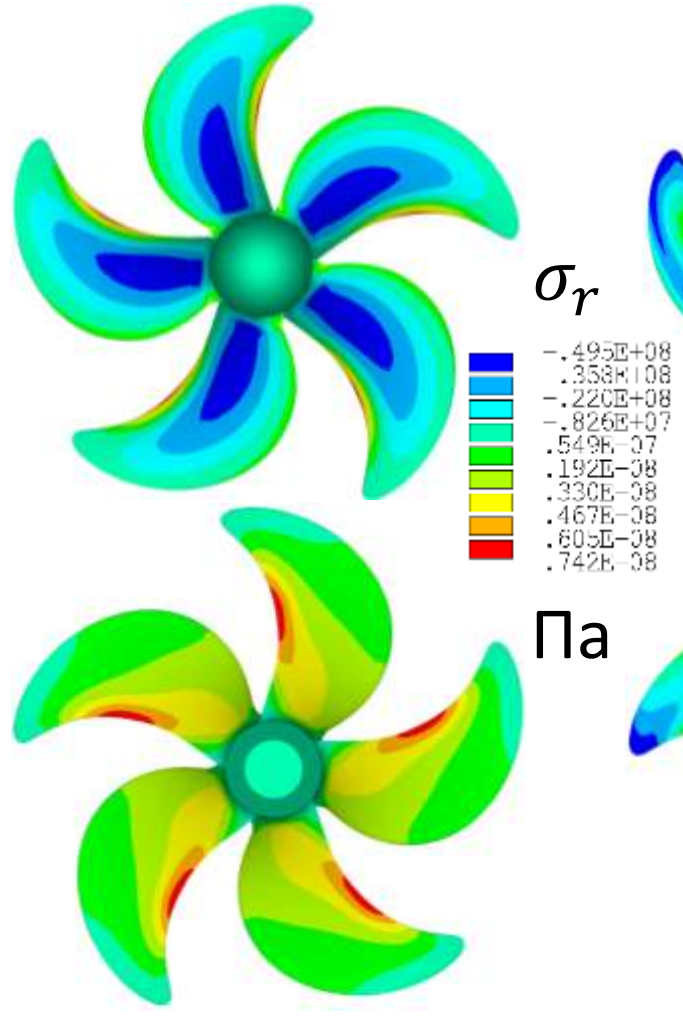


# Задача о натурном винте в свободном потоке

## Результаты КЭ расчета для случая задачи с учетом вращения

ПОВЕРХНОСТЬ

нагнетающая засасывающая



$\sigma_{eqv_{max}} = 76.2 \text{ МПа}$

$\sigma_{rC} = -49.5 \text{ МПа}$

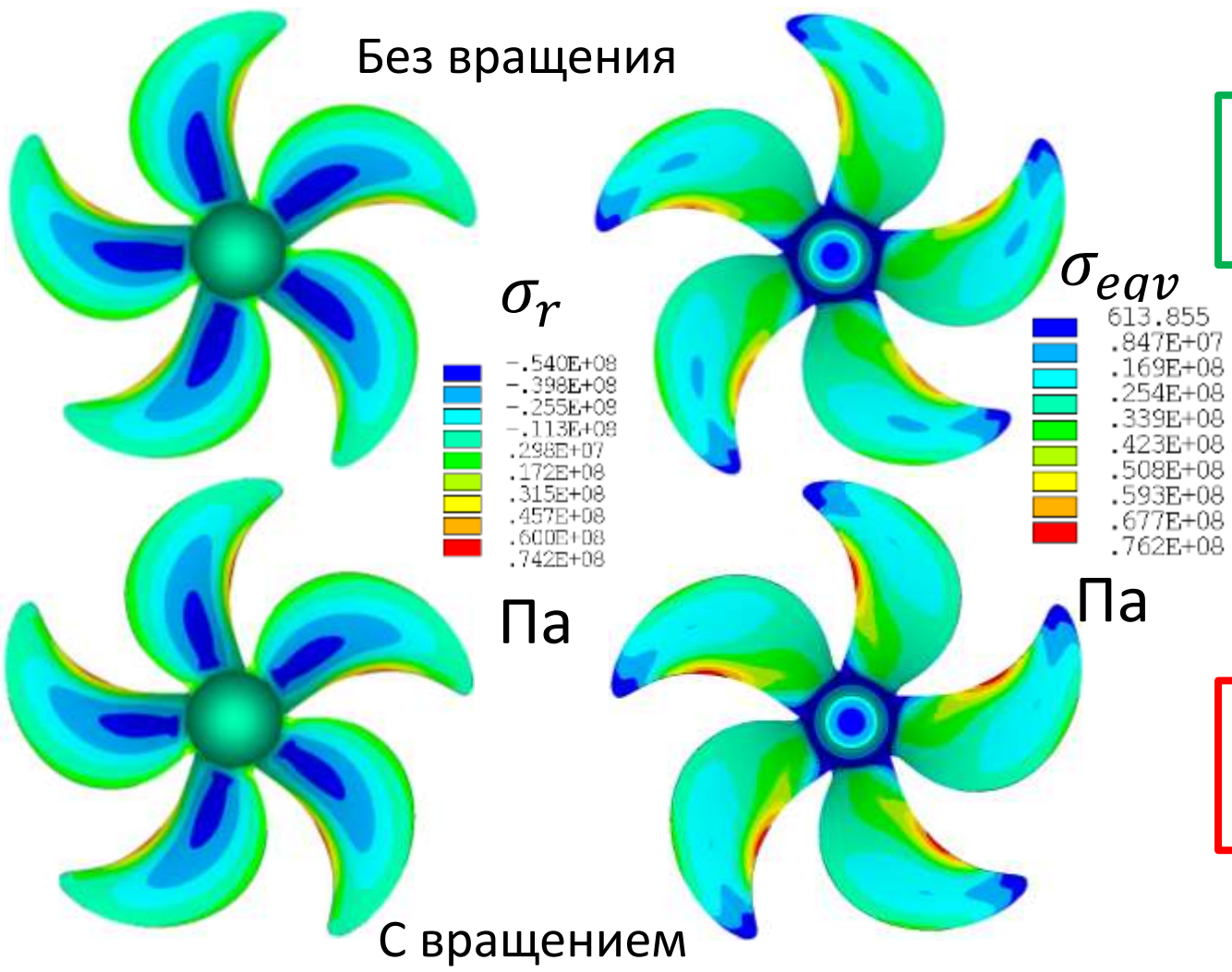
$n_s = 3.47$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 4.95$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 3.22$

# Задача о натурном винте в свободном потоке

## Анализ результатов КЭ расчета



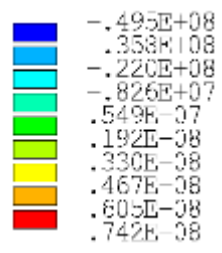
$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 3.50$$

$$n_s = 3.47$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 3.22$$

# Задача о натурном винте в свободном потоке

## $\sigma_r$ Сравнение с аналитическим решением

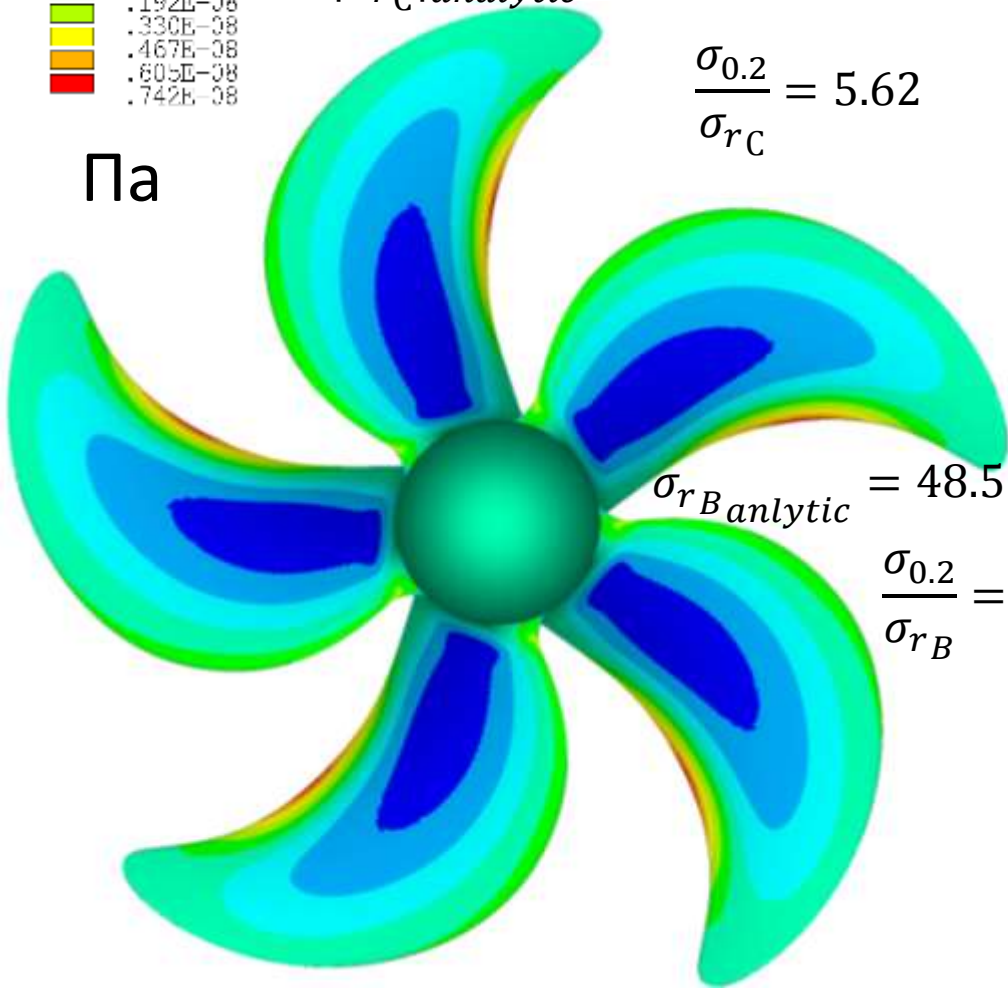


$|\sigma_{rC}|_{fea} = 49.5 \text{ МПа}$       $n_s = 3.47$

$|\sigma_{rC}|_{analytic} = 43.57 \text{ МПа}$

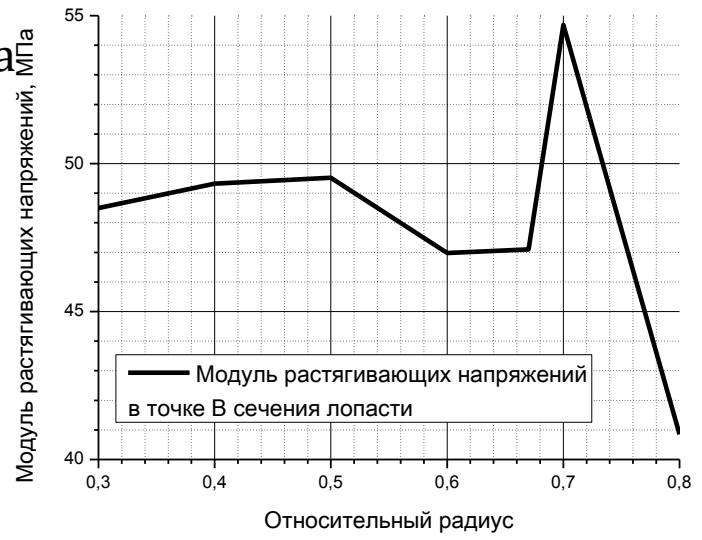
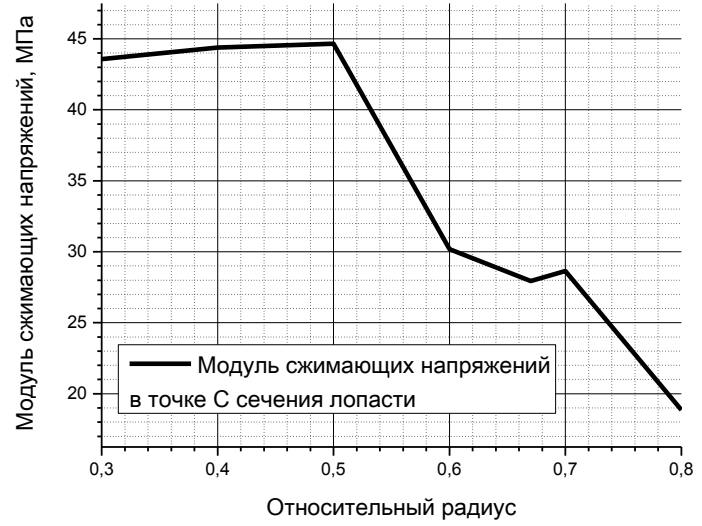
$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 5.62$

Па



$\sigma_{rB analytic} = 48.50 \text{ МПа}$

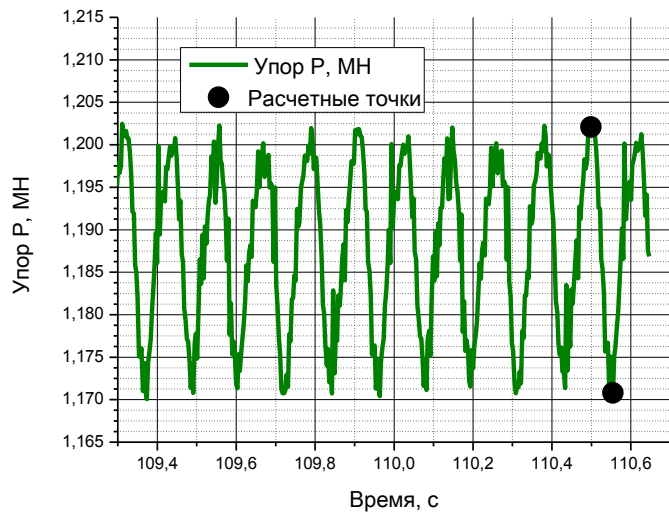
$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rB}} = 5.05$



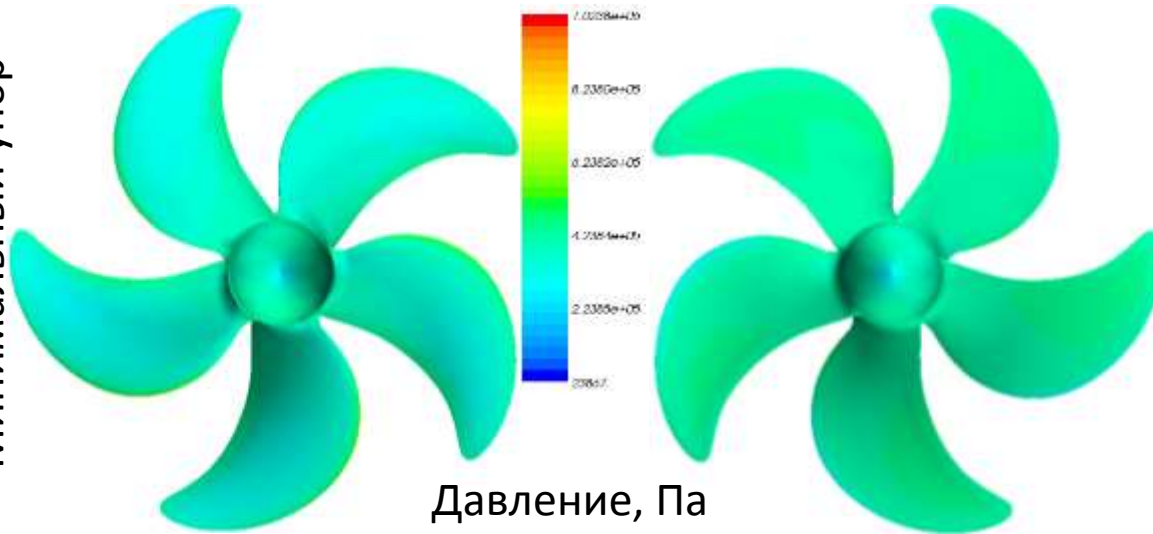


# Задача о натурном винте в за корпусом

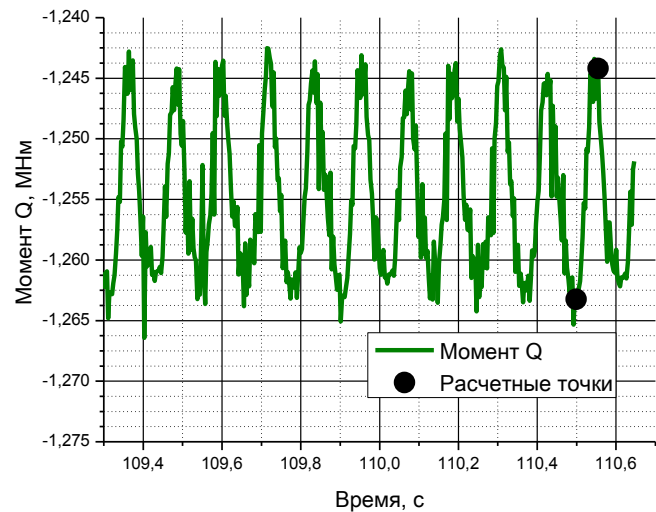
## Граничные условия



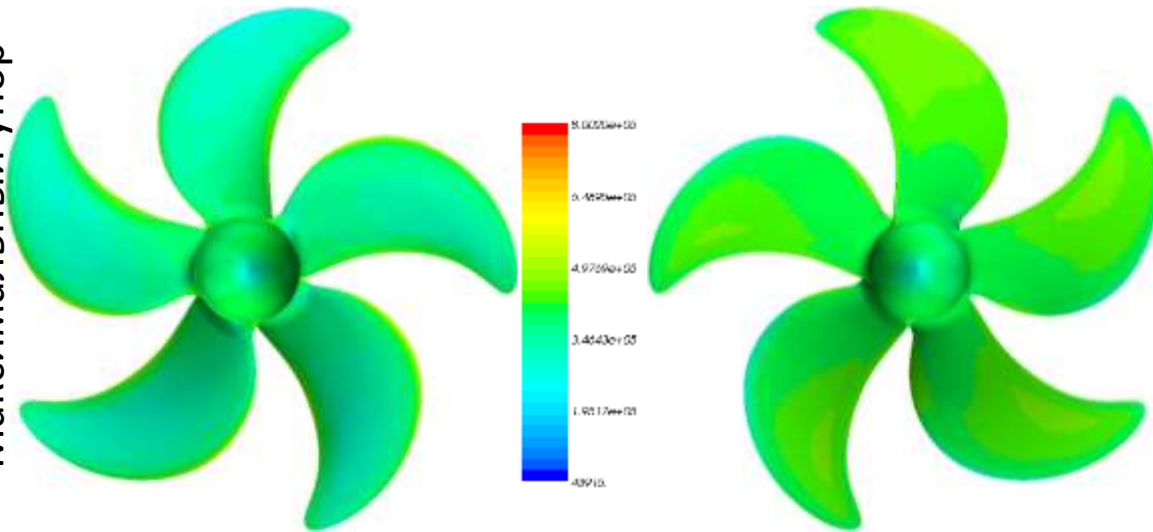
Минимальный упор



Давление, Па



Максимальный упор





# Задача о натурном винте в за корпусе

## Постановка задачи

Бронза БрА9Ж4Н4

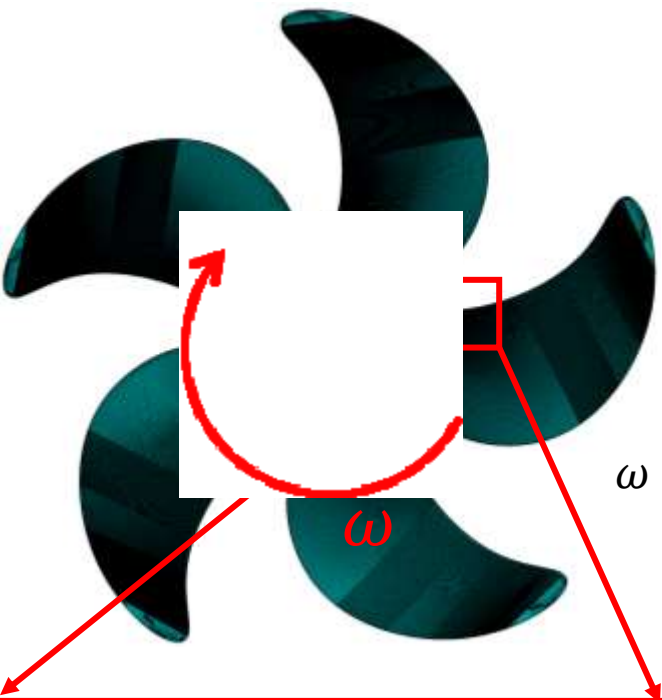
$E = 1.13 \cdot 10^5$  МПа

$\nu = 0.35$

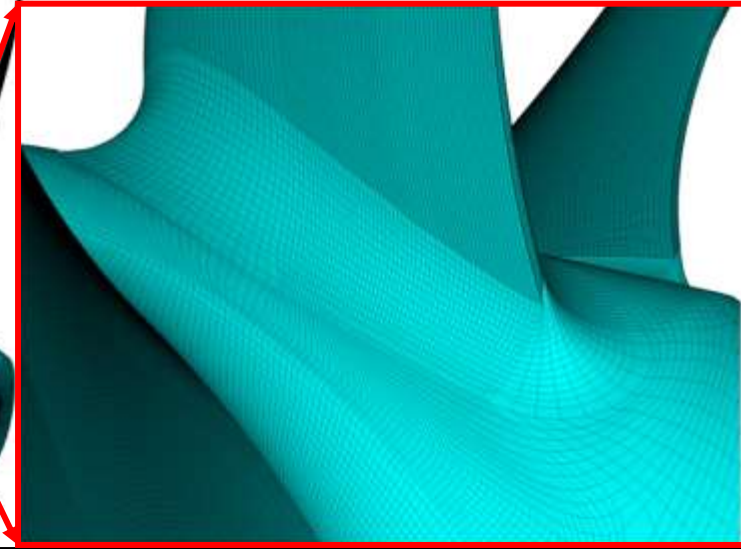
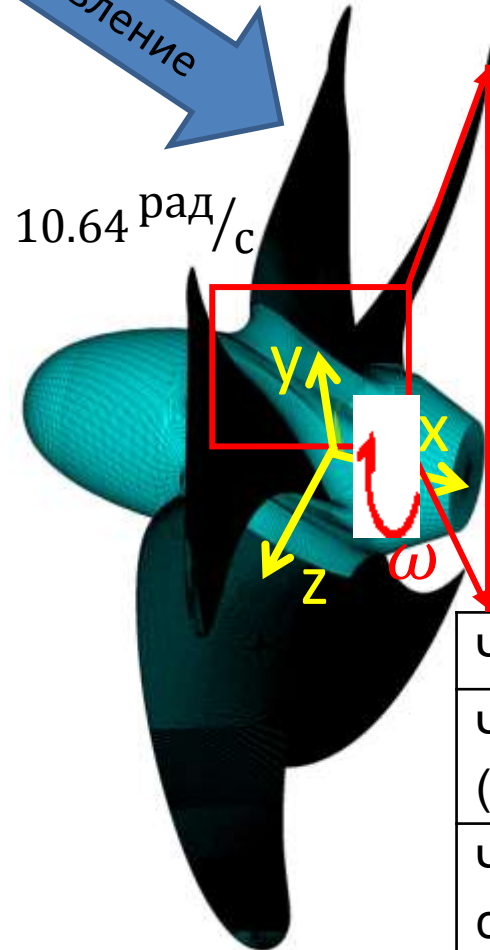
Материал:  $\sigma_{0.2} = 245$  МПа

$\rho = 7500$  кг/м<sup>3</sup>

$\sigma_{-1} = 175$  МПа



$\omega = 10.64$  рад/с



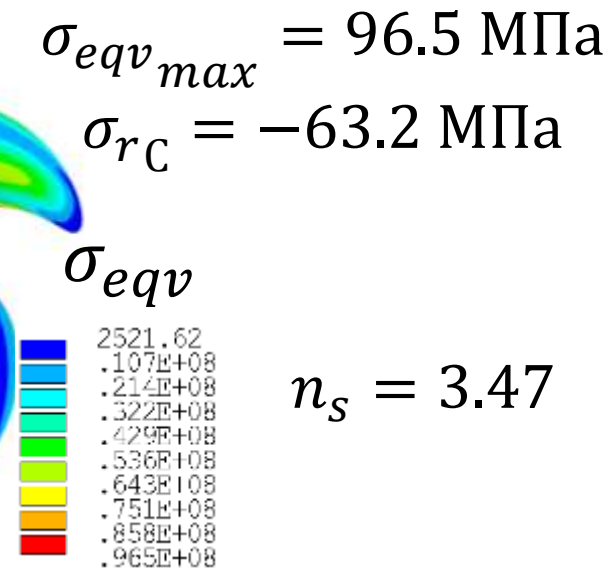
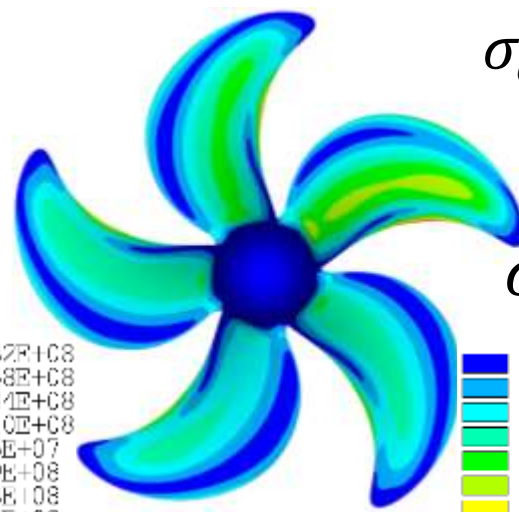
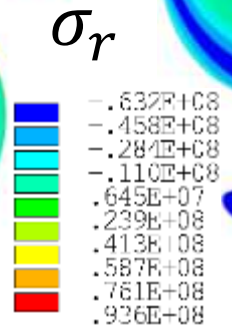
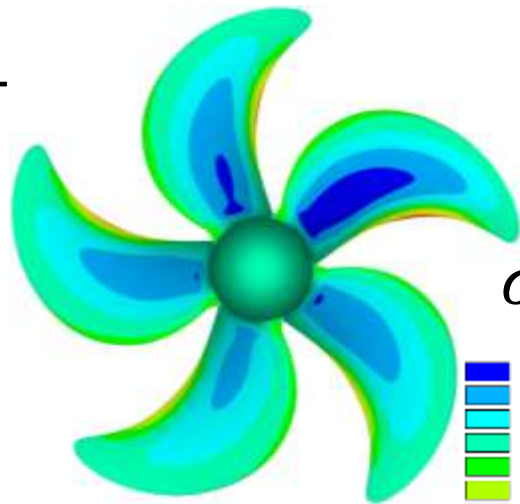
Число узлов (NN)	4888939
Число элементов (NE)	4429750
Число степеней свободы (NDF)	19555756

# Задача о натурном винте в свободном потоке

## Результаты КЭ расчета для случая минимального упора

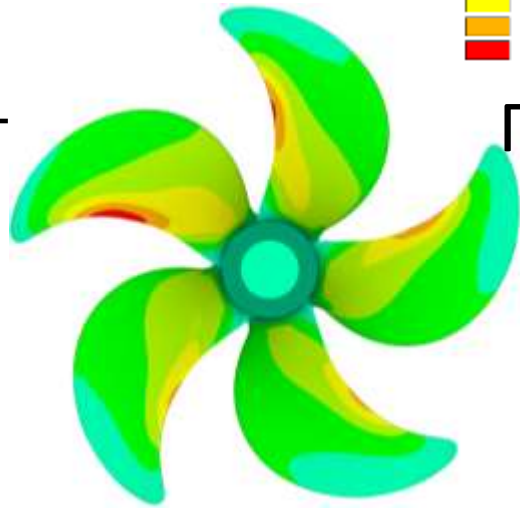
ПОВЕРХНОСТЬ

нагнетающая засасывающая

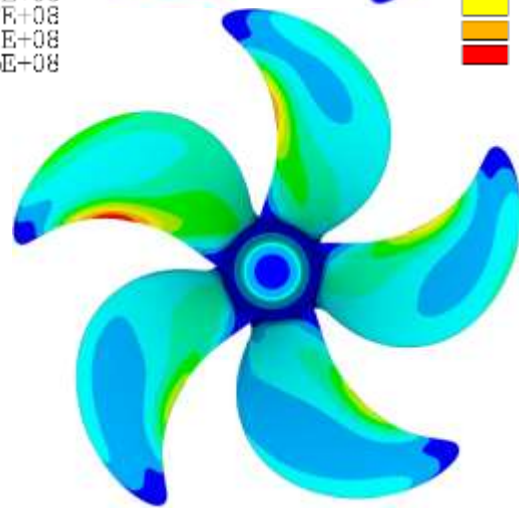


$\sigma_{eqv_{max}} = 96.5 \text{ МПа}$   
 $\sigma_{rC} = -63.2 \text{ МПа}$

$n_s = 3.47$



Па



Па

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 3.88$

$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 2.54$

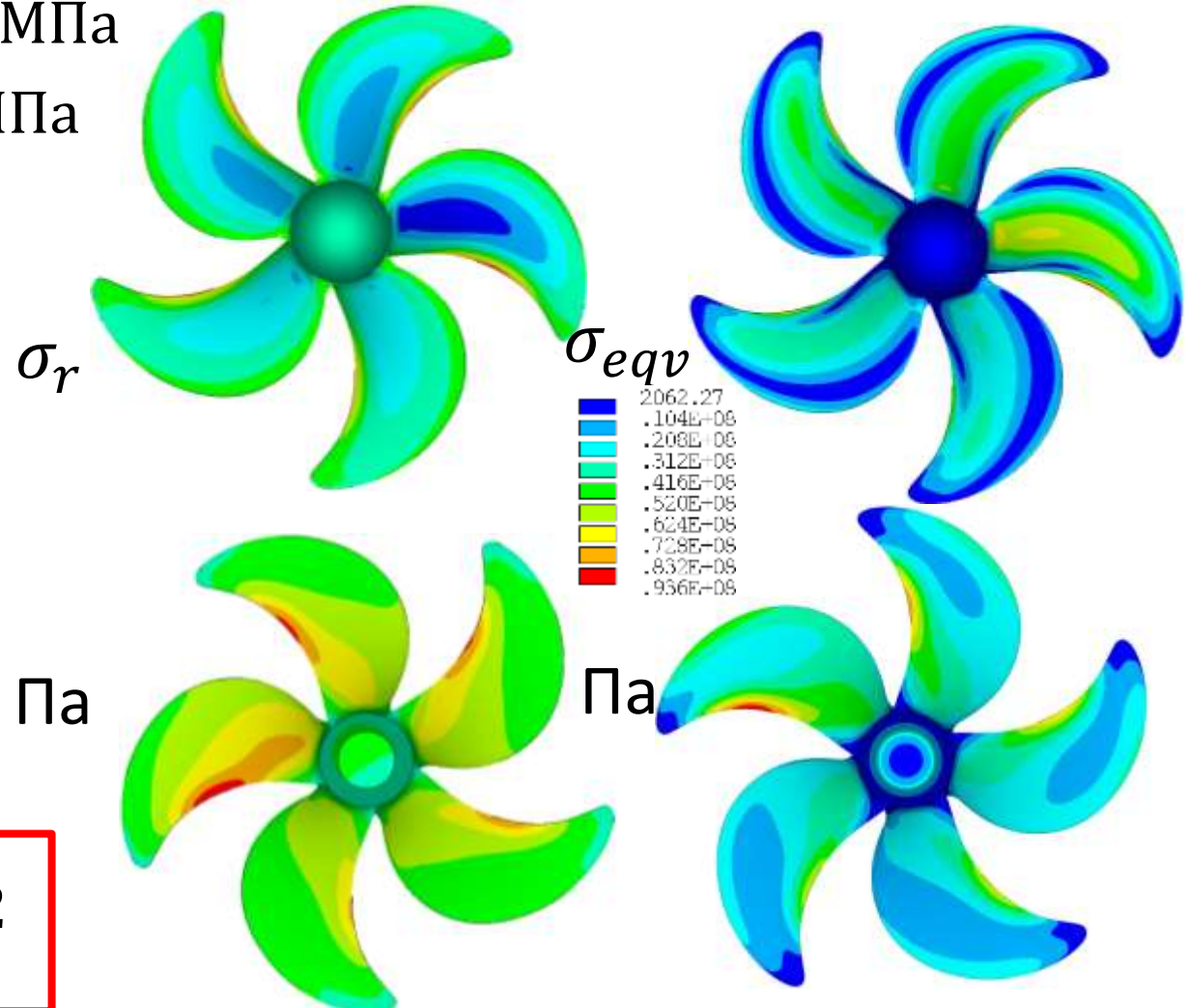
# Задача о натурном винте в свободном потоке

## Результаты КЭ расчета для случая максимального упора

$$\sigma_{eqv_{max}} = 93.6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{rC} = -72.8 \text{ МПа}$$

$$n_s = 3.47$$



засасывающая поверхность  
 нагнетающая поверхность

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{rC}} = 3.37$$

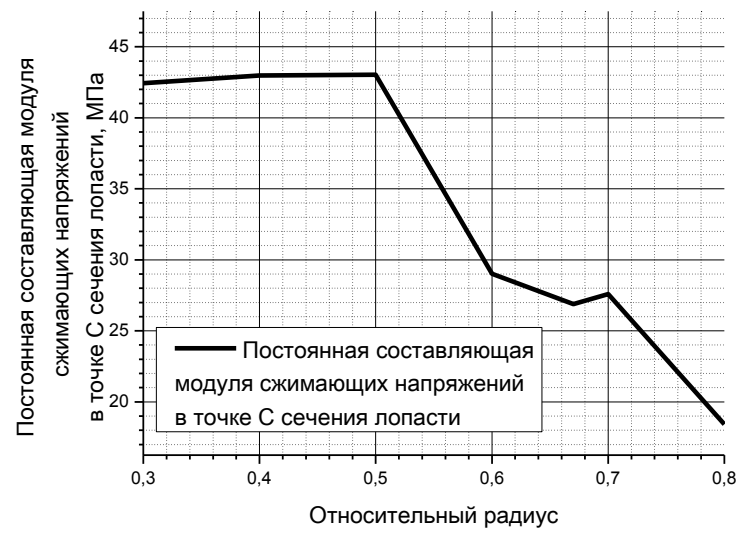
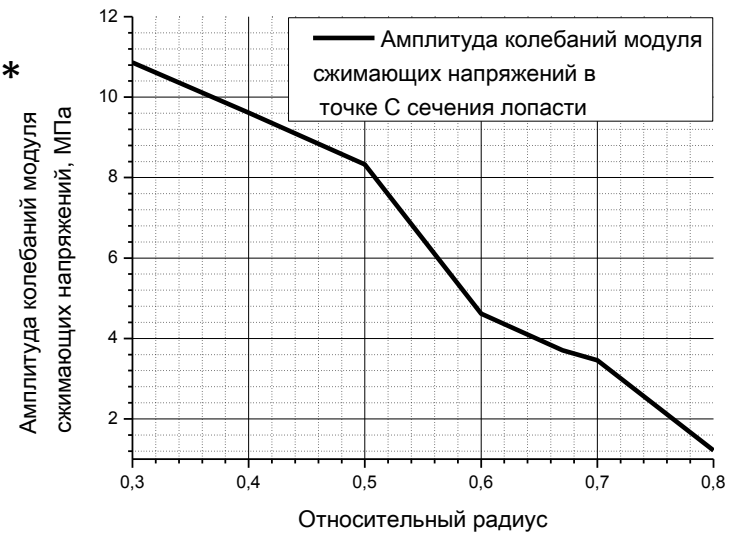
$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{eqv_{max}}} = 2.62$$

# Задача о натурном винте в свободном потоке

$$N = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_a \sigma_m}} \quad \text{Расчет на циклическую прочность}$$

$N$  – коэффициент запаса по циклической прочности\*  
 $n_{\sim} = 3.5$  – нормативный коэффициент запаса по циклической прочности

	Методика	Расчет
$\sigma_m$ , МПа	42.44	52.05
$\sigma_a$ , МПа	10.86	20.80
$N$	7.27	5.52
$\sigma_m$ , МПа	53.30	95.5
$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_m}$	4.60	2.53



\*ОСТ 5.4050-72 Винты гребные. Методы оценки статической и циклической прочности лопастей и нормы запасов их прочности.



## Заключение

В ходе работы выполнены следующие задачи:

- Численно решена задача нахождения напряженно-деформированного состояния лопастей масштабной модели гребного винта при испытаниях в свободной воде. Проведено исследование влияния учета вращения на картину напряженно-деформированного состояния. Проведен расчет на статическую прочность. Рассмотрено аналитическое решение, проведено сравнение аналитического и численного решений.
- Численно решена задача нахождения напряженно-деформированного состояния лопастей гребного винта натуральных размеров при испытаниях в свободной воде. Проведено исследование влияния учета вращения на картину напряженно-деформированного состояния. Проведен расчет на статическую прочность. Рассмотрено аналитическое решение, проведено сравнение аналитического и численного решений.
- Численно решена задача нахождения напряженно-деформированного состояния лопастей гребного винта натуральных размеров при испытаниях работы винта за корпусом судна. Проведен расчет на статическую и циклическую прочность. Рассмотрено аналитическое решение, проведено сравнение аналитического и численного решений.



**Спасибо за внимание!**