

***Разработка и исследование нового цилиндра низкого давления (ЦНД)
повышенной пропускной способности для мощных конденсационных
паровых турбин***

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0072 от 05 июня 2014г. с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» на этапе № 4 в период с 01 января 2016 г. по 30 июня 2016 г. выполнены следующие работы:

- 1 Изготовлены узлы для модернизации экспериментального стенда для экспериментальной проверки эффективности системы организации регенеративных отборов.
- 2 Произведена модернизация экспериментального стенда для экспериментальной проверки эффективности системы организации регенеративных отборов.
- 3 Проведенные экспериментальные исследования модели новой системы организации регенеративных отборов пара из проточной части двухъярусного ЦНД.
- 4 Изготовлен экспериментальный стенд для исследования выхлопного патрубка двухъярусного цилиндра низкого давления.
- 5 Произведен монтаж экспериментального стенда для исследования выхлопного патрубка двухъярусного цилиндра низкого давления.
- 6 Проведенные экспериментальные исследования модели выхлопного патрубка двухъярусного ЦНД подтвердили эффективность его конструкции.
- 7 Изготовлена осесимметричная модель соплового аппарата последней ступени двухъярусного ЦНД.
- 8 Произведен Монтаж экспериментального стенда для исследования осесимметричной модели соплового аппарата последней ступени двухъярусного ЦНД.
- 9 Проведены экспериментальные исследования осесимметричной модели соплового аппарата последней ступени двухъярусного ЦНД.

При этом были получены следующие результаты:

1) Проведенные экспериментальные исследования модели системы организации регенеративных отборов показали большую перспективность новой системы регенеративного отбора для разрабатываемого двухъярусного ЦНД. Удалось в значительной мере уменьшить асимметрию структуры течения, вызванную регенеративным отбором пара. Это иллюстрируется рисунком 1, на котором представлено окружное распределение относительного полного давления за сопловой решеткой при различных

системах регенеративного отбора. Таким образом, окружная неравномерность была снижена в 5 раз, по сравнению с традиционной системой отбора, что превосходит требования ТЗ (пункт 4.2.2), где ставится цель достигнуть двукратного снижения. Стоит отметить, что разработанная модель новой системы регенеративного отбора через осерадиальный канал, образованный аэродинамическим отсекателем потока в межступенчатом зазоре отборного отсека ступеней, может быть применена не только в новом двухъярусном ЦНД, но и в обычных традиционных ЦНД, а также в цилиндрах высокого и среднего давления. Особую актуальность новая система регенеративного отбора может найти в теплофикационных турбинах, где имеют место большие отборы пара.

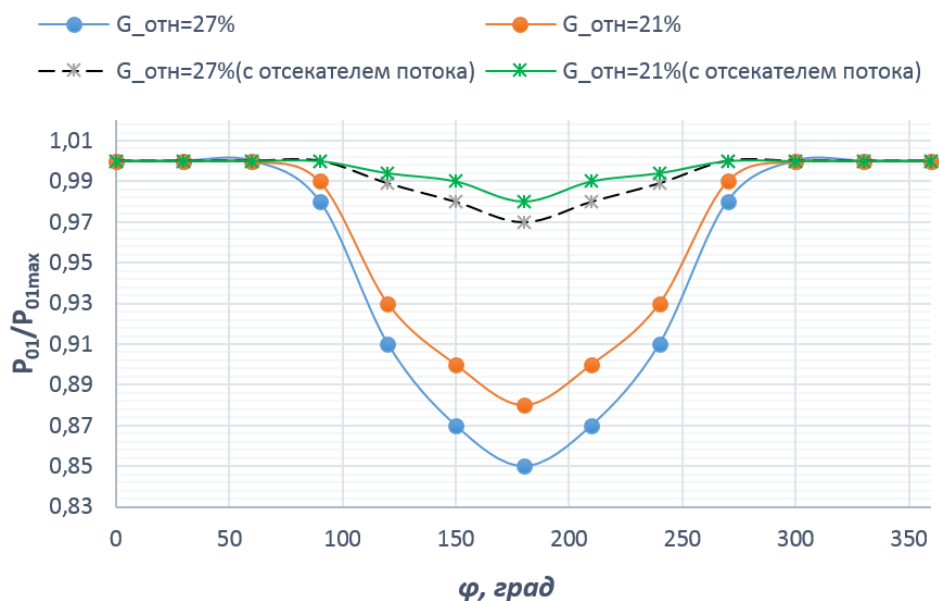


Рисунок 1 – Распределение относительного полного давления за сопловой решеткой при различных системах регенеративного отбора

2) Проведенные экспериментальные исследования модели выхлопного патрубка двухъярусного ЦНД подтвердили эффективность его конструкции, разработанной в третьем этапе настоящего проекта.

Как показали результаты испытаний выхлопного патрубка с традиционным осерадиальным диффузором, имеющим нулевую перекрышу относительно вершины последней лопатки, не происходит эффективного торможения потока, поскольку периферийная высокоскоростная струя, выходящая из радиального зазора, продолжает ускоряться на внешнем криволинейном обводе с последующим торможением в скачке уплотнения, за которым течение приобретает отрывной нестационарный характер.

Для обеспечения эффективного преобразования кинетической энергии потока в потенциальную необходимо устанавливать диффузоры с отрицательной перекрышей относительно вершины лопаток последней ступени, что обеспечивает почти равномерное поле скоростей на входе в диффузор. На рисунках 2 и 3 приведены значения коэффициента потерь

полученного в результате испытаний для различных вариантов установки перекрыши.

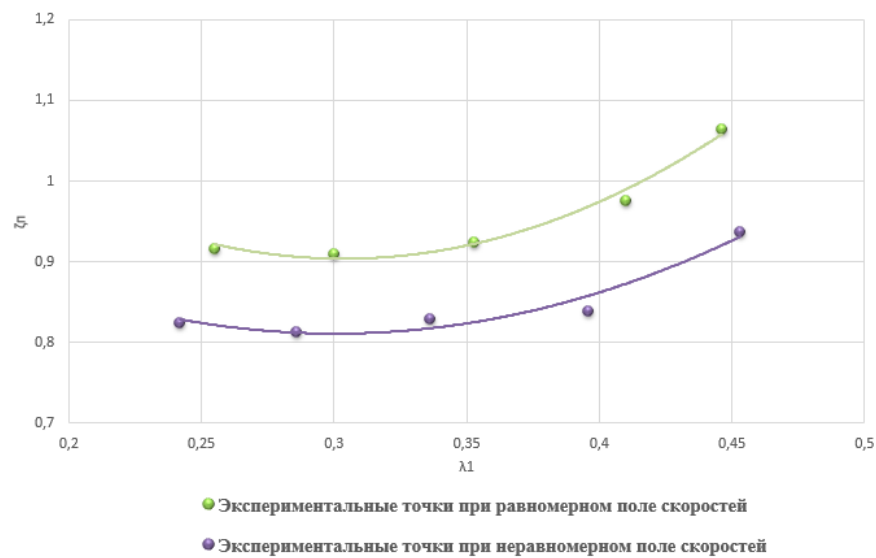


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента полных потерь ζ_p от безразмерной скорости λ_1 для модели патрубка с диффузором нижнего яруса, установленным с отрицательной перекрышей

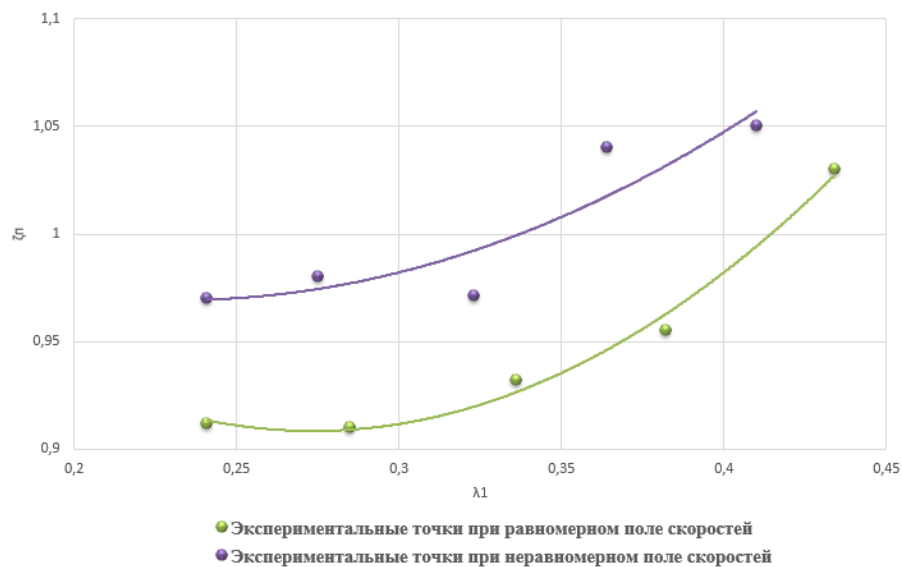
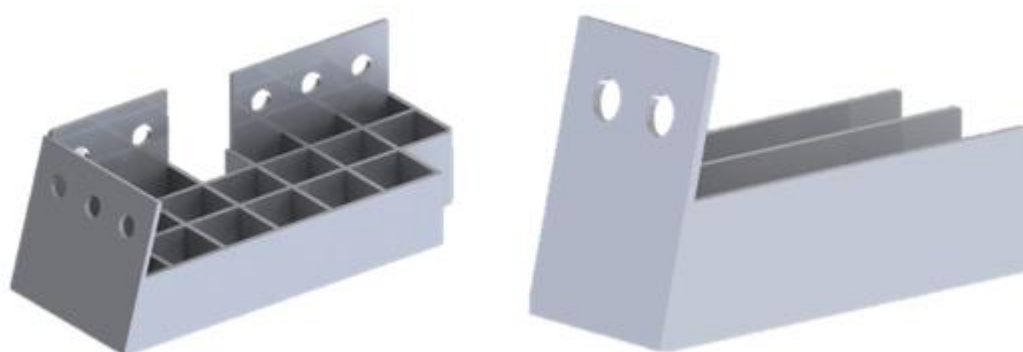


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента полных потерь ζ_p от безразмерной скорости λ_1 для модели патрубка с диффузором нижнего яруса, установленным с положительной перекрышей

Проведенные численные и экспериментальные исследования подтвердили сложный пространственный характер течения в корпусе выхлопного патрубка с формированием двух мощных вихревых шнуров, наличие которых на 45-50 % снижает эффективную проходную площадь в плоскости горизонтального разреза патрубка.

Экспериментально подтверждена эффективность комбинированной противовихревой решетки (рисунок 4), позволяющей на 20 % увеличить степень заполнения потоком выходного сечения выхлопного патрубка, что превышает значение, заявленное в ТЗ (пункт 4.3.1.1). На рисунке 4 приведены экспериментальные значения коэффициента потерь для патрубка с установленными решетками.



а) решетка основная

б) решетка дополнительная

Рисунок 4 - Противовихревая решетка

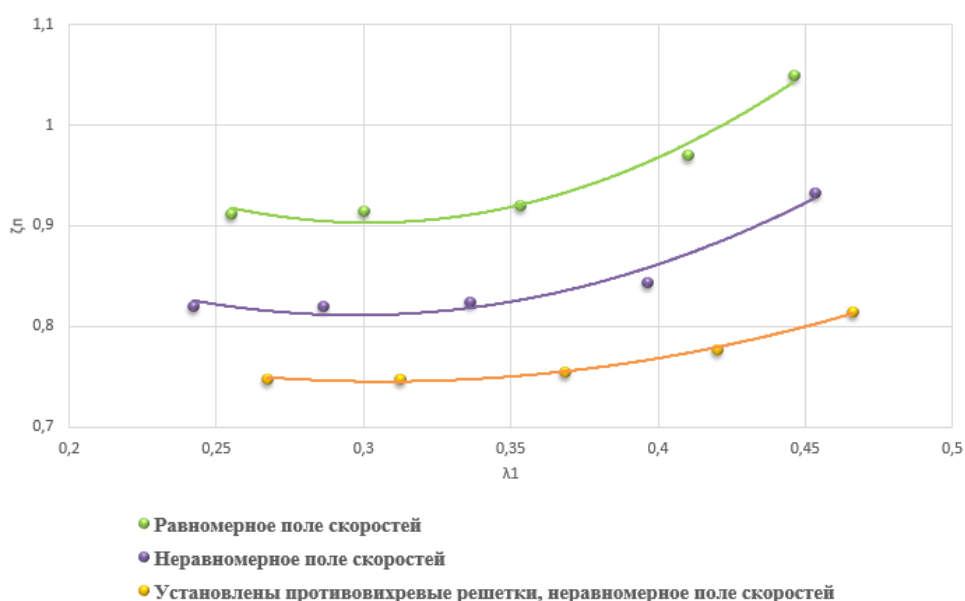


Рисунок 5 – Влияние противовихревых решеток на эффективность патрубка нижнего яруса с диффузором с отрицательной перекрышей

Коэффициент полных потерь разработанного выхлопного патрубка изменяется в диапазоне от 0,75 до 0,83, а для выхлопного патрубка верхнего яруса аналогичной конструкции от 0,68 до 0,75. Полученные значения меньше заявленного в пункте 4.3.1.1 ТЗ значения равного 1,15, что свидетельствует о выполнении поставленных целей.

3) В рамках проведенного экспериментального исследования осесимметричной модели соплового аппарата был подтвержден положительный эффект от применения специального дефлектора и отсоса пограничного слоя на аэродинамические характеристики соплового аппарата с большим углом раскрытия меридионального обвода.

Результаты опытов показали, что наиболее интенсивное снижение аэродинамических потерь наблюдается при величине отсоса от 0 до 2 %. При увеличении доли отсоса свыше 4 % аэродинамические потери начинают возрастать. Снижение аэродинамических потерь в оптимальном диапазоне доли отбираемой среды составляет примерно 0.7 %. Влияние применения данного мероприятия во всем исследуемом диапазоне можно оценить по рисункам 6 и 7.

Проведенные численные и физические эксперименты подтвердили эффективность применения аэродинамического дефлектора непосредственно перед сопловым аппаратом для ступеней с углом раскрытия меридионального обвода, равным 45° . В целом положительный эффект от применения аэродинамического дефлектора проявляется во всем исследуемом диапазоне безразмерных скоростей. При номинальных режимах работы решетки снижение аэродинамических потерь составляет порядка 2.9% (рисунок 7).

Наиболее эффективным мероприятием по борьбе с вихреобразованием в сопловом аппарате со значительным углом раскрытия меридионального обвода оказалась установка специального аэродинамического дефлектора. Более значительное снижение коэффициента потерь и сохранение расхода рабочего тела в ступени являются основными достоинствами данного способа по сравнению с отсосом пограничного слоя. Основными недостатками являются сложность профилирования и установки аэродинамического дефлектора.

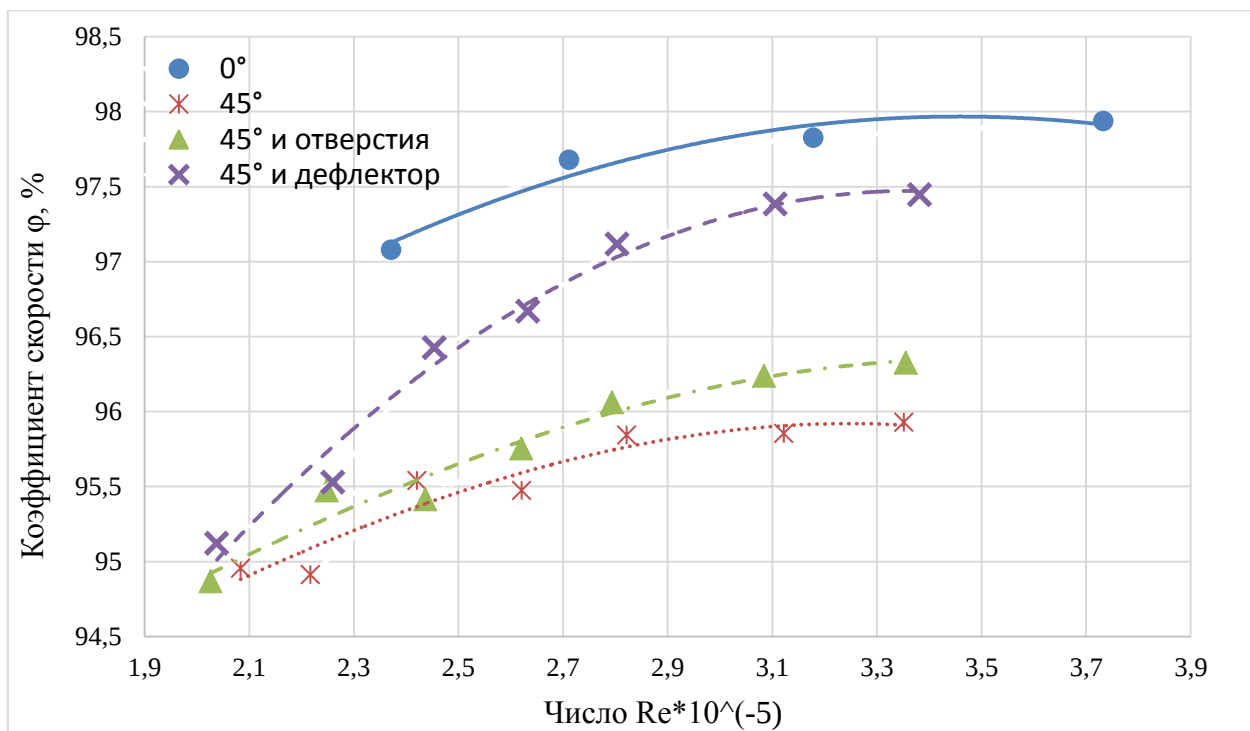


Рисунок 6 – Влияние числа Рейнольдса на коэффициент скорости моделей соплового аппарата

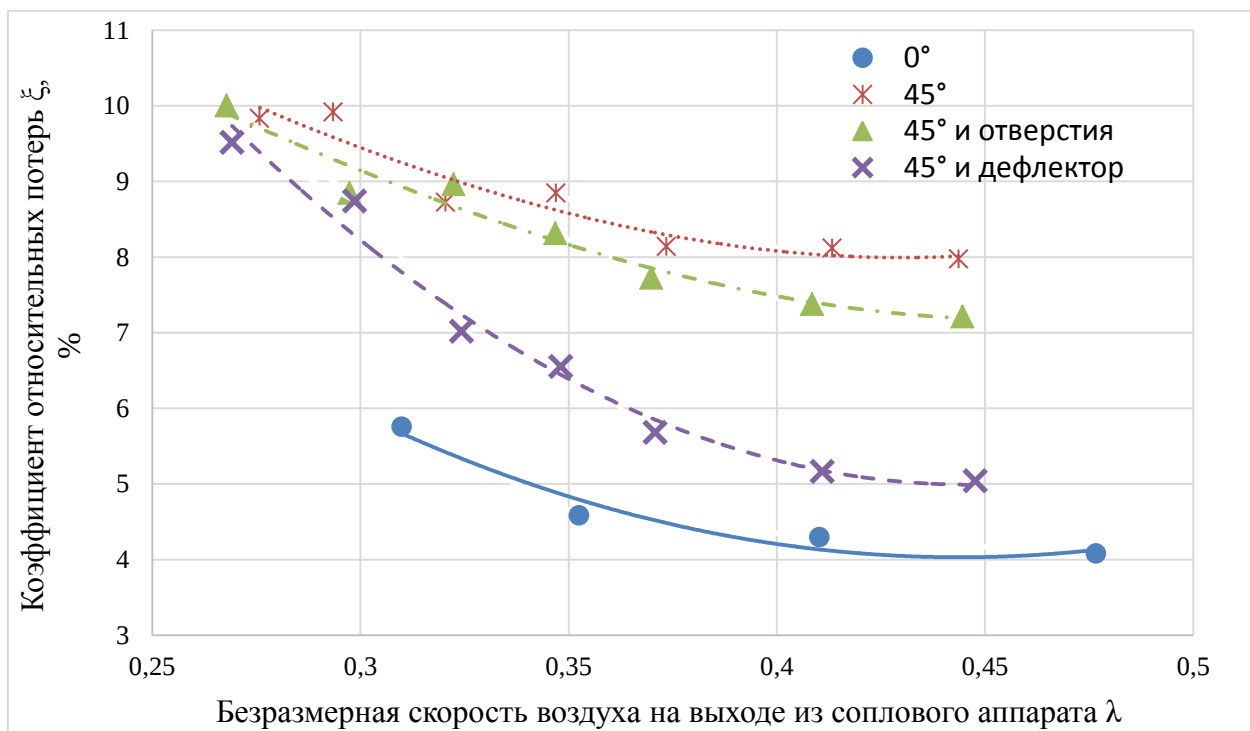


Рисунок 7 – Влияние безразмерной скорости на коэффициент относительных потерь моделей соплового аппарата

Оценка элементов новизны результатов работ по IV Этапу

Аналогичных конструкторских решений по части организации регенеративного обора с применением аэродинамических отсекающих в доступной научно-технической литературе обнаружено не было. Экспериментальные исследования влияния регенеративного отбора на КПД послеотборных ступеней не проводились с 70-х годов минувшего века, и содержали ограниченное количество данных (испытания проводились только на двух режимах). Поэтому выполненные испытания систем организации регенеративного отбора позволяют дополнить и уточнить существующие данные по влиянию отбора на эффективность проточной части.

Проблема влияния угла раскрытия проточной части активно исследовалась в период с 70-х по 90-е годы 20-го века. Однако, полученные решения подразумевали, как правило, воздействие на реактивность и характер проточной части. Так же обозначалась потенциальная эффективность применения отсоса пограничного слоя в периферийном сечении. Научная новизна в решении обозначенной проблемы состоит в экспериментальном доказательстве эффективности аэродинамического дефлектора.

Оценка соответствия полученных результатов работы техническим требованиям к выполнению проекта, и оценка перспектив продолжения проекта

Все обозначенные в Плане-графике работы выполнены в полном объеме. Полученные результаты полностью соответствуют требованиям технического задания, и позволяют перейти к экспериментальным исследованиям, запланированным на V этап реализации проекта.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.