

# Расчетное исследование тонального шума вентилятора с надроторным устройством

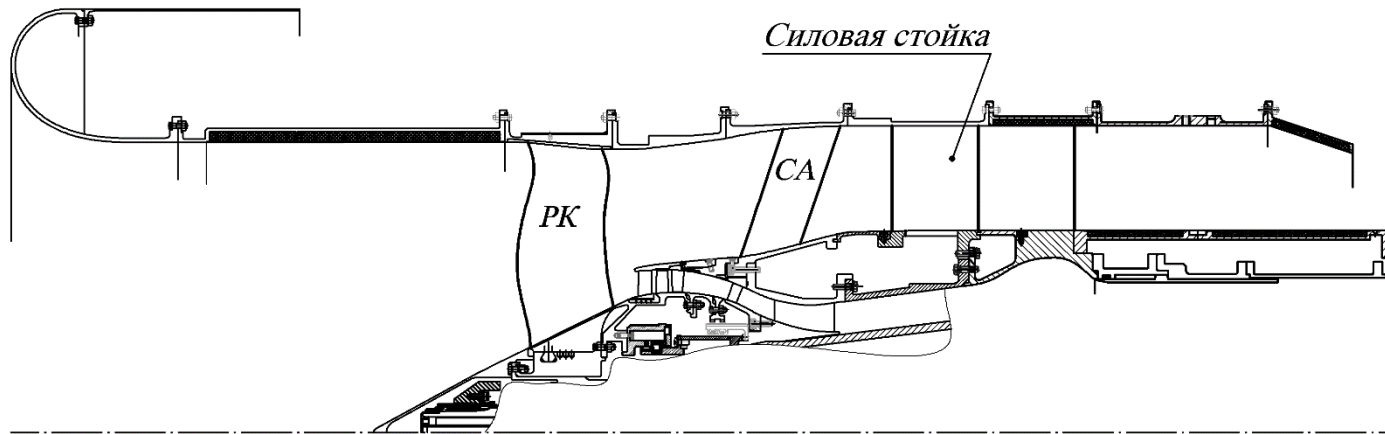
*Авторы: Россихин А.А., Дружинин Я.М., Милешин В.И.*

*Докладчик: Россихин А.А.*

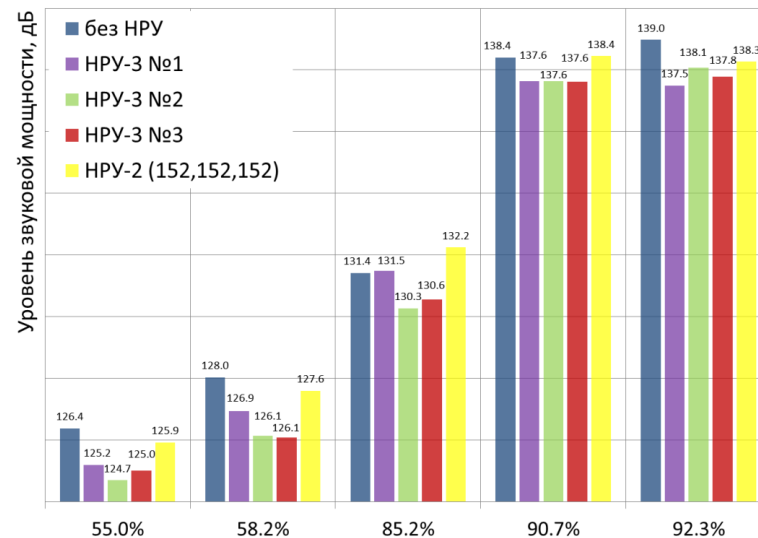
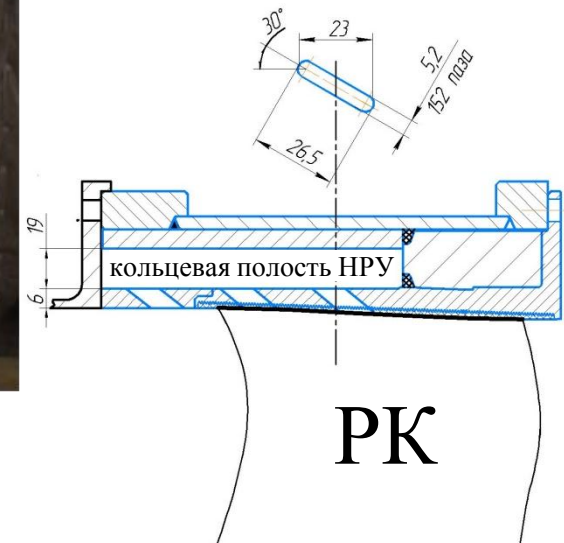


# Влияние НРУ на акустические характеристики вентиляторов

Экспериментальные исследования ЦИАМ показали существенное влияние НРУ на акустические характеристики вентиляторов



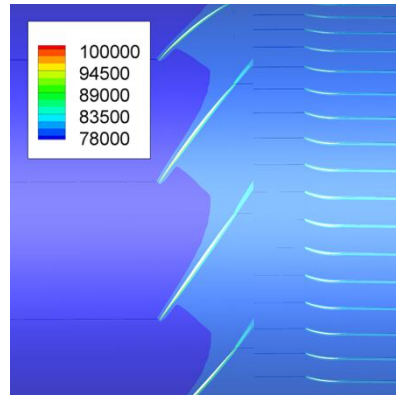
Рабочее колесо модели вентилятора



В данной работе представлено исследование, направленное на достижение лучшего понимания процессов, приводящих к снижению шума вентиляторов при наличии НРУ

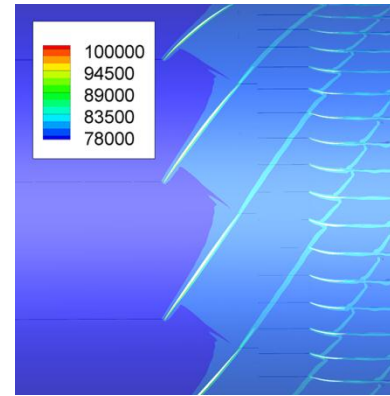
# Метод исследования

Расчет стационарного поля течения



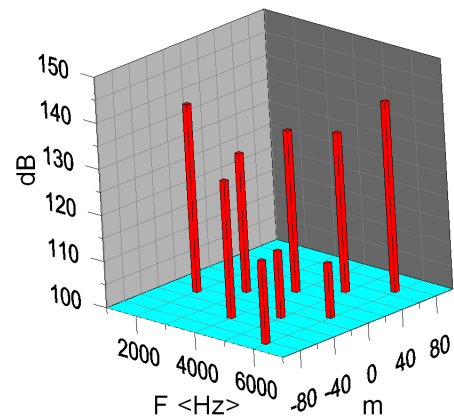
Цилиндрическое сечение – энтропийная функция

Расчет нестационарных возмущений

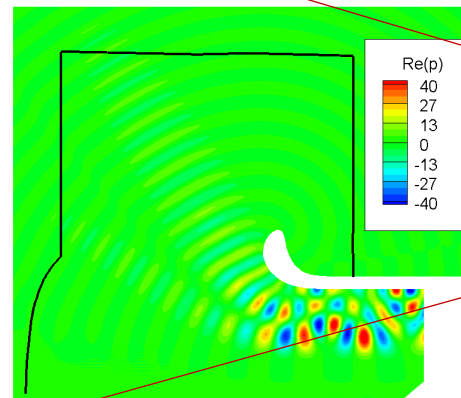


NUMECA Fine/Turbo  
NLH метод

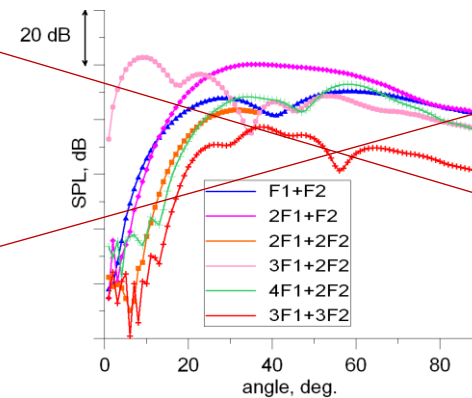
Модальный анализ



Расчет распространения



Расчет пульсаций давления в дальнем поле



ЦИАМ 3DAS

## Объект исследования



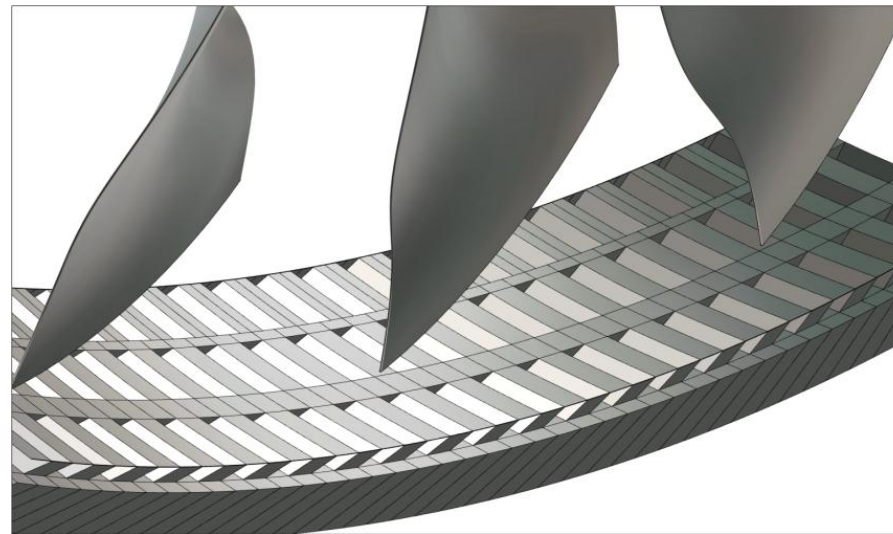
Число лопаток РК – 18  
Число лопаток СА - 47

Параметры	Расчетная точка	Взлет	Посадка
Относительная скорость вращения вала	100%	93%	48%
Окружная скорость вентилятора (приведенная)	315 м/с	292.95 м/с	166.95 м/с
Суммарный расход (приведенный)	74.5 кг/с	68.84 кг/с	37.97 кг/с
Степень двухконтурности	13.1	14	17

Объект исследования – модель двухконтурного вентилятора

Надроторное устройство щелевого типа с тремя поясами щелей

Число щелей - 152

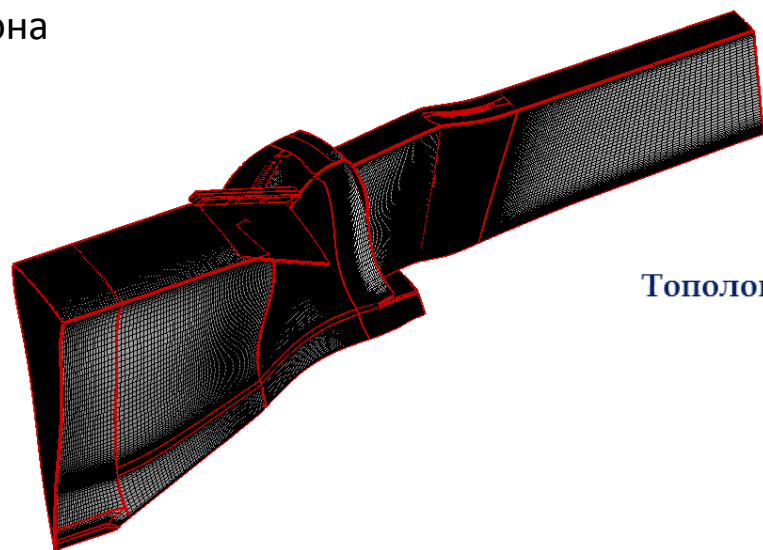


В рамках данного исследования оценивались характеристики ЗПК для оборотов, соответствующих режиму «взлет» и тональный шум вентилятора для режима «посадка»

## Расчетная сетка и метод исследования

Генераторы Autogrid 5 и IGG  
 Топология Н-О-Н  
 Число блоков 57  
 Общее число ячеек 7.43 миллиона  
 Из них на НРУ приходится  
 1.94 миллиона

	Ротор	Статор
Число узлов	3507821	1978095
Число меридион. слоев	137	105
Миним. угол скоса	15.0	41.0
Осредненный угол скоса	73.7	77.4



Топология блоков

- Программный комплекс NUMECA Fine/Turbo
- Трехмерные уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу
- Модель турбулентности k-ε
- Схема Джеймсона

### Граничные условия

- Вход:  $P^*=101325$  Pa,  $T^*=288.15$  K
- Выход: радиальное равновесие
- Стенки: адиабатический
- Расчет с радиальным зазором 0.3 мм



## Метод расчета

1

- NLH (NonLinear Harmonic) метод

2

- осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса
- $U = (p, \rho v, \rho E)$ , где  $v = (v_x, v_y, v_z)$  – относит. скорость

3

- $U(r, t) = U(r) + \Sigma U'(r', t)$

4

- $\Omega_i \frac{d\bar{U}}{dt_i} = - \Sigma \bar{F}_c \vec{S} + \Sigma \bar{F}_v \vec{S} + \Omega_i \bar{S}_{Ti}$

5

- начальные данные для NLH -результаты стационарной задачи в приближении "MixingPlane"

6

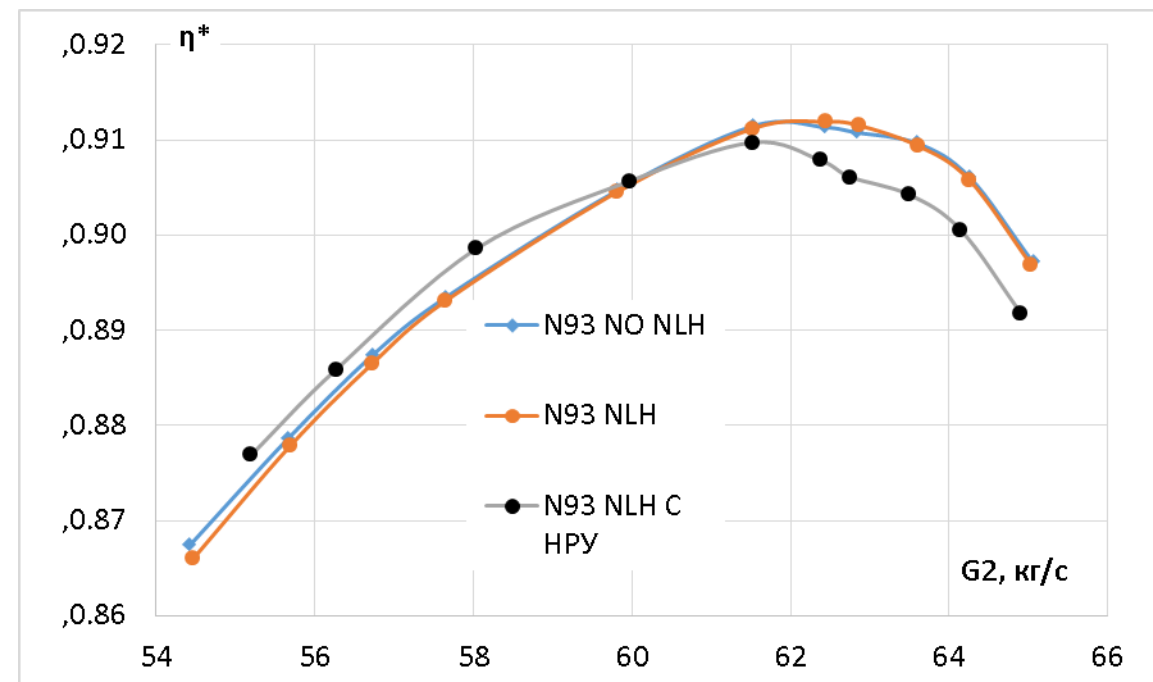
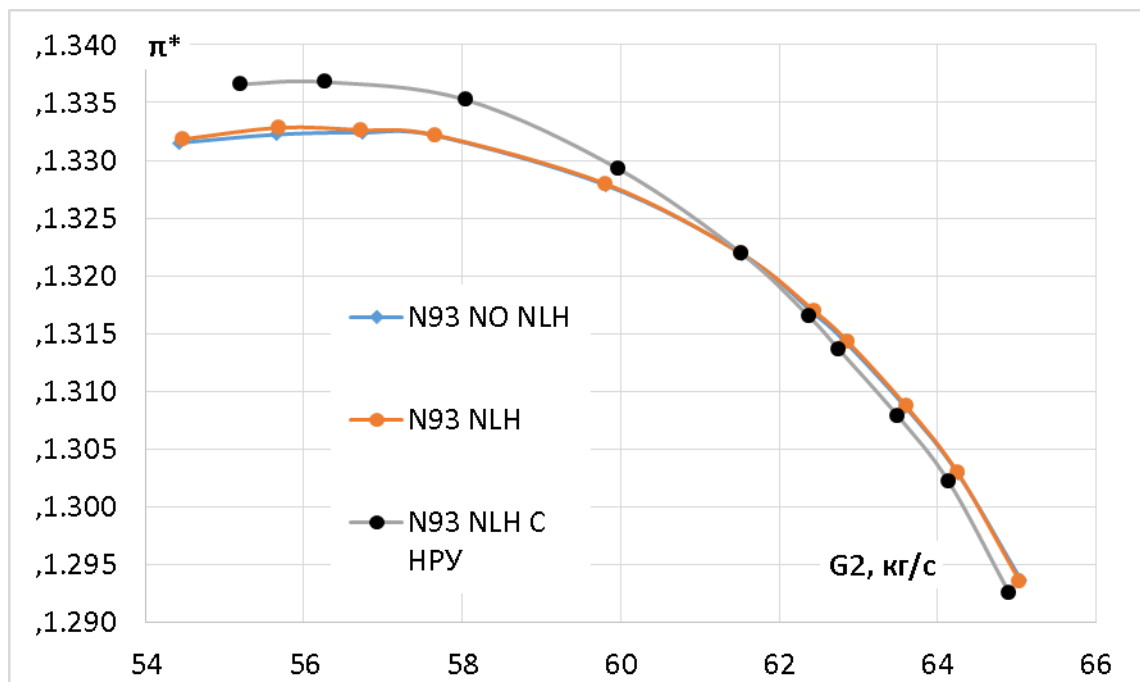
- 4 гармоники, описывающие возмущение в каждом из венцов

ГУ

- Обобщенная периодичность на периодических границах;
- Специальный интерфейс, передающий азимутальный моды через границу между роторами

# Расчет нестационарного поля течения в ступени без и с НРУ для режима «взлет»

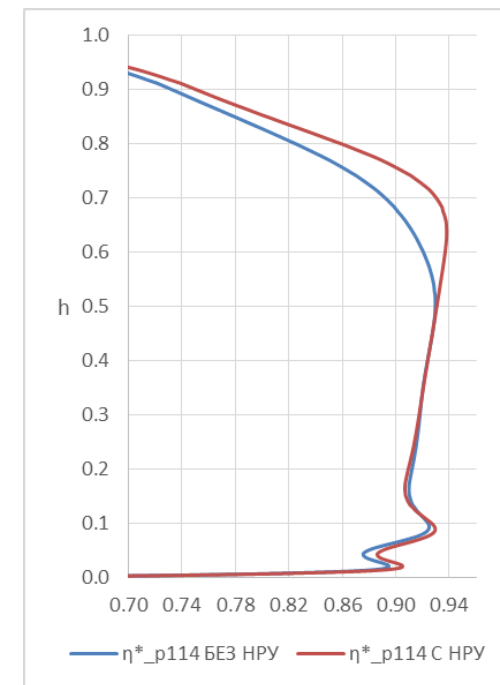
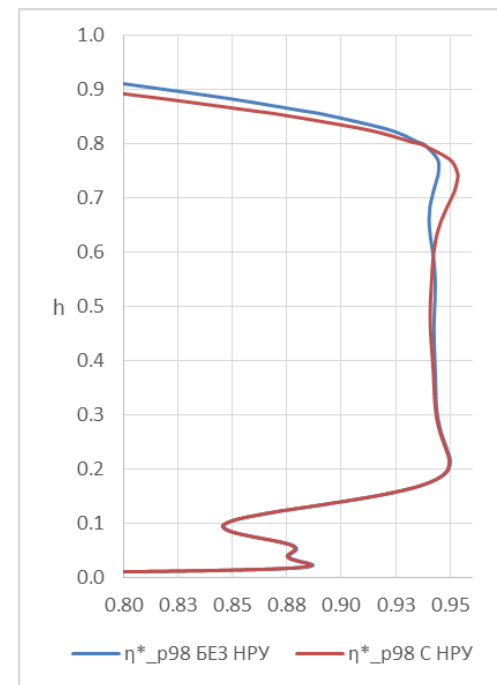
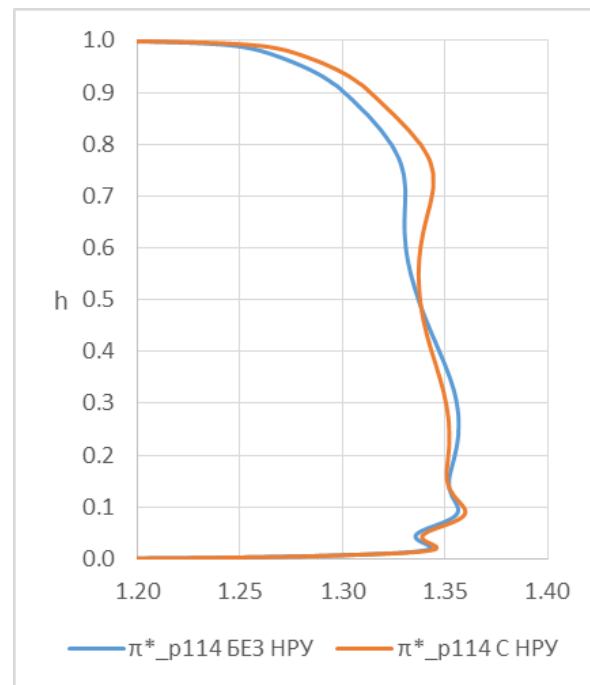
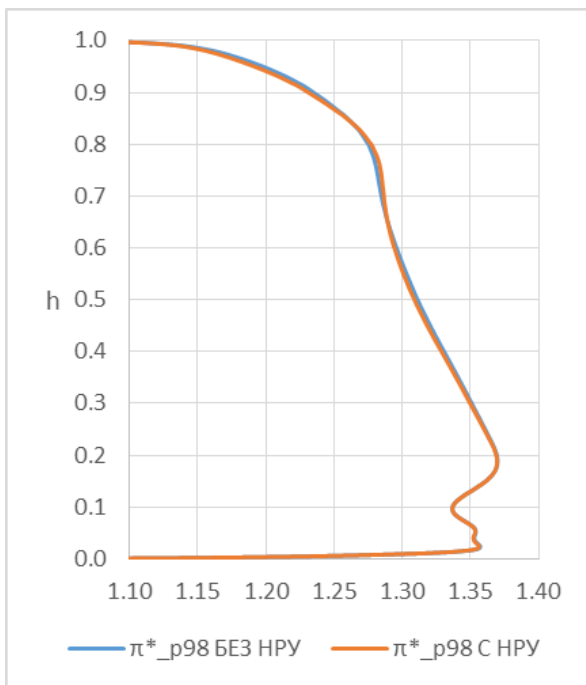
С целью исследования влияния надроторного устройства на аэродинамические характеристики были выполнены расчеты аэродинамических характеристик вентилятора для частоты вращения  $N = 93\%$  (соответствует режиму «взлет»). Исследование было выполнено с помощью базового NLH метода.



Интегральные характеристики ступени с гладкой проточной частью и с НРУ

## Интегральные характеристики

	БЕЗ НРУ	С НРУ
Л.Р.Р.	$G2=64.25$ кг/с, $\pi^*=1.303$ , $\eta^*=0.906$	$G2=64.14$ кг/с, $\pi^*=1.302$ , $\eta^*=0.901$
ГРАНИЦА ГДУ	$G2=54.47$ кг/с, $\pi^*=1.332$ , $\eta^*=0.866$	$G2=55.20$ кг/с, $\pi^*=1.337$ , $\eta^*=0.877$



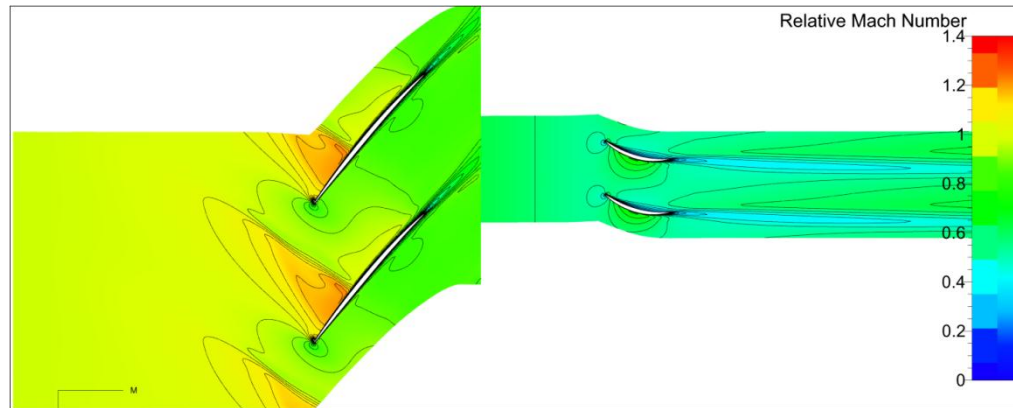
Радиальное распределение степени повышения полного давления  $\pi^*$  за спрямляющим аппаратом

Радиальное распределение КПД  $\eta^*$  за спрямляющим аппаратом

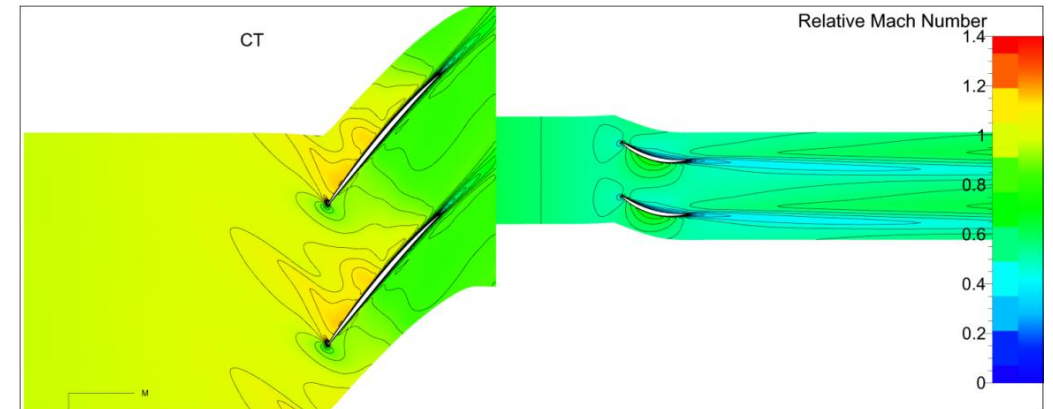


# Стационарное поле течения

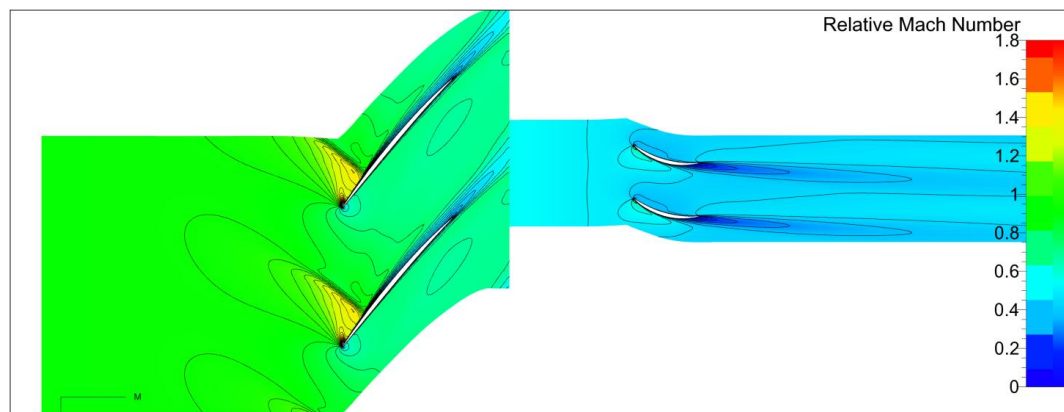
Л.Р.Р.  $G=64.25$  кг/с,  $\pi^*=1.303$ ,  $\eta^*=0.906$ ,  $0.95h$ , БЕЗ НРУ



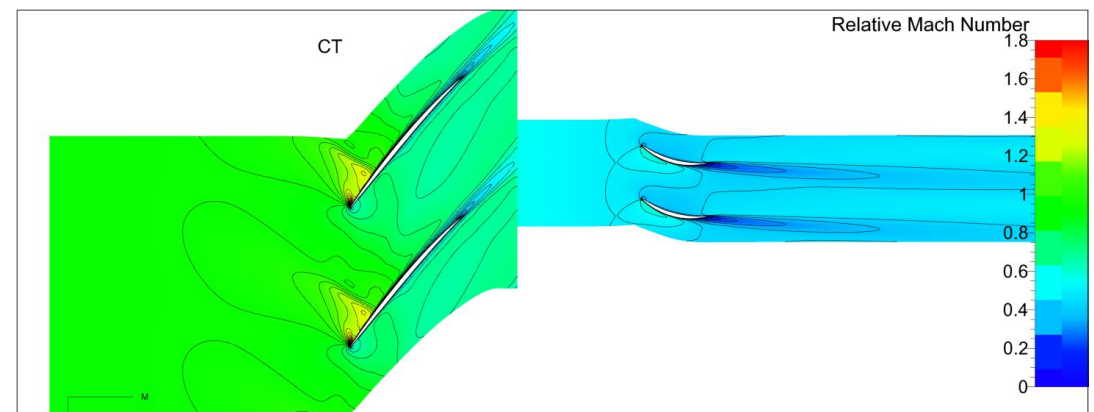
Л.Р.Р.  $G=64.14$  кг/с,  $\pi^*=1.302$ ,  $\eta^*=0.901$ ,  $0.95h$ , С НРУ



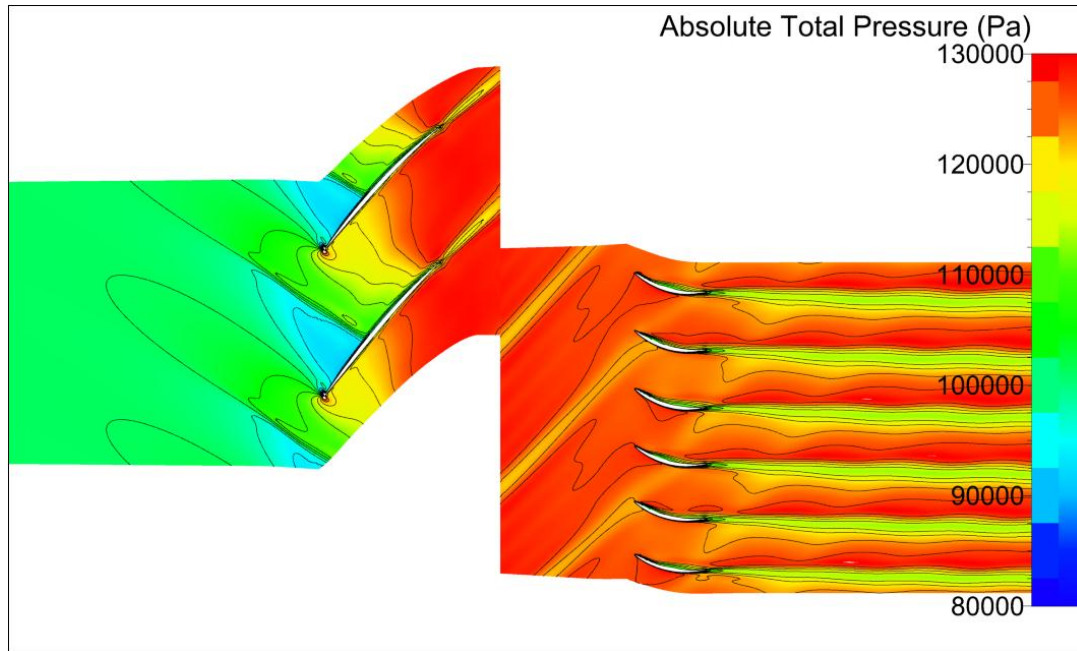
ГРАНИЦА ГДУ,  $G_2=54.47$  кг/с,  $\pi^*=1.332$ ,  $\eta^*=0.866$ , БЕЗ НРУ



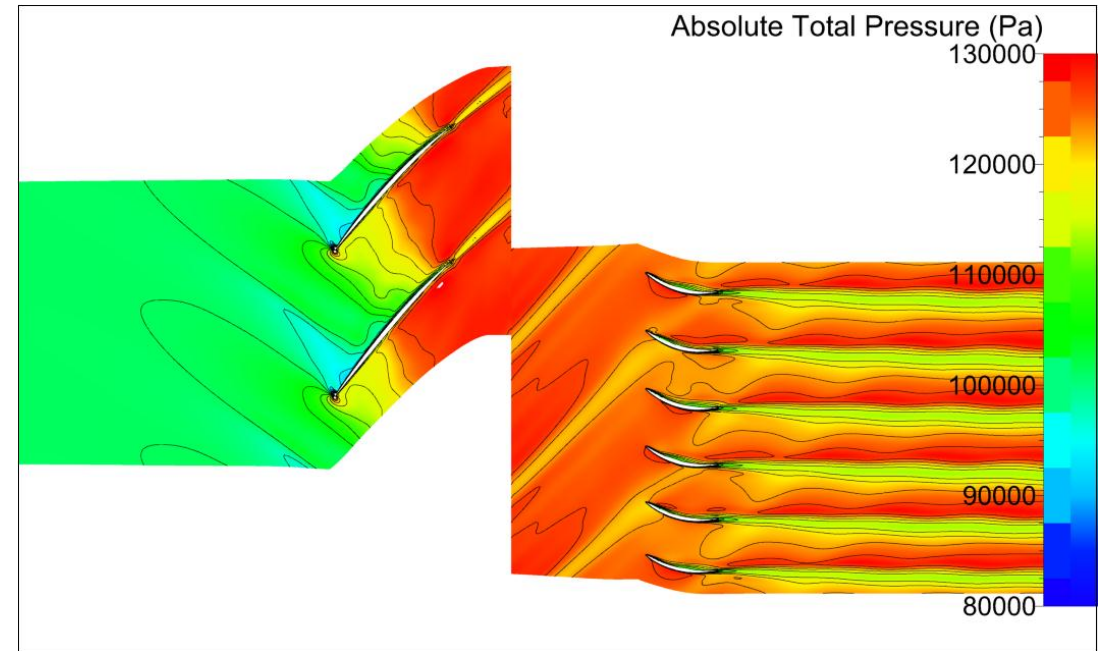
ГРАНИЦА ГДУ,  $G_2=55.20$  кг/с,  $\pi^*=1.337$ ,  $\eta^*=0.877$ , С НРУ



## Реконструкция полей течения



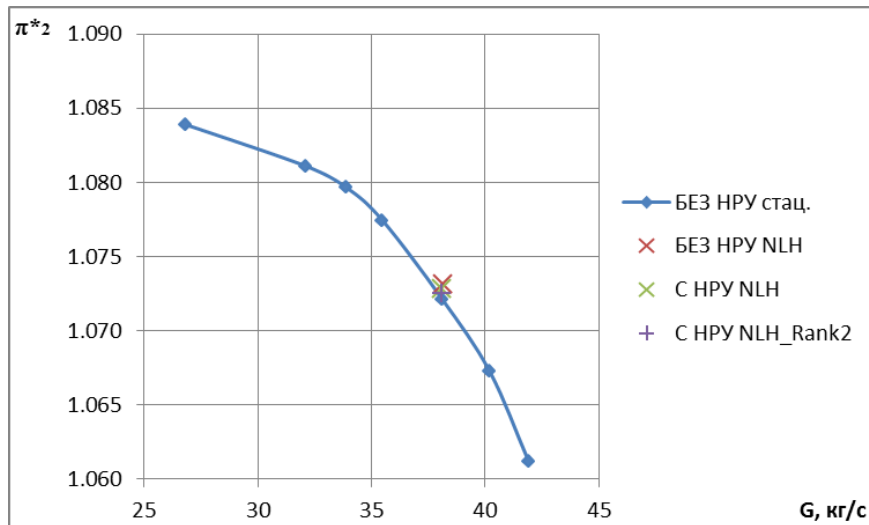
Нестационарное поле течения (поле полного давления) на цилиндрическом сечении  $h=0.95$  для вентилятора без НРУ  
Линия рабочих режимов



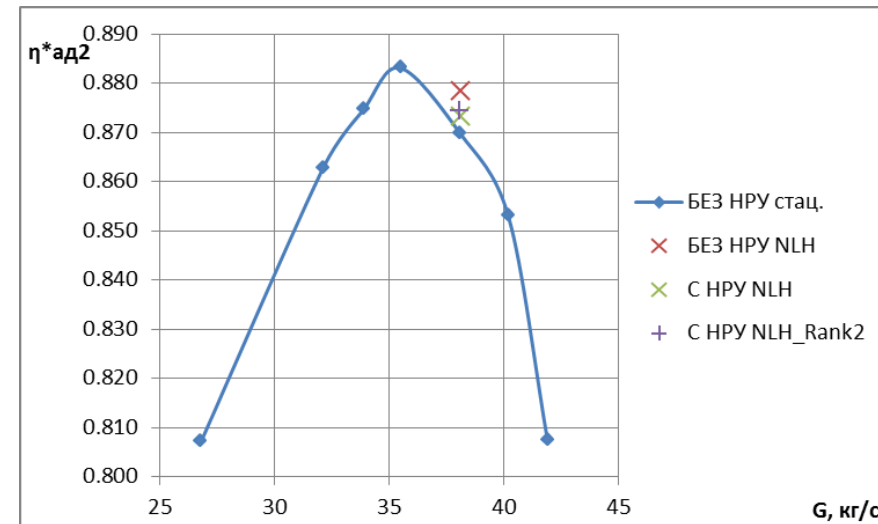
Нестационарное поле течения (поле полного давления) на цилиндрическом сечении  $h=0.95$  для вентилятора с НРУ  
Линия рабочих режимов

# Расчет нестационарного поля течения в ступени без и с НРУ для режима «посадка»

С целью исследования влияния надроторного устройства на тональный шум ступени были выполнены расчеты нестационарного поля течения в вентиляторе для частоты вращения  $N = 48\%$  (соответствует режиму «посадка»). Исследование было выполнено с помощью базового NLH метода и NLH метода 2-го ранга.



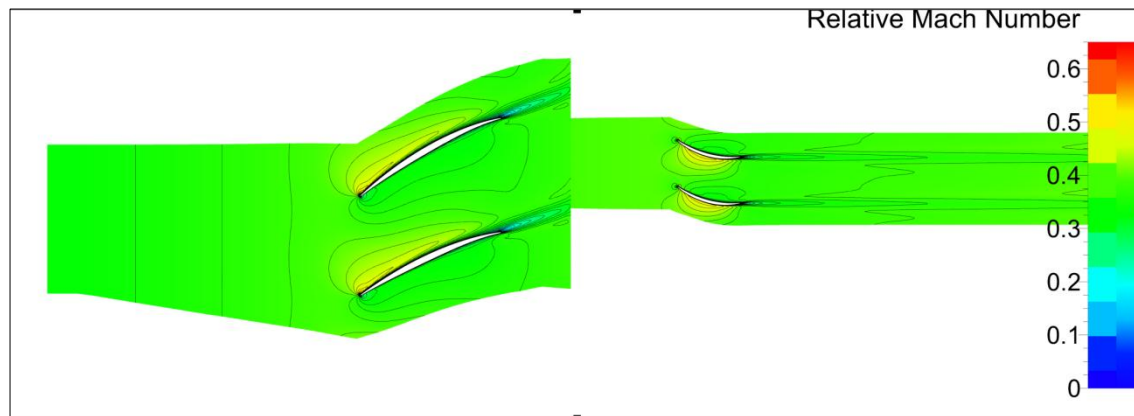
Степень повышения полного давления



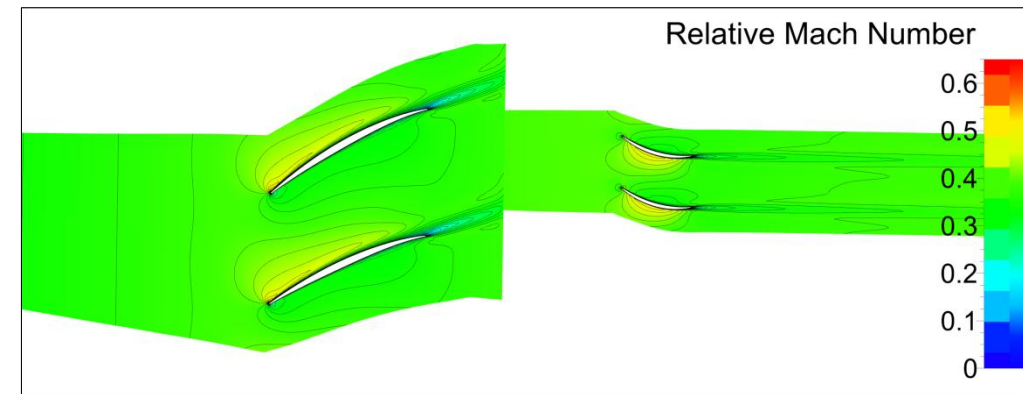
КПД

## Среднее поле течения

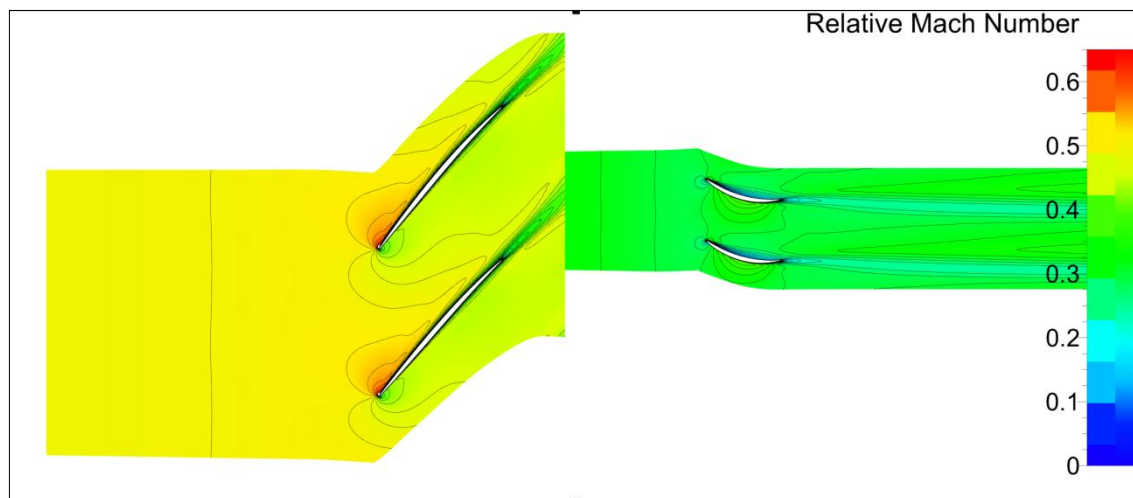
0.5h, БЕЗ НРУ



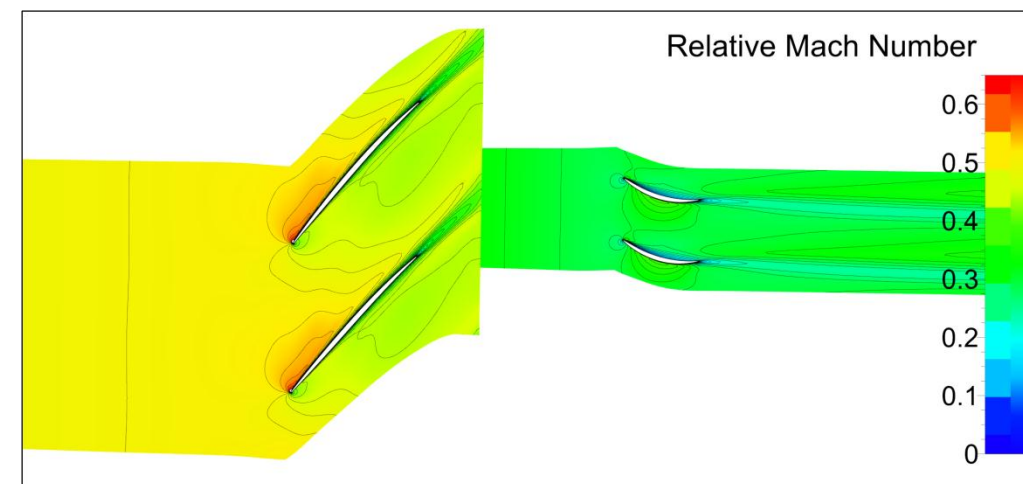
0.5h, С НРУ



0.95h, БЕЗ НРУ

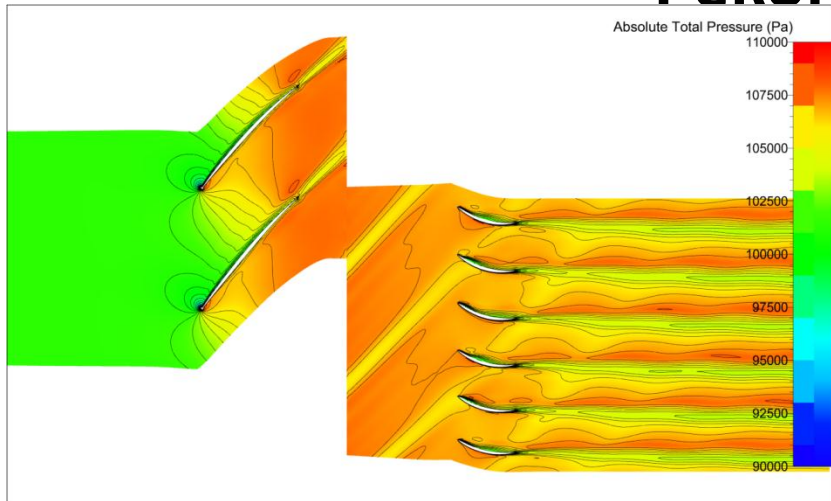


0.95h, С НРУ

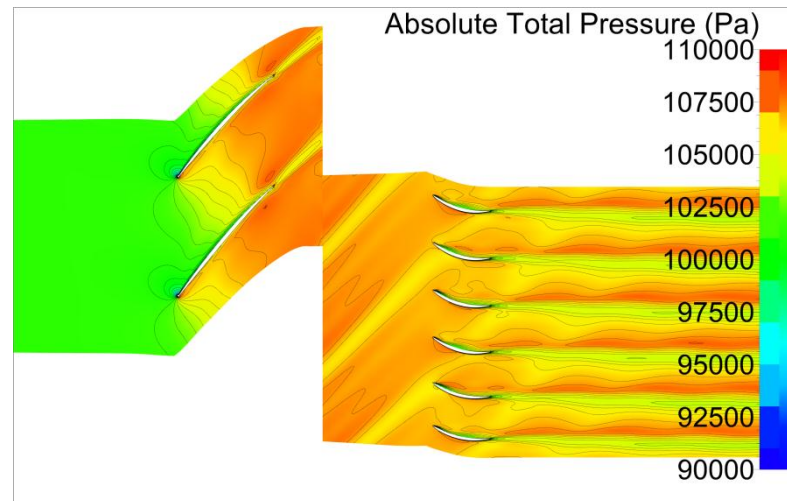




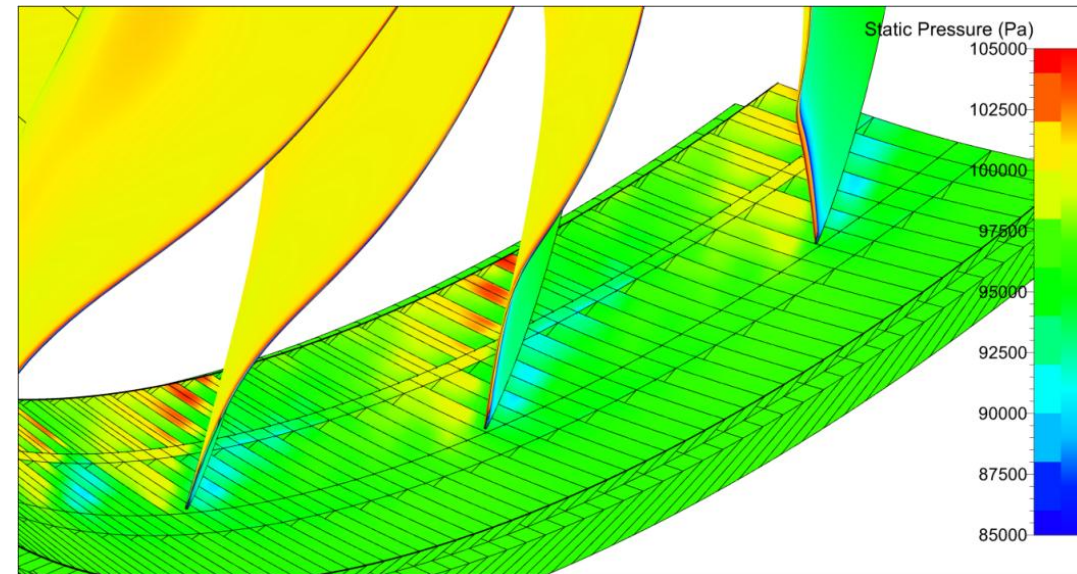
## Реконструкция полей течения



Нестационарное поле течения (поле абсолютного давления) на цилиндрическом сечении  $h=0.95$  для вентилятора без НРУ



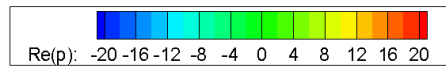
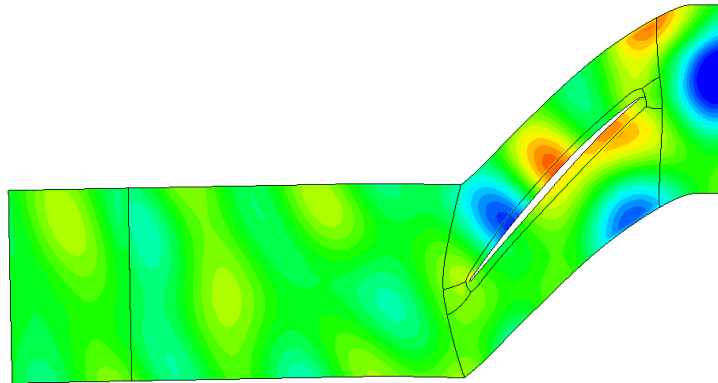
Нестационарное поле течения (поле абсолютного давления) на цилиндрическом сечении  $h=0.95$  для вентилятора с НРУ



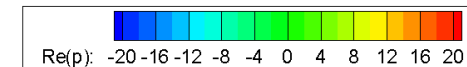
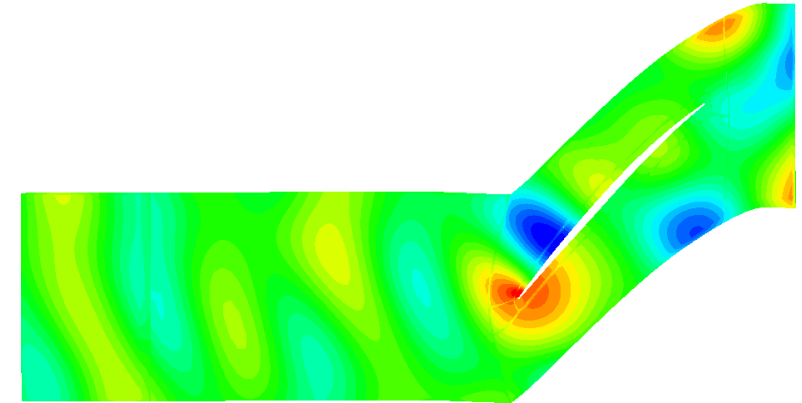
Распределение давления на периферийной части РК и на поверхности щелевой решётки НРУ.  $N=4105$  об/мин,  $G=38.1$  кг/с,  $\pi^*_B=1.073$ ,  $\eta^*_{ад} \approx 0.873$

# Поля гармоник

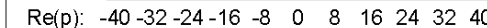
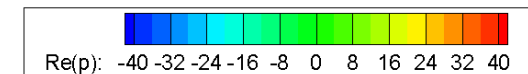
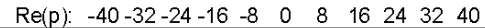
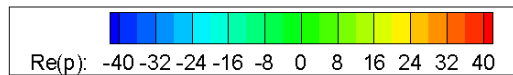
Вентилятор без НРУ



Вентилятор с НРУ



Блоки, связанные с ротором. Гармоника с частотой  $\omega=47\Omega$ .  $D=0.9D$



Блоки, связанные со статором. Гармоника с частотой  $\omega=36\Omega$ .  $D=0.9D$



## Модальный анализ

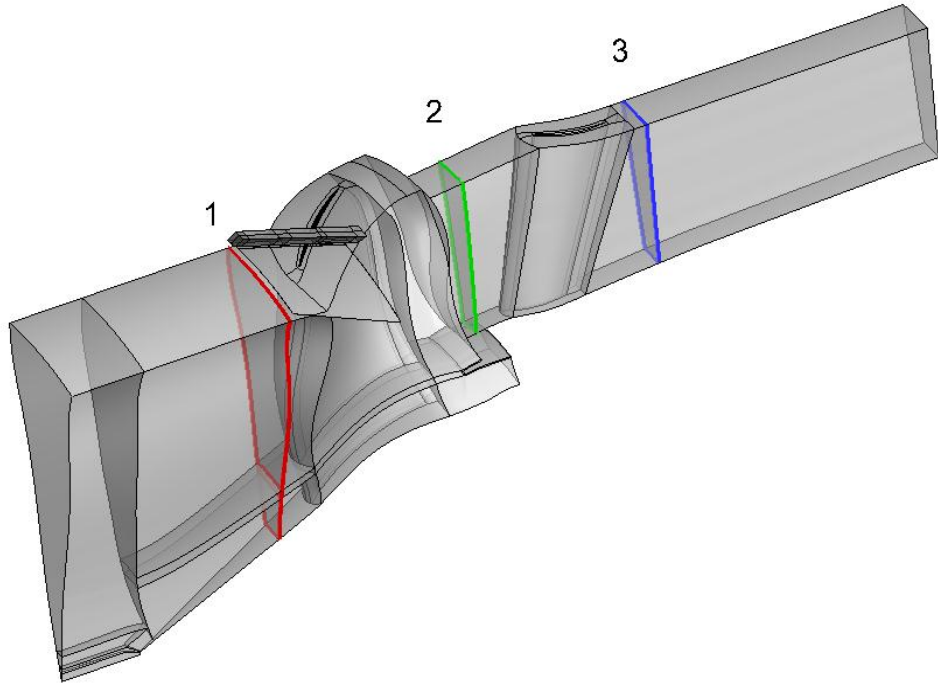
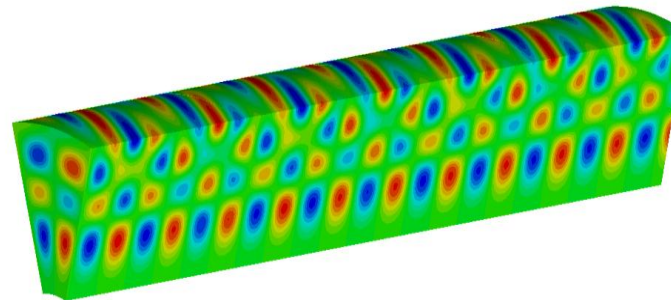


Схема расчетной области с указанием поверхностей, на которых производится модальный анализ

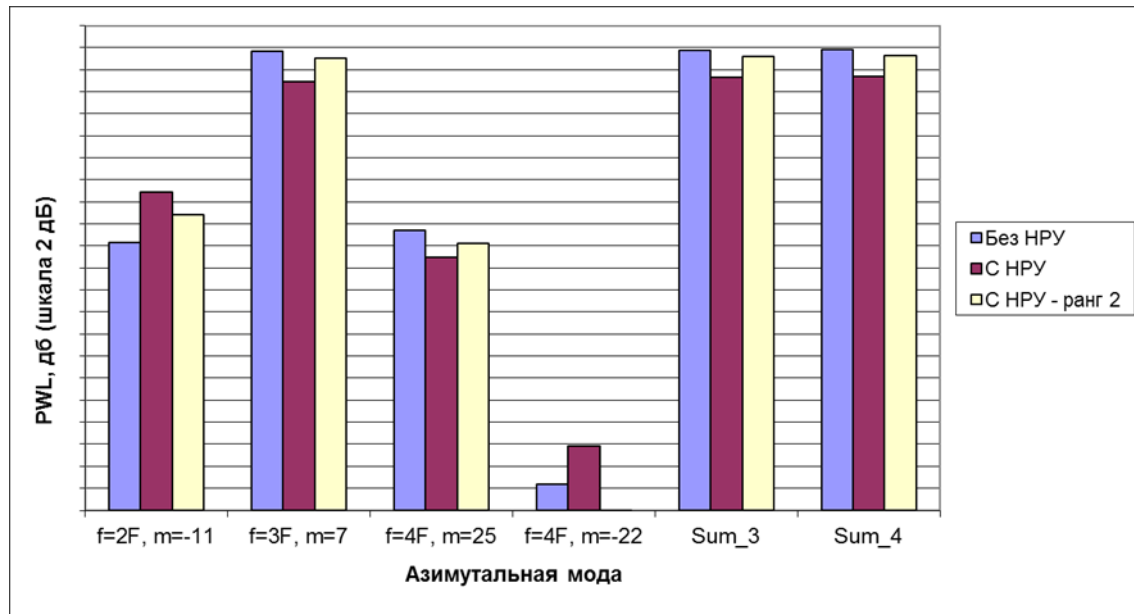
Анализ полученного в расчете взаимодействия решения проводится путем его разложения на входе в лопаточную машину и выходе из нее по акустическим модам для цилиндрического канала

### Примеры мод в цилиндрическом канале



Распространяющиеся моды:  
 $R_{\min}=0.4$  м.,  $R_{\max}=1.4$  м.,  $M = -0.4$ ,  
 $f= 1$  КГц,  $m = 12$ ,  $q = 4,2$ .

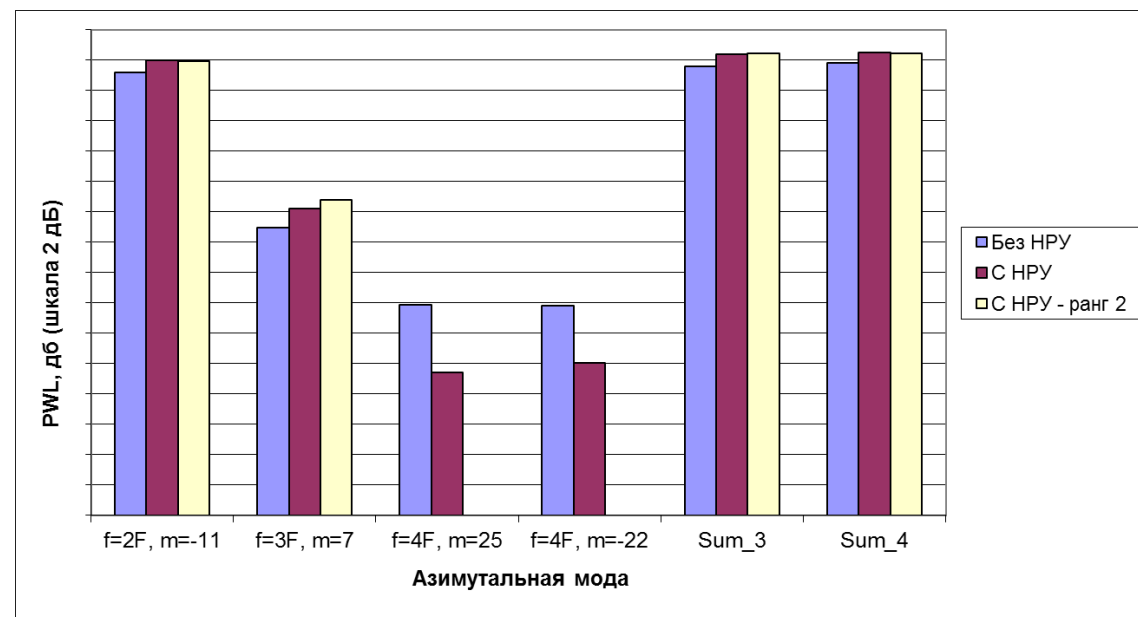
## Результаты модального анализа



Результаты модального анализа на поверхности 1

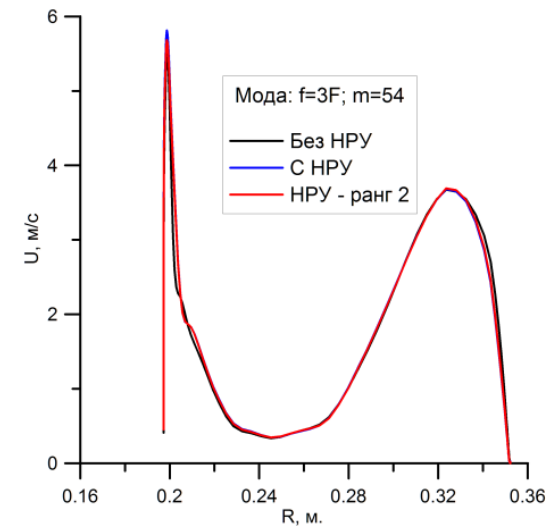
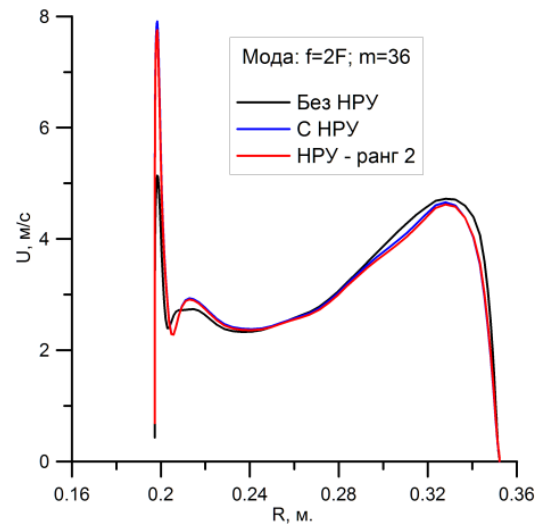
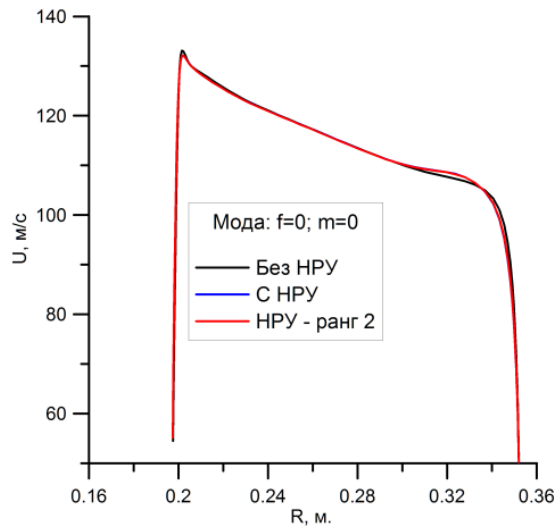
Для излучения против потока суммарное для всех азимутальных мод снижение шума составило 2.4 дБ для расчета с использованием базового NLH метода и 0.6 дБ для расчета, проведенного с помощью NLH метода второго ранга

Для излучения по потоку суммарное для всех мод повышение шума составило 0.8 дБ для расчета с использованием как базового NLH метода, так и NLH метода второго ранга.

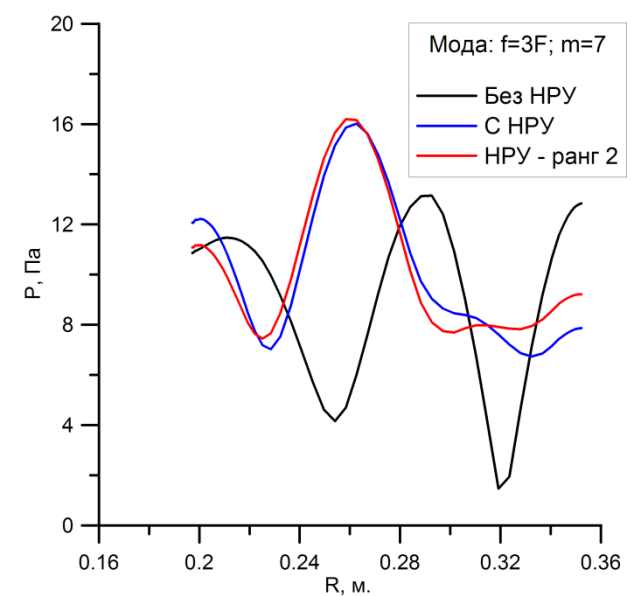
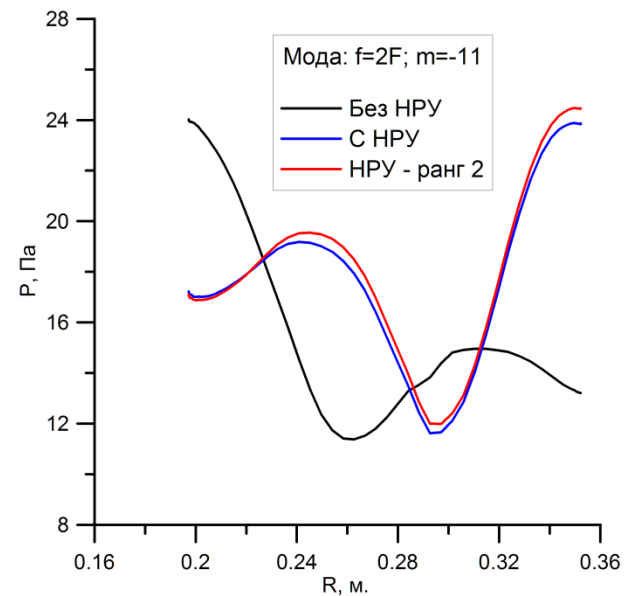


Результаты модального анализа на поверхности 3

# Анализ поля течения в осевом зазоре



Влияние НРУ на поле течения и след за ротором. Поле осевой скорости. Поверхность 2



Влияние НРУ на поле течения и след за ротором. Поле статического давления. Поверхность 2

## Заключение

- В работе представлено исследование влияния НРУ на акустические и аэродинамические характеристики вентилятора со сверхвысокой степенью двухконтурности с помощью программного комплекса NUMECA FINE/Turbo. Для расчета нестационарного поля течения в вентиляторе использовался гармонический NLH метод.
- Для режима «взлет» с использованием базового метода NLH было исследовано влияние НРУ на аэродинамические характеристики вентилятора. Показано, что в правой части напорной ветки для варианта с НРУ отмечается снижение КПД на 0.5%. Степень повышения давления и расход воздуха снижаются в меньшей степени. В левой части напорной ветки наблюдается противоположный эффект влияния НРУ: степень повышения давления возрастает на  $\sim 0.4\%$ , а адиабатический КПД на  $\sim 1\%$ . Полученный эффект воздействия надроторного устройства на аэродинамические характеристики вентиляторной ступени соответствует традиционным представлениям о работе надроторного устройства в части повышения характеристик вблизи границы устойчивой работы компрессора.
- На режиме «посадка» влияние НРУ выражается в снижении адиабатического КПД на величину  $\approx 0.4\%$  по сравнению с гладкой проточной частью. Степень повышения давления и расход воздуха изменяются слабо. Анализ полей течения в межлопаточных каналах показал, что эффект воздействия НРУ на обтекание профилей рабочих лопаток наблюдается только в периферийной зоне (более 95% высоты лопаток) и у втулки в отрывной зоне.
- Результаты расчетов в NLH постановке использованы для анализа влияния НРУ на акустические характеристики вентилятора на режиме «посадка». Показано, что для излучения против потока суммарное для всех азимутальных мод снижение шума составило 2.4 дБ для расчета с использованием базового NLH метода и 0.6 дБ для расчета, проведенного с помощью NLH метода второго ранга. Для излучения по потоку суммарное для всех мод повышение шума составило 0.8 дБ для расчета с использованием как базового NLH метода, так и NLH метода второго ранга. В целом по сумме излучения по и против потока шум вентилятора при наличии данного НРУ на режиме «посадка» повышается на 0.8 дБ.
- Анализ поля течения показывает, что повышение уровней шума для вентилятора с НРУ вероятно определяется повышением интенсивности следов в области вблизи втулки и изменением поля течения в роторе.