

На правах рукописи



Хоанг Ван Чунг

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ТРАКТА
ГТУ D – КЛАССА**

Специальность: 05.04.12 - «Турбомашины и комбинирование турбоустановки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Черников Виктор Александрович

Официальные оппоненты: **Хоменок Леонид Арсеньевич**
доктор технических наук, профессор
Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург, заведующий аналитическим отделом главных научных сотрудников

Ферафонтьев Юрий Викторович

кандидат технических наук

Публичное акционерное общество «Силовые машины - ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», г. Санкт-Петербург, начальник отдела исследований и испытаний паровых турбин

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» декабря 2019 г. в 16.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<http://www.spbstu.ru>).

Автореферат разослан «____»

2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д 212.229.06, к.т.н., доцент

Талалов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наряду с увеличением населения в отдельных странах и в мире в целом растет спрос на электроэнергию. Развитие тепловых электростанций, работающих с использованием газовых турбин, в настоящее время является современной тенденцией.

В последний период времени одним из направлений по совершенствованию стационарных ГТУ, является переход от одновальных к двухвальным конструкциям, что влечёт за собой новую компоновку оборудования комбинированных станций, при которой электрогенератор должен располагаться за силовой турбиной. В этих условиях, для таких специальных двухвальных ГТУ возникла необходимость отвода горячих газов к котлу-утилизатору с помощью выходного патрубка. Таким образом выходной тракт двухвальных ГТУ изменяется по сравнению с традиционными одновальными установками и представляет из себя сочетание осевого диффузора и выходного патрубка. Поэтому исследования аэродинамики такого тракта становятся актуальными.

Актуальность работы:

1. Переход стационарного газотурбостроения к двухвальным конструкциям ГТУ с возможностью оптимизации турбокомпрессора.
2. Для такого типа стационарных газовых турбин впервые применен выходной тракт с односторонним отводом рабочего тела.
3. Отсутствие экспериментальных данных по структуре 3D потока в выходных трактах с односторонним отводом рабочего тела при наличии развитого диффузора, восполняется экспериментальными и расчётными данными, приведенными в диссертации.

Цели и задачи диссертационного исследования. Целью диссертации является экспериментальное определение структуры 3D потока в проточной части тракта «Диффузор-Патрубок» и его интегральных характеристик в блоке с предвключенной турбинной ступенью.

Задачи исследования:

1. Проектирование модельного отсека «Д – П» и модельного отсека «С – Д – П».
2. Разработка методики экспериментального исследования.
3. Проведение экспериментальных исследований с предвключенной турбинной ступенью и без нее.
4. Сравнительный анализ полученных данных.
5. Численные исследования выходного тракта.

Соответствие диссертации пунктам Паспорта Научной специальности. Диссертационное исследование соответствует специальности 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки» по следующим пунктам, указанным в Паспорте научной специальности:

п.1 Разработка научных основ изучения физико-химических, гидрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов, общих свойств и принципов функционирования отдельных узлов и механизмов, а также основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок.

п.3 Экспериментальные исследования в области деформирования, прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов, циклов, схем, режимов работы основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок.

Научная новизна:

1. Разработана усовершенствованная методика постановки опытных исследований обработки экспериментальных данных, а также оценки показателей выходного тракта ГТУ D-класса энергетической газовой турбины.
2. Получение интегральных характеристик блока «Диффузор- Патрубок» и тракта «Ступень – Диффузор – Патрубок».
3. Мероприятия по улучшению аэродинамических качеств выходного тракта.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная методика экспериментальных исследований блока «Ступень – Диффузор – Патрубок».
2. Результаты опытных исследований аэродинамических интегральных характеристик блока «Ступень – Диффузор – Патрубок» новой перспективной ГТУ D-класса.
3. Сравнительные опыты на стенде ЭТ4 лаборатории турбиностроения модели «Ступень – Диффузор – Патрубок» и модели «Диффузор – Патрубок» (без предвключённой ступени).
4. Численные исследования аэродинамических качеств блока «Диффузор – Патрубок» с использованием данных измерений 3D-потока, генерируемого последней ступенью газовой турбины.
5. Рекомендации по совершенствованию выходного тракта ГТУ D-класса.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Усовершенствована и практически опробована методика экспериментальных аэродинамических исследований.

2. Экспериментально исследованы трехмерные распределения скоростей и параметров потока в различных сечениях проточной части входного тракта стационарной ГТУ двухвального типа.
3. В результате получены величины к.п.д., коэффициентов восстановления давления и потерь кинетической энергии потока на различных участках выходного тракта ГТУ D-класса.
4. Представленные в работе материалы дают возможность их использования при проектировании новых и модернизации имеющихся стационарных газовых турбин с целью повышения их экономичности.

Методология и методы исследования. Объект исследования – модель выходного тракта диффузор – патрубков с предвключенной ступенью турбины ГТУ D – класса и отдельная модель выходного тракта без ступени на стенде ЭТ4–С–Д–П Лаборатории турбиностроения имени И.И. Кириллова СПбГПУ.

Методы исследования. В диссертации использованы вышеуказанные экспериментальные методы, базирующиеся на применении основных физических законов. Для проведения численных исследований приведена расчетная модель с использованием пакетов конечно-элементного анализа ANSYS CFX. При проведении экспериментов и вычислительных исследований использовались методы физического моделирования и математические методы расчёта.

Личный вклад автора в разработку проблемы:

1. Проектирование моделей и участие в монтаже моделей выходного тракта ГТУ D–класса на экспериментальном стенде ЭТ-4 Лаборатории турбиностроения СПбПУ.
2. Участие в экспериментальных и численных исследованиях потока в выходном тракте «С–Д–П» газовой турбины ГТУ D–класса в группе аэродинамики Лаборатории турбиностроения СПбПУ.
3. Участие в обработке данных, расчете, анализе экспериментов.
4. Численное исследование блока «Диффузор–Патрубок» с помощью кода ANSYS CFX.

Апробация результатов работы:

1. Неделя науки СПбГПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ (Санкт – Петербург, 2018 г. – ч. 1. – С. 104 – 106).
2. Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей третьей международной научной конференции (Казань, 2019 г. С. 245 – 247.).

3. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей четвертой международной научной конференции (Казань, 2019 г. С. 54 – 56.).

Структура и объём работы. Квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы из 59 наименования. Текст диссертации изложен на 109 страницах, содержит 59 рисунков, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведены цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, даны основные её характеристики.

Первая глава посвящена обзору литературы, рассмотрены также характеристики диффузоров и рабочий процесс в диффузоре, особенности аэродинамических процессов в диффузоре при работе ГТУ в переменной части графика нагрузки, характерные особенности выходных устройств современных стационарных ГТУ. Указаны особенности конструкции выходного тракта двухвальных ГТУ D-класса. Конструктивная особенность этого тракта - одностороний отвод рабочего тела от турбины. Этим обусловлены аэродинамические проблемы, возникающие при проектировании выходных трактов диффузор-патрубок (Д-П) и профилировании последних ступеней газовых турбин. При создании новых стационарных ГТУ большой единичной мощности основной проблемой проектирования выходных трактов является отсутствие достаточно точных их аэродинамических характеристик в реальных условиях, то есть в условиях подвода трехмерного нестационарного потока, генерируемого последней ступенью турбины. Проблеме конструирования и совершенствования выходных трактов посвящено множество работ. Однако подавляющая часть этих работ выполнена без предвключённой турбинной ступени, что делает результаты таких исследований недостаточно точными для современных ГТУ большой единичной мощности.

Вторая глава содержит методику экспериментального исследования выходного тракта ГТУ, описание экспериментального стенда ЭТ4 для испытания выходных систем конструкции, таких как моделей выходного тракта «Диффузор - Патрубок» (Д-П) и «Ступень - Диффузор - Патрубок» (С-Д-П) ГТУ D-Класса. В этой главе в завершении приводится, схема измерений модельного блока «Д-П» и «С-Д-П», описывается информационно-измерительные системы стенда ЭТ4 для экспериментального исследования блока выходного тракта ГТУ.

На рисунок 1 представлен продольный разрез стенда ЭТ4–С–Д–П с предвключенной модельной турбинной ступенью, ПНА и дренированной силовой стойкой. Характерной особенностью конструкции стенда ЭТ4–СДП, является возможность траверсирования неосесимметричного 3D потока по площади в контрольных сечениях за РК и за силовыми стойками. С этой целью патрубков и отводящий рабочую среду тракт выполнены поворотными с осью вращения, совпадающей по направлению с осью ротора турбины. Главной отличительной черта экспериментального стенда ЭТ4 - наличие за диффузором модели коллектор-бокса для отвода паточка от турбины в направлении перпендикулярном её оси.

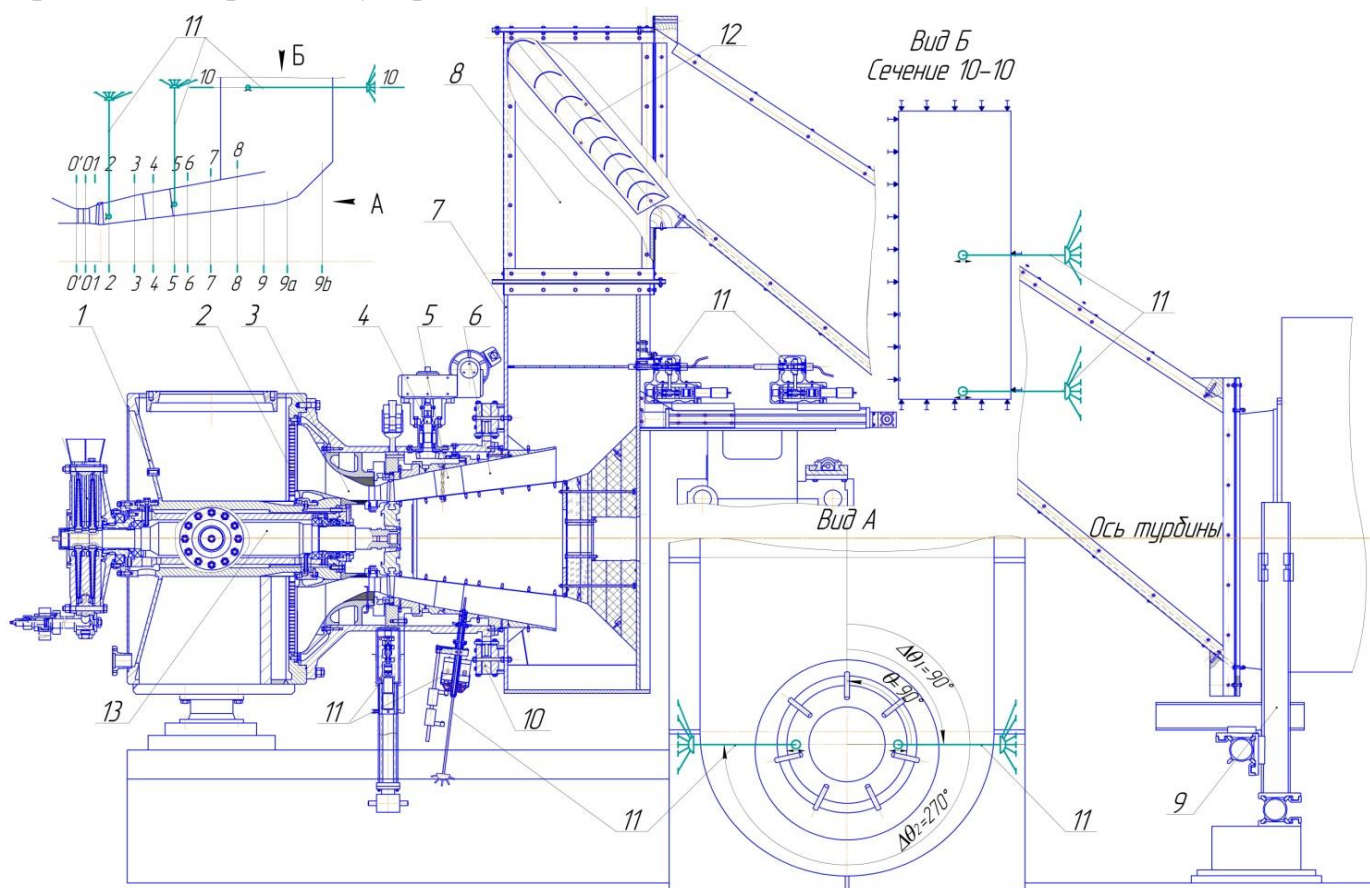


Рисунок 1. Продольный разрез стенда ЭТ4–СДП с предварительным направляющим аппаратом (ПНА)

1 – уравнивательный бак; 2 – хоникомб; 3 – подводящий тракт; 4 – поворотный механизм; 5 – силовая стойка (7 штук); 6 – диагональный диффузор; 7 – выходной патрубок; 8 – отводящий тракт; 9 – задняя роликовая опора отводящего тракта; 10 – передняя радиально-упорная шарикоподшипниковая опора патрубка и отводящего тракта; 11 – пятиканальные пневмометрические векторные зонды; 12 – поворотная лопаточная решетка отводящего тракта; 13 – вал ротора.

В таблице 1 приведены рассчитанные для природы и измеренные в модели определяющие критерии подобия потоков при входе в выходной тракт ГТУ. Имеющиеся отклонения чисел M_2 и Re_2 не могут оказать заметного влияния на основные характеристики исследуемой модели.

На рисунок 2 представлена схема измерений стенда ЭТ4–С–Д–П с ПНА в потоке данной модели. Характерными особенностями схемы измерений являются траверсирование неосесимметричного потока в сечи 2-2 посредством поворота коллектор-бокса вокруг оси диффузора при неподвижных измерительных приборах и дренажах в диффузоре. В схеме предусмотрено траверсирование 3D - полей скоростей и параметров потока термоанемометром Flow Master и 6-канальным зондом United Sensor.

Таблица 1. Характерные константы, параметры потока и критерии подобия для натурального и модельного выходного тракта «Диффузор – Патрубок» и «Ступень – Диффузор – Патрубок»:

Наименование и формула	Размер	Величина		
		Природа	Модель «Д-П»	Модель «С-Д-П»
Число Маха при входе в диффузор $M_2 = \frac{c_2}{a_2}$	–	0,369	0,300	0,280
Местная скорость звука $a_2 = \sqrt{kRT_2}$	$\frac{м}{с}$	568	346	355,8
Местная приведенная скорость $\lambda_2 = \frac{c_2}{a_2^*}$	–	0,396	0,327	0,3667
Критическая скорость $a_2^* = \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1} RT_2^*\right)}$	$\frac{м}{с}$	529,5	318,7	328,2
Число Рейнольдса при входе в диффузор $Re_2 = \frac{c_2 2l_2 \rho_2}{\mu}$	–	$2,01 \cdot 10^6$	$0,96 \cdot 10^6$	$0,96 \cdot 10^6$
Скорость потока c_2 при входе в диффузор	$\frac{м}{с}$	209,8	104,3	127

Наименование и формула	Размер	Величина		
		Натура	Модель «Д-П»	Модель «С-Д-П»
Показатель изоэнтропы $k = \frac{c_p}{c_v}$	—	1,3518	1,40	1,40
Газовая постоянная R	$\frac{Дж}{кгК}$	286,7	287,1	287,1
Температура газа T_2 при входе в диффузор	°C	559,5	96	42

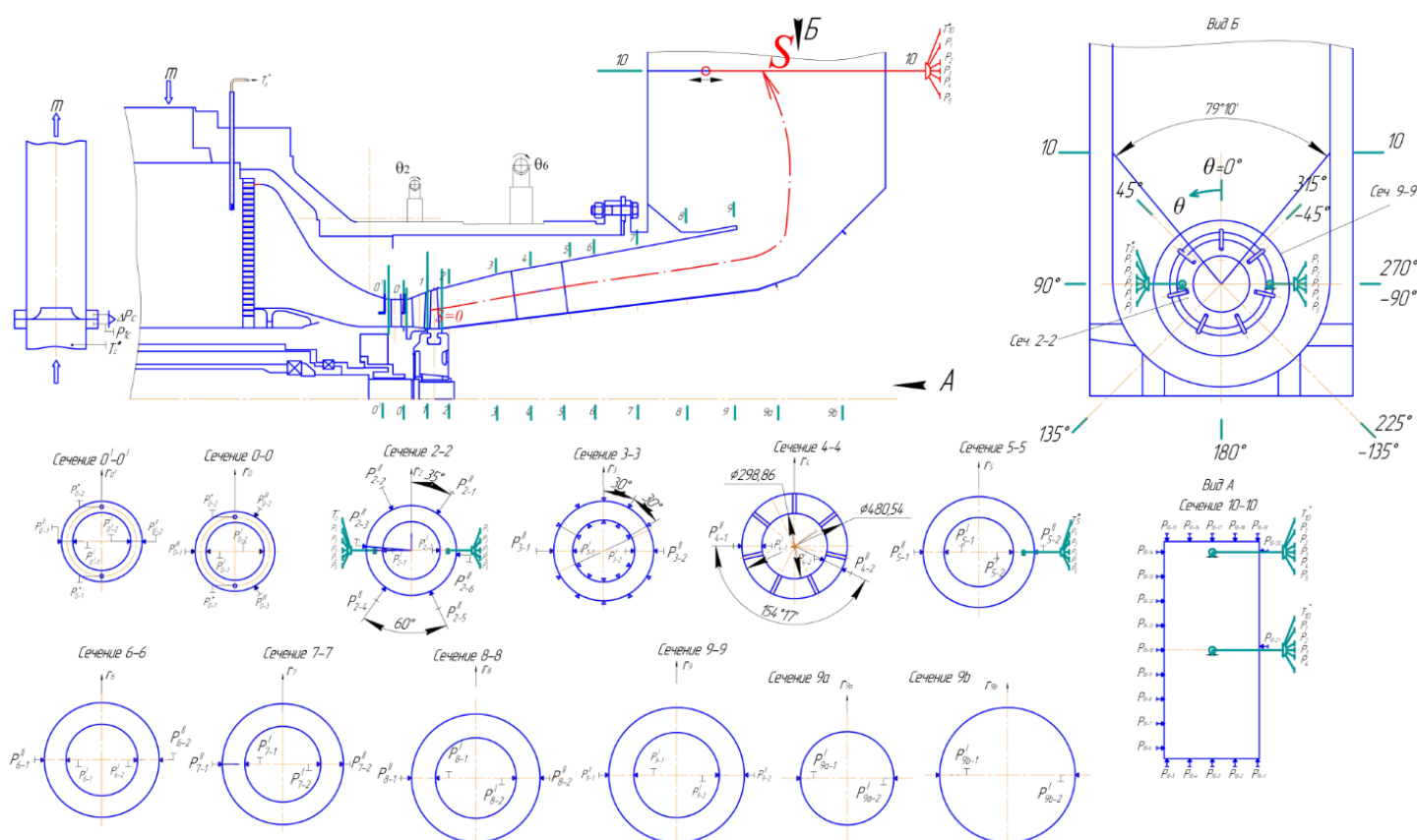


Рисунок 2. Схема измерений стенда ЭТ4–С-Д-П с ПНА

Третья глава содержит результаты экспериментальных испытаний и их анализ, интегральные аэродинамические характеристики моделей «Ступень - Диффузор - Патрубок» и «Диффузор - Патрубок», распределения локальных коэффициентов восстановления давления по длине диффузора, распределение нормированных полного и статического давлений и параметров потока во входном сечении 2-2 и векторное поле скоростей потока в выходном сечении 10-10.

Испытания выходного тракта совместно с предвключенной ступенью турбины проводились при массовом расходе $G = 7.4$ кг/с и частоте вращения ротора $n = 9094$ об/мин, что соответствует номинальной величине характеристического числа $u/C_0 = 0.557$ (здесь u - окружная скорость рабочего колеса на среднем диаметра и C_0 - теоретическая скорость потока, соответствующая изоэнтропийному перепаду энтальпий на ступень). Давление и температура в контрольном измерительном сечении 0-0 в опытах с предвключенной ступенью составляли $p_0^* = 148$ кПа и $T_0^* = 383$ К, а в сечении 2-2 - $p_{2cp}^* = 102,8$ кПа и $T_{2cp}^* = 351$ К. В опытах без ступени : $p_{2cp}^* = 104,3$ кПа и $T_{2cp}^* = 368$ К при расходе $G = 8$ кг/с. Угол закрутки потока на среднем диаметре в сечении 2-2 в опытах с предвключенной ступенью $\alpha_{2cp}^* = 103,9^\circ$ и без ступени - $\alpha_{2cp}^* = 95^\circ$.

Сравнительные исследования изолированного выходного тракта «Диффузор – Патрубок» и блока выходного тракта с предвключенной турбинной ступенью «Ступень – Диффузор – Патрубок» выполнялись на одной и той же модели выходного тракта, что означает полное геометрическое подобие исследуемых объектов. Определяющие критерии динамического подобия – числа Маха и Рейнольдса – в характерном сечении 2-2 были практически равными: для изолированного тракта «Диффузор – Патрубок» число Маха $M = 0.30$, число Рейнольдса $Re = 0.616 \cdot 10^6$; для блока «Ступень – Диффузор – Патрубок» число Маха $M = 0.28$, число Рейнольдса $Re = 0.747 \cdot 10^6$. Критерий Струхаля Sh , характеризующий моделирование нестационарных явлений в потоке, при испытаниях тракта с предвключенной ступенью идентичен характеристическому числу $u/C_0 = 0.557$ для турбинной ступени. В изолированном тракте эти нестационарные явления не моделировались. Поэтому обсуждаемые сравнительные опыты позволяют определить совместное влияние нестационарности и входной пространственной неравномерности на аэродинамические качества выходного тракта «Диффузор – Патрубок».

В таблице 2 представлены интегральные аэродинамические характеристики выходного тракта, полученные по результатам его испытаний с предвключенной ступенью и без ступени, то есть при осевом подводе потока к диффузору. Следует отметить, что методологическая погрешность из-за неучета сжимаемости потока при вычислении коэффициентов потерь составляет величину + 0,6% для числа $M = 0,28$ (опыты со ступенью) и + 1,1% для $M = 0,3$ (опыты без ступени).

Процесс расширения в ступени и сжатия в диффузоре можно представить в h - s диаграмме (рисунок 3).

Линия 0-2 представляет собой процесс расширения в лопаточном аппарате турбины. Точка 2* - полные параметры потока и точка 2 характеризует параметры в потоке во входном сечении диффузора. Линия 0-9 представляет собой процесс сжатия в диффузоре и отрезок 9-9* характеризует выходную кинетическую энергию на выходе из диффузора.

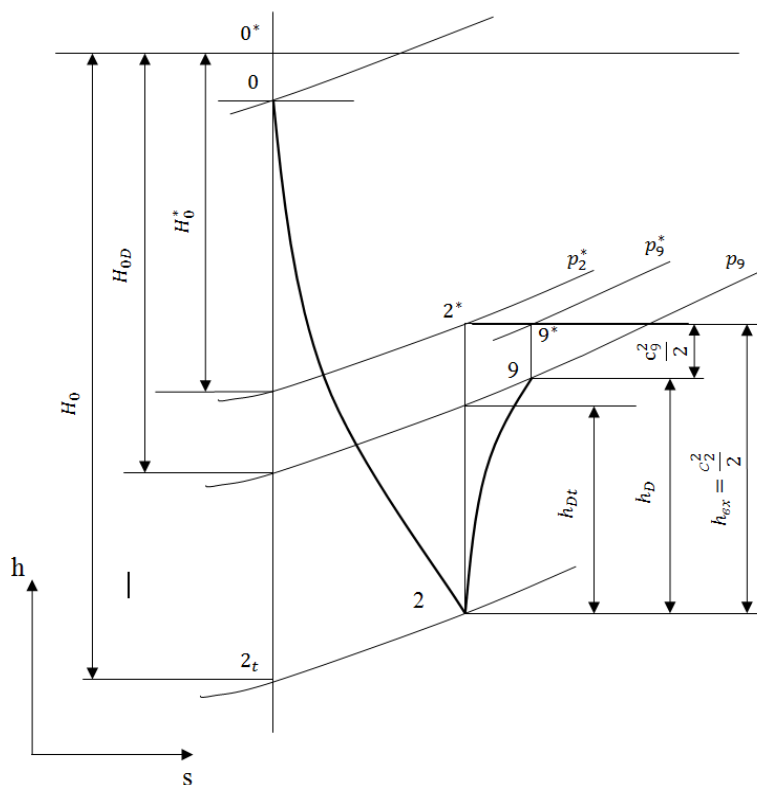


Рисунок 3. Процесс расширения рабочей среды в ступени и сжатия в последующем диффузоре

В соответствии с уравнением Бернулли для процесса сжатия в диффузорном канале по ходу течения кинетическая энергия потока уменьшается, а давление в потоке растет и уравнение сохранения энергии имеет вид (для идеального процесса):

$$\frac{\rho_2 c_2^2}{2} + p_2 = p_2^* = \text{const.}$$

Тогда

$$\frac{\rho_2 c_2^2}{2} = p_2^* - p_2$$

Коэффициент восстановления давления в диффузоре можно выразить соотношением:

$$C_{pD} = (p_{9cp} - p_{2cp}) / \frac{\rho_2 c_2^2}{2} = (p_{9cp} - p_{2cp}) / (p_{2cp}^* - p_{2cp})$$

Кинетическая энергия на выходе из диффузора не используется, а следовательно является потерей, то удобно пользоваться ещё одним важным энергетическим показателем – коэффициентом полных потерь диффузора ζ_D :

$$C_{pD} + \zeta_D = 1.$$

Тогда $\zeta_D = 1 - C_{pD} = (p_{2cp}^* - p_{9cp}) / (p_{2cp}^* - p_{2cp})$.

Коэффициент восстановления давления блока «Диффузор – Патрубок» можно выразит как:

$$C_{pD+\Pi} = (p_{10cp} - p_{2cp}) / (p_{2cp}^* - p_{2cp});$$

– коэффициент полных потерь блока «Д-П»

$$\zeta_{D+\Pi} = (p_{2cp}^* - p_{10cp}) / (p_{2cp}^* - p_{2cp});$$

– распределение местных значений коэффициента восстановления давления в диффузоре:

$$C_{pDi} = (p_9(\theta_i) - p_2(\theta_i)) / (p_2^*(\theta_i) - p_2(\theta_i)),$$

где θ - угловая координата принимала фиксированные значения в пределах от 0° до 180° .

Для к.п.д. диффузора получим: $\eta_D = N_{Dt} / N_D = (h_{9t} - h_2) / (h_9 - h_2) = C_p \frac{AR^2}{AR^2 - 1}$,

где $AR = \frac{A_9}{A_2}$ отношение площадей выходного и входного сечений диффузора.

Проведенные экспериментальные исследования при выбранной методике позволили получить важнейшие интегральные аэродинамические характеристики как отдельных элементов, так и всего исследуемого объекта в целом. К ним относятся прежде всего следующие характеристики:

– к.п.д. турбинной ступени $\eta = N / \dot{m}H_0 = M\omega / \dot{m}H_0 = 0,78$;

– к.п.д. η_{+D} турбинной ступени совместно с диффузором («ступень-диффузор»)

$$\eta_{+D} = N / \dot{m}H_{0+D} = 0,84 ;$$

– к.п.д. $\eta_{+D+\Pi}$ ступени совместно с диффузором и патрубком («ступень - диффузор - патрубок») $\eta_{+D+\Pi} = N / \dot{m}H_{0+D+\Pi} = 0,842$;

– нормированная величина прироста к.п.д. $\overline{\Delta\eta}_{+D}$, которую дает применение выходного диффузора $\overline{\Delta\eta}_{+D} = \eta_{+D} - \eta / \eta = 8,3\%$;

– нормированная величина прироста к.п.д., которую дает применение выходного диффузора и патрубка $\overline{\Delta\eta}_{+Д+П} = (\eta_{+Д+П} - \eta) / \eta = 8,6\%$.

Применённая новая методика обработки экспериментальных данных, в результате даёт возможность определения величины "прямого" выигрыша к.п.д. $\bar{\eta}_{+Д+П}$ блока «Ступень – Диффузор – Патрубок» от установки диффузора и патрубка. Это повышение к.п.д. в данном случае для режима 100% нагрузки ГТУ составляет значительную величину, равную 8,6%.

Таблица 2. Интегральные характеристики выходного тракта

Интегральная характеристика		Формула	Значение	
			Со ступенью	Без ступени
Коэффициент внутренних потерь выходного тракта (коэффициент потерь полного давления)		$\zeta_{Д-П} = \frac{P_{2ср}^* - P_{10ср}^*}{P_{2ср}^* - P_{2ср}}$	0,343	0,404
Коэффициент полных потерь	диффузора	$\zeta_{Д} = \frac{P_{2ср}^* - P_{9ср}}{P_{2ср}^* - P_{2ср}}$	0,419	0,390
	выходного тракта «Д-П»	$\zeta_{Д-П} = \frac{P_{2ср}^* - P_{10ср}^*}{P_{2ср}^* - P_{2ср}}$	0,400	0,440
Коэффициент восстановления давления	в диффузоре	$C_{рД} = \frac{P_{9ср} - P_{ср}}{P_{2ср}^* - P_{2ср}}$	0,581	0,610
	в выходном тракте «Д-П»	$C_{рД} = \frac{P_{10ср} - P_{ср}}{P_{2ср}^* - P_{2ср}}$	0,600	0,560

Восстановительные качества выходного тракта «Диффузор – Патрубок», характеризуемое коэффициентом C_p , существенно изменяются, если при входе в него устанавливается ступень.

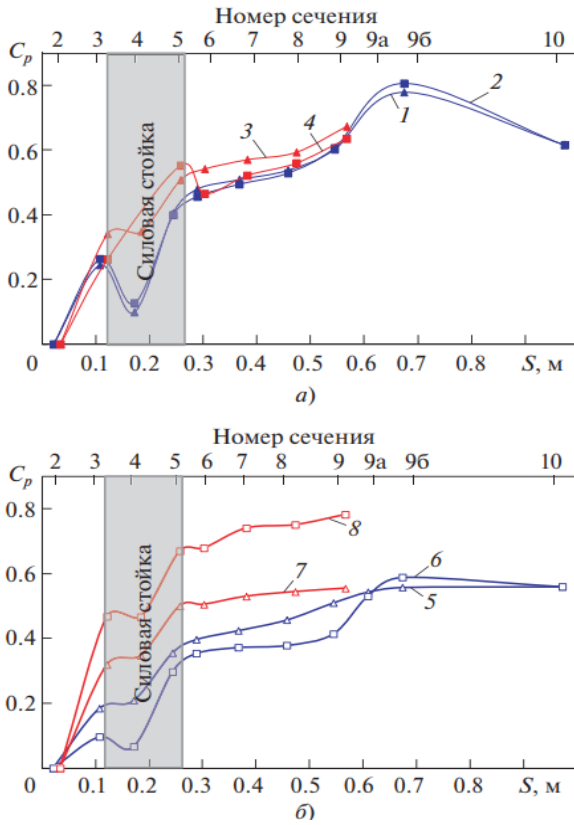


Рисунок 4 – Зависимость прикорневого C_p' и периферийного C_p'' коэффициента восстановления давления от длины выходного тракта Д–П при испытаниях со ступенью (а) и без ступени (б): 1, 5 – C_p' , $\theta = 0-180^\circ$; 2, 6 – C_p' , $\theta = 180-360^\circ$; 3, 7 – C_p'' , $\theta = 0-180^\circ$; 4, 8 – C_p'' , $\theta = 180-360^\circ$ ($\theta = 0-180^\circ$ и $\theta = 180-360^\circ$ - диапазоны углов, в пределах которых рассчитаны средние по полуокружностям величины C_p)

По результатам измерений пристеночных давлений вдоль периферийного и корневого обводов диффузора распределения локальных коэффициентов восстановления C_p' и C_p'' представлены на рисунке 4 и рисунке 5 как функция осевой координаты для различных значений угла θ . На рисунке 4 приведены прикорневые C_p' и периферийные C_p'' , осредненные по углу θ для левой ($\theta = 0-180^\circ$) и правой

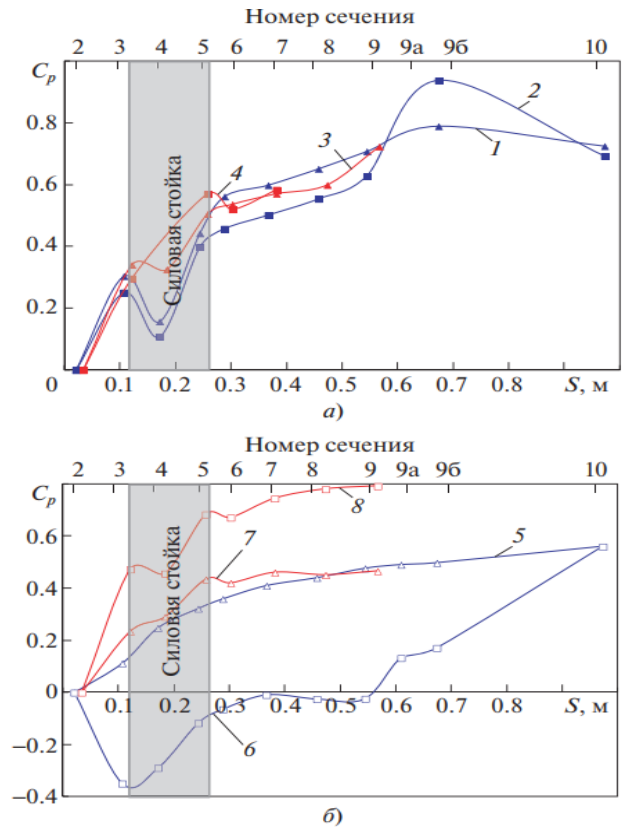


Рисунок 5 – Зависимость прикорневого C_p' и периферийного C_p'' коэффициента восстановления давления от длины выходного тракта Д–П при испытаниях со ступенью (а) и без ступени (б): 1, 5 – C_p' , $\theta = 0^\circ$; 2, 6 – C_p' , $\theta = 180^\circ$; 3, 7 – C_p'' , $\theta = 0^\circ$; 4, 8 – C_p'' , $\theta = 180^\circ$ ($\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ - значения углов, при которых рассчитаны местные значения коэффициентов C_p ; рис.2)

($\theta = 180 - 360^\circ$) частей потока. На рисунке 5 показаны локальные графики C_p' и C_p'' для верхней ($\theta = 0^\circ$) и нижней ($\theta = 180^\circ$) струек потока. Из графиков рисунок 4(а) и рисунок 4(б) видно, что для варианта со ступенью интенсивный процесс восстановления давления продолжается еще и на протяжении поворота потока от осевого к радиальному направлению при входе в прямоугольное сечение патрубка (кривые 1 и 2).

Графики на рисунках 6 и 7 иллюстрируют сочетание «прямого» влияния турбинной ступени и «обратного» влияния выходного патрубка на окружную неравномерность распределения параметров потока в сечении 2-2. Состояние потока в этом сечении определяется главным образом «прямым» влиянием ступени, на которую приходится большой перепад давлений $p_0^* - p_2$, в значительной мере превосходящий перепад давлений в тракте.

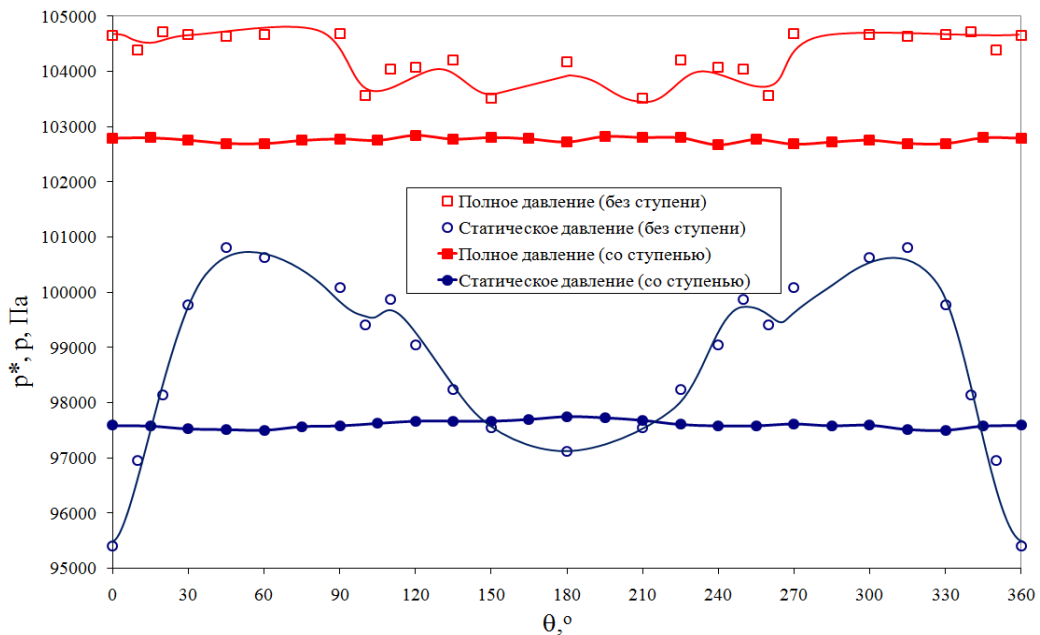


Рисунок 6. Окружное распределение полного и статического давлений во входном сечении 2-2 диффузора при испытаниях изолированного выходного тракта «Д–П» и в блоке с предвключенной ступенью «С–Д–П»

В результате «прямого» влияния происходит равномерное распределение параметров потока еще при входе в ступень. Эта равномерность, очевидно, сохраняется в сечении 2-2 при выходе из ступени, что подтверждается экспериментальными данными, полученными при испытаниях выходного тракта с предвключенной ступенью на нескольких режимах. Таким образом, «прямое» влияние ступени в значительной

степени нивелирует «обратное» влияние патрубка, которое имеет место при испытаниях выходного тракта без ступени.

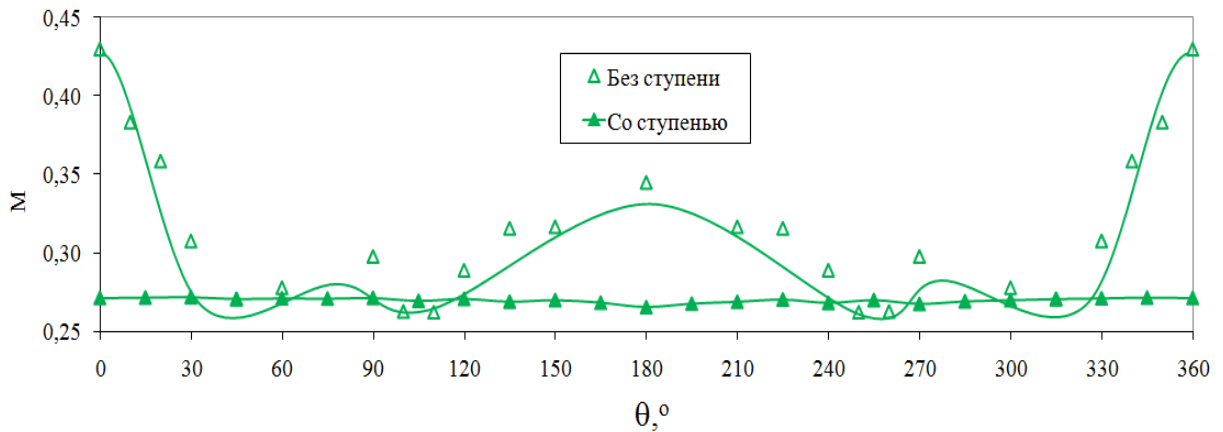


Рисунок 7. Окружное распределение чисел Маха $Mc_{2, \text{ср}}$ на входе в диффузор

Четвертая глава содержатся результаты CFD - моделирования потока в выходном тракте «Диффузор - Патрубок» при помощи коммерческого кода ANSYS CFX. Характерные картины течения, полученные по материалам экспериментальных исследований, а также с помощью CFD моделирования имеют большое качественное сходство по эксперименту и расчёту. Схема течения в выходном тракте представлена на рис. 8.

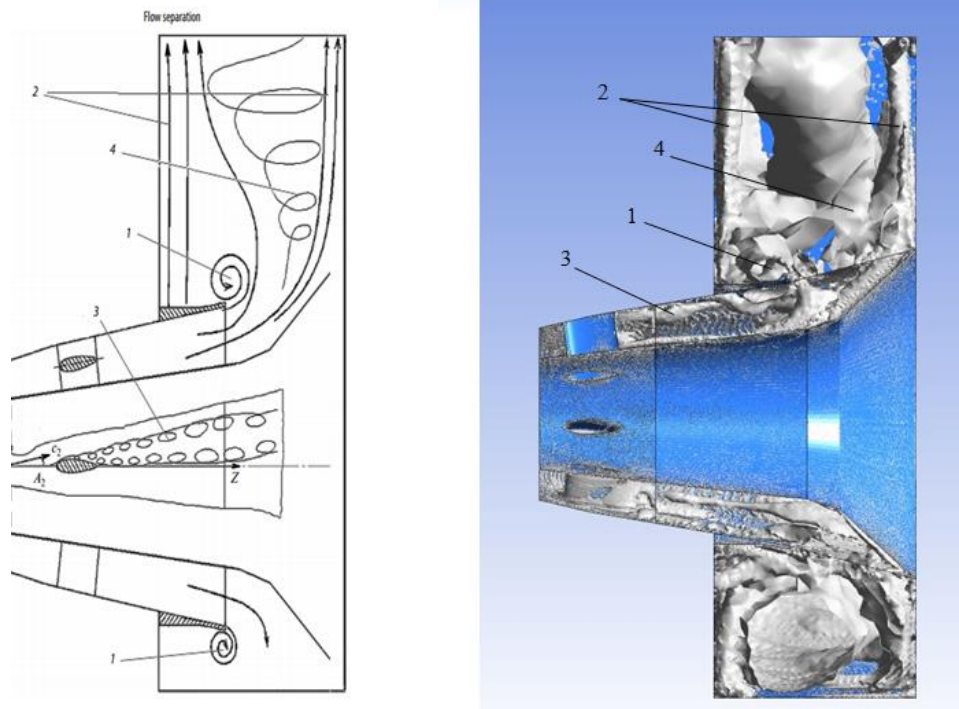


Рисунок 8 – Схема течения в выходном тракте ГТУ D-класса: 1 - область локальных отрывных течений выходного диффузора (торовый вихрь); 2 - область струйного течения в патрубок; 3 - область отрывного течения за силовыми стойками диффузора; 4 - область развитого вихревого течения в патрубок

Заключение

1. Получены интегральные характеристики диффузора в блоке с предвключенной ступенью для стационарной ГТУ мощностью ~ 100 МВт: коэффициент восстановления давления для блока $C_p = 0,600$; относительный прирост к.п.д. из-за установки диффузора и патрубка блока « Ступень - Диффузор - Патрубок» $\overline{\Delta\eta_{+Д+П}} = 8,6\%$; коэффициент внутренних потерь выходного тракта « Ступень - Диффузор - Патрубок» $\zeta_{Д-П} = 0,343$.
2. Основные источники потерь кинетической энергии в выходном тракте: недостаточно совершенная организация потока в осерадиальной части диффузора и в выходном патрубке, а также срывы потока при обтекании силовых стоек в диффузоре.
3. При аэродинамических исследованиях выходных трактов турбин определяющим фактором в создании реальных входных граничных условий является радиальная неравномерность и нестационарность распределения параметров потока, генерируемая последней ступенью турбины.
4. Повышенная величина $C_p = 0,600$ для выходного тракта в блоке с предвключенной ступенью « Ступень - Диффузор - Патрубок» по сравнению с $C_p = 0,560$ для изолированного тракта «Д-П» показывает, что учет реальных входных граничных условий оказывает значительное влияние на основную аэродинамическую характеристику выходного тракта турбины.
5. Наличие патрубка в выходном тракте стационарной ГТУ двухвального типа вызывает существенное обратное влияние на рабочий процесс в диффузоре. Поэтому при аэродинамических исследованиях установка выходного патрубка является необходимым условием для получения достоверных результатов.
6. При организации и планировании модельных испытаний, изолированных выходных турбинных трактов снижение уровня окружной неравномерности потока на входе в диффузор может быть обеспечено включением в экспериментальный отсек гидравлического сопротивления с целью возможно большего приближения входных граничных условий к реальным.
7. Результаты CFD моделирования потока выходного тракта показали вполне удовлетворительное качественное совпадение с экспериментом.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Хоанг, В.Ч. Аэродинамические процессы в выходном тракте стационарной газовой турбины: результаты экспериментальных исследований / Е.Ю. Семакина, В.Ч. Хоанг, В.А. Черников // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 3. С. 49–60 (**Перечень ВАК**).
2. Хоанг, В.Ч. Экспериментальные аэродинамические исследования выходного тракта двухвальной ГТУ мощностью 100 МВ / Е.Ю. Семакина, В.А. Черников, В.Ч. Хоанг // Теплоэнергетика. - 2019. – N 6. С.48–58. DOI: 10.1134/S0040363619060080 (**Перечень ВАК**).
3. Hoang, V. Ch. Experimental Aerodynamic Investigations of the 100-MW Two-Shaft Gas Turbine Unit Exhaust Duct / E. Yu. Semakina, V. A. Chernikov, V. Ch. Hoang // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No. 6, pp. 415–424. DOI: 10.1134/S0040601519060089 (**Перечень SCOPUS**).
4. Хоанг, В.Ч. Влияние входных граничных условий на аэродинамические характеристики выходного тракта двухвальной ГТУ / В.Ч. Хоанг, В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. – 2018. – ч. 1. – С. 104 – 106.
5. Хоанг, В.Ч. Особенности конструкции выходного тракта двухвальной ГТУ с котлом - утилизатором / В.Ч. Хоанг // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей третьей международной научной конференции. 30 апреля 2019 г. Часть 1. - Казань: ООО «Конверт», -2019. С.245-247.
6. Хоанг, В.Ч. Стенд для экспериментальных исследований аэродинамики выходного тракта двухвальной ГТУ D-класса / В.Ч. Хоанг, Е.Ю. Семакина, В.А. Черников // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей четвертой международной научной конференции. 31 мая 2019 г. Часть 1. - Казань: ООО «Конверт», - 2019.С. 54-56.