

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Кафедра ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН имени А.В.Щеглева



# Российский международный энергетический форум

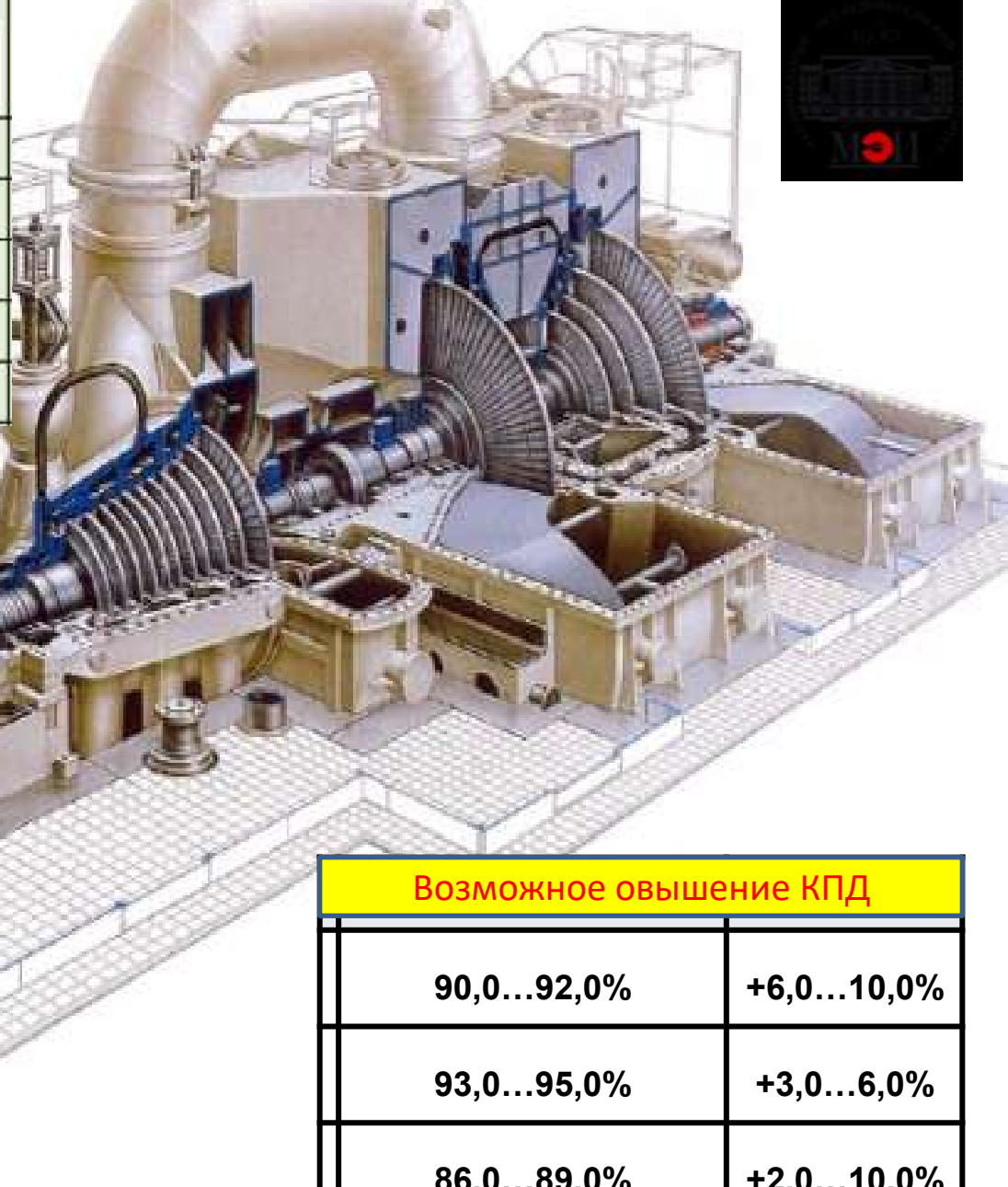
Санкт-Петербург  
19. 04.2023

*Техническое совершенствование проточных частей  
паровых турбин на основе результатов работ  
выполненных в НИУ МЭИ*

# Эффект от реконструкции



Объект	Значение	КПД ЦВД	КПД ЦСД	КПД ЦНД
		%	%	%
Исходный режим работы до реконструкции энергоблока №1,2		84.64	89.74	82.67
Исходный режим работы после реконструкции энергоблока №1,2		87.50	93.00	88
Энергоблок №1 до реконструкции		77.55	88.45	80.07
Энергоблок №1 после реконструкции		85.94	93.60	85.49



### Возможное овышение КПД

90,0...92,0%	+6,0...10,0%
93,0...95,0%	+3,0...6,0%
86,0...89,0%	+2,0...10,0%



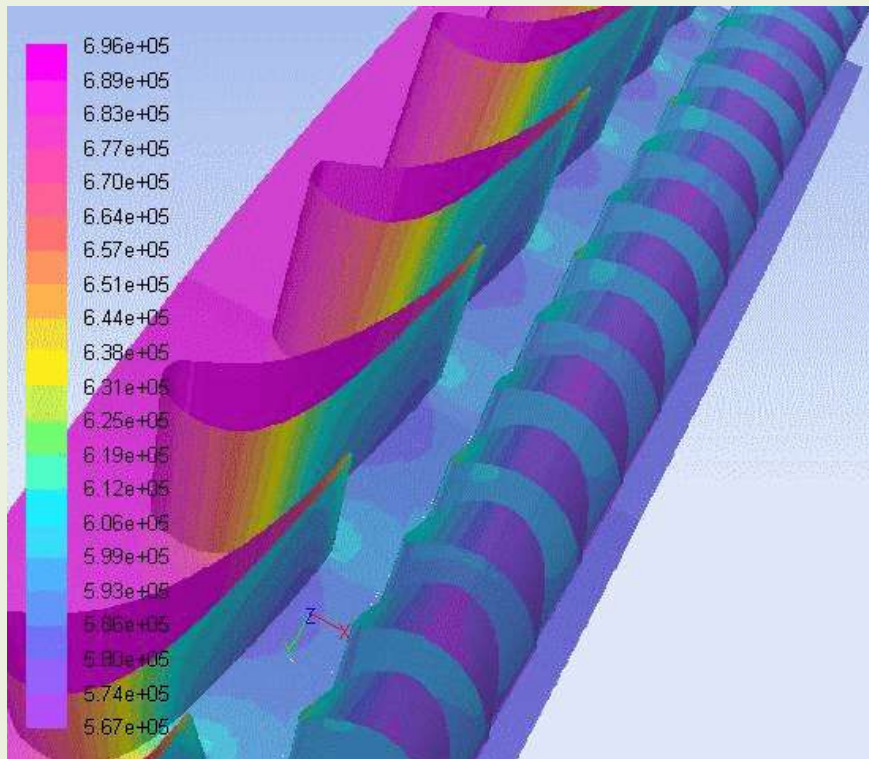
# Повышение аэродинамической эффективности проточных частей



- Органы парораспределения;
- Надбандажные уплотнения ЦВД;
- Эвакуация пленочной влаги из проточной части ЦВД;
- Влагоудаление в последней ступени ЦНД;
- Проточная часть цилиндра высокого давления;
- Проточная часть цилиндра низкого давления;
- Камеры отбора пара из ЦВД на регенерацию;
- Паровпуск ЦВД;
- Выхлопной патрубков ЦНД;
- Выхлоп ЦВД.

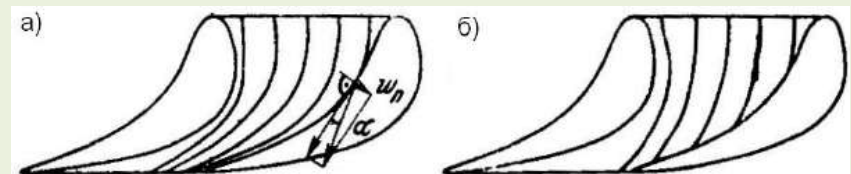
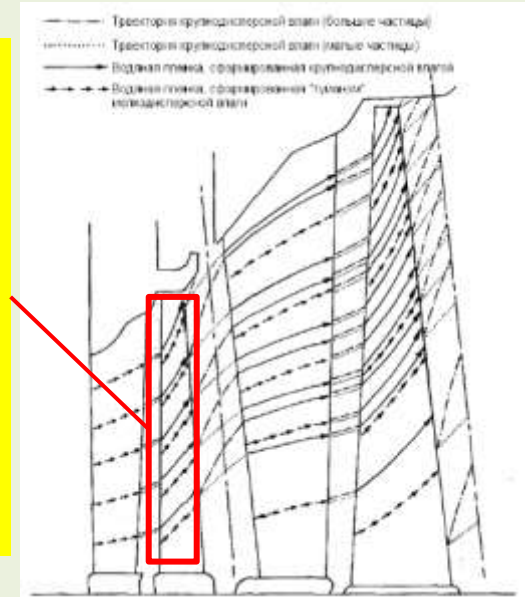


## Применение модели Sliding Mesh



Для определения сепарационных способностей ступени моделироваться процесс движения частиц жидкой фазы в ступени.

Рабочая лопатка является основной причиной образования крупных капель. При вращении на ней осаждается влага и формируется водяная пленка.

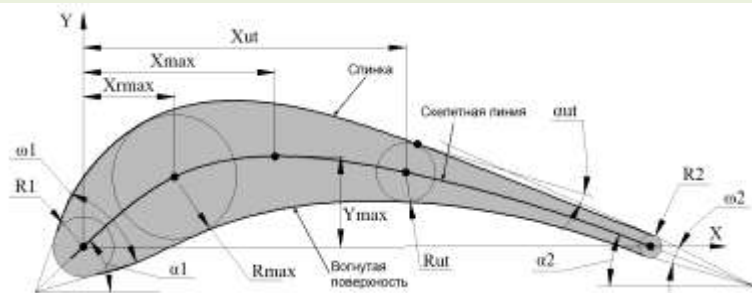


Траектории капель в сопловой решетке размером 5 мкм (а) и 60 мкм (б)

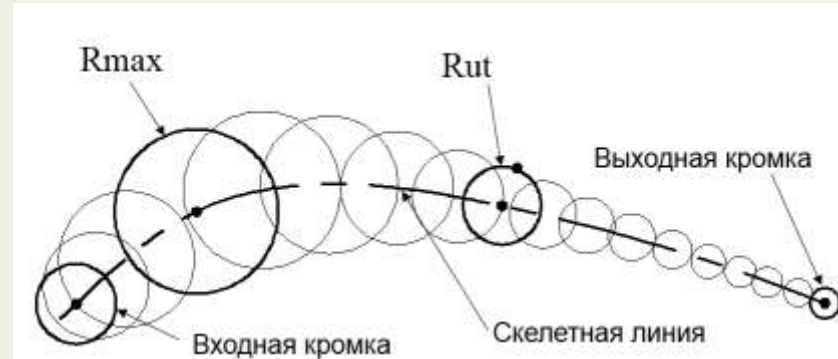
# Современные методы профилирования лопаточного аппарата



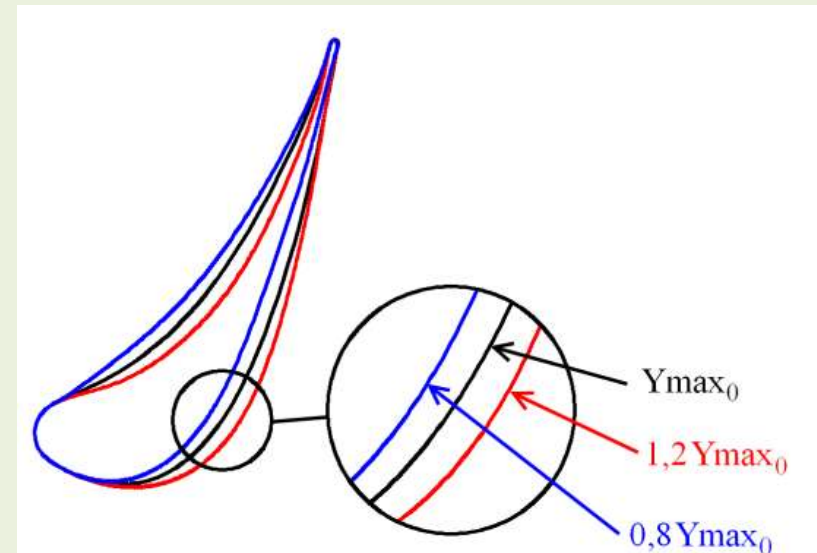
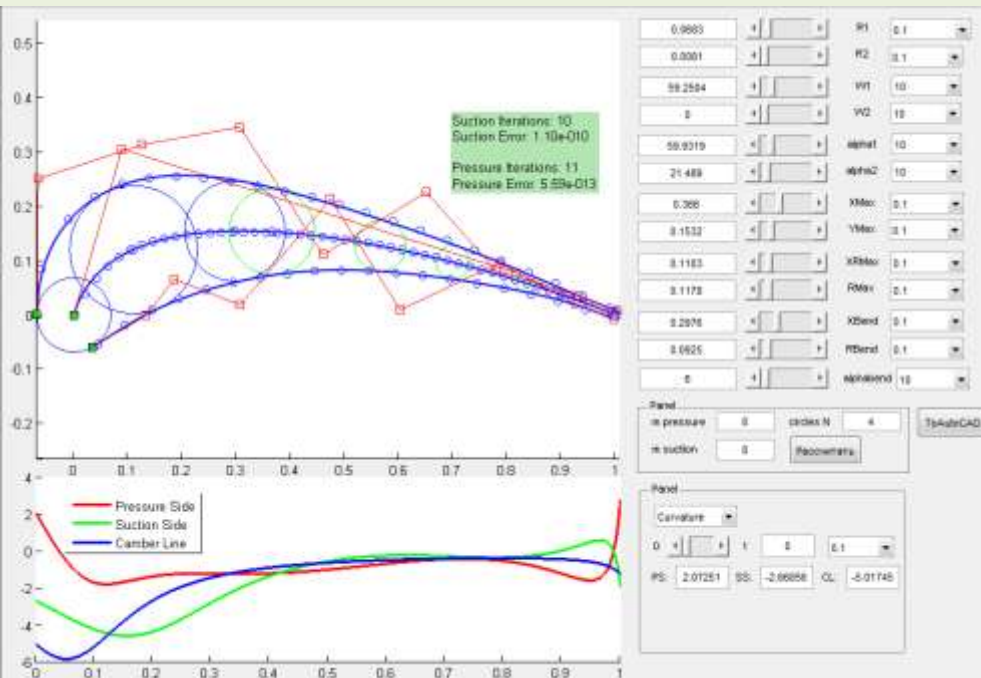
Blading nomenclature



Allocation of radius of inscribed circle



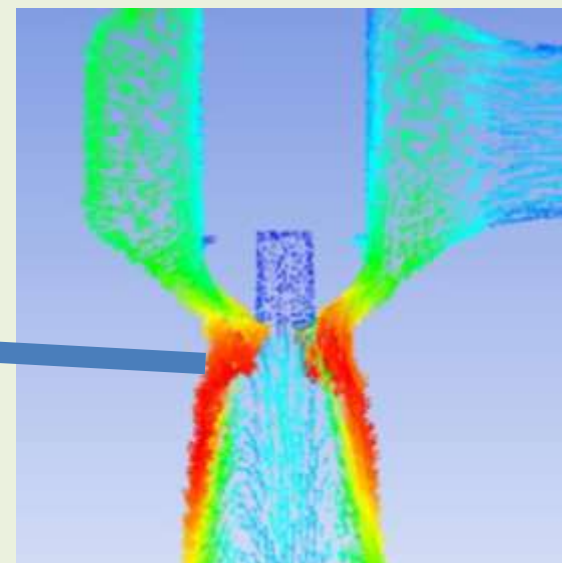
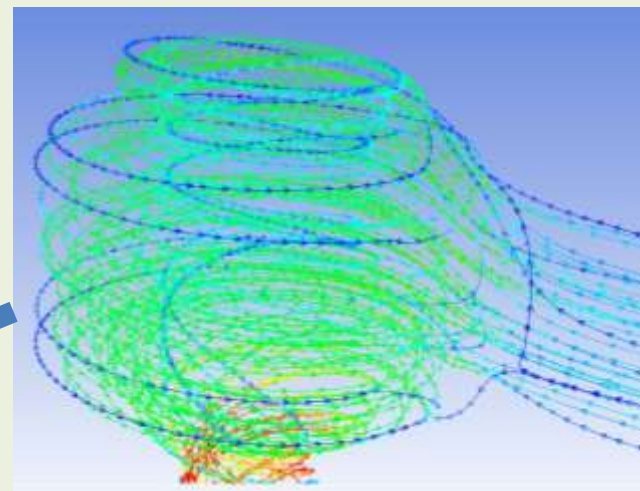
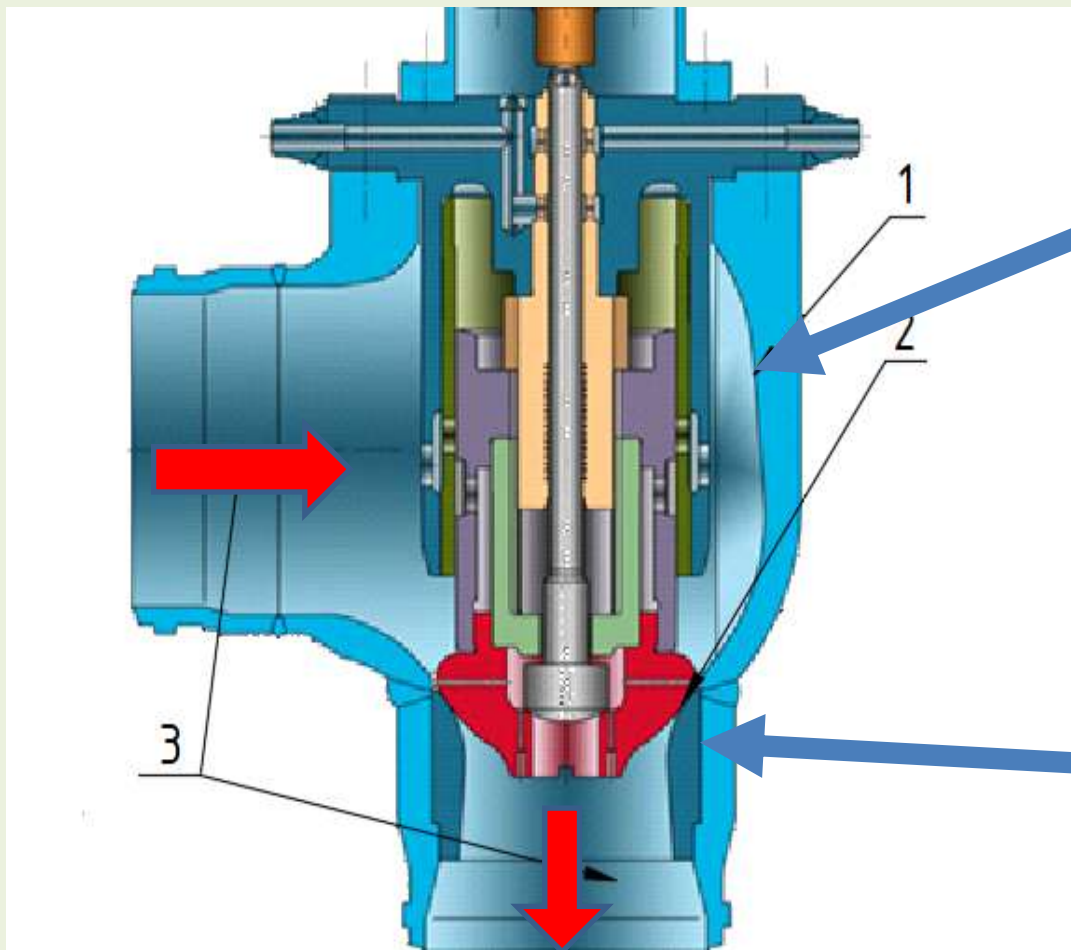
Program interface



# Направления повышения эффективности



## Регулирующий клапан



## Результаты повышения эффективности регулирующих клапанов паровых турбин



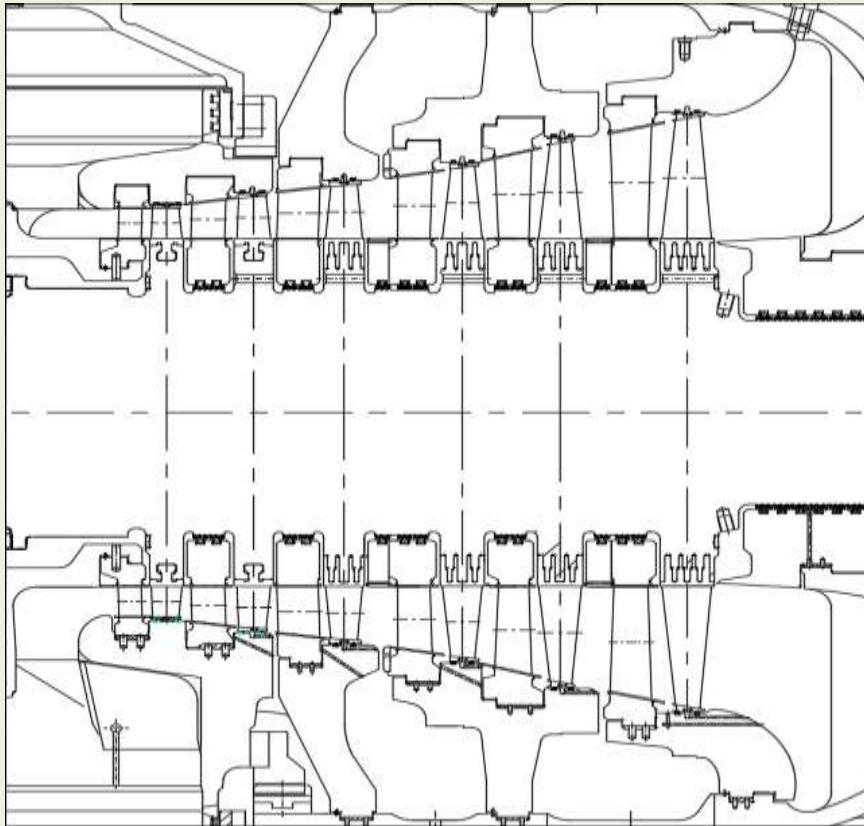
Внедрение предлагаемых технических решений по модернизации органов парораспределения будет иметь следующий эффект:

- Блок клапанов высокого давления – 2,1 МВт для быстроходных и 1,8 МВт для тихоходных турбин;
- Регулирующий клапан греющего пара – 0,3 МВт как для быстроходных, так и для тихоходных турбин;
- Блок клапанов низкого давления – 0,3 МВт как для быстроходных, так и тихоходных турбин.



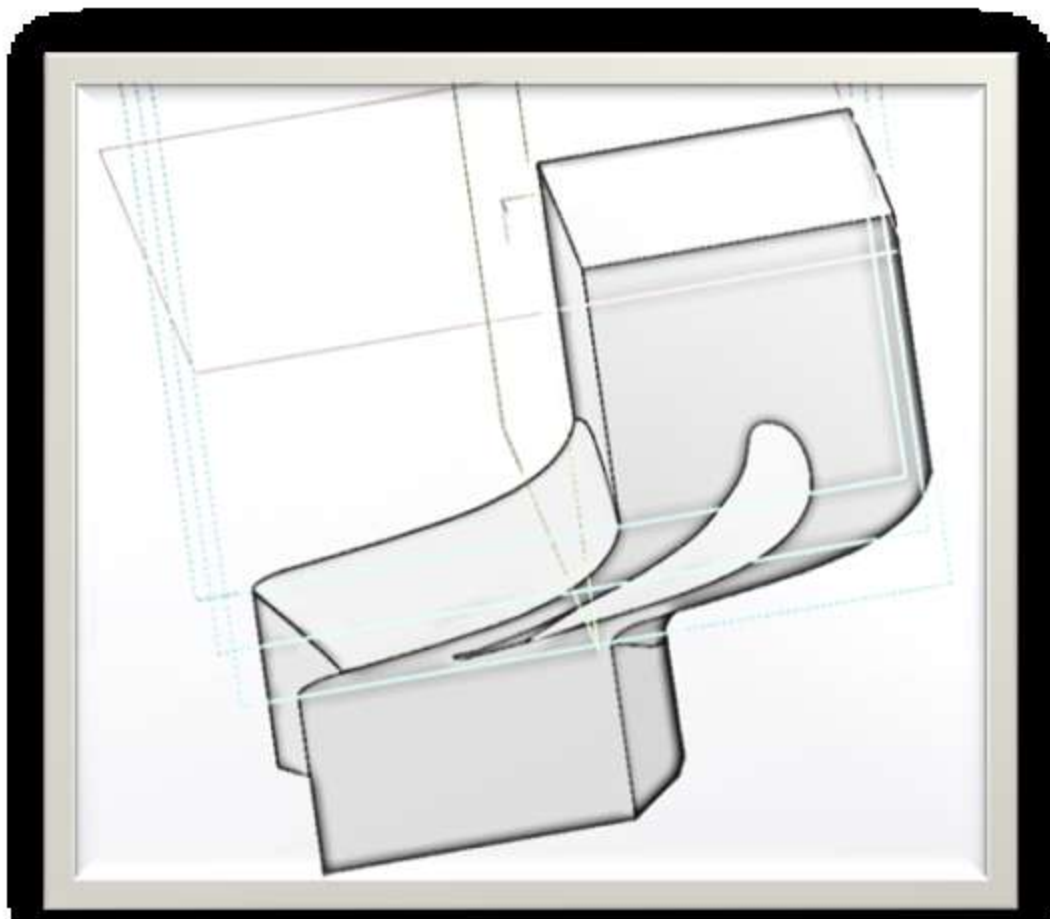


## Проточная часть цилиндра ВД

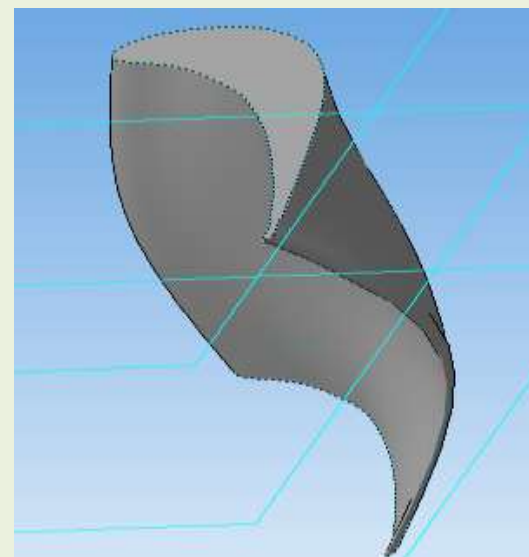


- Повышение эффективности планируется за счет:
- Многопараметрическая оптимизация профильной части лопаточного аппарата с целевой функцией экономичности;
  - Вариантные расчеты;
  - Разработка 3D моделей;
  - Газодинамический 3D расчет нового варианта.
- Повышение экономичности за счет увеличения количества ступеней, при сохранении осевого габарита.
- По консервативной оценке новые профили лопаток могут обеспечить прибавку мощности до 2,3 МВт для быстроходных и до 1,5 МВт для тихоходных турбин

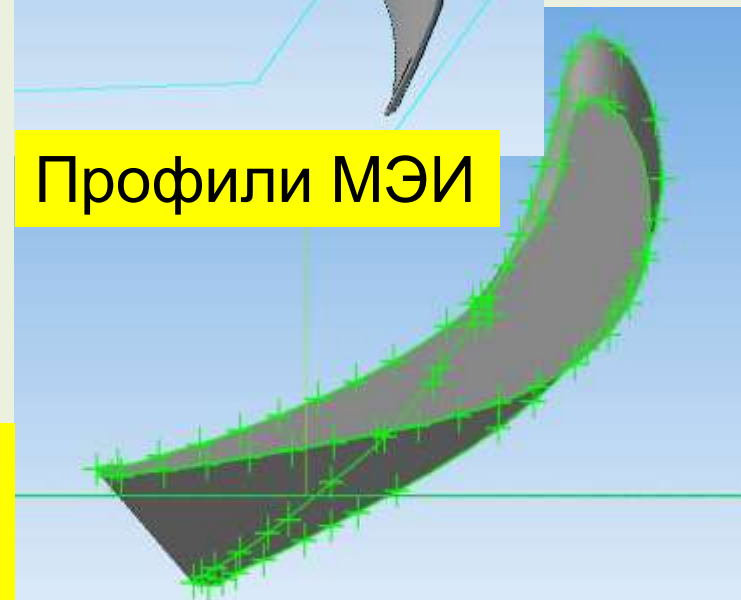
# Сопловая лопатка с переменным углом



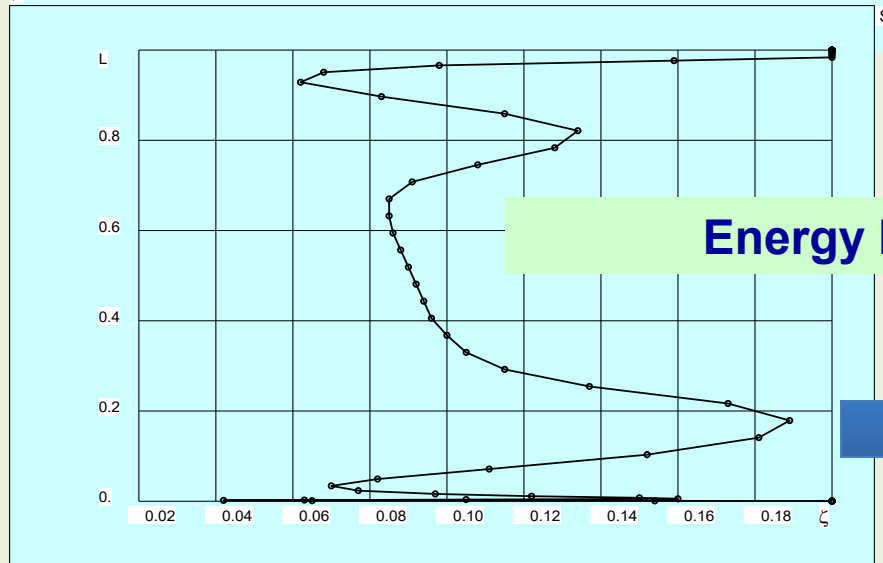
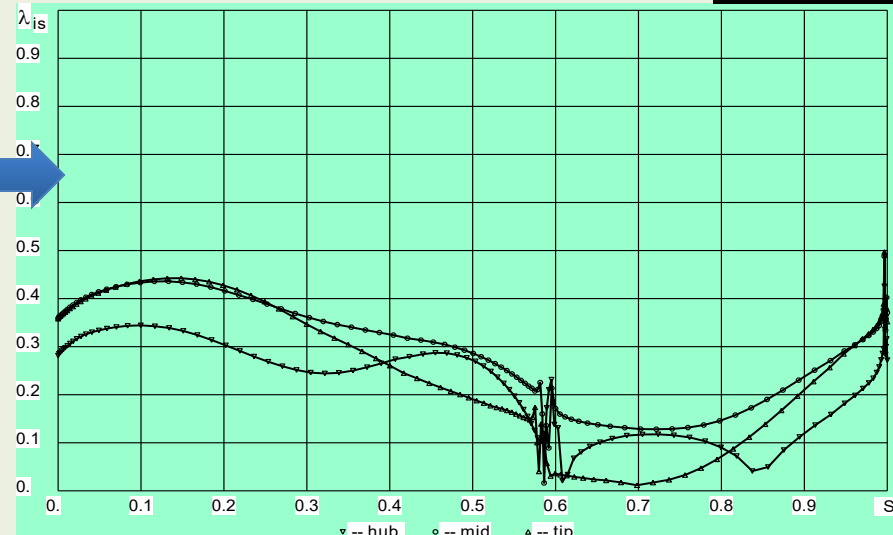
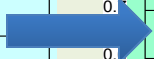
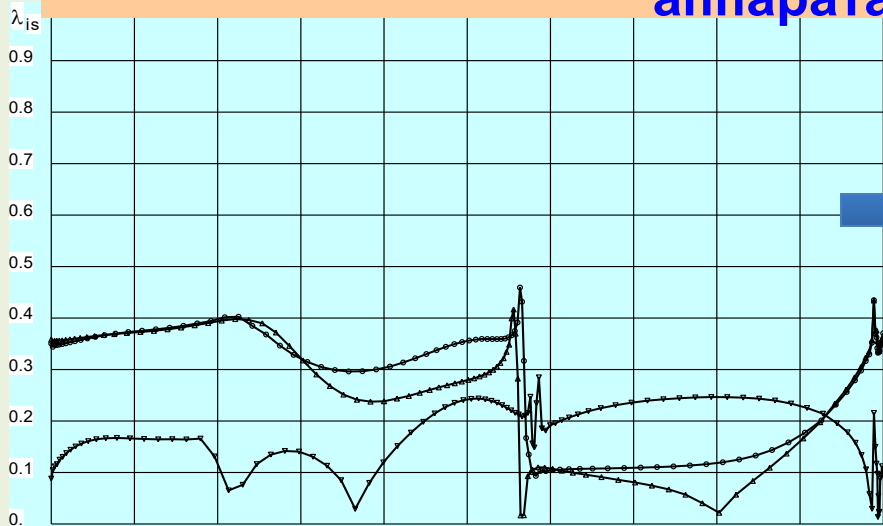
Переменный угол выхода потока  
позволяет перераспределить расход по высоте  
решетки



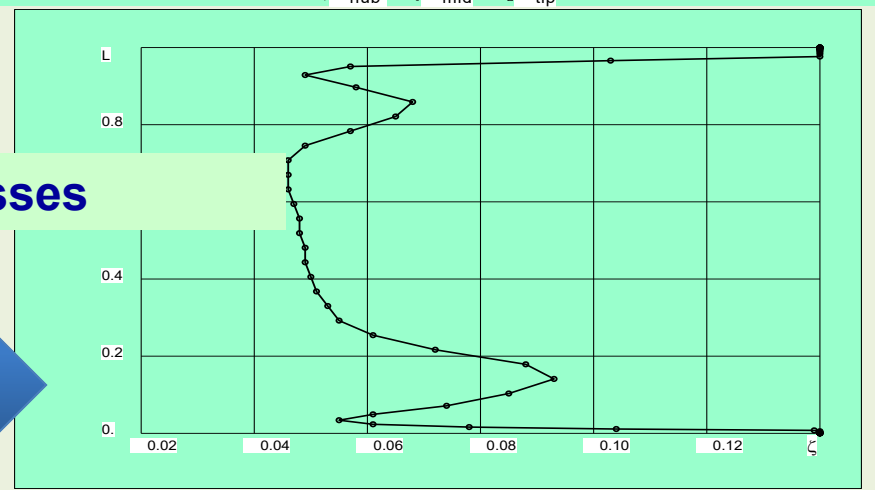
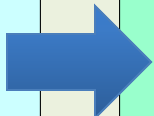
Профили МЭИ



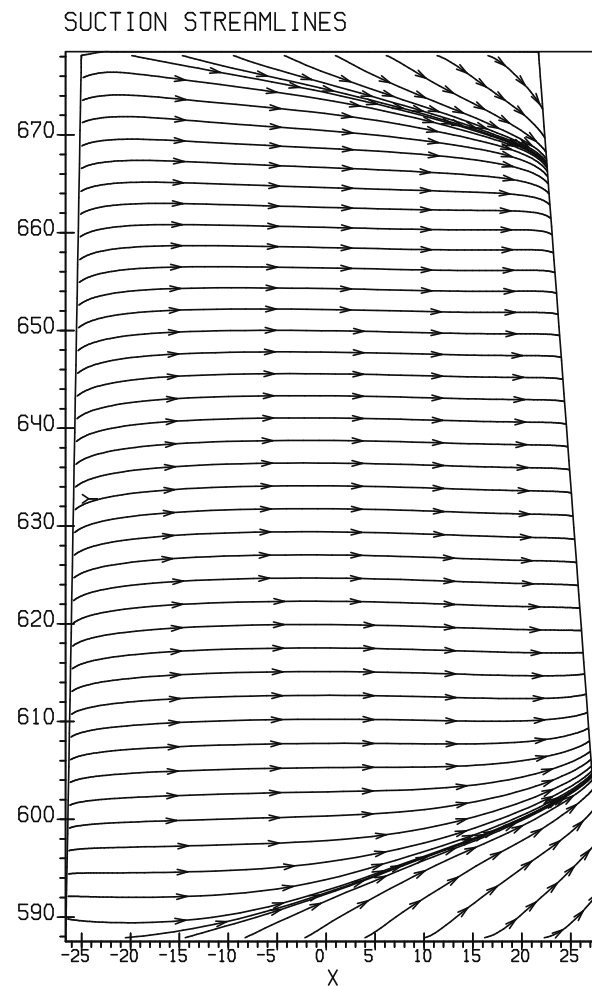
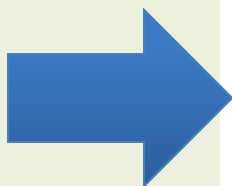
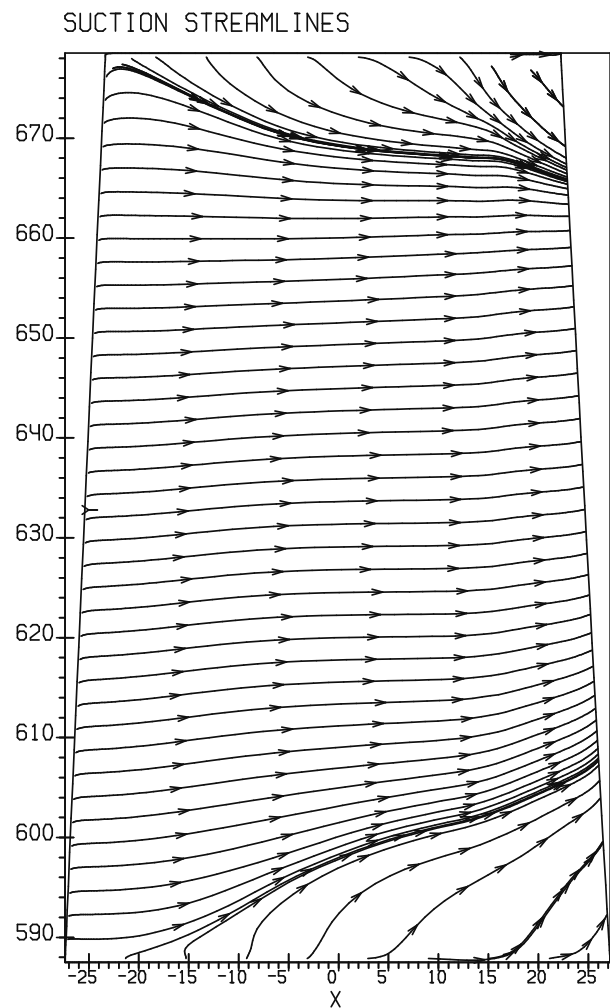
# Современные методы профилирования лопаточного аппарата



Energy losses



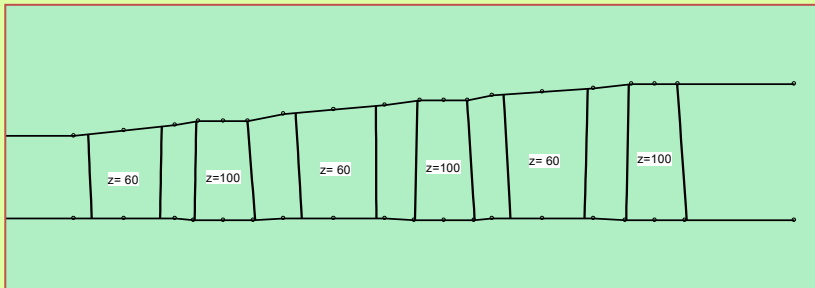
# Современные методы профилирования лопаточного аппарата



**Уменьшение зоны вторичных течений**



# Повышение КПД отсека в результате 3D профилирования

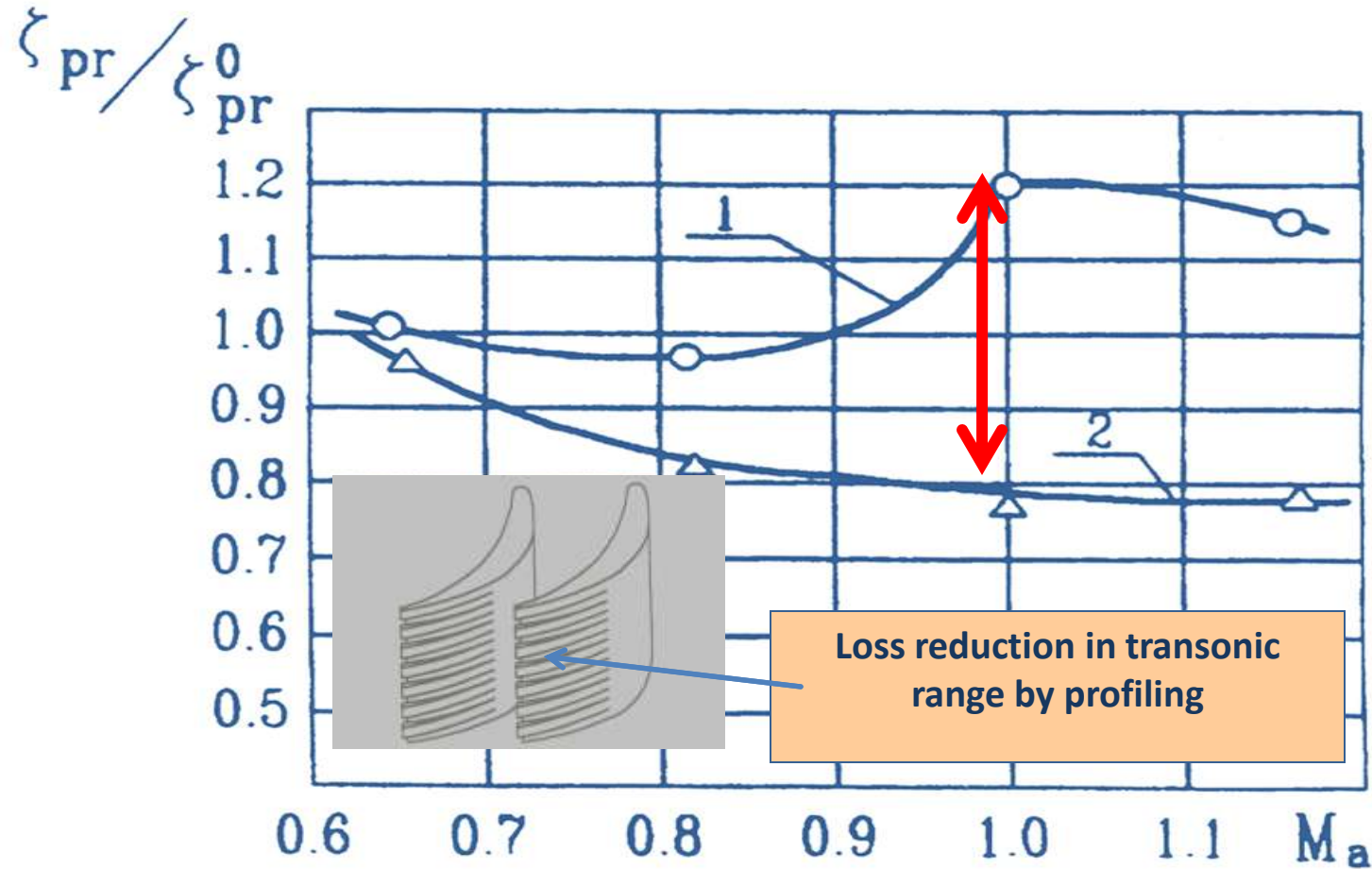


Меридиональные обводы и число ступеней в отсеке осталось без изменения



КПД отсека из трех ступеней увеличился на 2.4 % до 93%

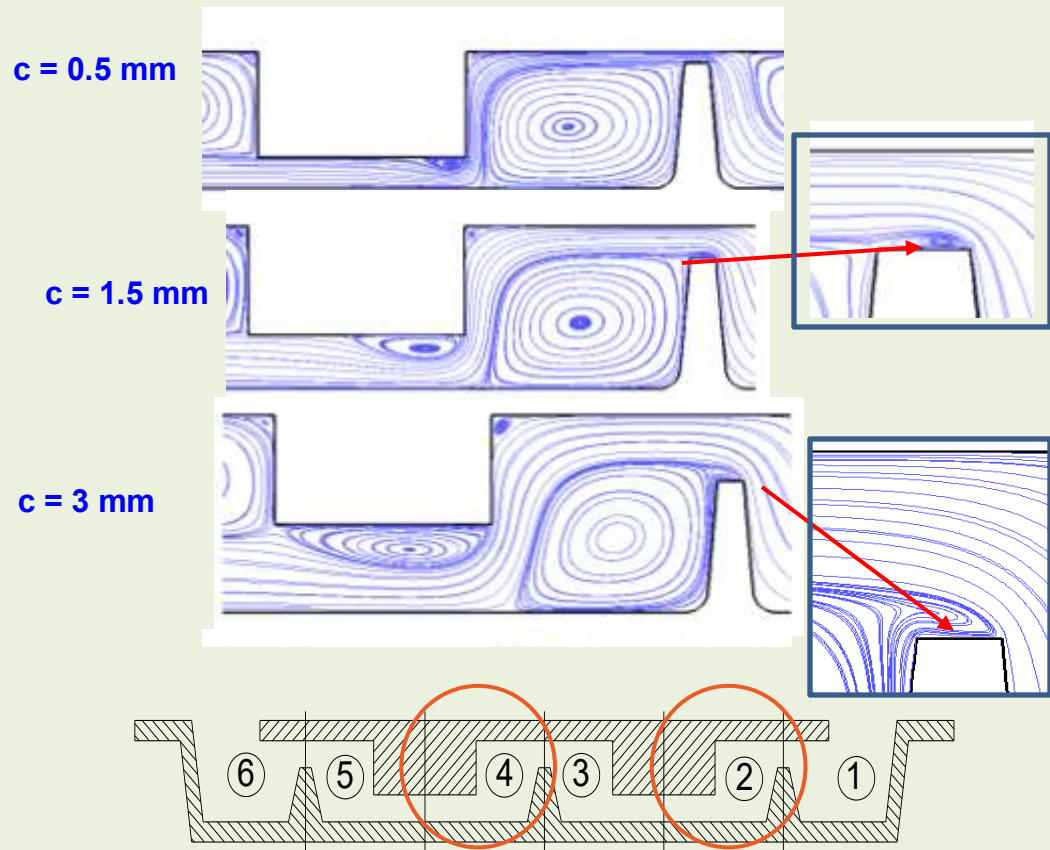
# Снижение потерь энергии при сверхзвуковых скоростях потока



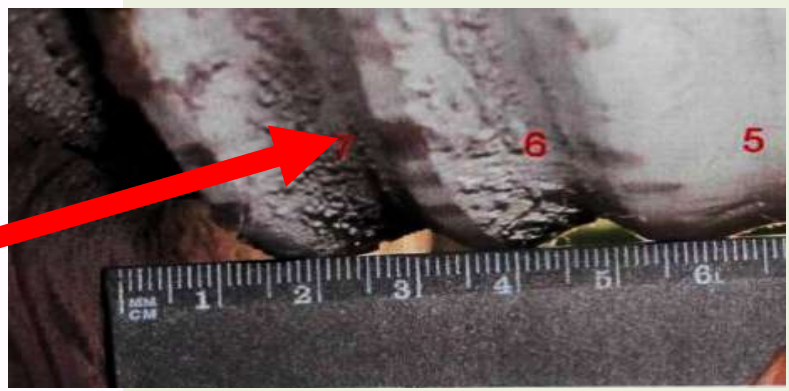
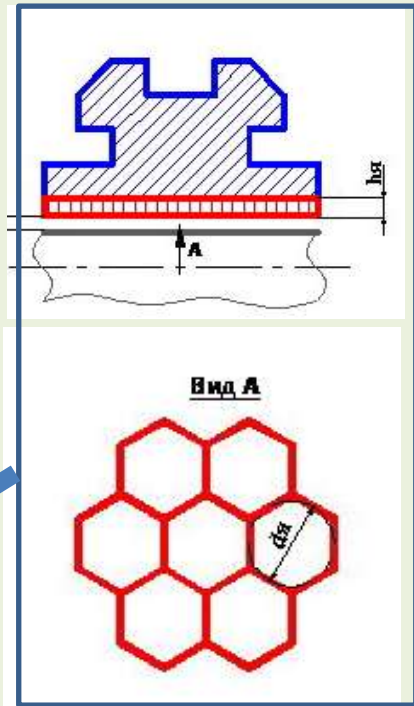
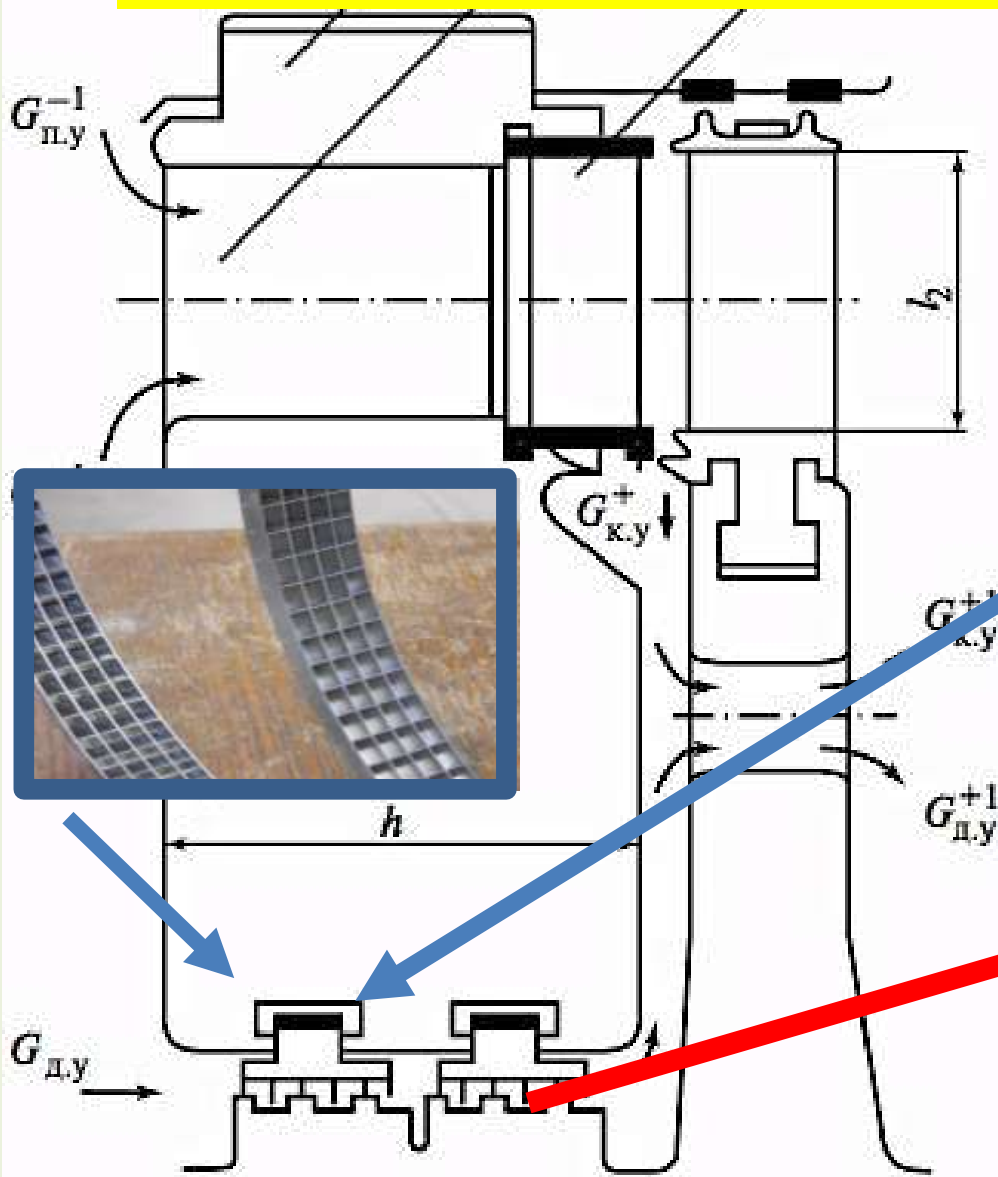
# Моделирование течения в уплотнениях



## Влияние зазора на течение в уплотнениях



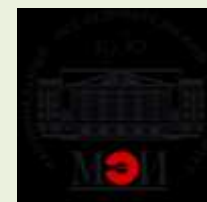
# Уменьшение потерь от утечек



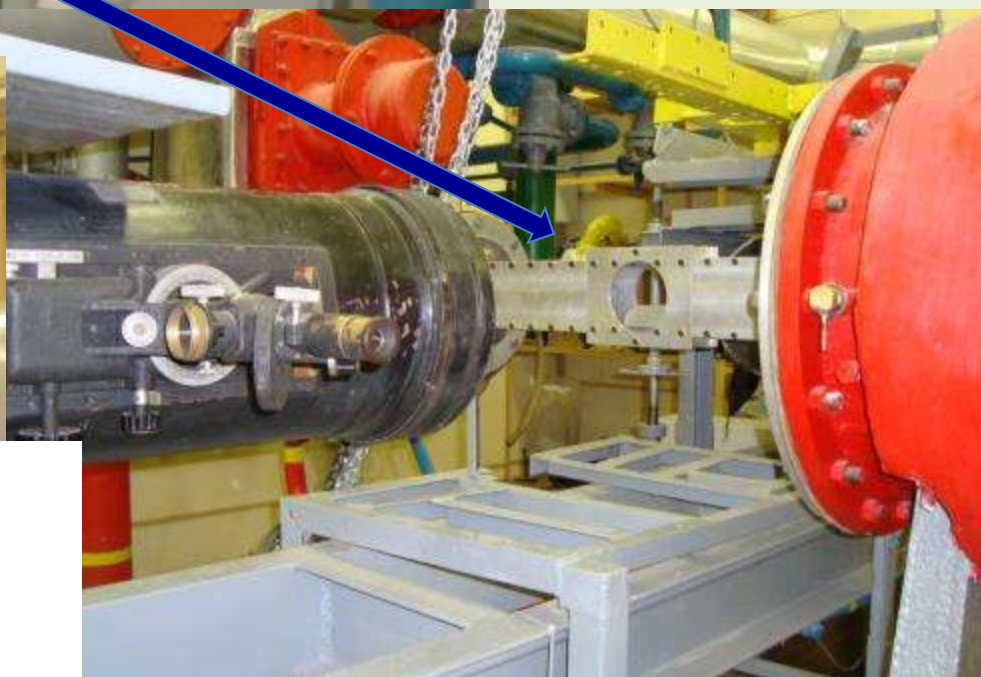
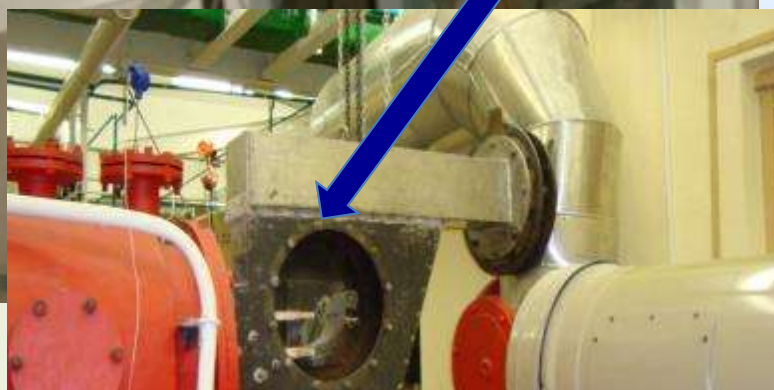
# Вариант выполнения сотовых вставок конструкции МЭИ



# Отладка и испытание предлагаемых технических решений в Проблемной лаборатории турбомашин кафедры паровых и газовых турбин МЭИ



Модернизация  
стенда для  
исследования  
уплотнений на  
влажном паре



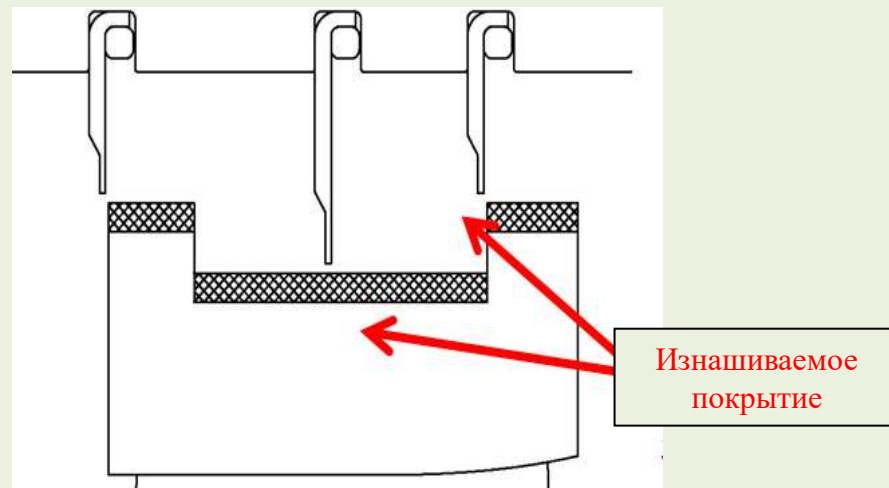
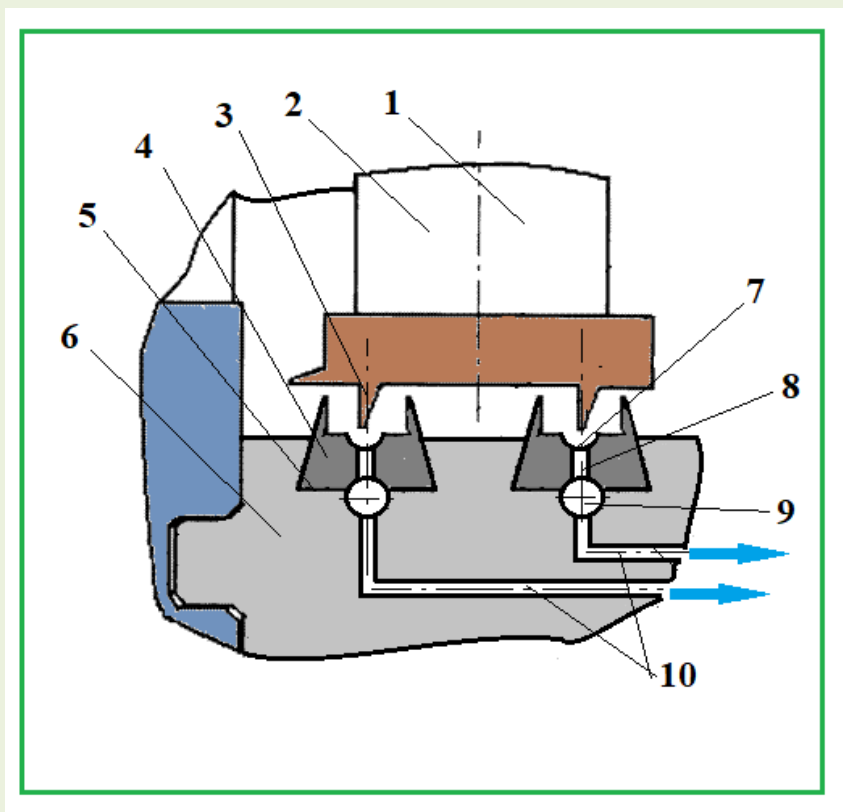
✓ Конструкция сотовых уплотнений позволяет разработать сепарацию влаги для уменьшения размывов и снижения потерь.



# Результаты повышения эффективности конструкции уплотнений паровых турбин

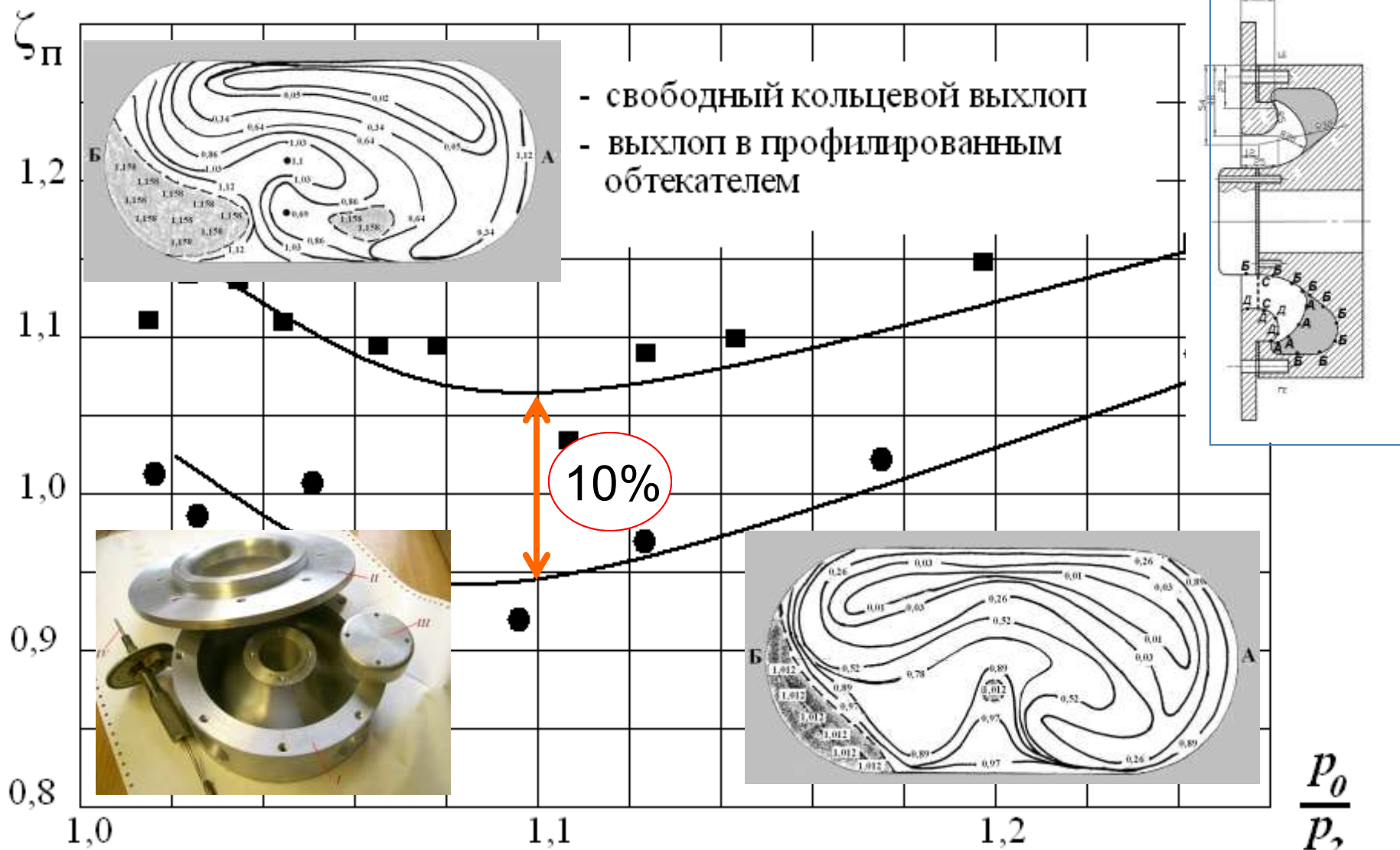


## Уплотнения ЦВД



- По предварительным результатам внедрение рассматриваемой конструкции надбандажного уплотнения в ЦВД повысит мощность быстроходных турбин на 0,8 МВт и тихоходных на 0,6 МВт.

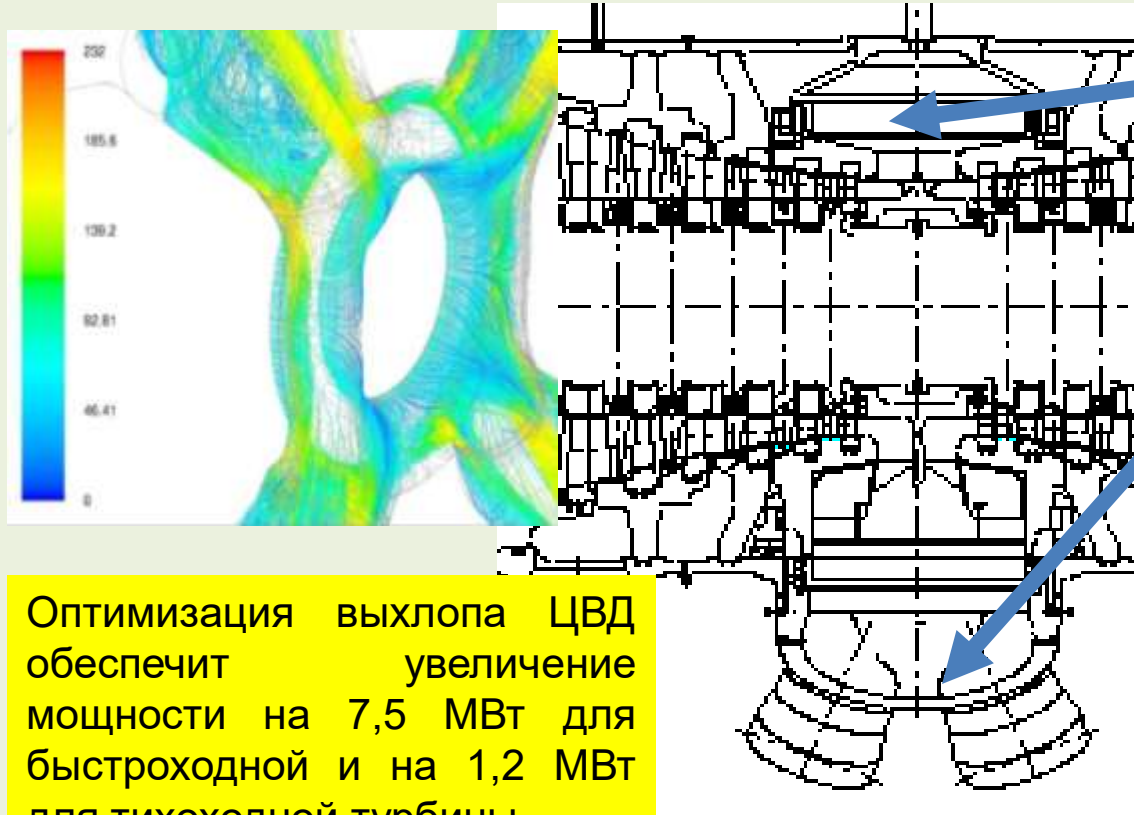
# Снижение потерь в выхлопном патрубке ЦВД



# Направления повышения эффективности паровых турбин ТЭС и АЭС



## Входной и выхлопной патрубков цилиндра высокого давления



Оптимизация выхлопа ЦВД обеспечит увеличение мощности на 7,5 МВт для быстроходной и на 1,2 МВт для тихоходной турбины.

Оптимизация конструкций паровпуска ЦВД может обеспечить прибавку 6,5 МВт мощности для быстроходной турбины



# Направления повышения эффективности паровых турбин ТЭС и АЭС



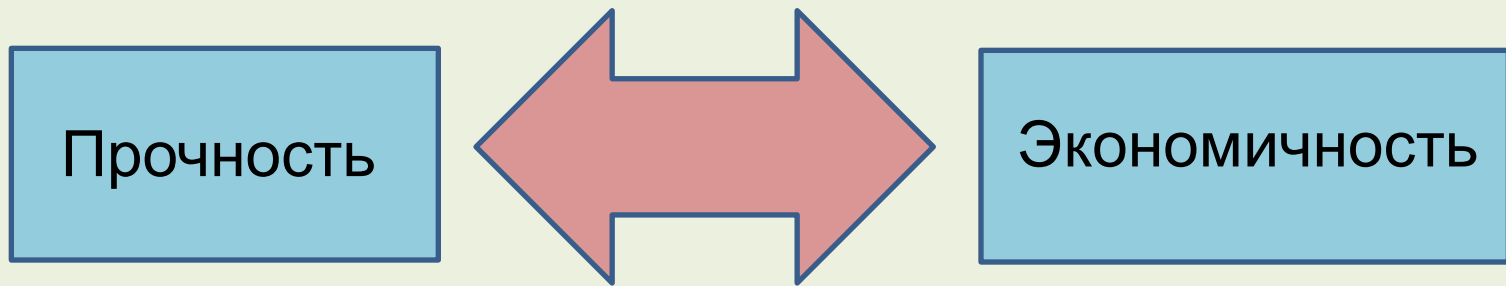
## Проточная часть цилиндра НД



По экспертной оценке, оптимизация проточной части ЦНД может повысить мощность быстроходной турбины на 12 МВт, а тихоходной – на 3 МВт.



# Выбор длины рабочей лопатки



С ростом длины труднее обеспечить прочность

С ростом длины уменьшаются потери с выходной скоростью

С ростом длины увеличивается оптимальный теплоперепад и вместе с ним относительные скорости, а значит и волновые потери.

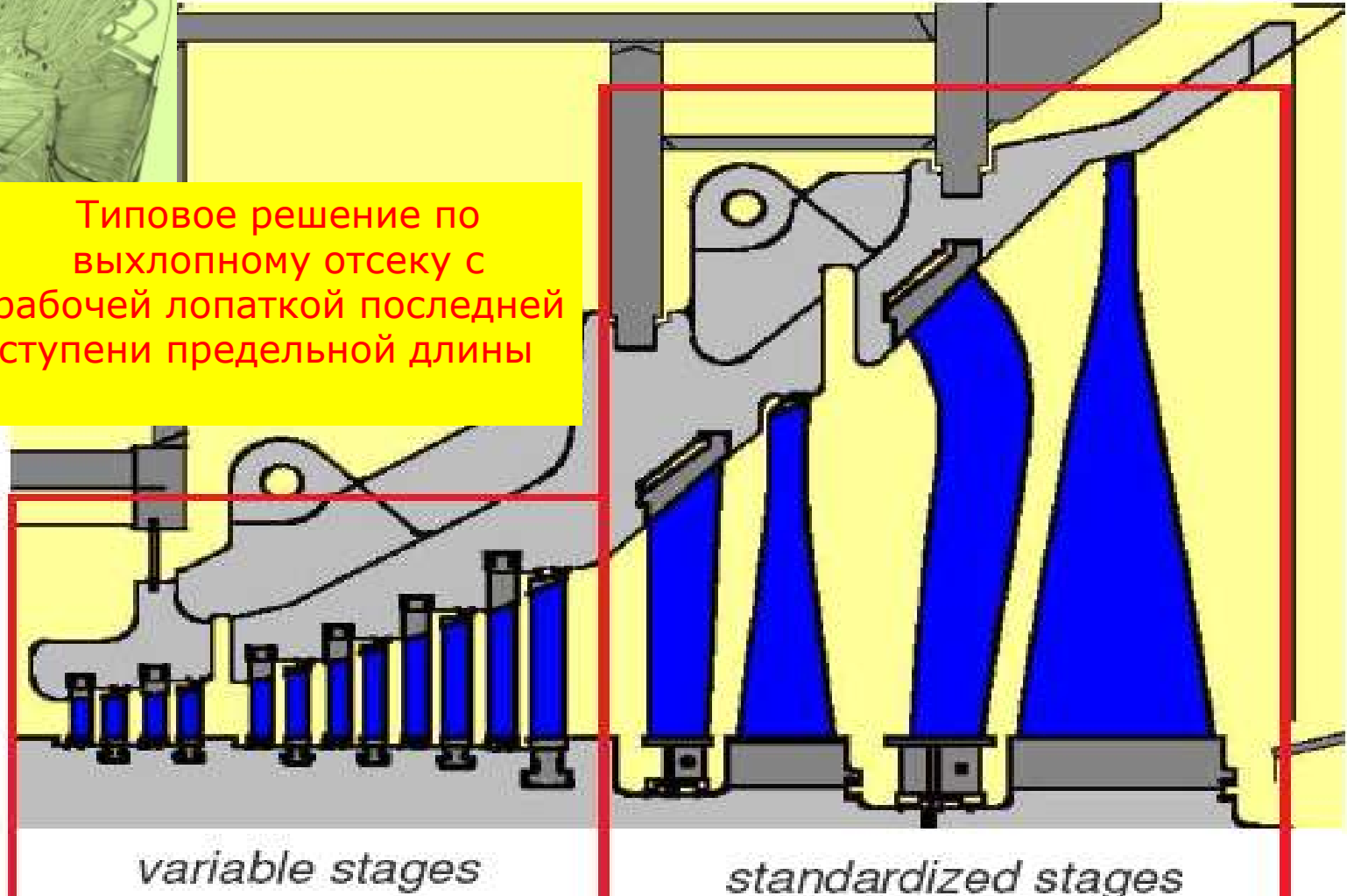
С ростом теплоперепада растет отношение удельных объемов за рабочей и сопловой решетками, а значит у периферийный угол раскрытия, т.е. концевые потери.

На числа  $M_2 > 1,5 - 2$  трудно подобрать профили периферийных сечений с малыми потерями.

# Направления повышения эффективности паровых турбин АЭС



Типовое решение по выхлопному отсеку с рабочей лопаткой последней ступени предельной длины

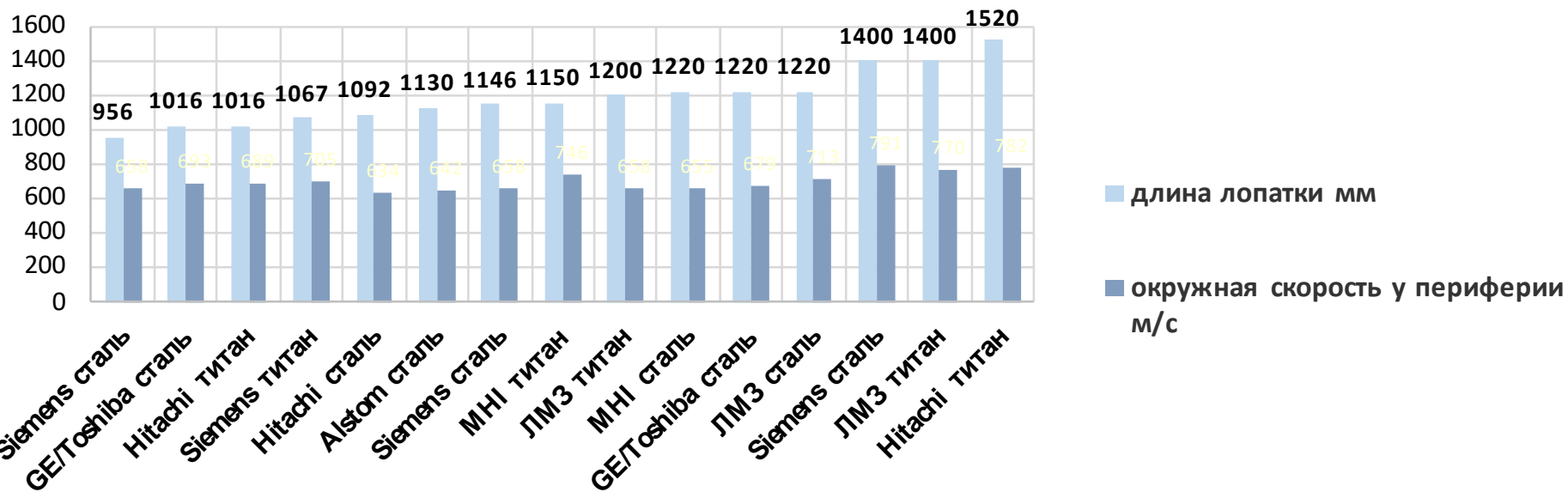


*variable stages*

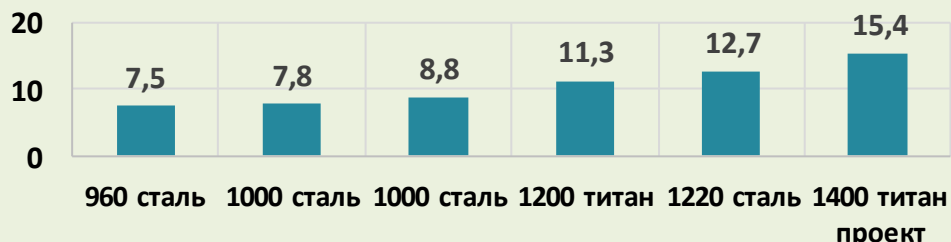
*standardized stages*



# Высоты и окружные скорости рабочих лопаток последних ступеней



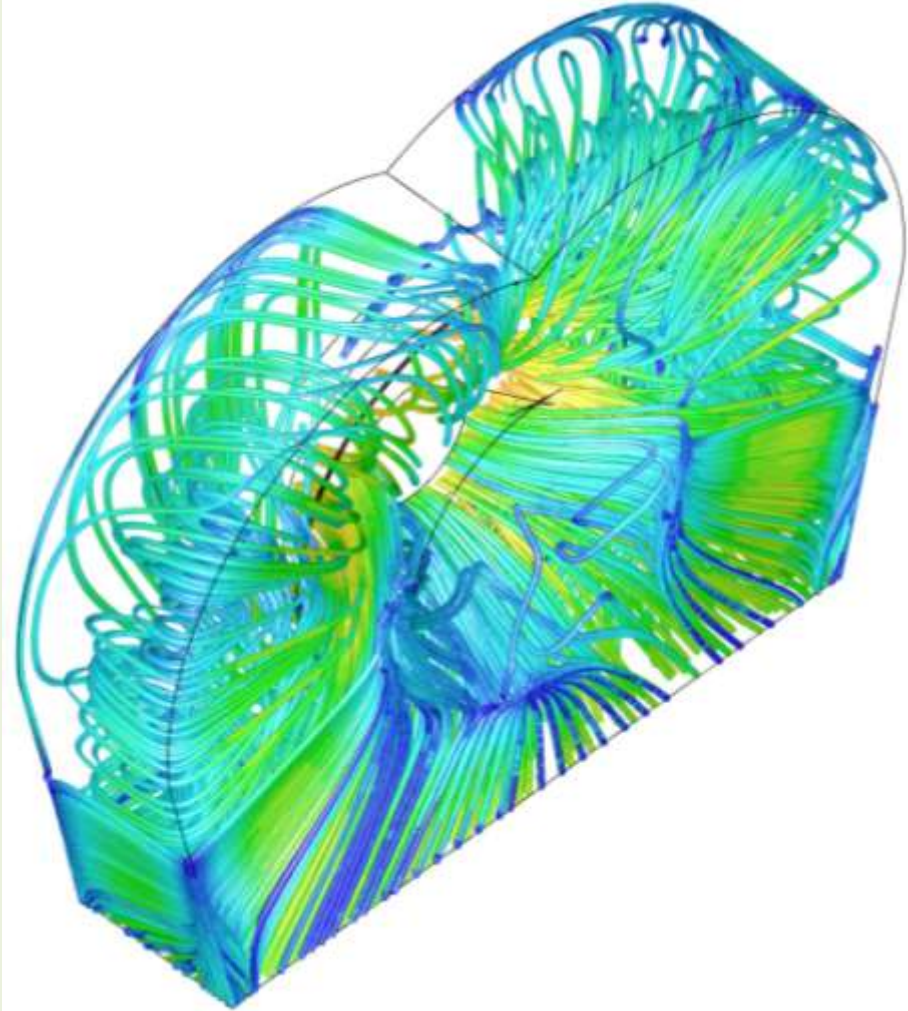
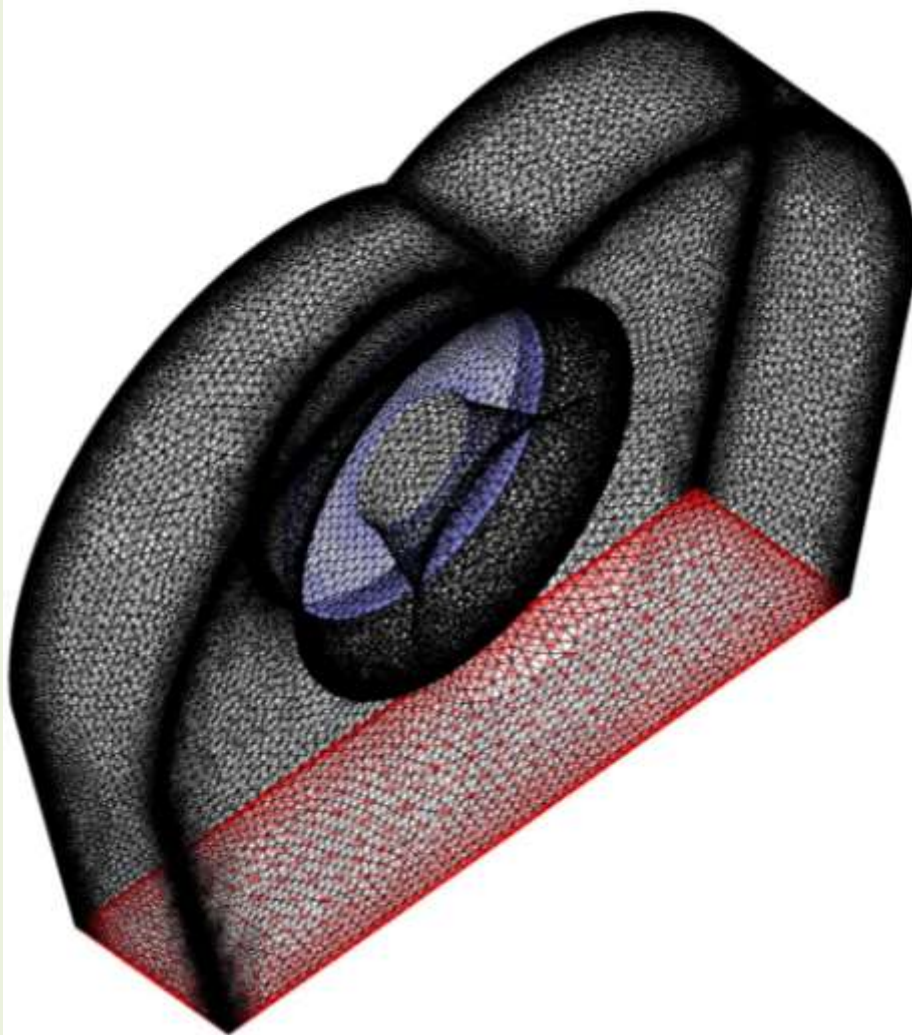
Площадь выхлопа турбин ЛМЗ с разными лопатками последних ступеней (м<sup>2</sup>)



# Повышение эффективности за счет увеличения площади выхлопа паровых турбин ТЭС и АЭС



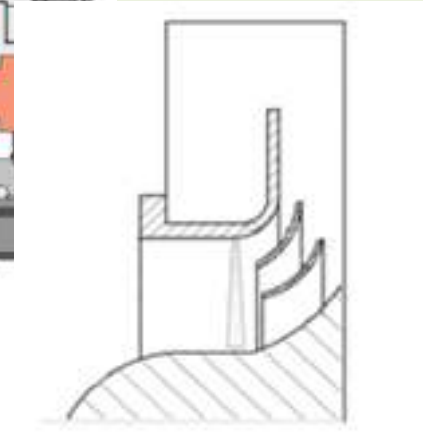
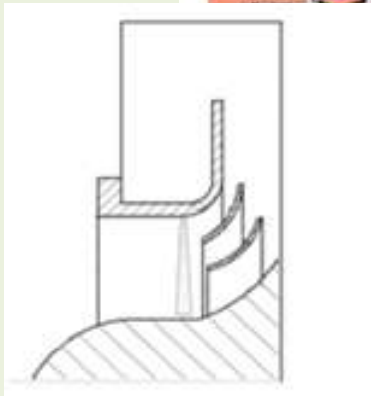
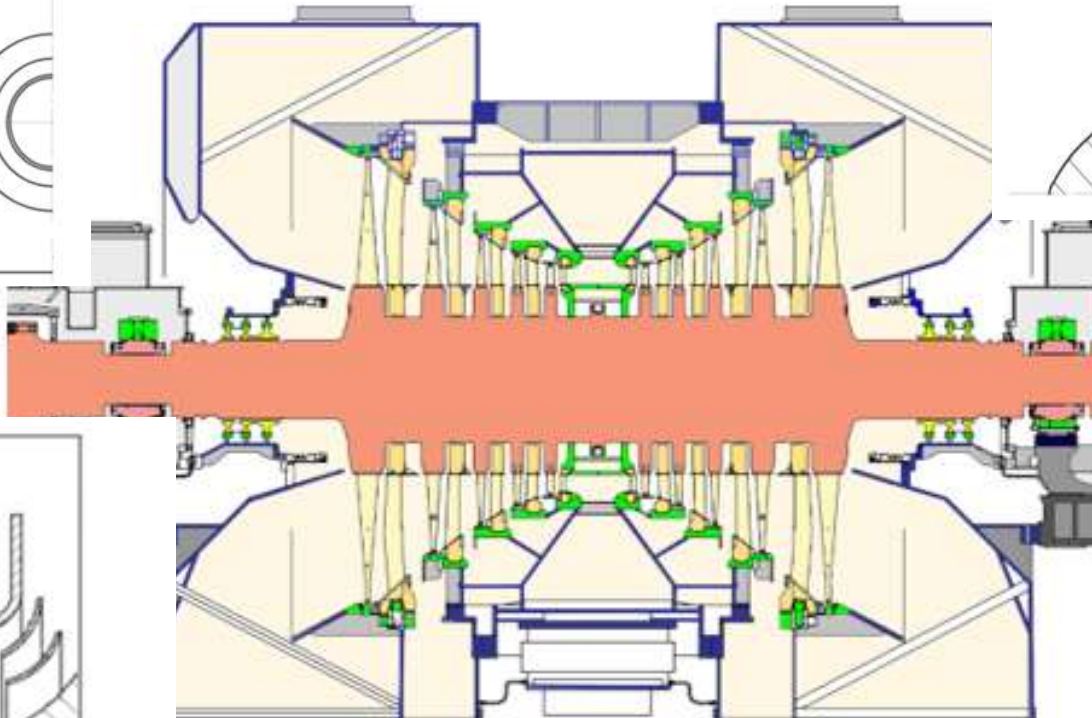
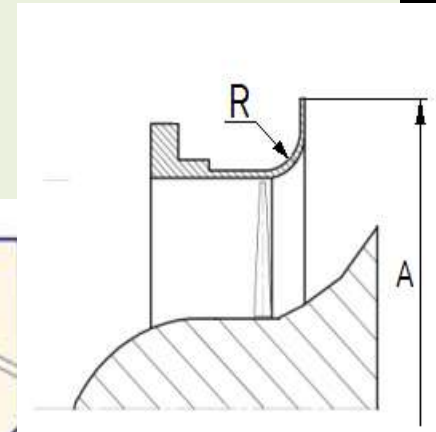
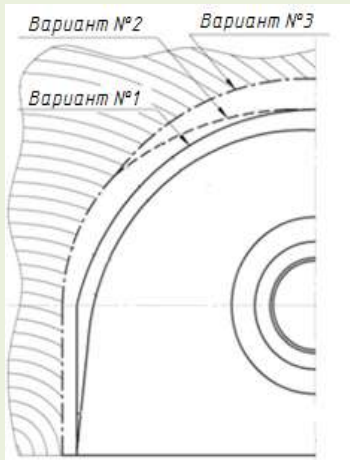
# Снижение потерь энергии в выхлопном патрубке



# Направления повышения эффективности паровых турбин АЭС

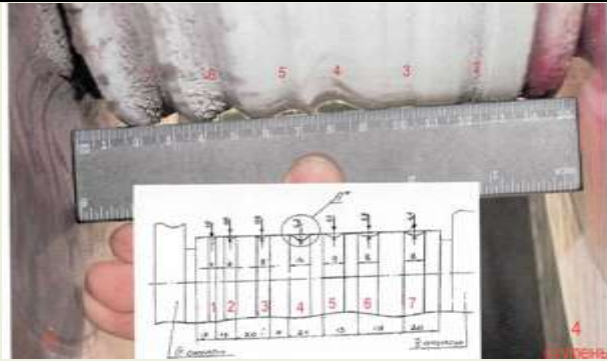


## Выхлопной патрубок ЦНД



- Оптимизация выхлопного патрубка ЦНД – 5,5 МВт для быстроходных и 3,5 МВт для тихоходных турбин;

# Эрозия рабочих лопаток под действием влаги.

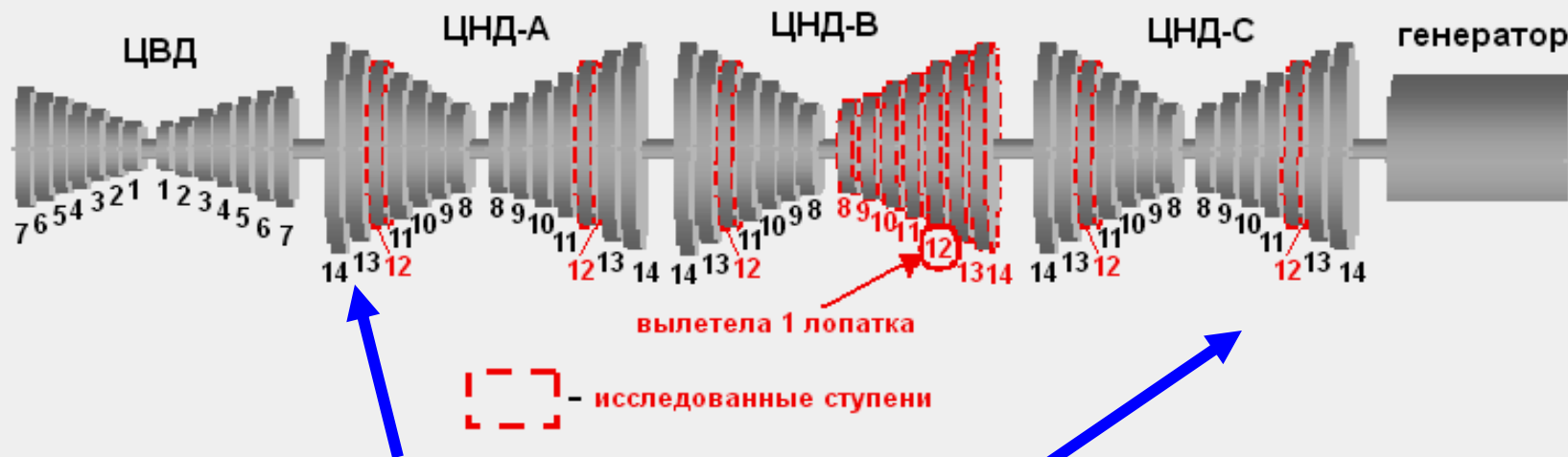




$M_{1t} = 1,18$

Волновая структура потока на насыщенном паре  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$

# Процессы во влажном паре не моделируются – необходимы эксперименты и натурные испытания на стендах



Всего повреждено 662 лопатки из 700 (95%).

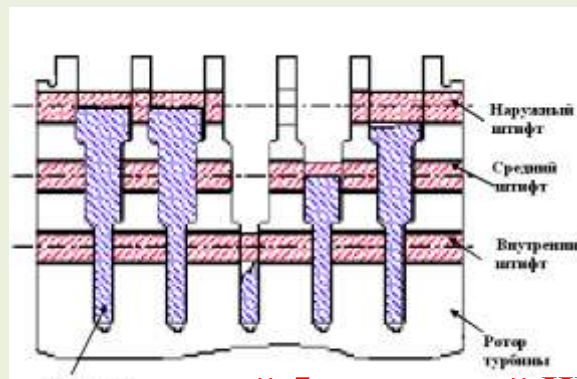
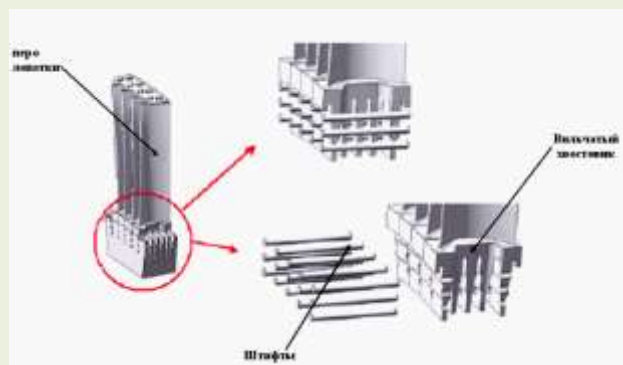
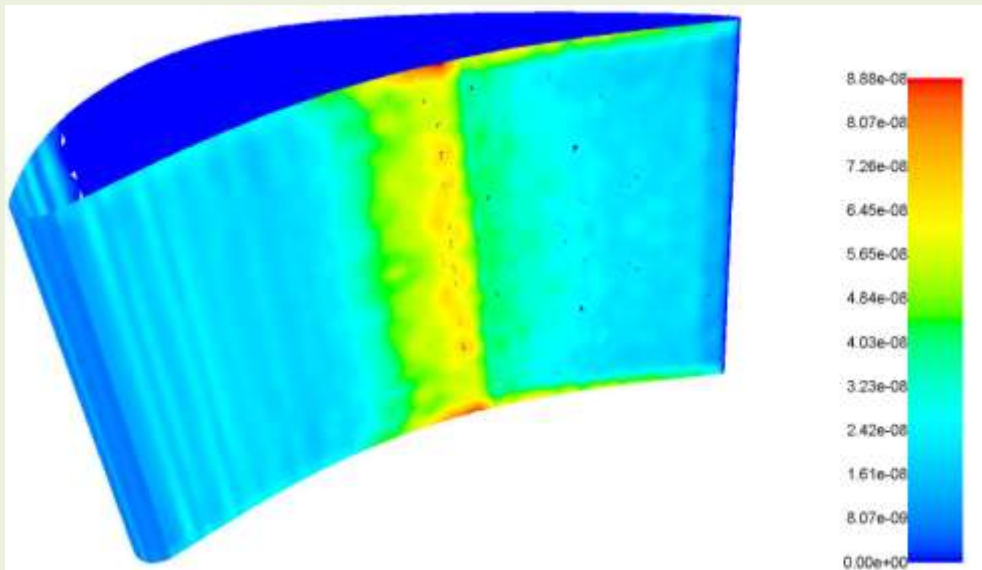
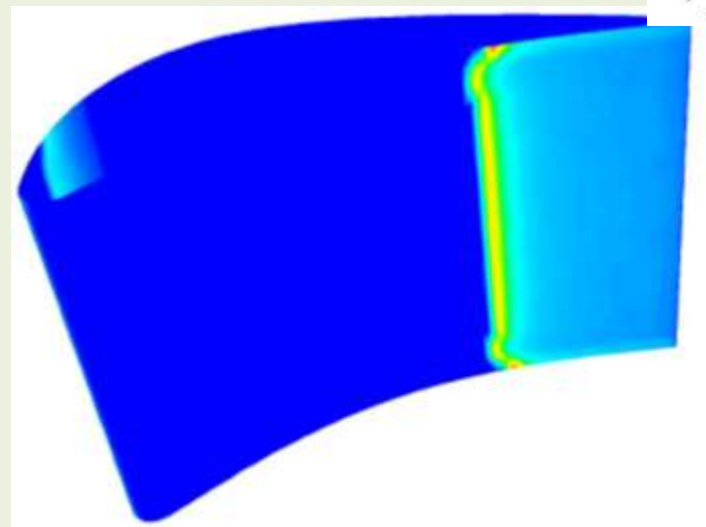


Схема ротора и статистика разрушений 5-х ступеней ЦНД

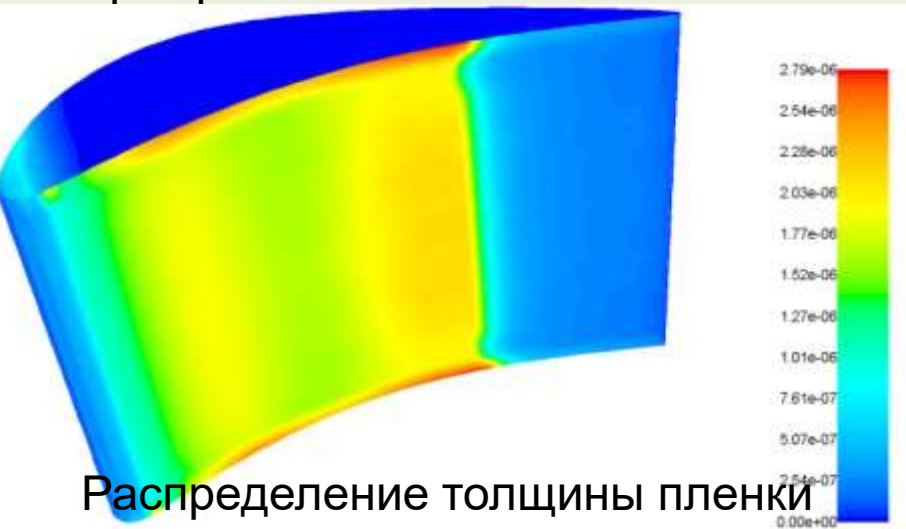
# Современные методы разрушения крупнодисперсной влаги



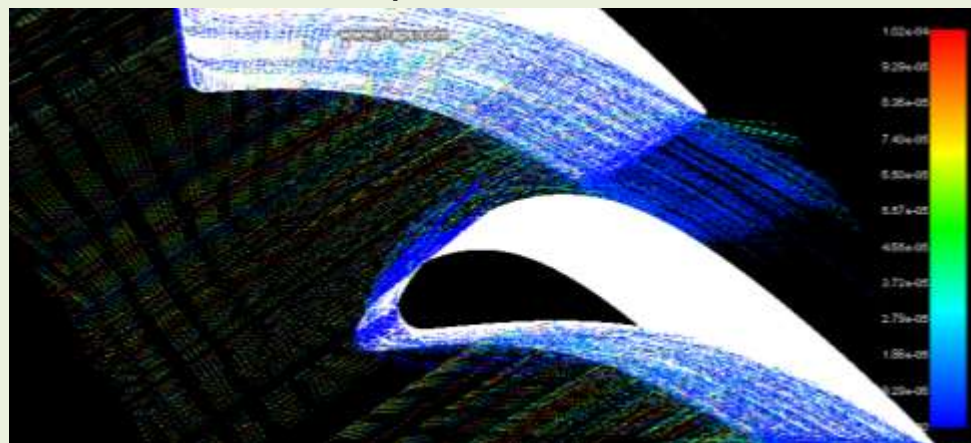
Формирование пленки



Область срыва капель с волн на поверхности пленки

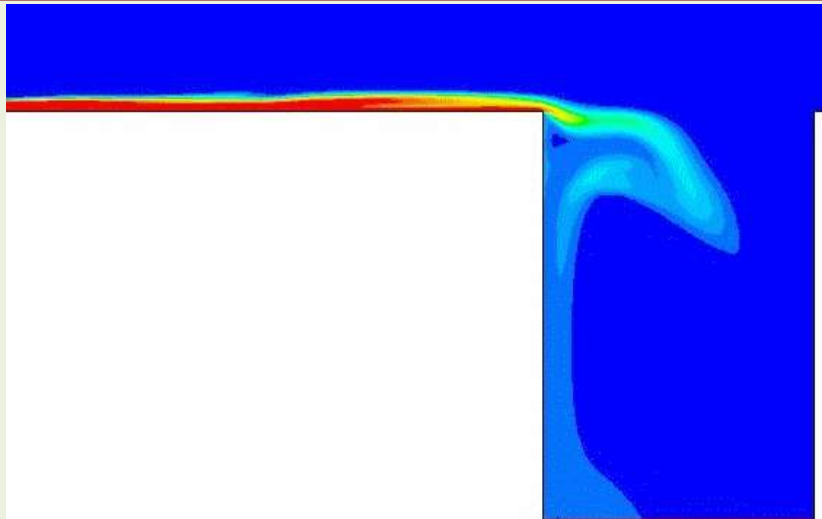


Распределение толщины пленки

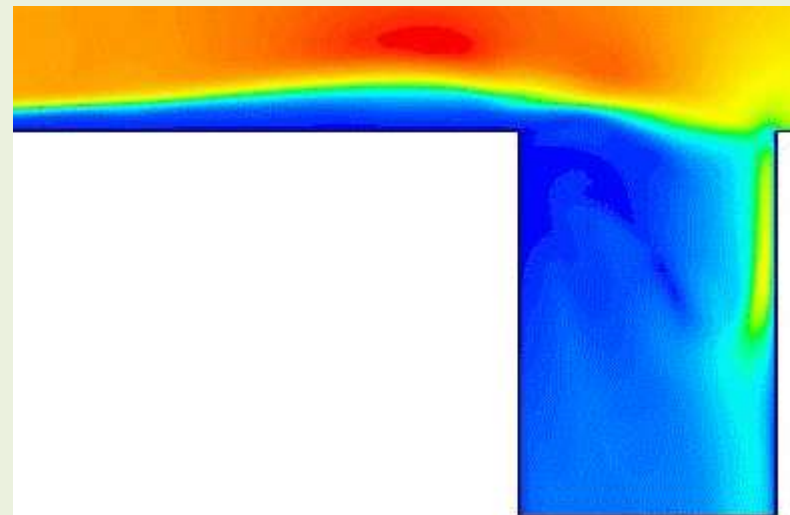


# Структура потока при истечении двухфазной среды в щель

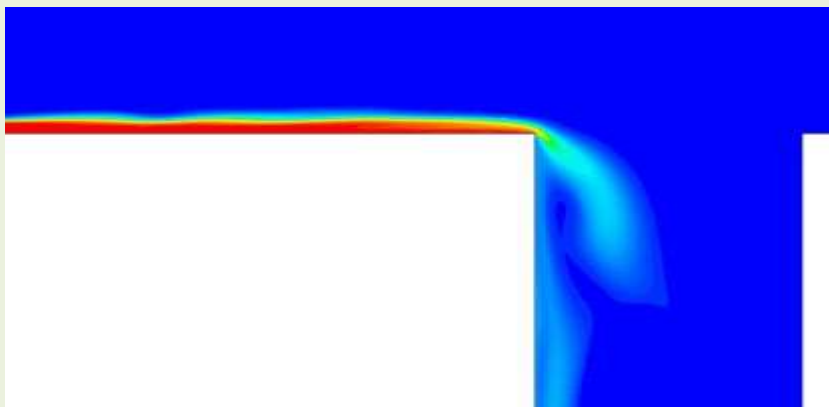
Распределение жидкой фазы в области щели в различные моменты времени для  $\pi = 0,915$



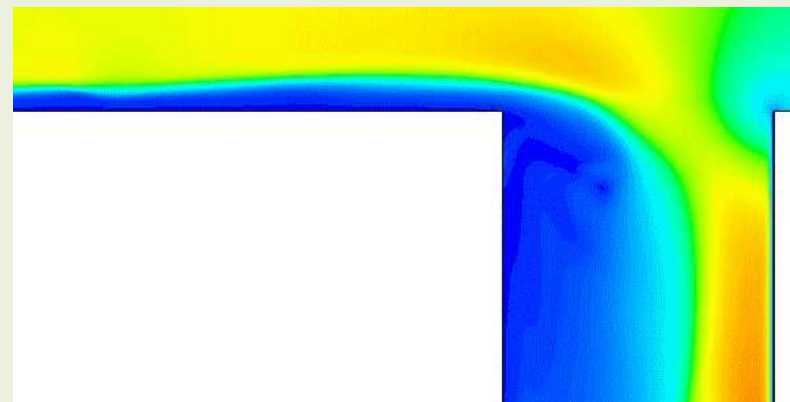
Скорости паровой фазы в области щели в различные моменты времени для  $\pi = 0,915$



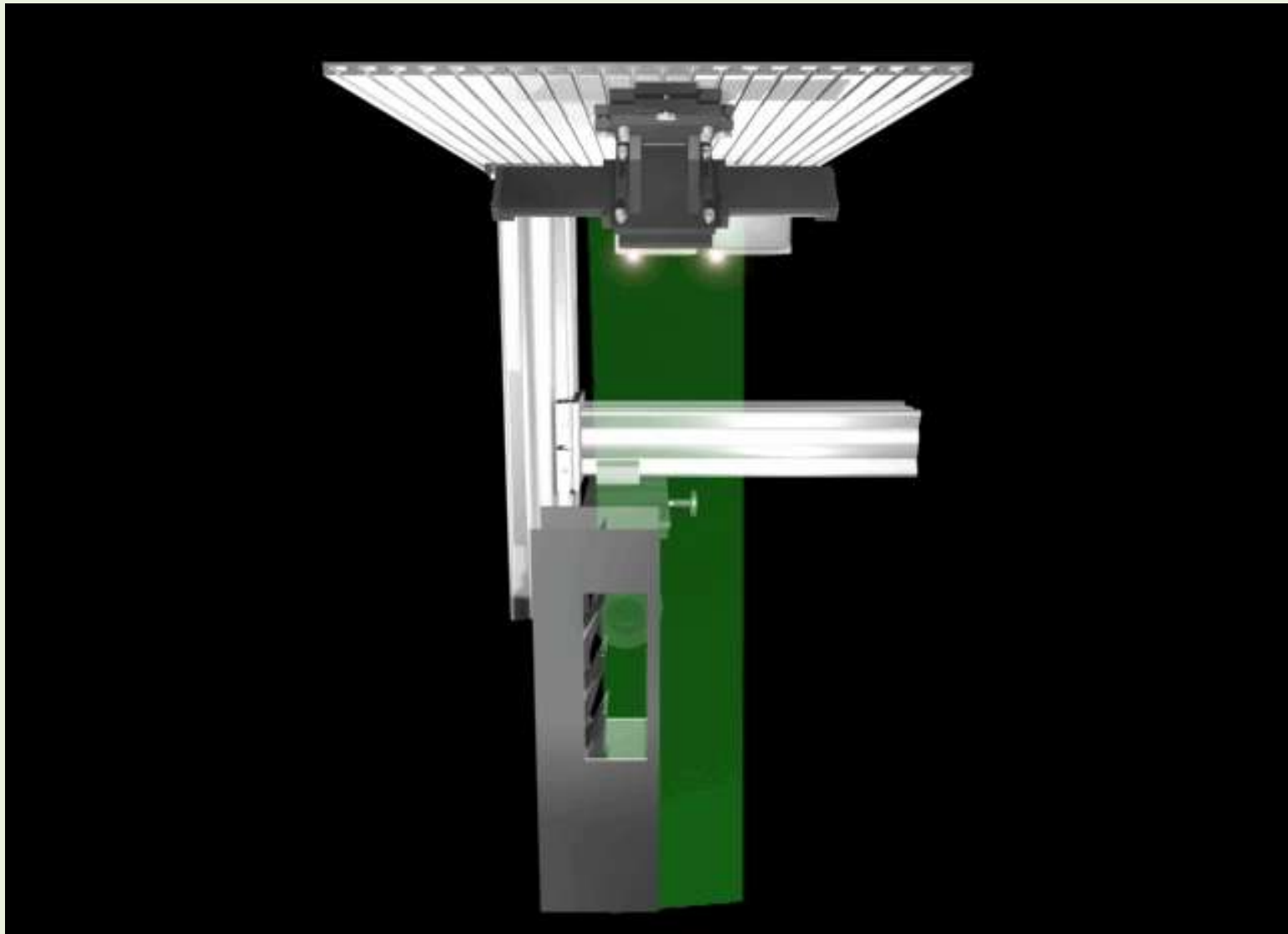
Распределение жидкой фазы в области щели в различные моменты времени для  $\pi = 0,716$



Скорости паровой фазы в области щели в различные моменты времени для  $\pi = 0,716$



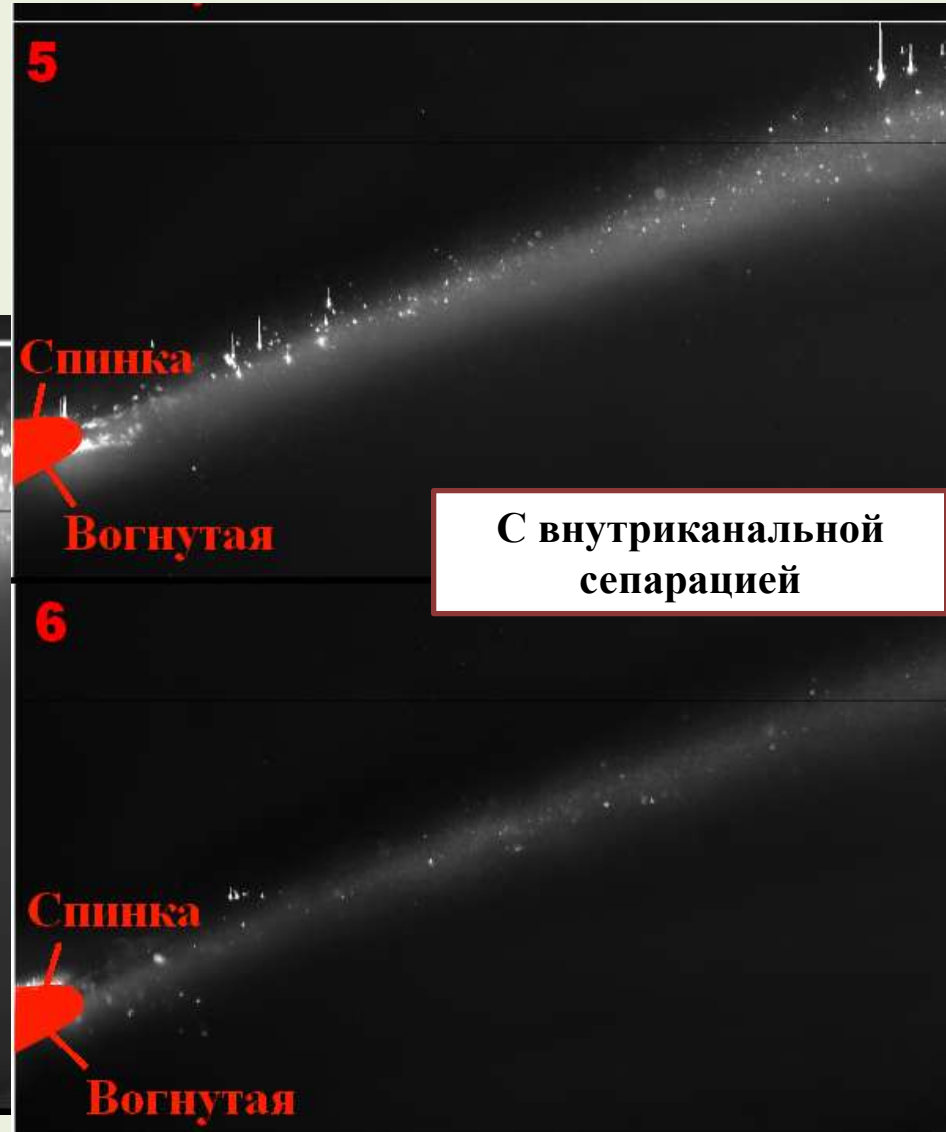
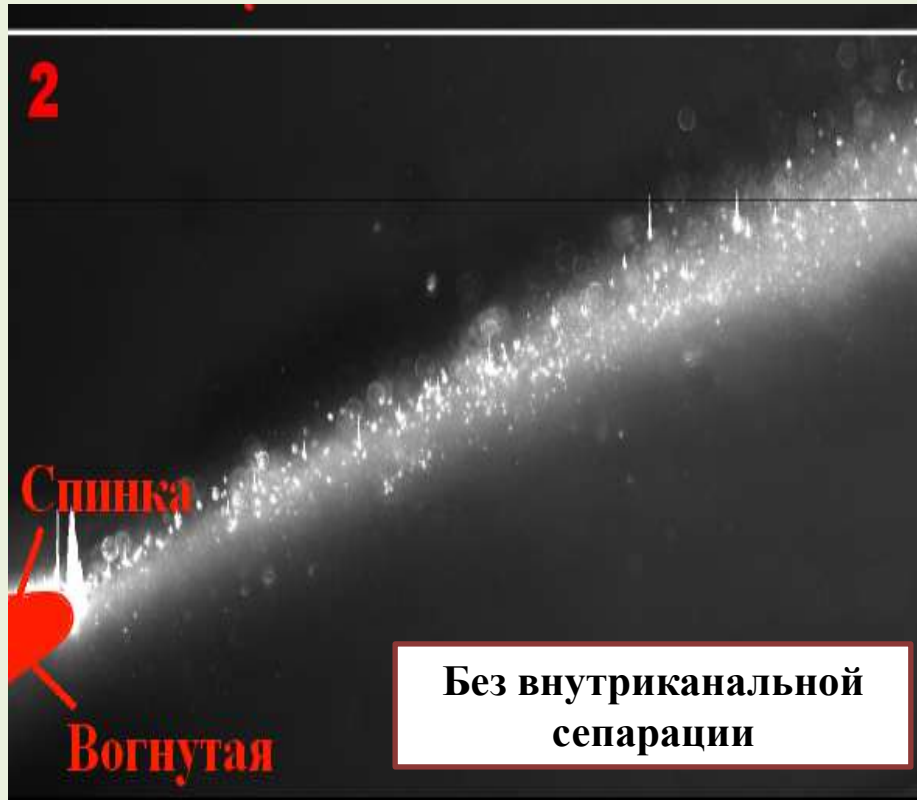
# Система лазерной диагностики «ПОЛИС»



# Лазерная диагностика течения- эффективный метод исследования газодинамических явлений в двухфазных потоках в турбомашинах



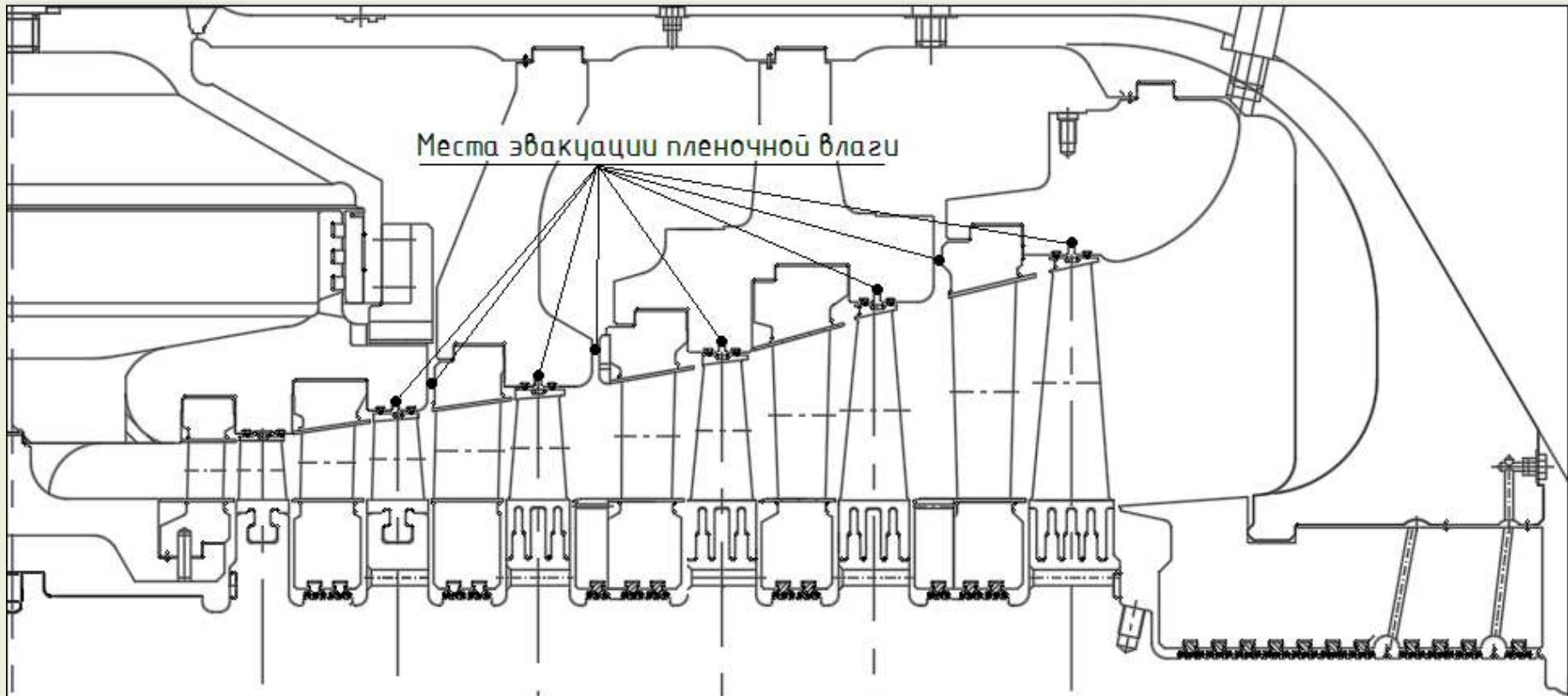
Влияние сепарации на количество  
крупных капель за решеткой на линии  
 $0,1b$  при  $y_0 = 3\%$



# Направления повышения эффективности паровых турбин АЭС



## Сепарация пленочной влаги из ЦВД



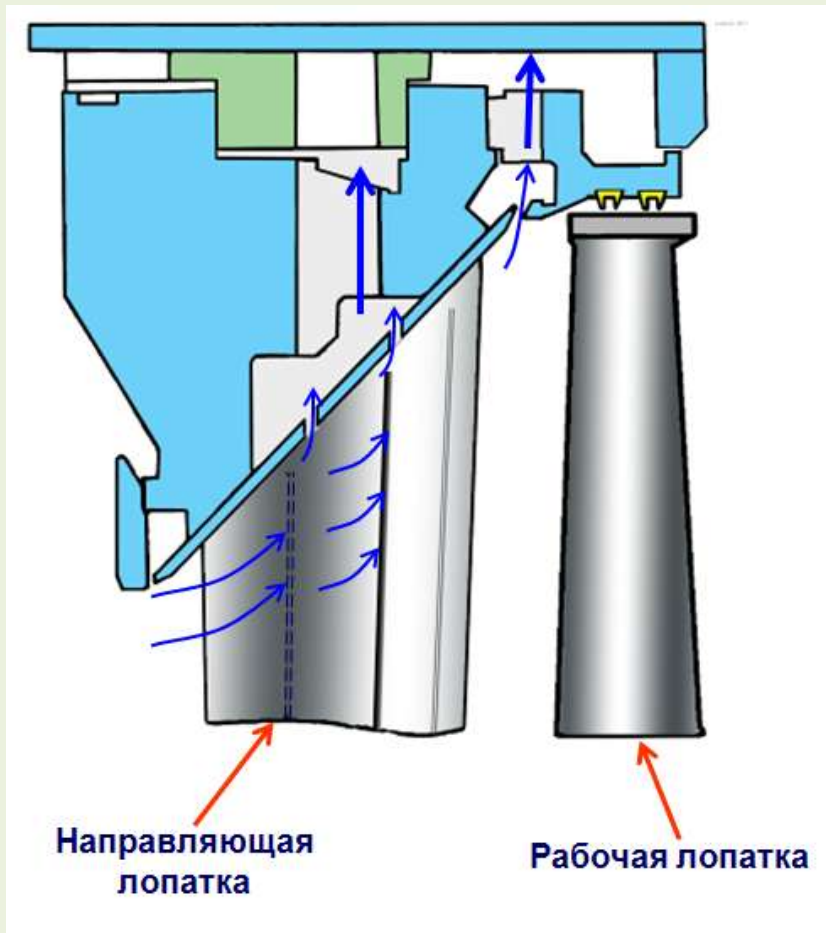
- По полученным результатам оптимизация системы удаления пленочной влаги повысит мощность как быстроходных, так и тихоходных турбин на 2,5 МВт.



# Направления повышения эффективности паровых турбин АЭС



## Влагоудаление в ступенях ЦНД



- На эффективность удаления пленочной влаги с поверхности сопловых лопаток влияет форма и геометрические размеры плоских щелей для отсоса влаги, а также места их расположения.
- По экспертной оценке усовершенствование системы влагоудаления в последней ступени может дополнительно увеличить мощность, как быстроходной, так и тихоходной турбины на 1,5 МВт





Разработка новых технических решений по предотвращению эрозии на основе результатов расчетно-экспериментальных исследований и анализа эффективности практического применения существующих активных и пассивных методов предотвращения эрозии лопаточного аппарата последних ступеней паровых турбин, работающих в области влажного пара.

## Полученные результаты:

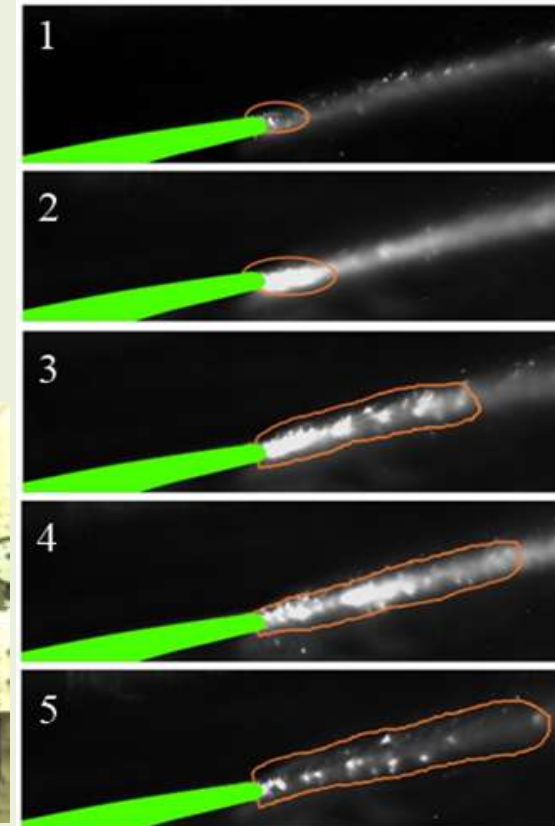
- Разработаны новые технические решения по предотвращению эрозии в последних ступенях ЦНД паровых турбин серии Т-100 и Т-250.
- Спроектирована диафрагма последней ступени ЦНД турбины серии Т-250 с системами обогрева и вдува греющего пара.
- Изготовлен опытный образец разработанного устройства по борьбе с эрозионным износом.



Опытный образец диафрагмы последней ступени

# Национальный исследовательский университет «МЭИ»

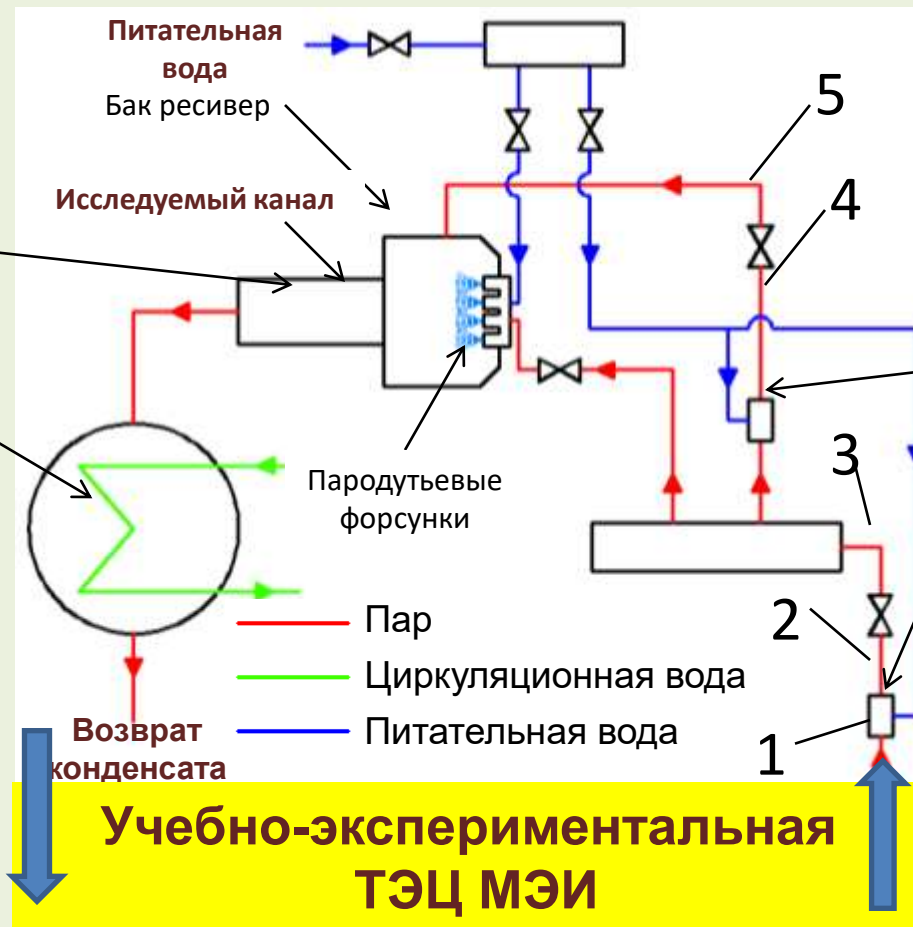
**Отладка и испытание предлагаемых технических решений в Проблемной лаборатории турбомашин кафедры паровых и газовых турбин МЭИ**



Расход воздуха  
до 4кг/сек  
Давление воздуха  
до 0.2 МПа



# Лабораторная база кафедры на ТЭЦ МЭИ



- Исследование течения перегретого, насыщенного и влажного пара
- Дозвуковое, транзвуковое и сверхзвуковое течение пара
- Рабочее тело поступает непосредственно из ТЭЦ МЭИ
- Возможность исследования каналов различной геометрии



NATIONAL  
RESEARCH  
UNIVERSITY

# Заключение

Результаты исследований показывают возможность прироста мощности до 6...8% в зависимости от исходного состояния проточной части и времени проектирования за счет совершенствования элементов проточной части.

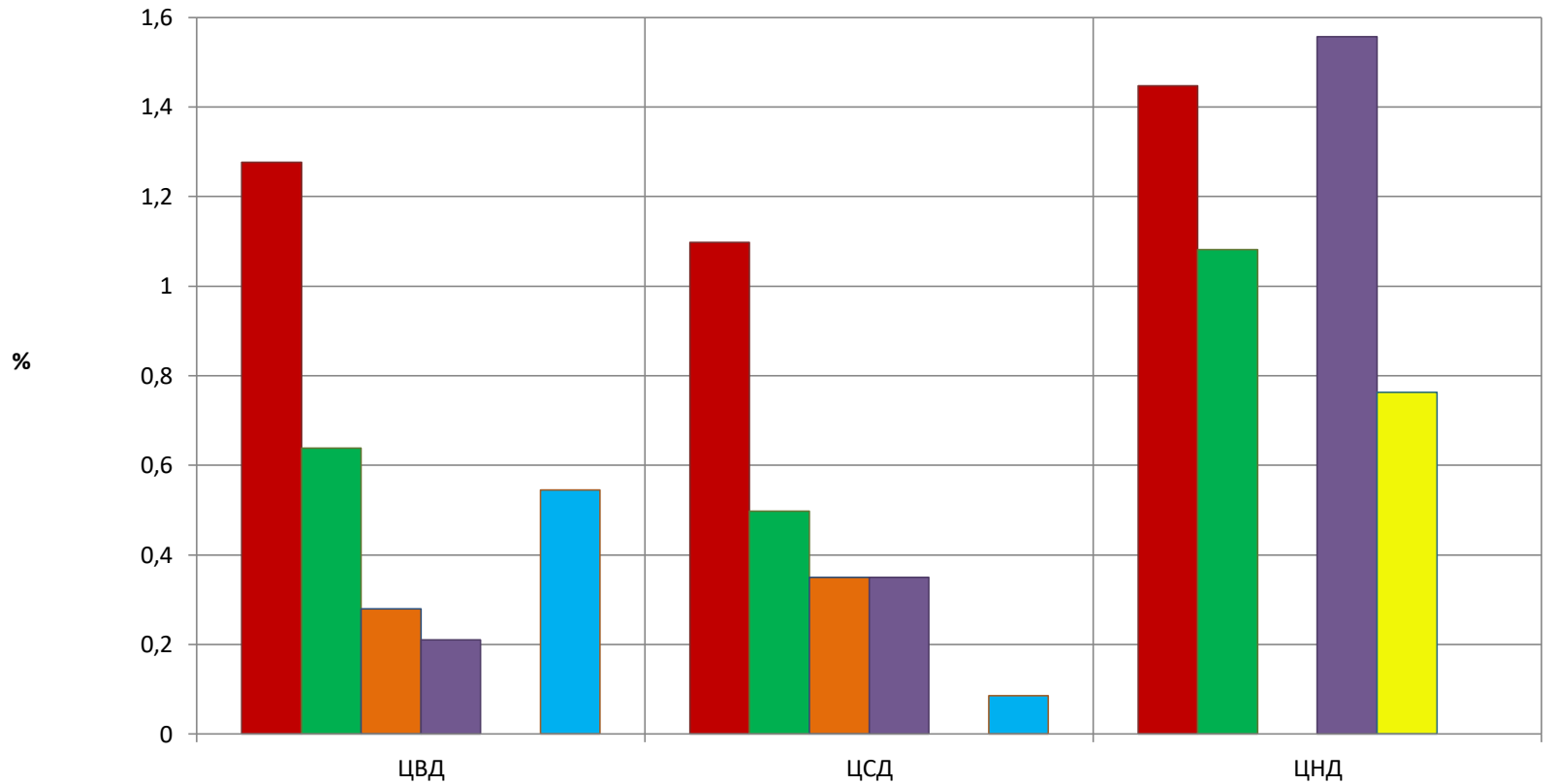
## Основные направления перспективных разработок по проточным частям паровых турбин ТЭС и АЭС

Снижение аэродинамических потерь энергии и повышение надежности элементов проточных частей турбин: системы паровпуска, лопаточного аппарата, уплотнений, переходных и выхлопных патрубков, снижение эрозионного износа и потерь от влажности. Разработка домашних кодов по 3d проектированию лопаточного аппарата с учетом особенностей движения жидкой фазы.

Расчетно-экспериментальные исследования и разработка типовых конструкций выхлопного отсека для мощных паровых турбин с рабочими лопатками предельной длины. Выхлопной отсек состоит из двух последних ступеней и диффузорного выхлопного патрубка.



# Относительное изменение мощности за счет снижения потерь энергии



■ Проточная часть   ■ Уплотнения   ■ Паровпуск   ■ Выхлопной патрубков   ■ Область влажного пара   ■ Перепускной патрубков



## Проведение испытаний на экспериментальных стендах необходимы для эффективной модернизации

Стенды кафедры позволяют провести испытания и получить необходимые для проведения эффективной модернизации паровых турбин ТЭС и АЭС расходные и динамические характеристики различных типов уплотнений при работе на воздухе и на влажном паре для выработки рекомендаций по их применению как для уменьшения протечек, так и для снижения уровня возбуждающих сил, вызывающих автоколебания и НЧВ роторов





**Спасибо за внимание!**

**Moscow Power Engineering Institute**

**Department of Steam and Gas turbines**

14a, Krasnokazarmennaya Street, Moscow, 111250, Russia

[Gribinvg@mpei.ru](mailto:Gribinvg@mpei.ru)

