

VIII Российская конференция  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



## ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАДРОТОРНЫХ УСТРОЙСТВ В ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРАХ

МАРАКУЕВА О.В.  
ВОРОШНИН Д.В.  
МУРАВЕЙКО А.С.

ООО «НУМЕКА»

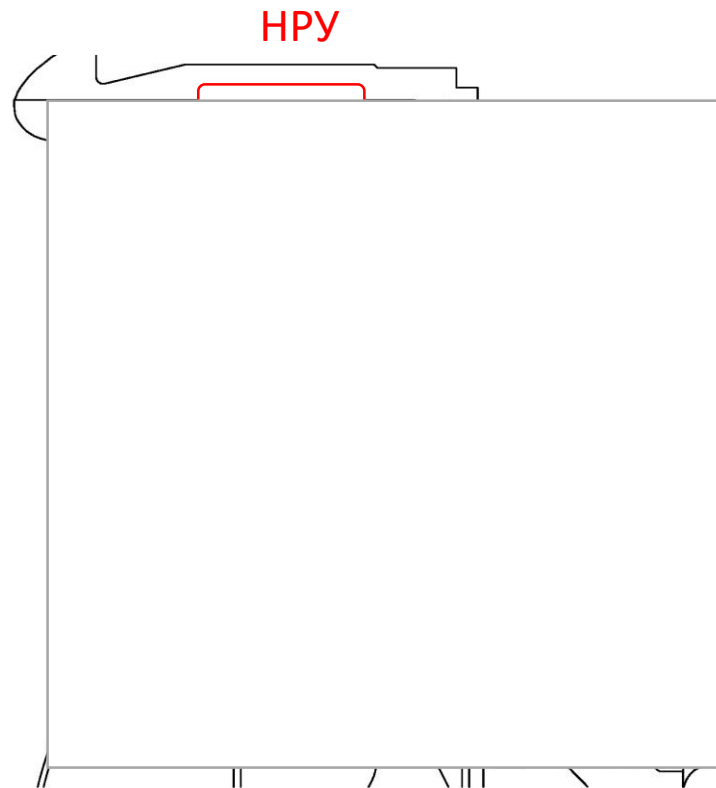
Для увеличения диапазонов устойчивой работы компрессоров широко применяются надроторные устройства (НРУ) различного типа

Цели работы:

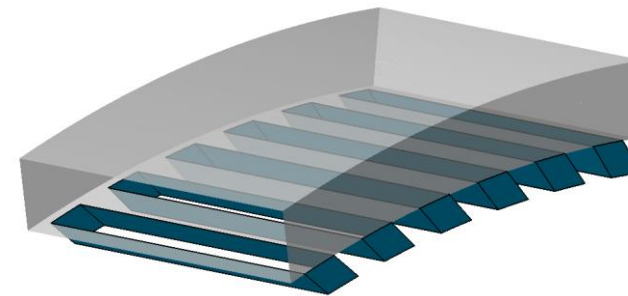
- Разработка математических моделей осевых компрессоров с учетом щелевого НРУ:
  - двухступенчатый вентилятор
  - ступень М-1
  - ступень КНД
- Исследование влияния положения и типа ротор-статор интерфейса между РК и НРУ
- Оценка влияния НРУ на работу компрессоров на различных частотах вращения

**Количество лопаток:** РК1 – 22, НА1 – 42, РК2 – 40, НА2 – 72.

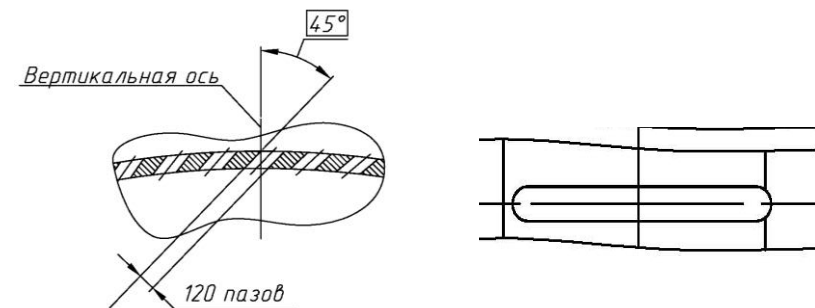
**НРУ:** кольцевая полость, которая соединяется с проточной частью через 120 пазов, наклоненных в направлении вращения на  $45^\circ$ . Перекрывает периферию РК1 до середины осевой хорды



Первая ступень с НРУ



Сектор НРУ



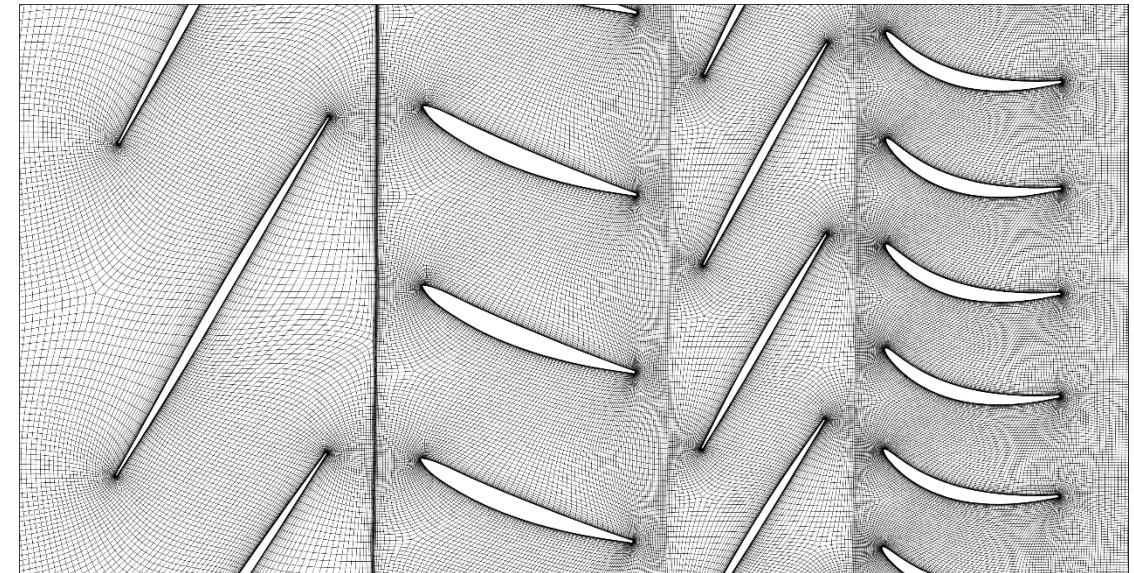
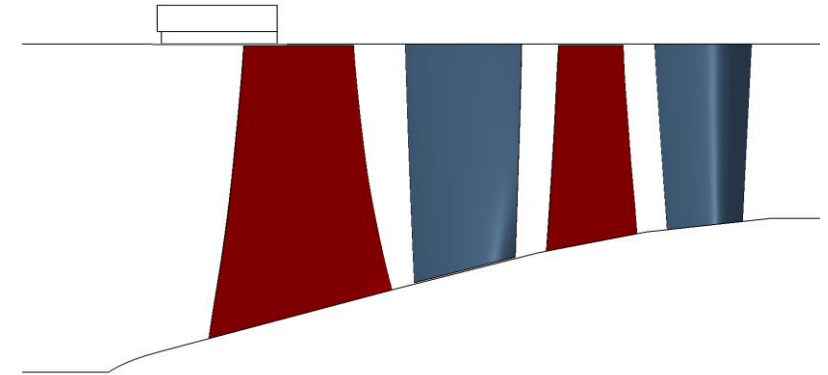
Конфигурация пазов НРУ

## Сеточная модель с НРУ

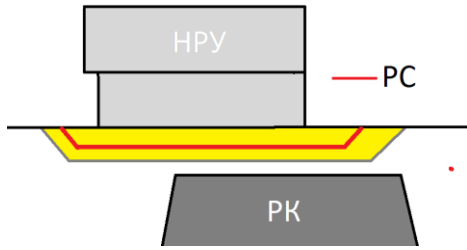
- блочно-структурированная сетка *AutoGrid5+IGG*
- радиальный зазор у РК1 и РК2 0.3 мм
- втулочный зазор у НА1
- ~ 4.5 млн узлов
- $y^+ < 1$

## Постановка

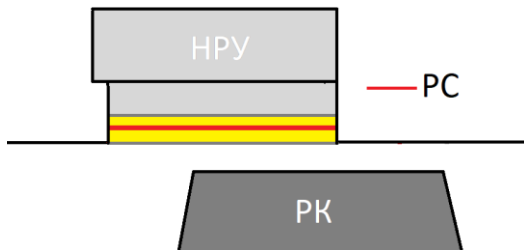
- *Numeca Fine/Turbo v. 13.1*
- термически-совершенный газ
- NLH Basic 3 гармоника
- модель турбулентности Spalart - Allmaras
- вход:  $P_0 = 1$  атм,  $T_0 = 288.15$  К,  $V_z/|V| = 1$
- выход: варьирование P или G



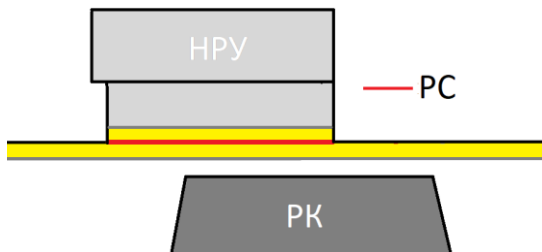
RS в зазоре



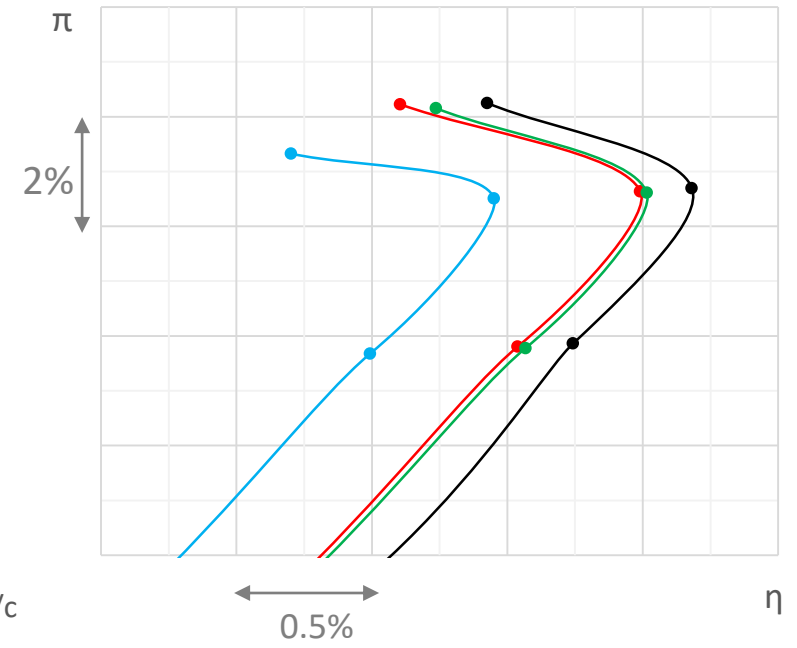
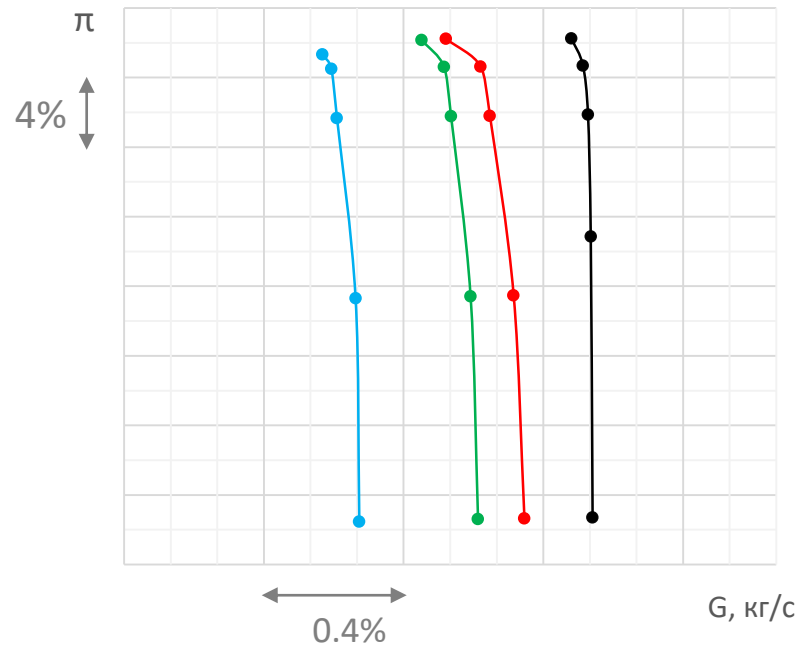
RS в НПУ



RS на периферии

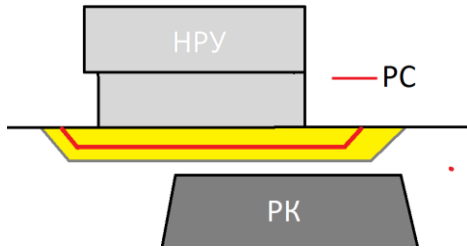


Высота каждого буферного блока со стороны НПУ ~2% от высота паза  
 Высота буферных блоков в зазоре РК до 30% зазора

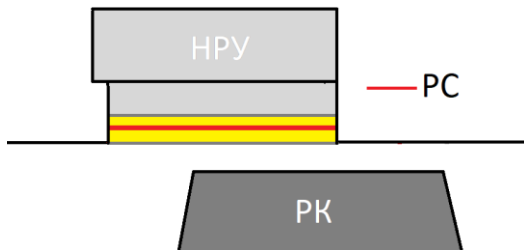


- ГЛАДКАЯ ПЧ
- НПУ (RS в зазоре)
- НПУ (RS в НПУ)
- НПУ (RS на периферии)

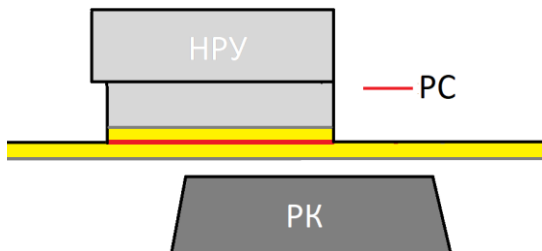
RS в зазоре



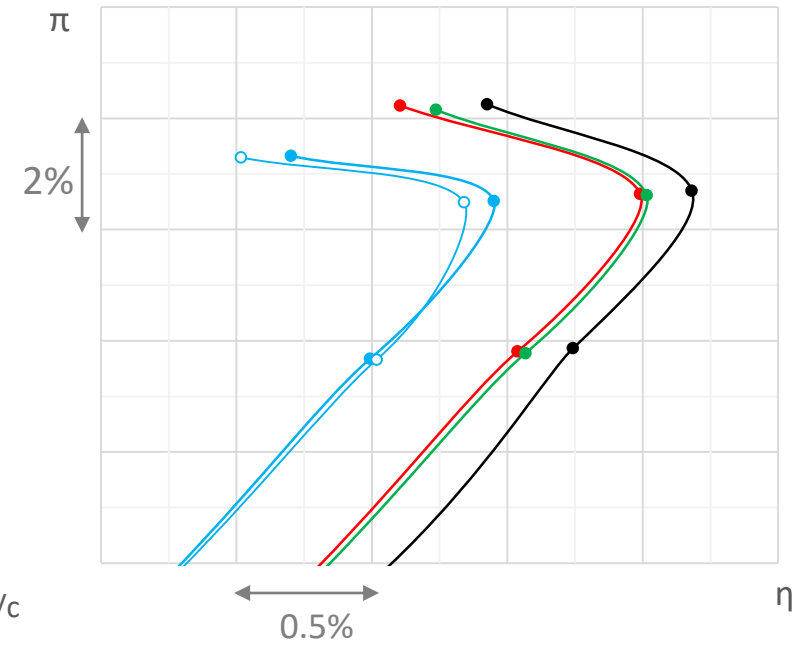
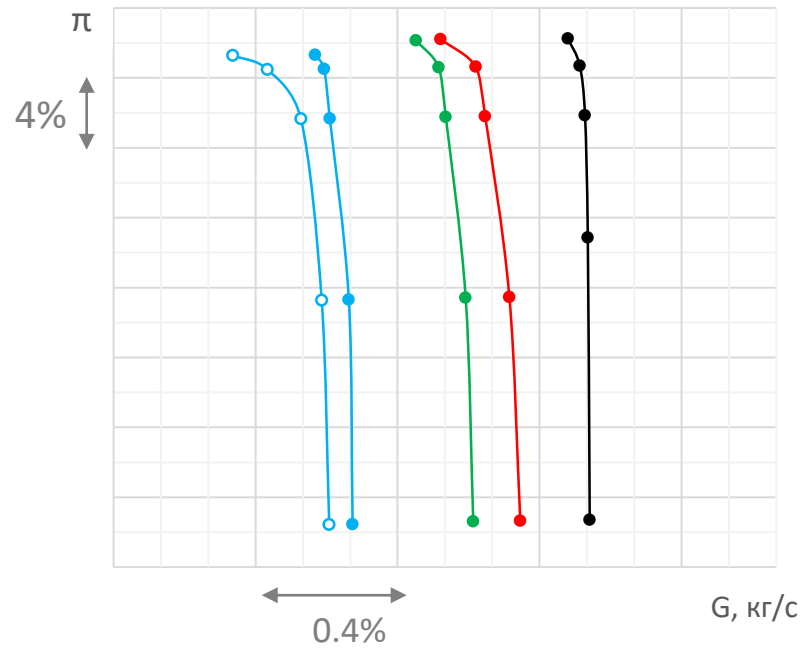
RS в НПУ



RS на периферии

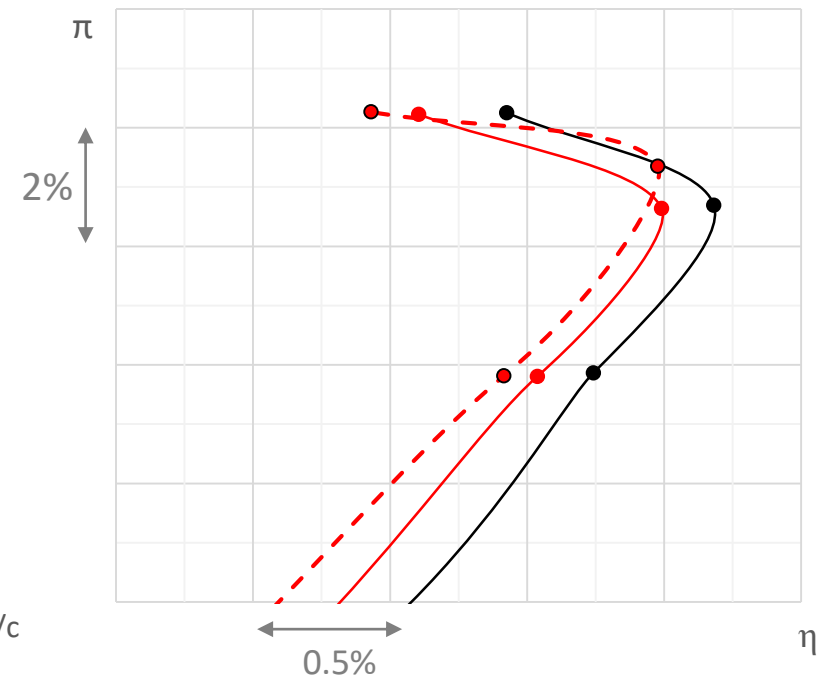
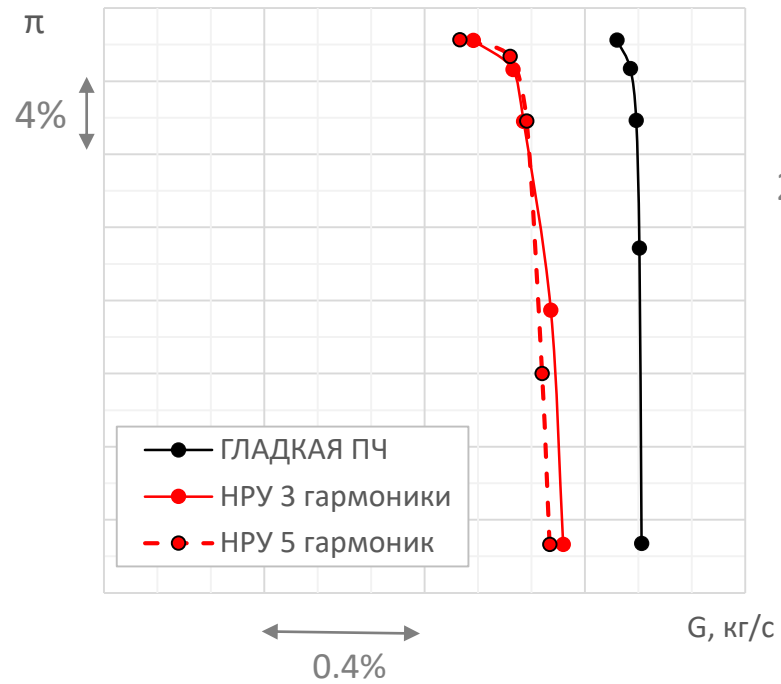
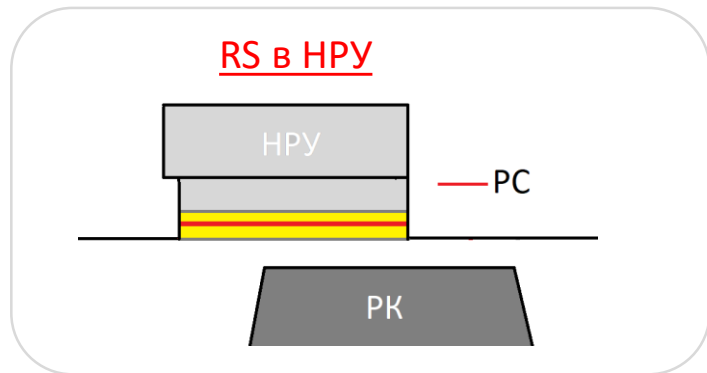


Высота каждого буферного блока со стороны НПУ ~2% от высота паза  
 Высота буферных блоков в зазоре РК до 30% зазора



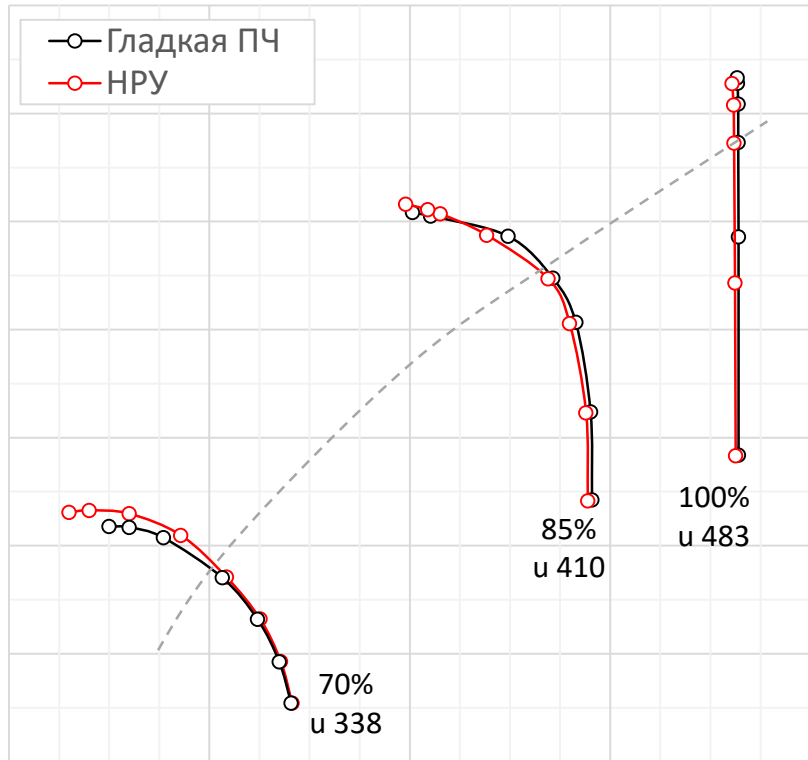
- ГЛАДКАЯ ПЧ
- НПУ (RS в НПУ)
- ГЛАДКАЯ ПЧ (RS в зазоре)

- НПУ (RS в зазоре)
- НПУ (RS на периферии)



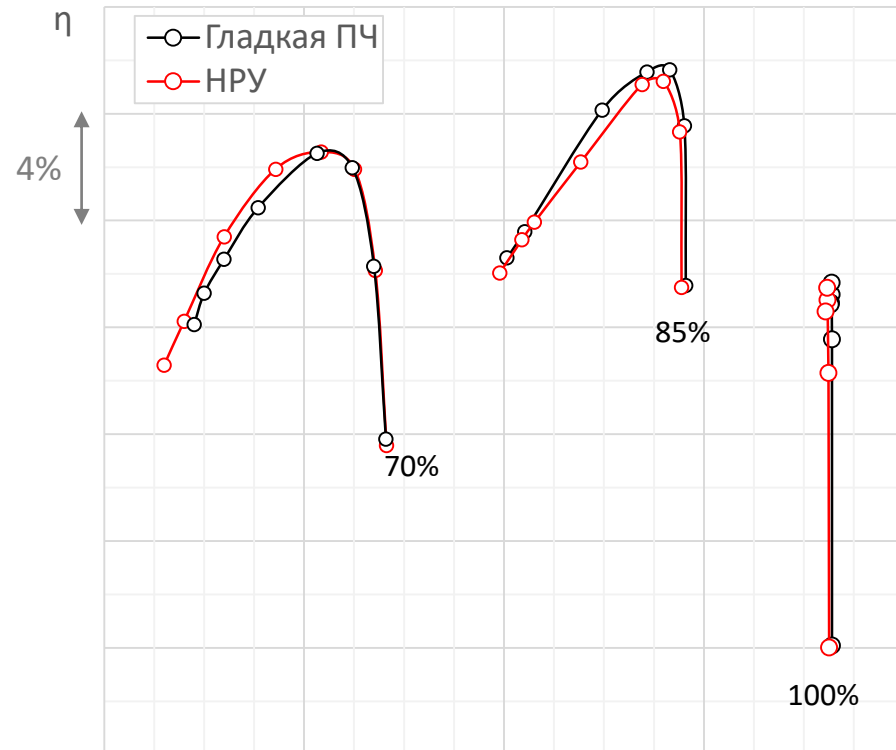


π



G, кг/с

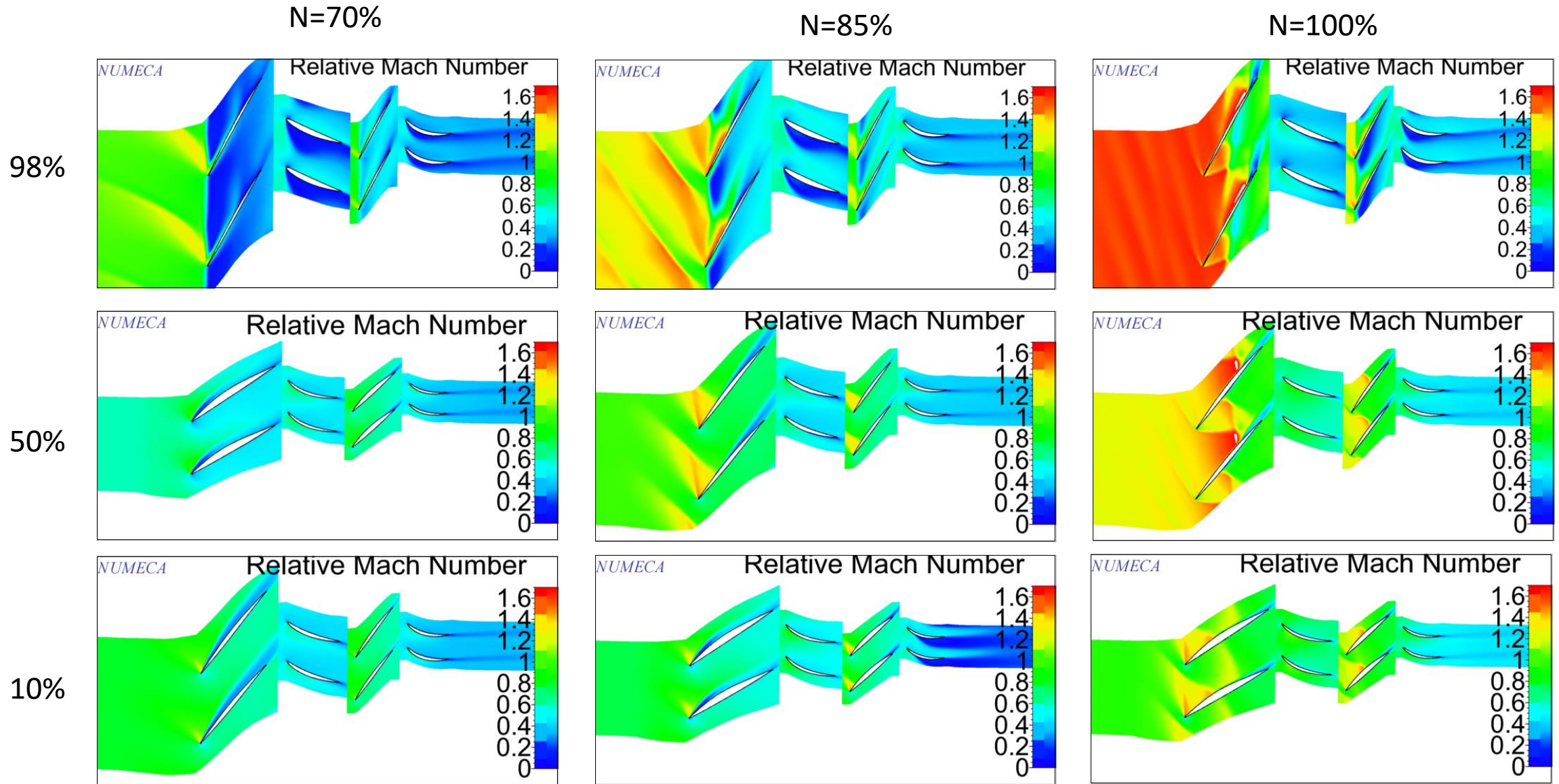
η



G, кг/с

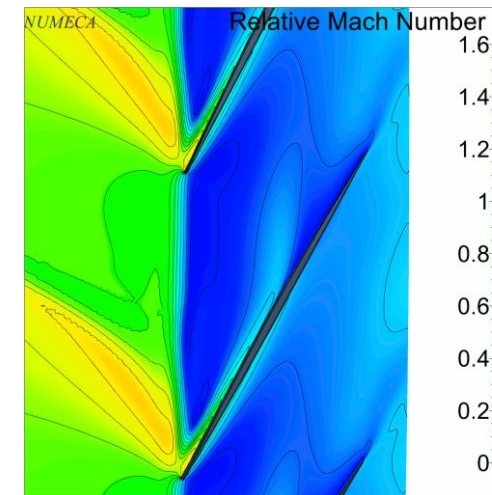
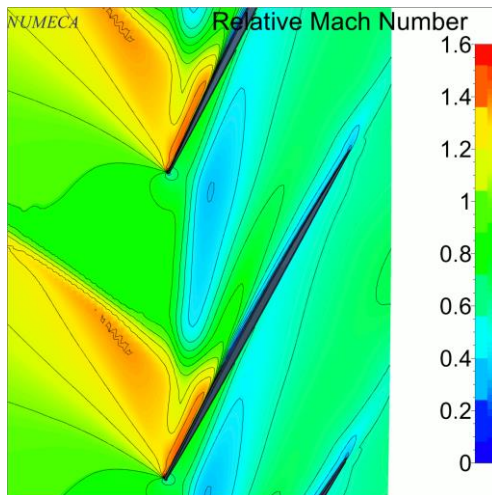
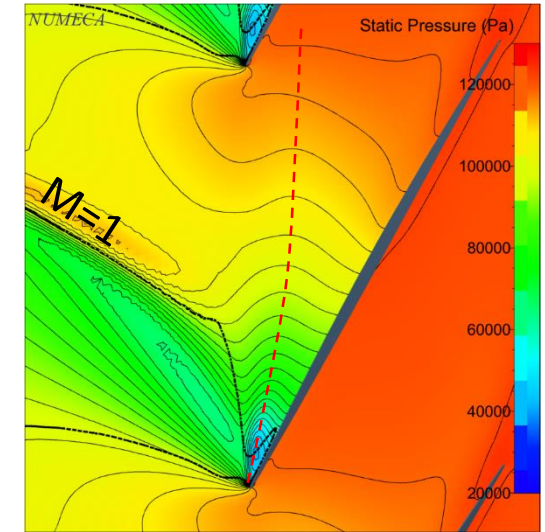
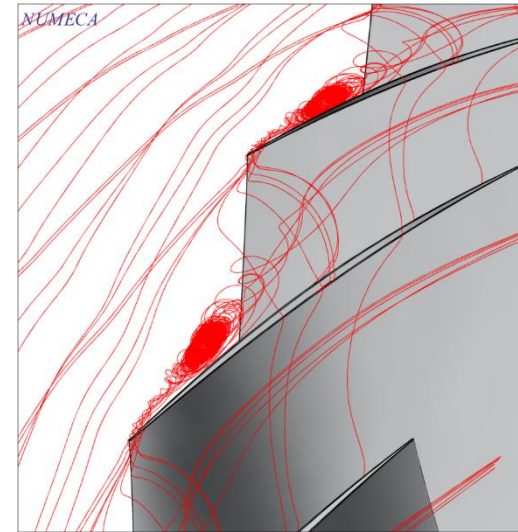
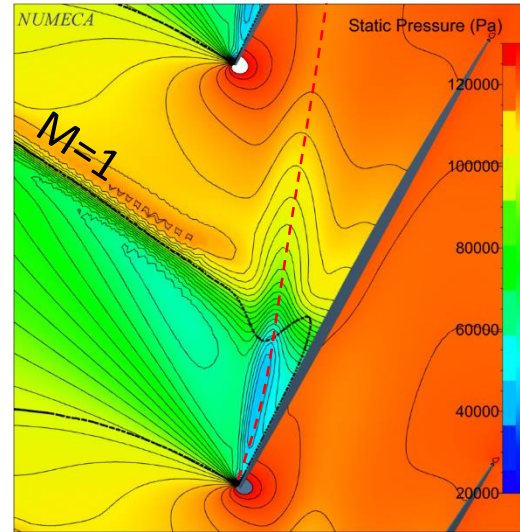
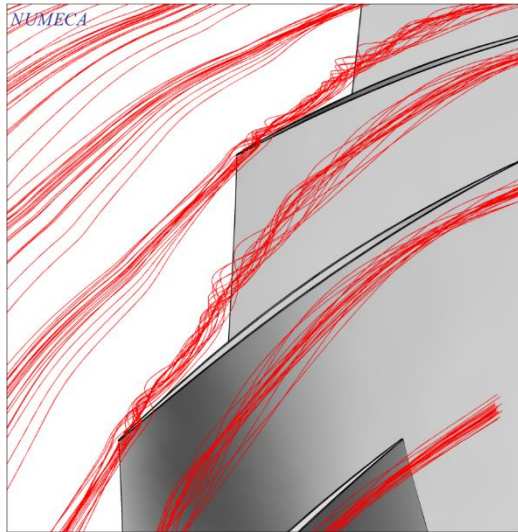
	N = 70%		N = 85%		N = 100%	
	КПД_рт, %	ΔКу, %	КПД_рт, %	ΔКу, %	КПД_рт, %	ΔКу, %
Гладкая ПЧ						
НРУ						
Δ НРУ	+0.04%	+6.65	-0.44	+1.1%	-0.1%	-0.1%





Рабочая точка

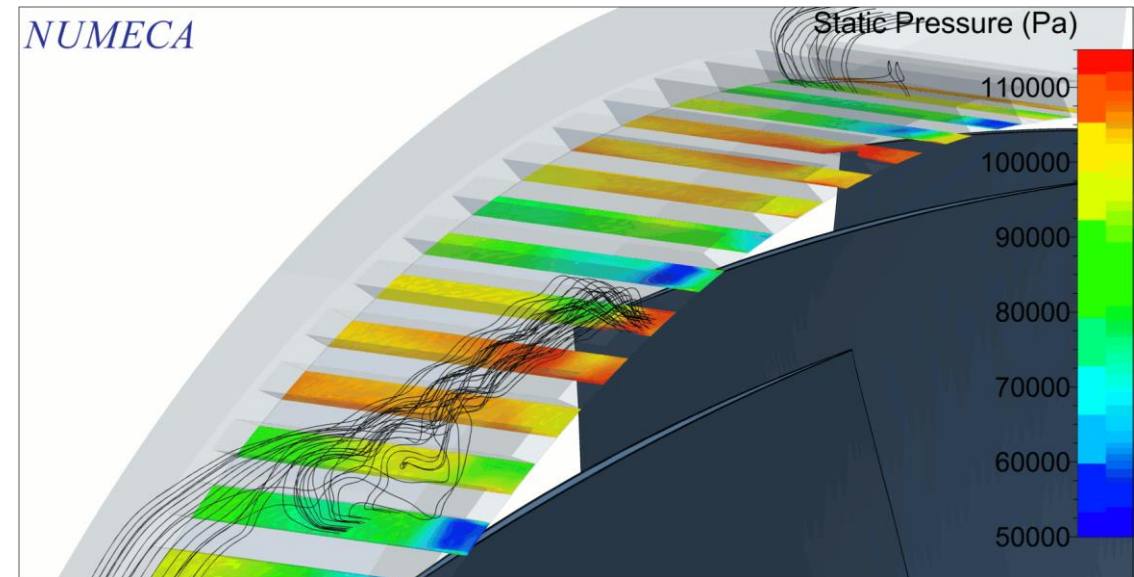
Предсрывная точка (G = 4.85 кг/с)



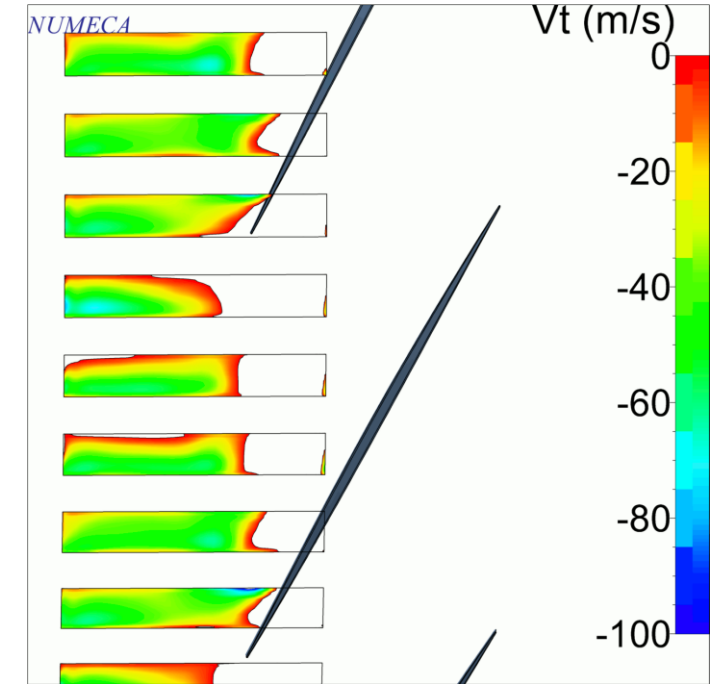
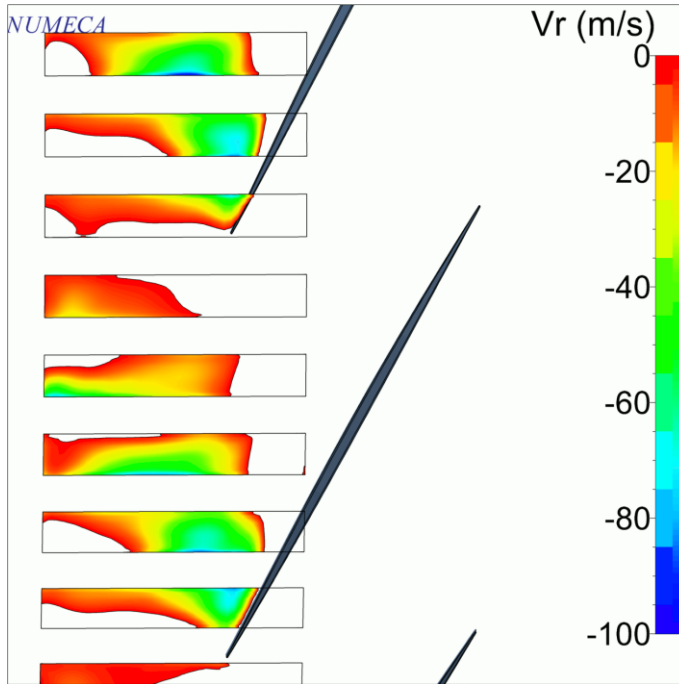
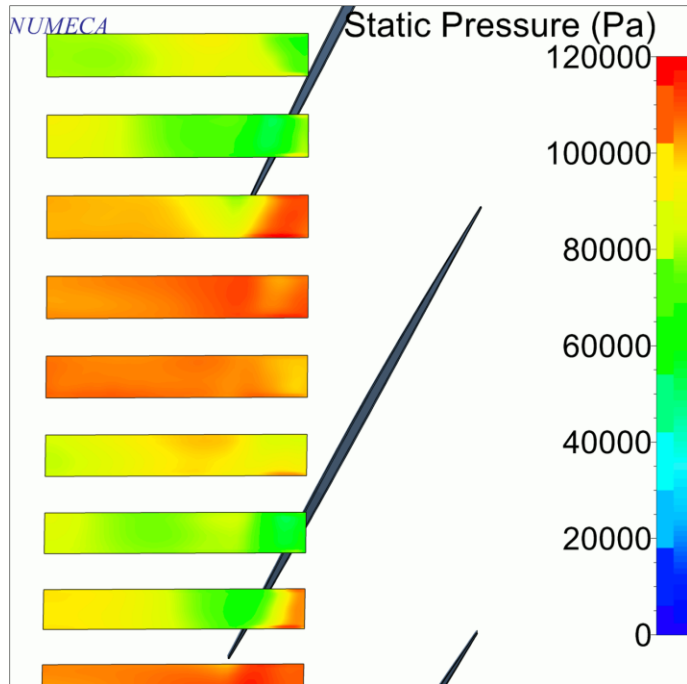


Под действием разницы давлений в осевых пазах реализуется перетечка воздуха из межлопаточного канала со стороны давления лопатки в область перед передней кромкой:

- отбирается воздух из застойных зон
- уменьшается нагрузка на сторону давления лопатки в области паза и интенсивность вихря перетечки
- дополнительные потери на смешение
- инжектируемый воздух имеет большую закрутку против направления вращения, что может приводить к увеличению угла атаки

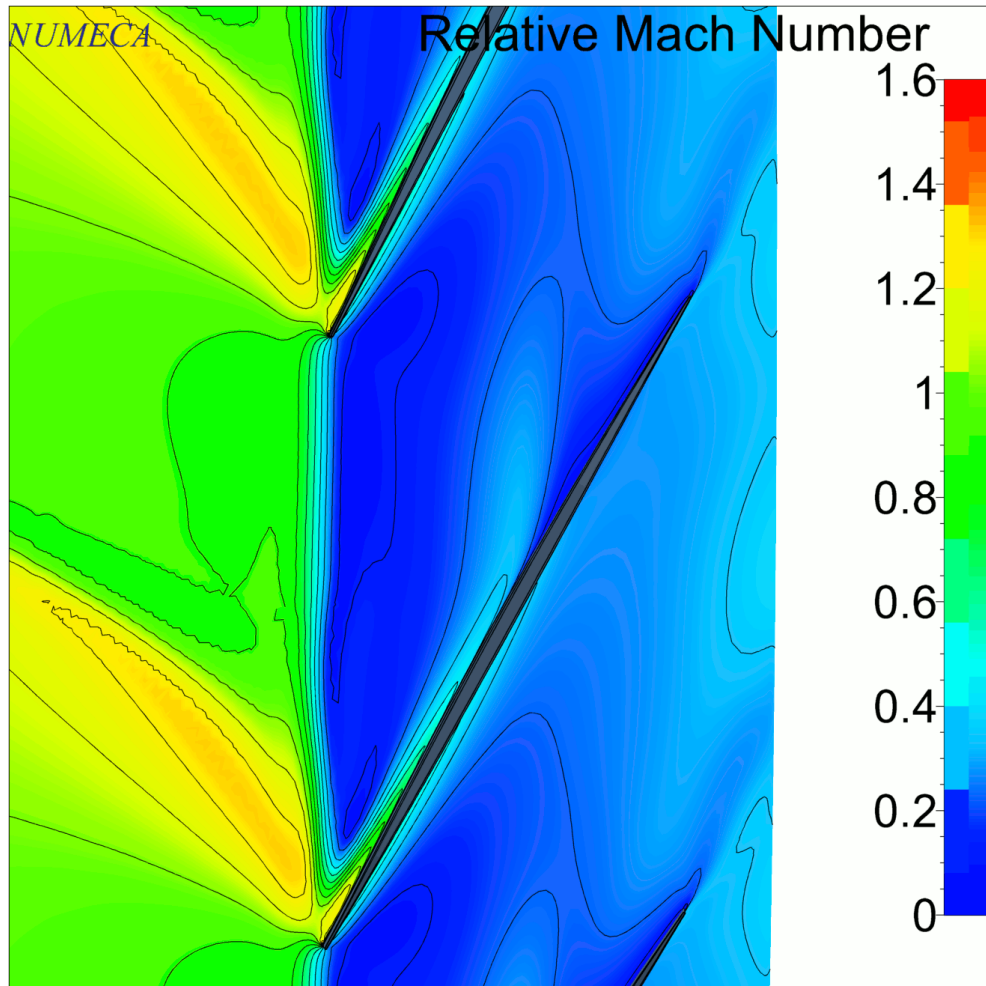


$G = 4.8 \text{ кг/с}$

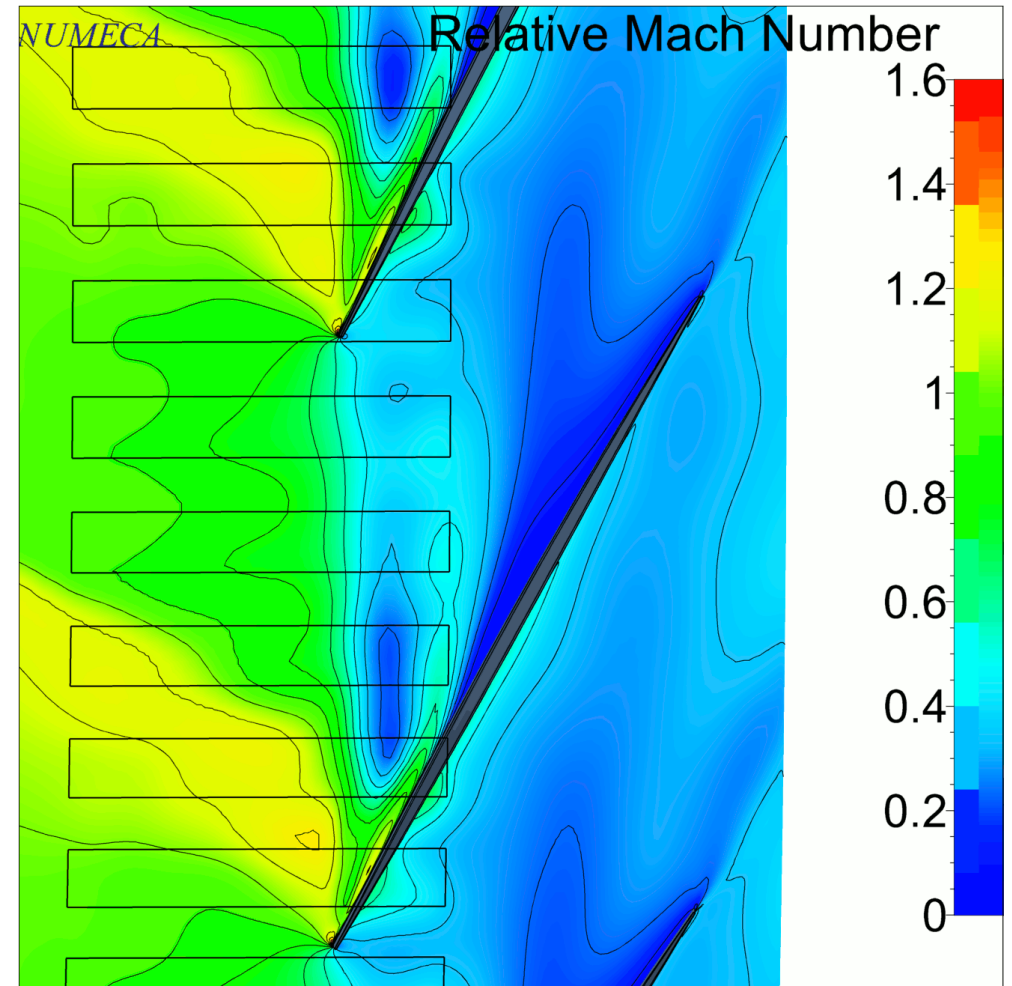


«-» против вращения РК

Гладкая ПЧ, предсрывная точка ( $G = 4.85$  кг/с)

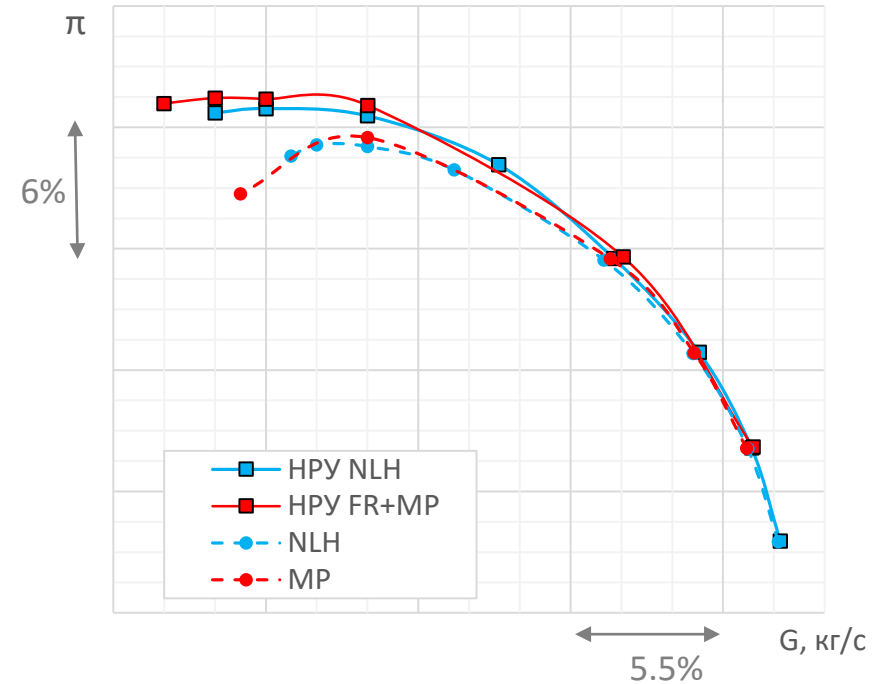
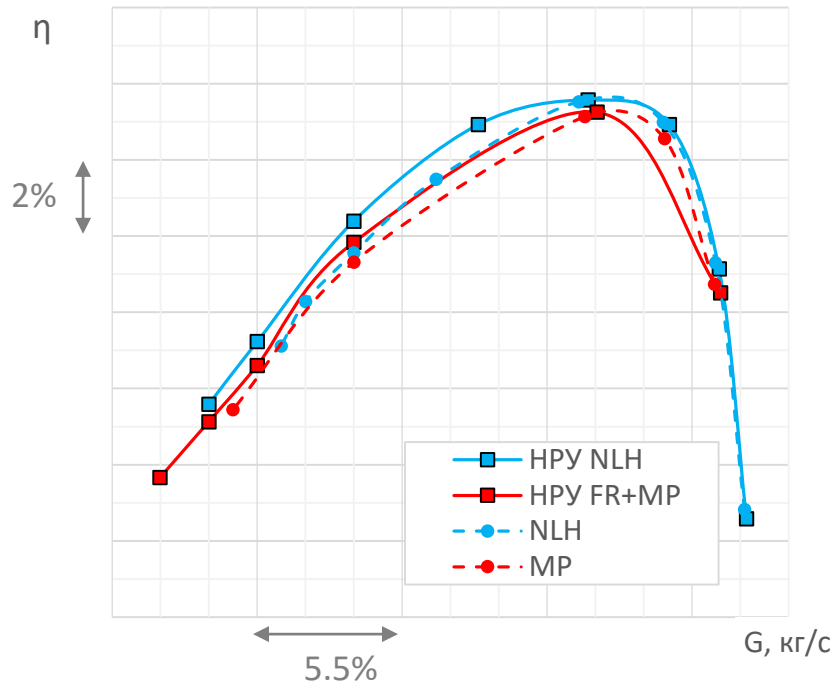


НРУ, ( $G = 4.8$  кг/с)



- **URANS:** Моделирование проводится для полного оборота, либо при кратном количестве лопаток во всех венцах и пазов НРУ. Требуется большое вычислительное время для получения решения.
- **Frozen Rotor:** Моделирование проводится для полного оборота, либо при кратном количестве лопаток во всех венцах и пазов НРУ. Требуется проведение ряда расчетов с различным положением ротора относительно статора с последующим осреднением.
- **NLH:** Моделирование проводится для исходного количества лопаток и пазов НРУ с включением в модель только 1 лопатки и 1 паза. Решение зависит от количества выбранных гармоник, с увеличением количества гармоник возрастают требования к оперативной памяти.

- NLH с 3 гармониками
- Frozen Rotor между РК и НРУ, Mixing Plane между венцами

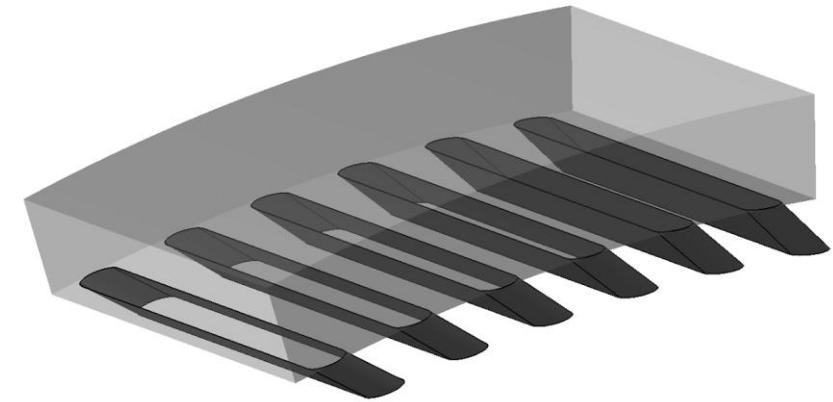
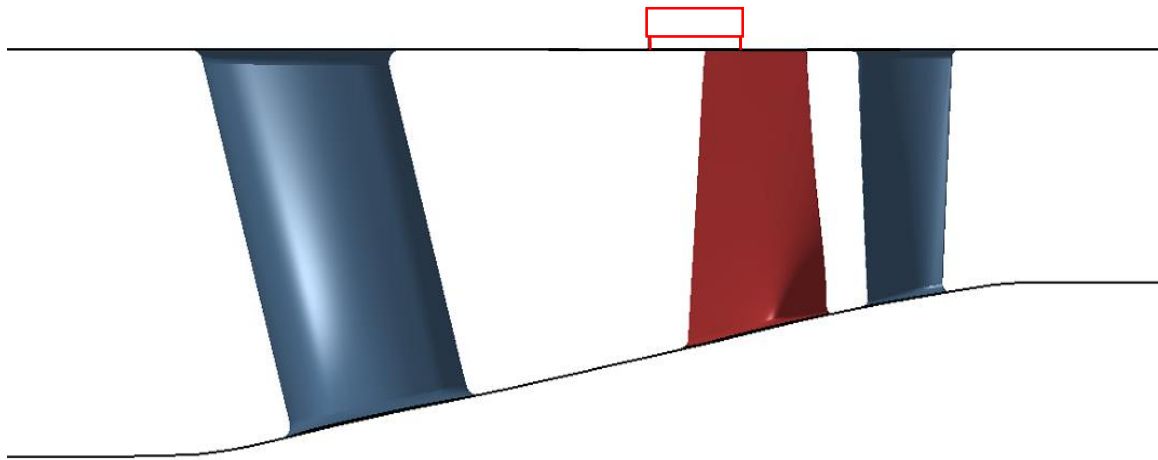


	NLH		FR + MP	
	КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %
Гладкая ПЧ				
НРУ				
Δ НРУ	+0.04%	+6.65	-0.12	+9.75%



**Количество лопаток:** Стойки - 3, РК1 – 17, НА1 – 32

**НРУ:** кольцевая полость, которая соединяется с проточной частью через 126 пазов, наклоненных по направлению вращения на  $45^\circ$ . Перекрывает периферию РК1 на 30% осевой хорды



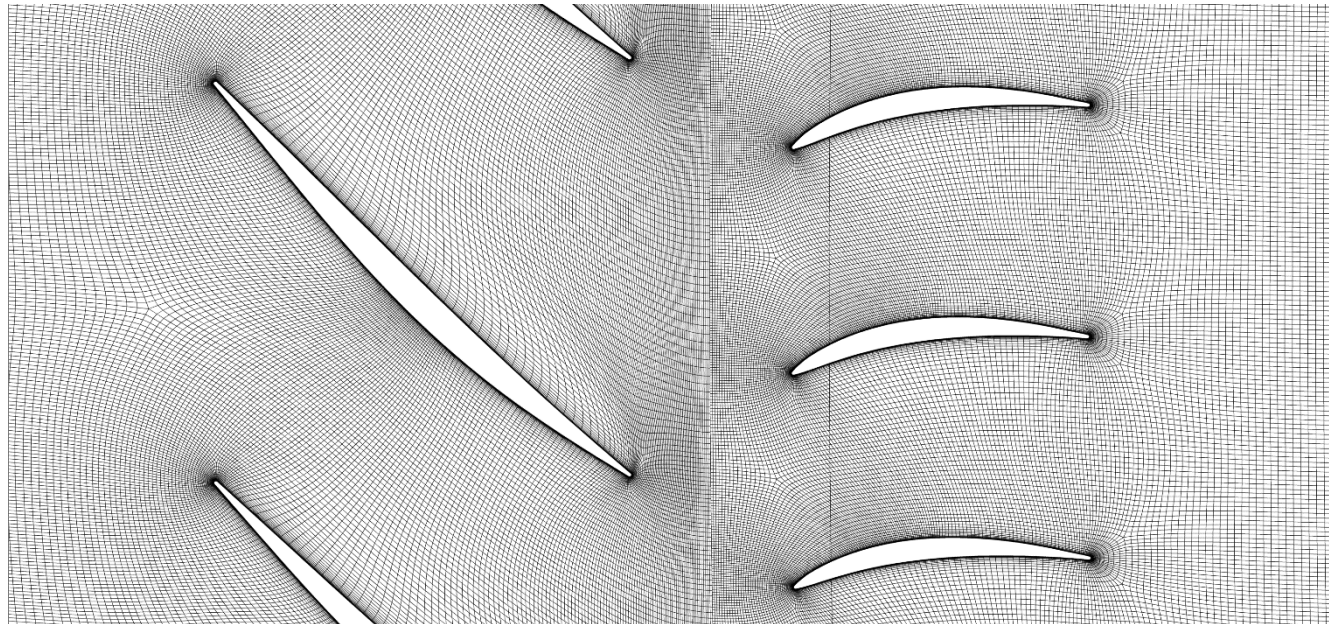
Сектор НРУ

## Сеточная модель с НРУ

- блочно-структурированная сетка *AutoGrid5+IGG*
- радиальный зазор у РК 0.5 мм
- галтели: стойка – 5 мм, РК и НА – 3 мм
- горячая геометрия РК на каждом режиме
- ~ 4.7 млн узлов
- $y^+ < 1$

## Постановка

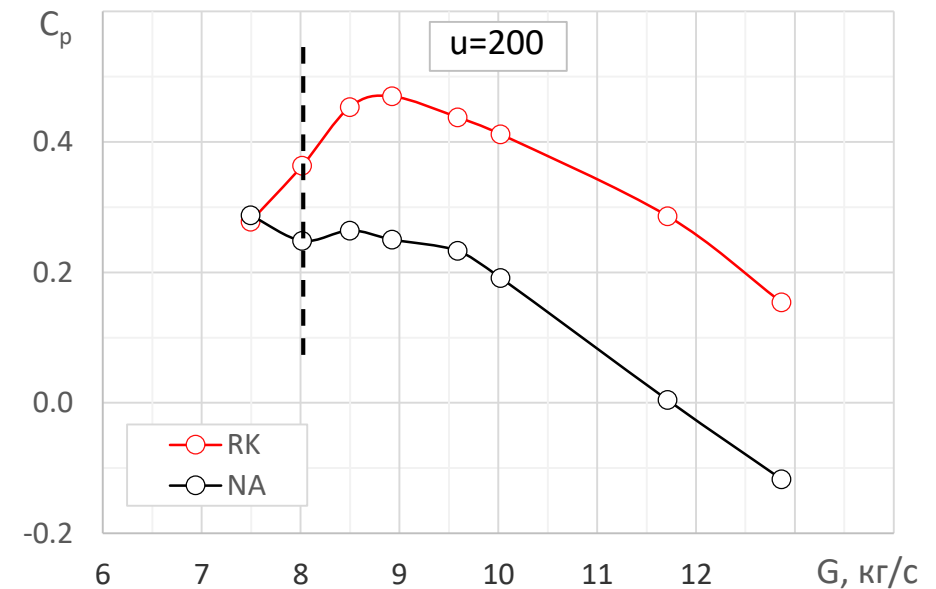
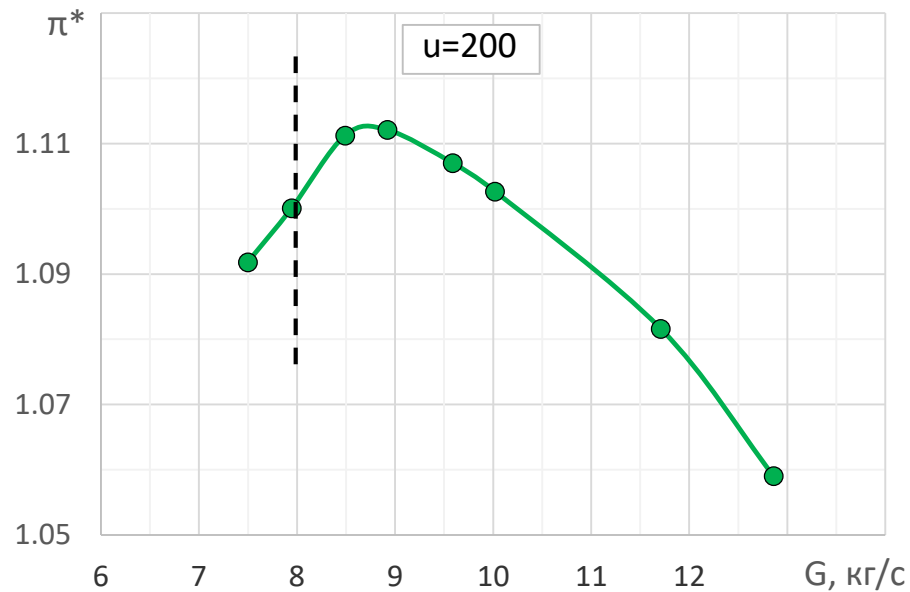
- *Numeca Fine/Turbo v. 15.1*
- термически-совершенный газ
- NLH MR1 3 гармоники
- модель турбулентности SST
- вход:  $P_0 = 1$  атм,  $T_0 = 288.15$  К,  $V_z/|V| = 1$
- выход: варьирование P или G

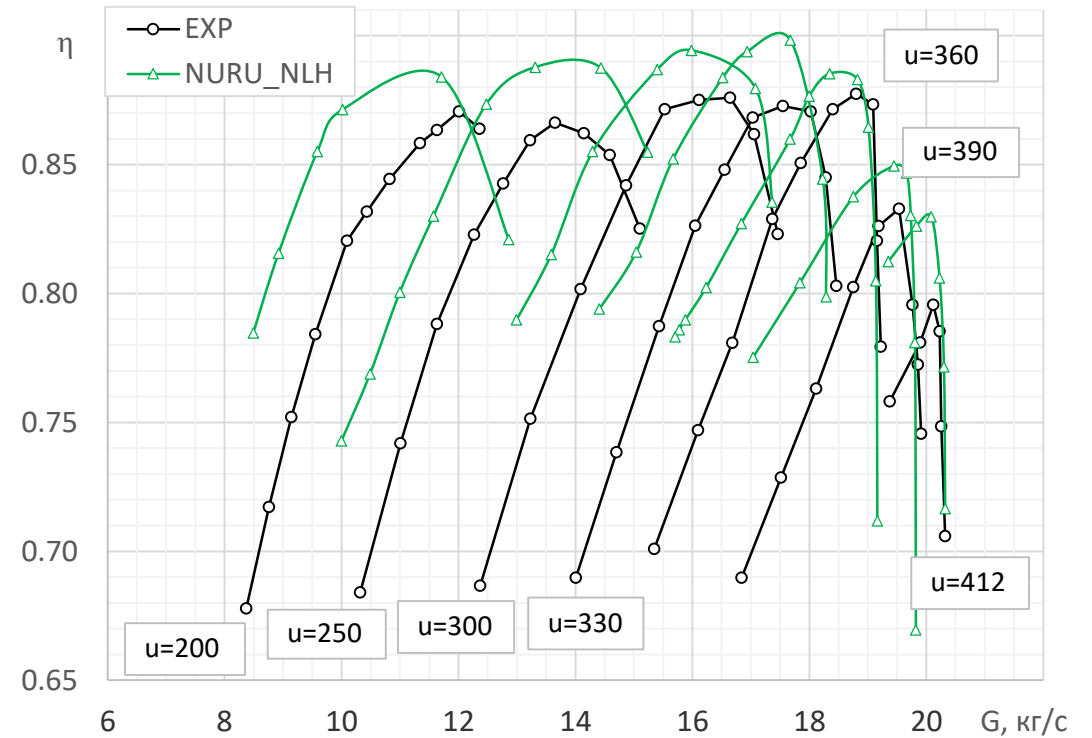
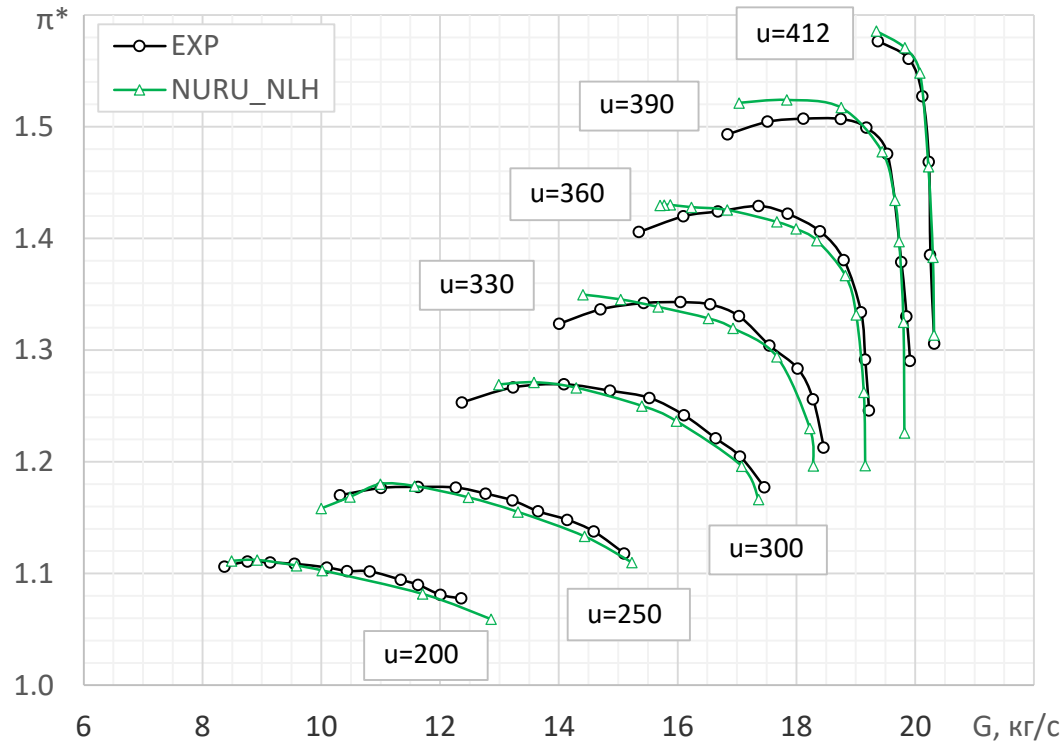


- на низких частотах численная модель может быть достаточно устойчивой даже в области срыва
- определение границы проводится на базе коэффициента восстановления статического давления в венцах: границей считается точка, в которой оба венца находятся в срыве

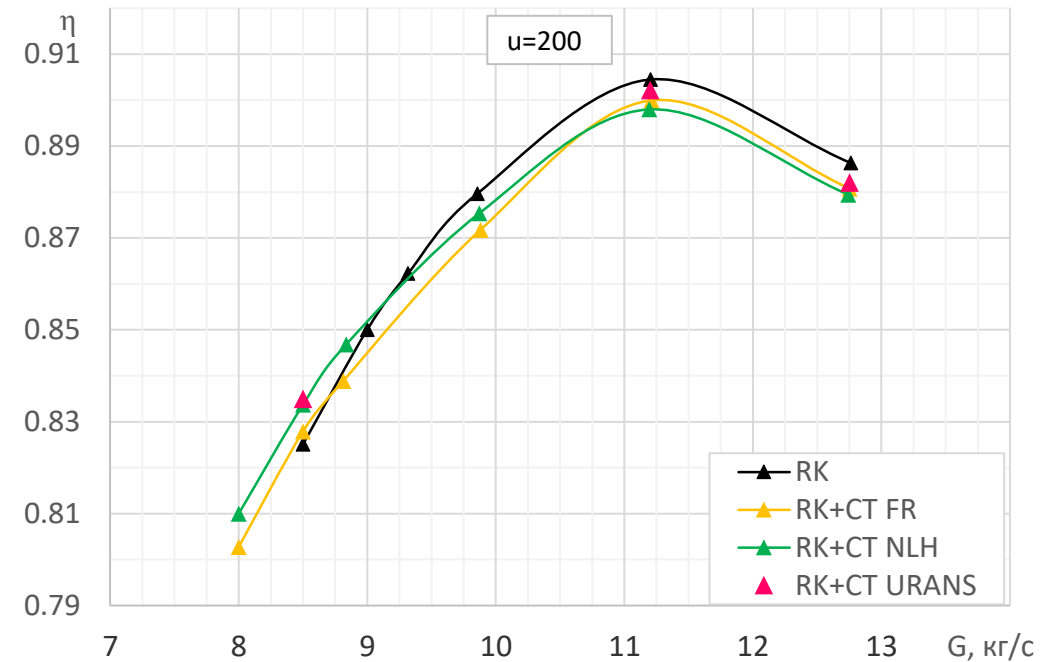
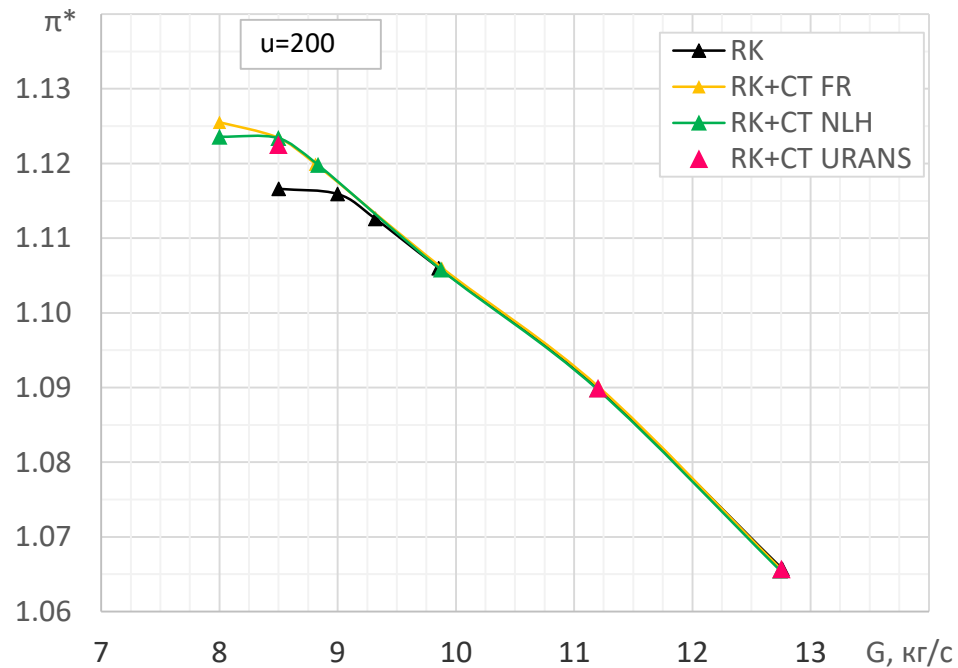
$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{P_t - P_1}$$

в случае ротора в знаменателе относительный динамический напор





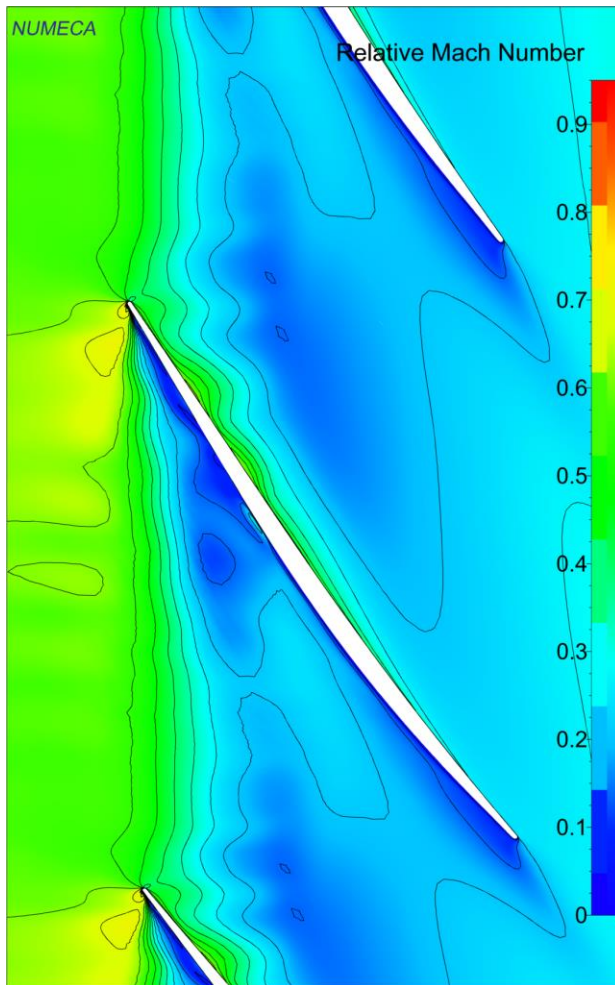
- для изолированного РК с НРУ применялись следующие подходы: **URANS (хар-ка недосчитана), NLH, Frozen Rotor**
- количество РК и пазов НРУ скорректировано с целью обеспечения периодичности для URANS и Frozen Rotor: 16 РК и 128 НРУ
- NLH – сектор с 1 лопаткой РК и пазом НРУ, URANS и Frozen Rotor – сектор с 1 лопаткой РК и 8 пазми НРУ



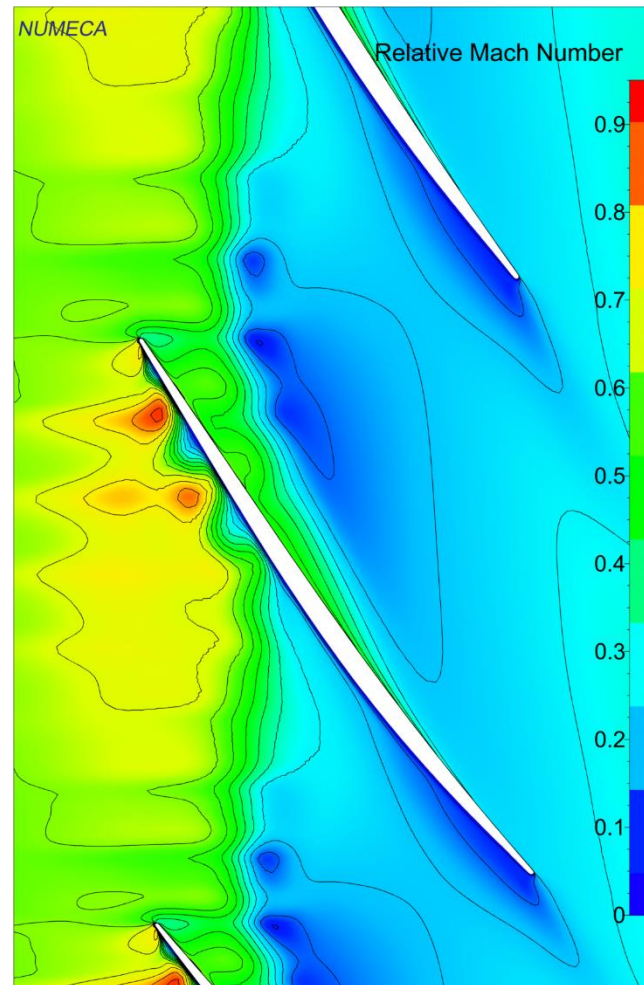
NLH		URANS		FR		Гладкая ПЧ	
КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %
89.8	44.26	90.2	35.73	89.99	44.7	90.45	35.05



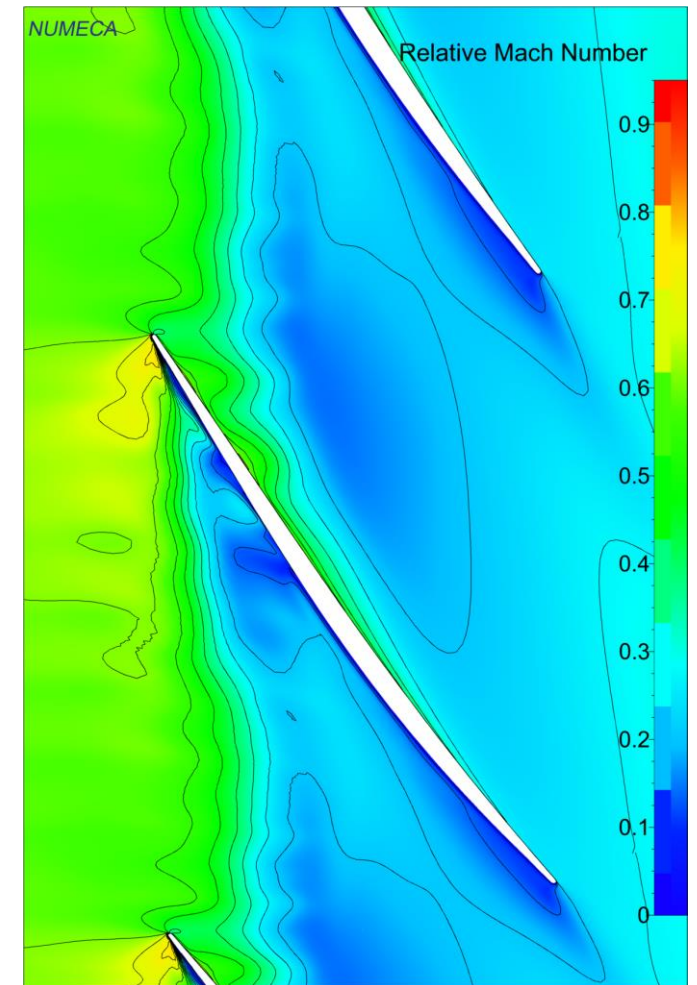
## URANS



## Frozen Rotor



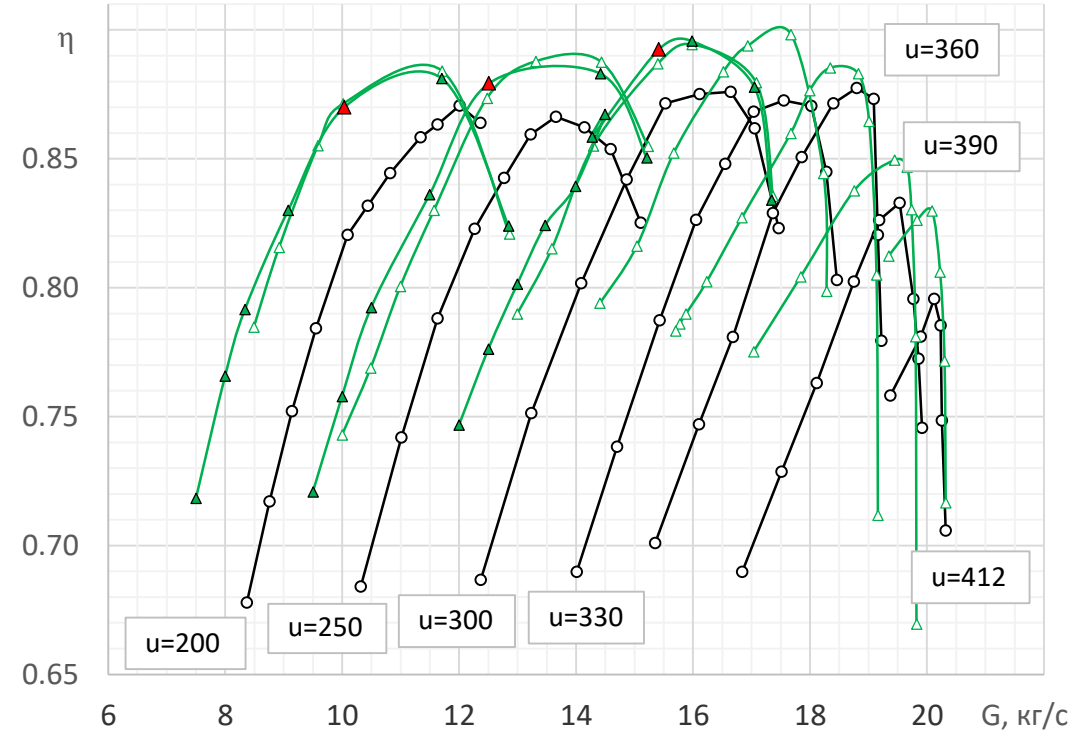
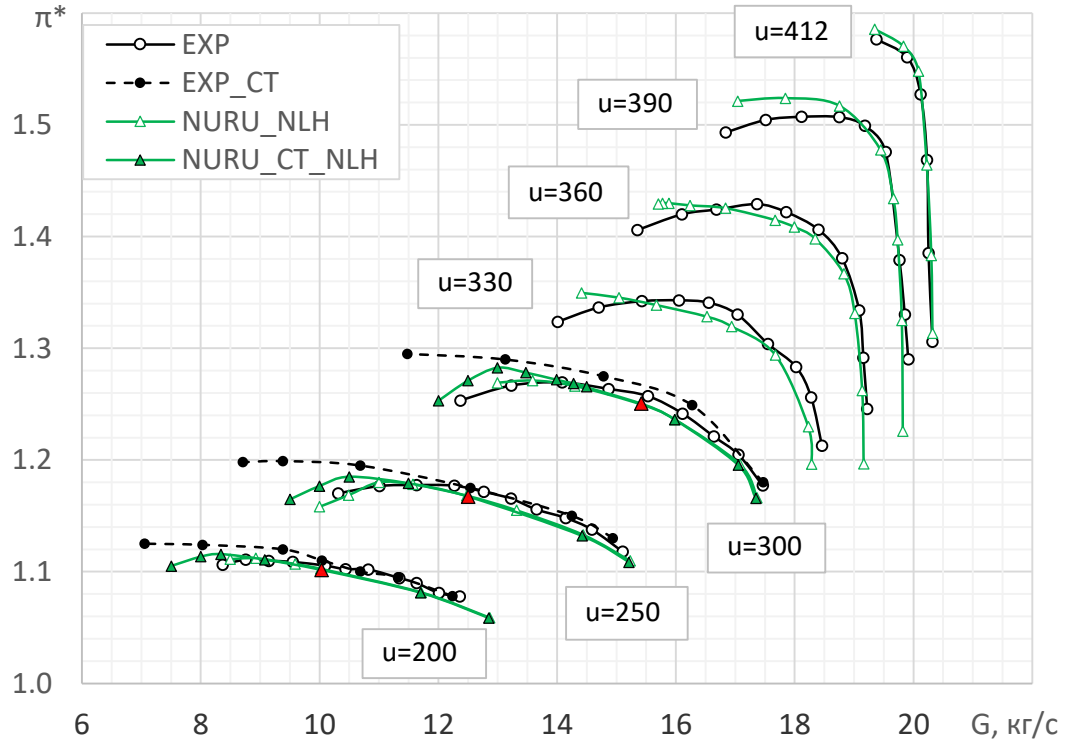
## NLH 3h



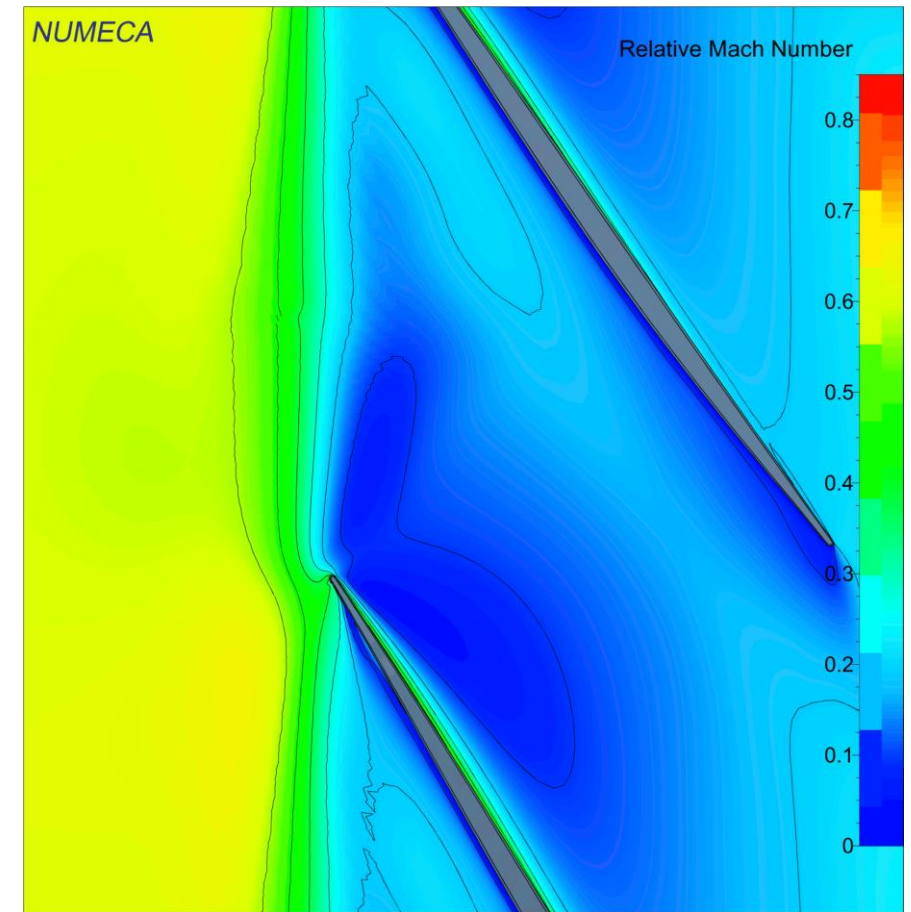
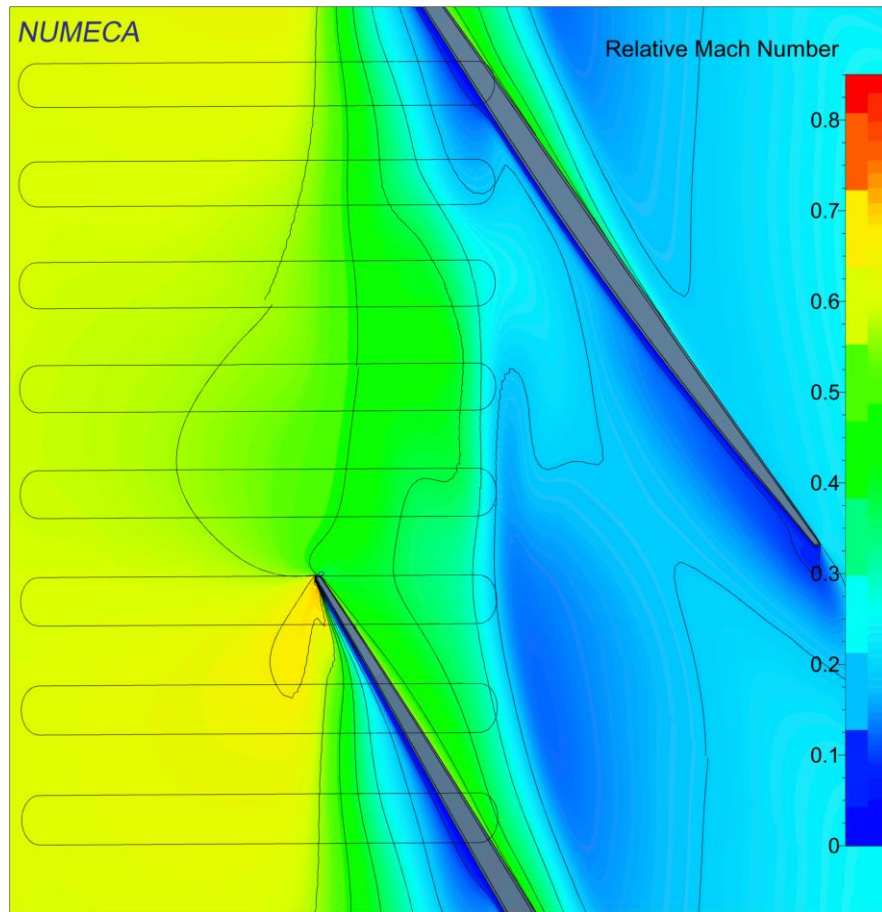
2 процессора Intel Xeon Platinum 8268  
47 ядер  
Распараллеливание Intel IMPI(ICC15)

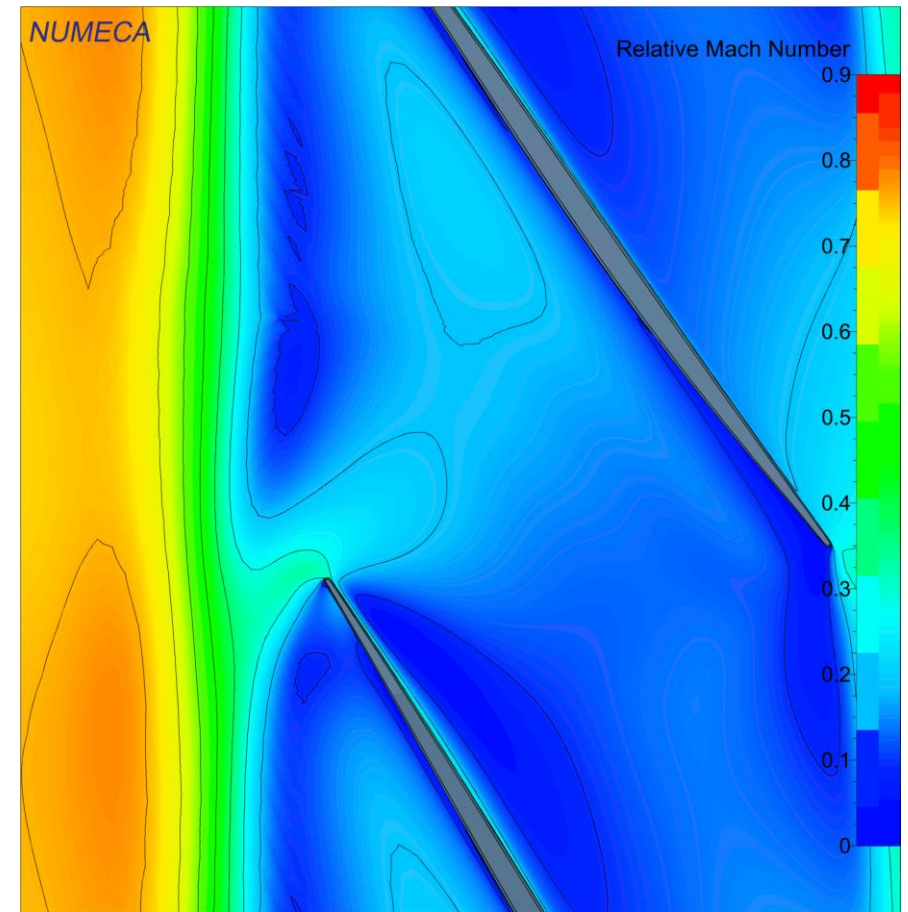
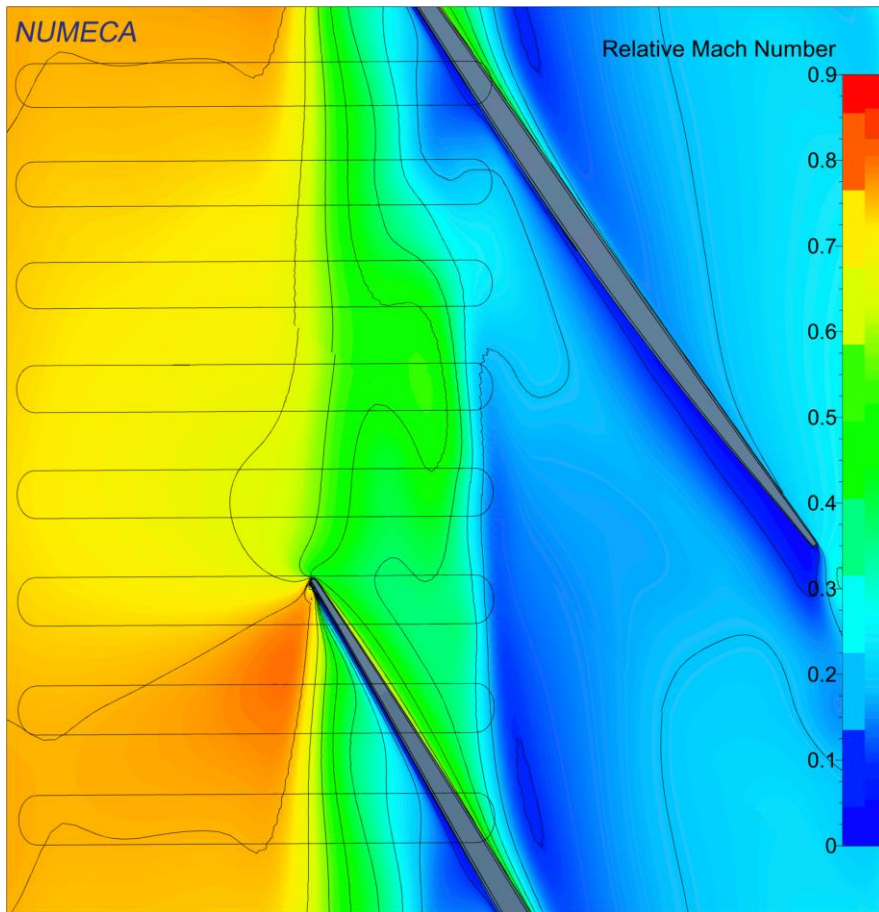
Frozen Rotor 1 положение	NLH 3h	URANS
1 час 10 мин	7 часов	2 недели



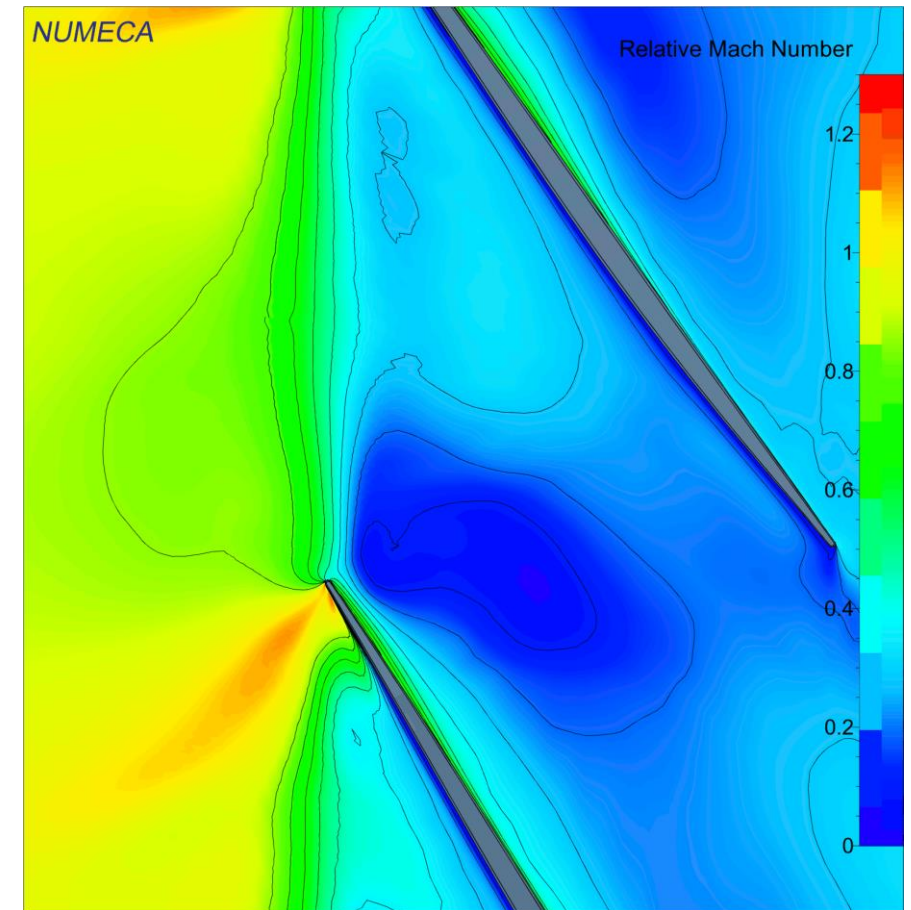
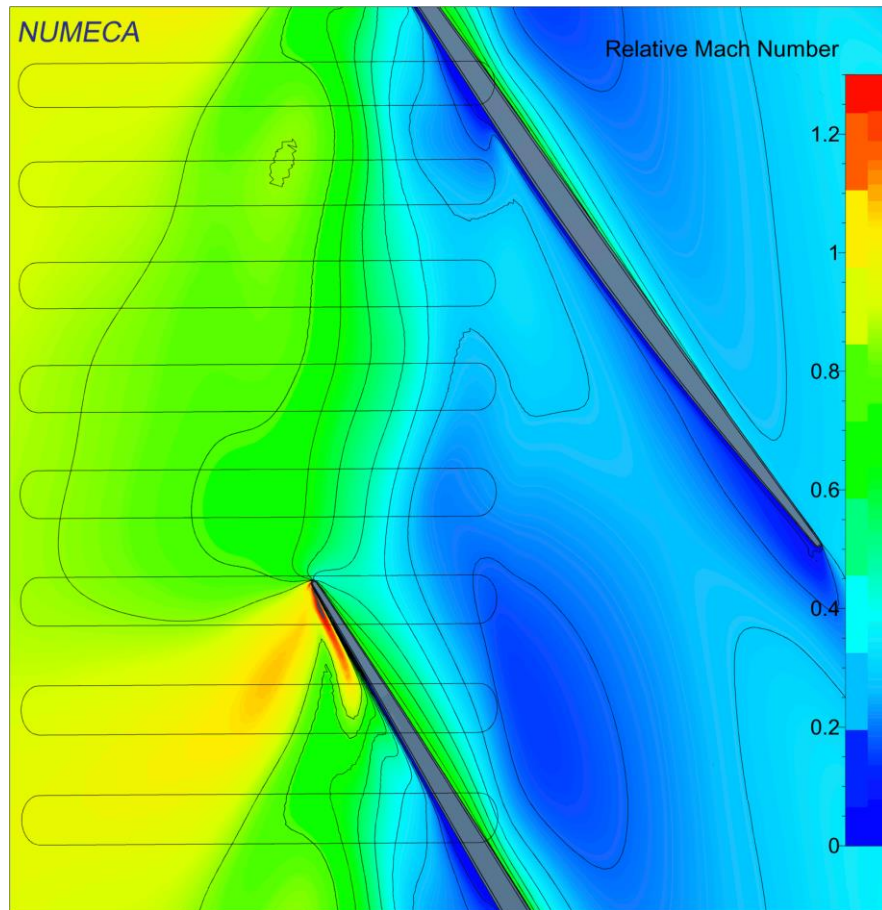


	u = 200 м/с		u = 250 м/с		u = 300 м/с	
	КПД_рт, %	ΔКу, %	КПД_рт, %	ΔКу, %	КПД_рт, %	ΔКу, %
<b>Гладкая ПЧ</b>	87.1	20.3	87.4	23.7	88.7	18.9
<b>НРУ</b>	87.0	34.3	87.9	31.4	89.2	28.8
<b>Δ НРУ</b>	-0.1	+14.0	+0.5	+7.7	+0.5	+9.9



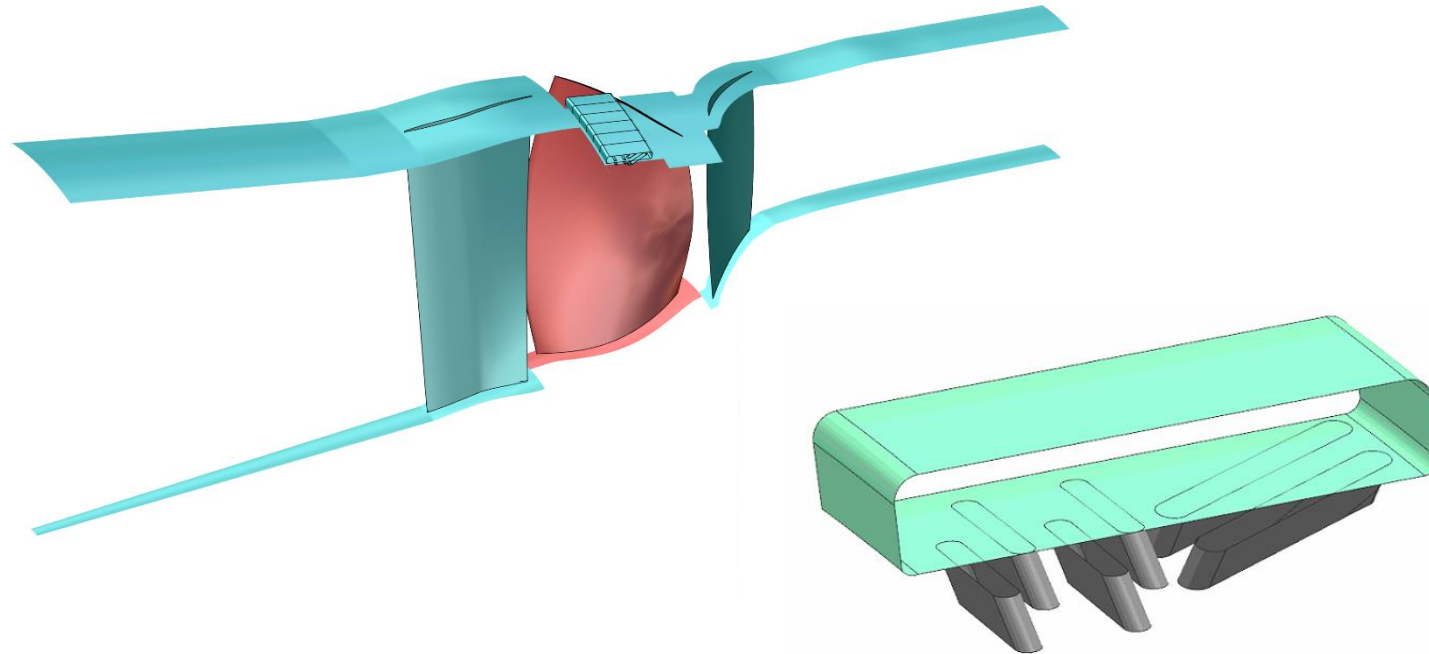






**Венцы:** РВНА, РК, НА

**НРУ:** кольцевая полость, которая соединяется с проточной частью через 126 пазов, наклоненных по направлению вращения. Перекрывает периферию РК1 на 30% осевой хорды



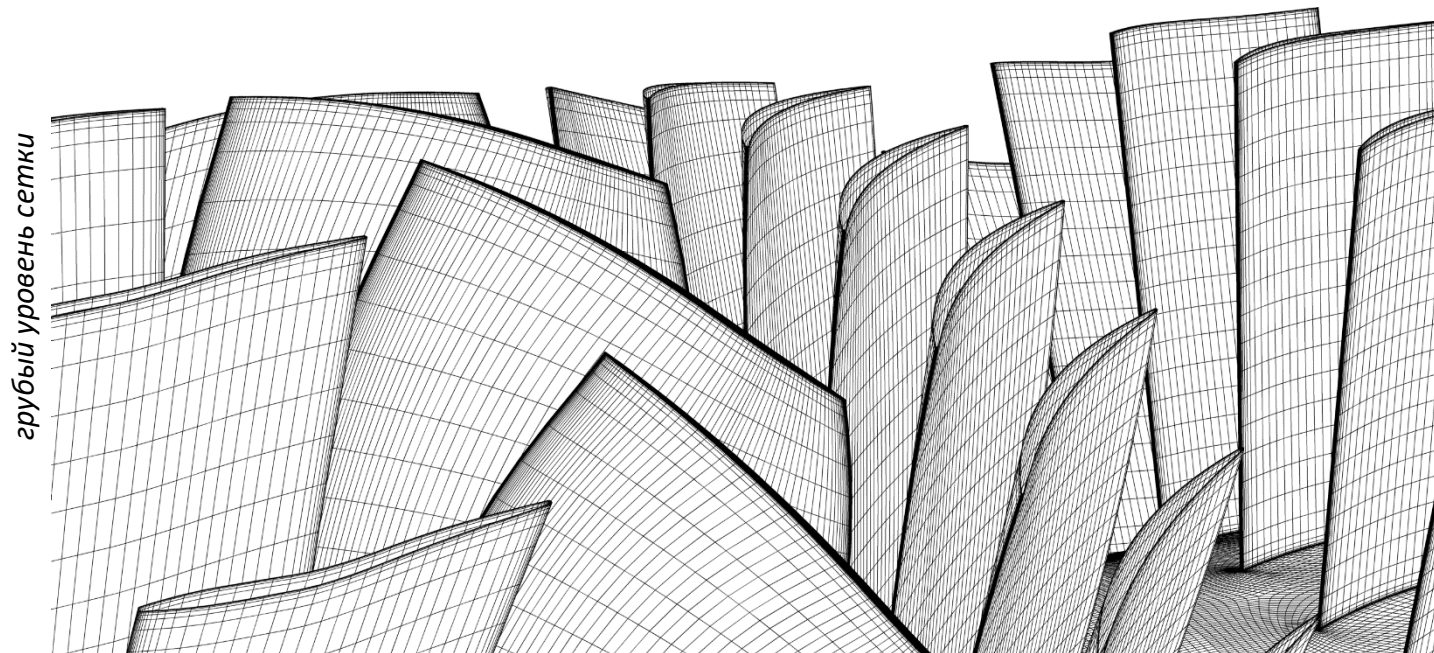
Сектор НРУ

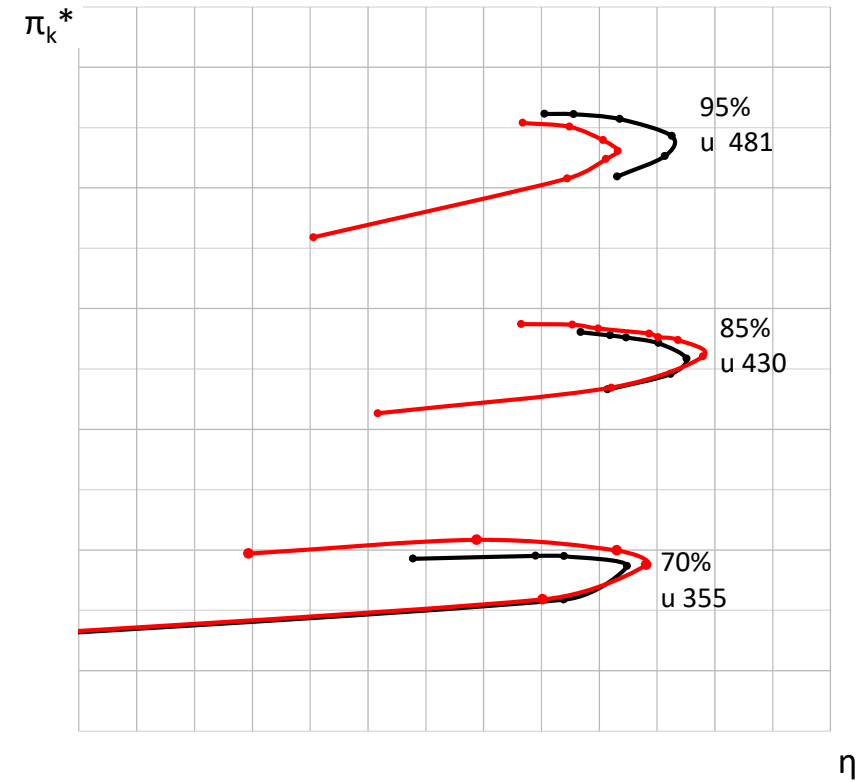
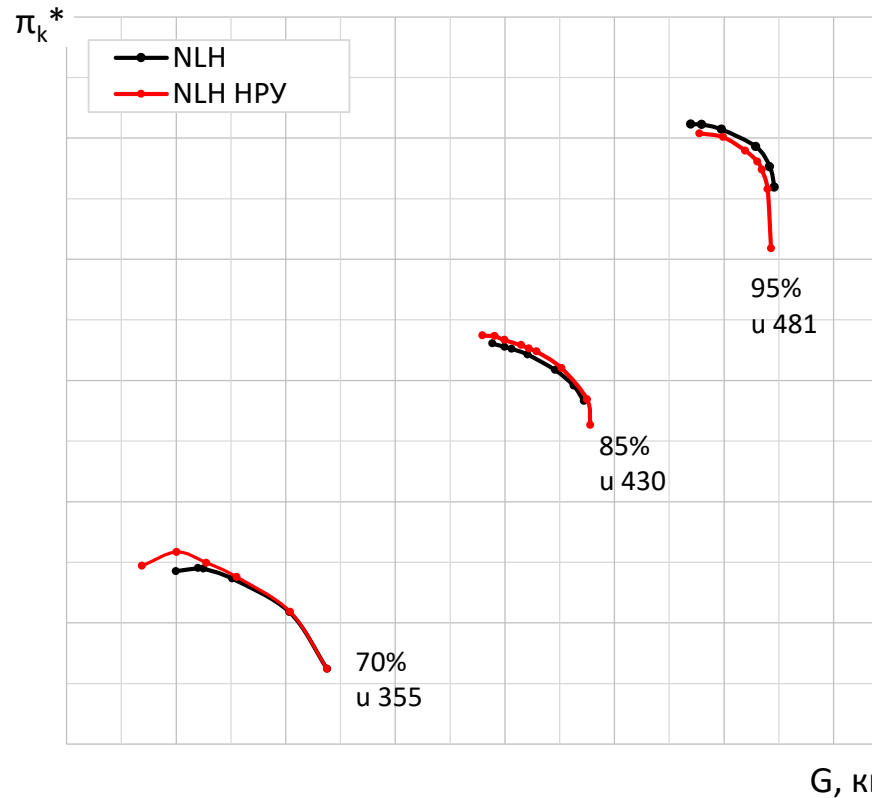
## Сеточная модель с НРУ

- блочно-структурированная сетка *AutoGrid5+IGG*
- радиальный зазор у РК
- ~ 6.4 млн узлов
- $y^+ < 1$

## Постановка

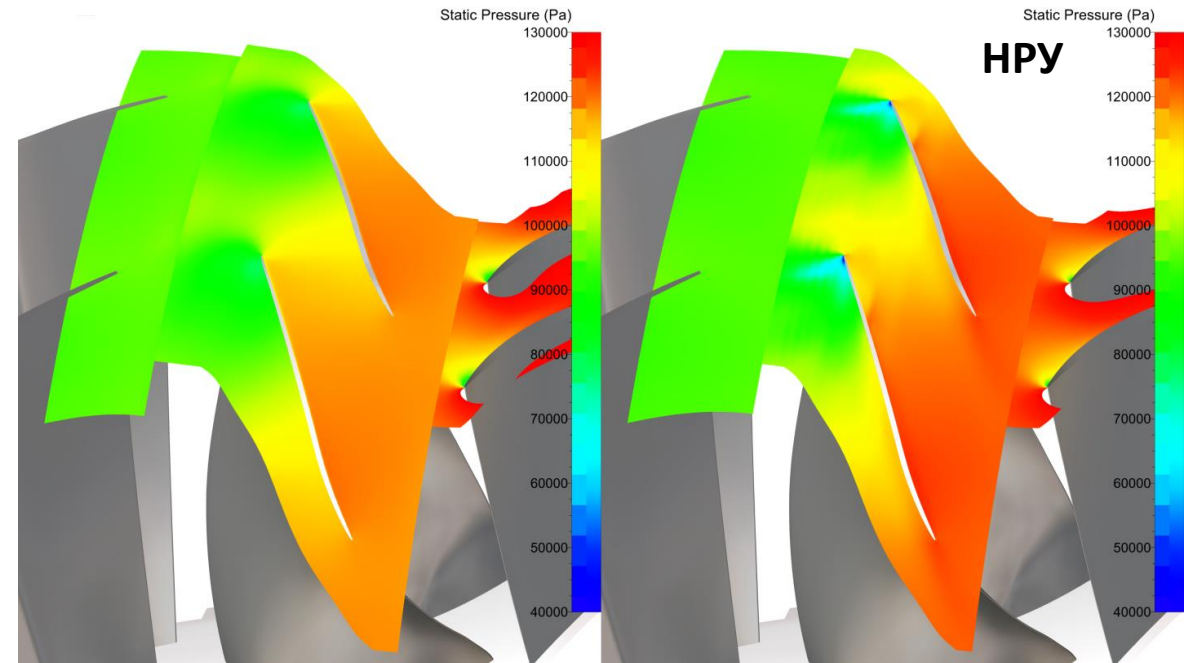
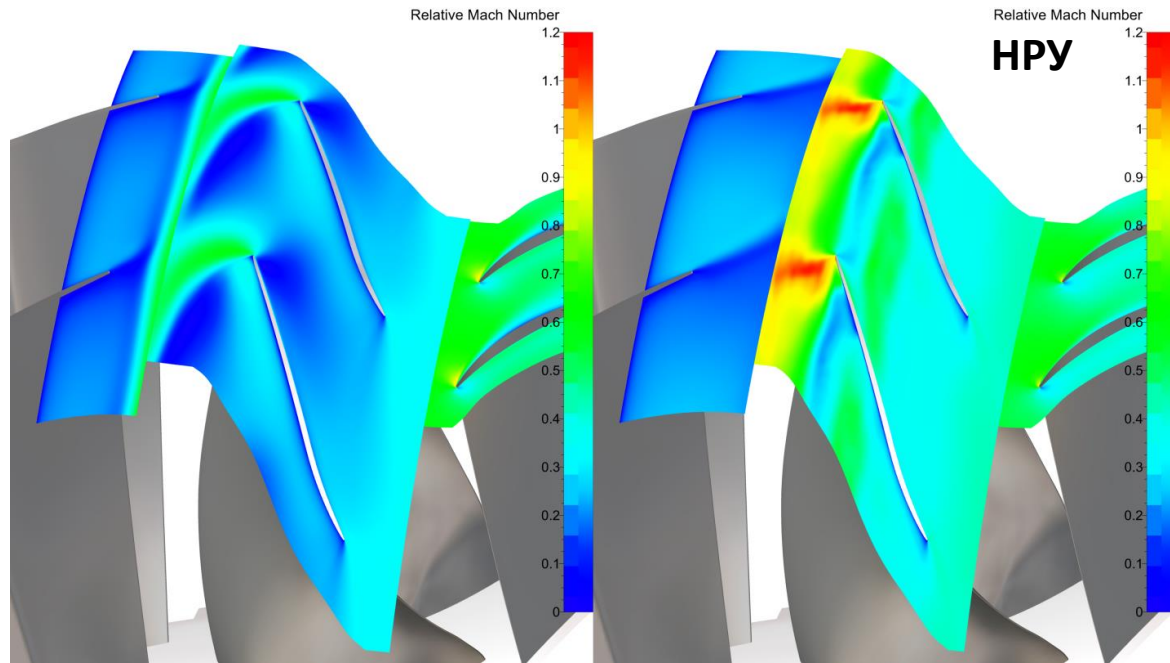
- *Numeca Fine/Turbo v. 12.1*
- термически-совершенный газ
- NLH Basic 3 гармоники
- модель турбулентности SST
- вход:  $P_0 = 1$  атм,  $T_0 = 288.15$  К,  $V_z/|V| = 1$
- выход: варьирование P или G





	N = 70%		N = 85%		N = 95%	
	КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %	КПД_рт, %	ΔKy, %
Гладкая ПЧ						
НРУ						
Δ	0.0	+6.0%	+0.8	+1.8	-1.0	-1.9





- Разработаны математические модели для расчета 3х осевых компрессоров с учетом НРУ :
  - исследовано влияние положения РС на интегральные характеристики: оптимальным является положение «в НРУ»
  - NLH подтвердил свою эффективность при решении задач с НРУ в сравнении с URANS и Frozen Rotor
- Показана эффективность работы НРУ на различных частотах работы компрессоров: увеличение запасов ГДУ может достигать 14% (ступень М-1)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!