Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем

На правах рукописи

Хоанг Ван Чунг

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ТРАКТА ГТУ D - КЛАССА

Направление подготовки–13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Код и наименование

Направленность – 13.06.01_11 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Хоанг Ван Чунг
Научный руководитель: д.т.н., профессор кафедры «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели», Черников Виктор Александрович

Санкт Петербург–2019

Научно-квалификационная работа выполнена на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» Института энергетики и транспортных систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Зав. кафедрой:	*– Забелин Николай Алексеевич – к.т.н., доцент*
Научный руководитель:	*– Черников Виктор Александрович – д.т.н., профессор*
Рецензент:	*– Тихомиров Борис Александрович – д.т.н., профессор СПбГМТУ*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу:http://elib.spbstu.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

- Переход стационарного газотурбостроения к двухвальным конструкциям ГТУ с возможностью оптимизации турбокомпрессора;
- Для такого типа стационарных газовых турбин впервые применен выходной тракт с односторонним отводом рабочего тела;
- Отсутствие экспериментальных данных по структуре 3D потока в выходных трактах с односторонним отводом рабочего тела при наличии развитого диффузора.

Цель и задачи исследования

Цель исследования - экспериментальное определение структуры 3D потока в проточной части тракта «Диффузор-Патрубок» и его интегральных характеристик в блоке с предвключенной турбинной ступенью.

Задачи исследования:

- Проектирование модельного отсека «Д – П» и модельного отсека «С – Д – П»;
- Разработка методики экспериментального исследования;
- Проведение экспериментальных исследований с предвключенной турбинной ступенью и без нее;
- Сравнительный анализ полученных данных

Научная новизна

- Применение усовершенствованной методики экспериментального исследования и оценки показателей выходного тракта ГТУ D-класса энергетической газовой турбины.
- Получение интегральных характеристик блока «Диффузор-Патрубок» и тракта «Ступень – Диффузор – Патрубок».
- Мероприятия по улучшению аэродинамических качеств выходного тракта.

Теоретическая и практическая значимость

- Усовершенствована и практически опробована методика экспериментальной оценки выходного тракта ГТУ D-класса.

- Экспериментально исследованы трехмерные распределения скоростей и параметров потока в различных сечениях проточной части входного диффузора.
- Получены величины потерь кинетической энергии потока на различных участках выходного тракта.
- Представленные в работе выводы и обобщения дают возможность их использования при проектировании новых и модернизации имеющихся стационарных газовых турбин с целью повышения их экономичности.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Неделя научки СПБПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2018 г. – ч. 1. – С. 104 – 106).
- Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей третьей международной научной конференции (Казань, 2019 г. С. 245-247.).
- Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей четвертой международной научной конференции (Казань, 2019 г. С. 54-56.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из которых 2 - в периодических изданиях ВАК РФ (одна работа проиндексирована в базе данных Scopus).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

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 настоящее время, появившиеся тенденции перехода от одновальных к двухвальным ГТУ влекут 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 актуальными.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – модель выходного тракта диффузор – патрубок с предвкюченной ступенью турбина ГТУ D – класса. Модель выходного тракта на стенде ЭТ4-С-Д-П Лаборатории турбиностроения имени И.И. Кириллова СПБГПУ.

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

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования: на рис. 1 представлен продольный разрез экспериментального стенда ЭТ4–СДП с предвключенной модельной турбинной ступенью, ПНА и силовыми стойками, она из которых дренирована. 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 патрубок и отводящий рабочую среду тракт выполнены поворотными с осью вращения, совпадающей по направлению с осью ротора турбины. Главная отличительная черта выходного тракта наличие за диффузором модели коллектор-бокса для отвода патока от турбины в направлении перпендикулярном её оси. В этих условиях для имеющегося стенда необходимо было обеспечить измерения неосесимметричного потока, а также организовать отвод воздуха за пределы лаборатории.

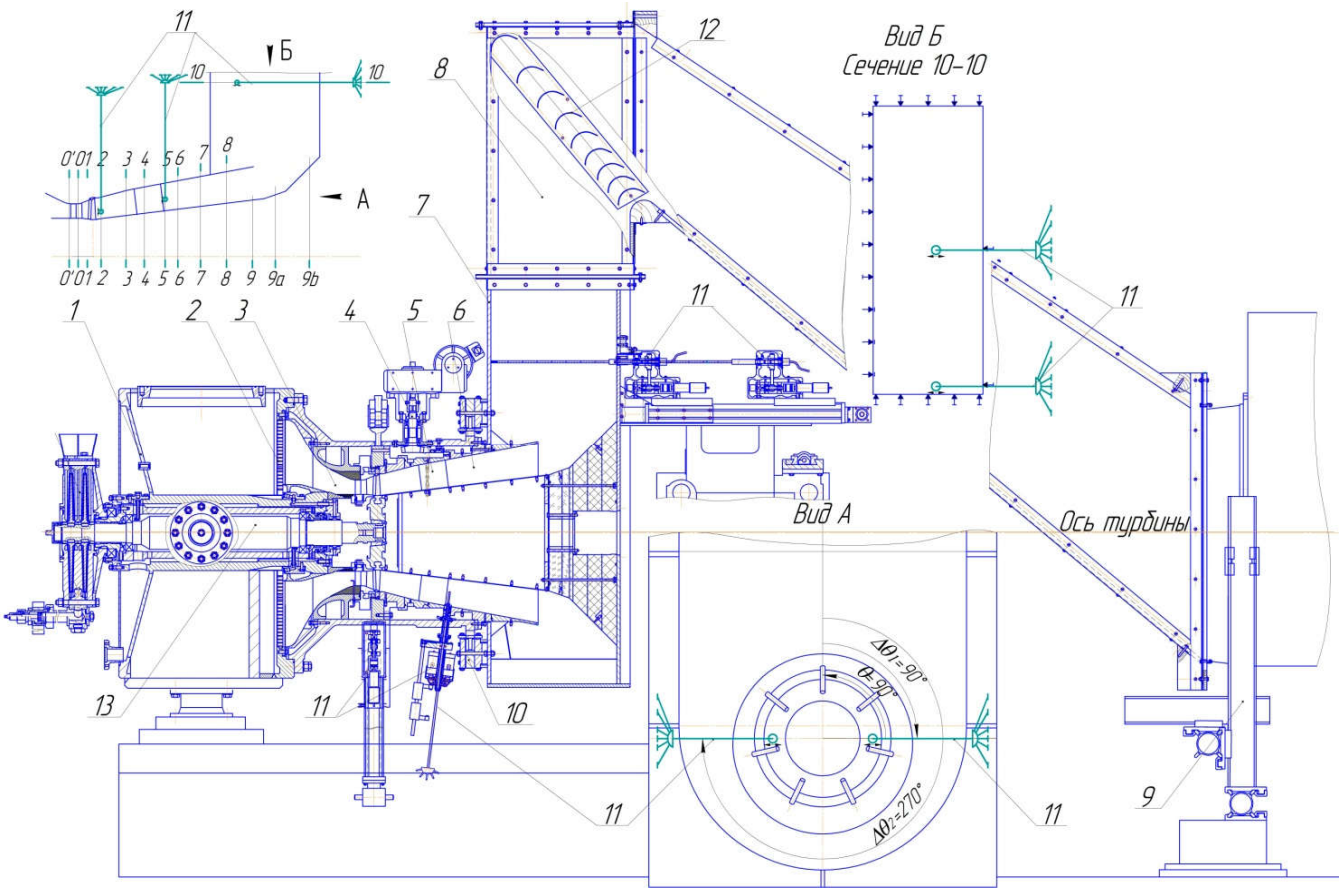

Рис.1. Продольный разрез стенда ЭТ4–СДП с предварительным направляющим аппаратом (ПНА)

1 – уравнительный 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 расчитанные для натуры и измереные в модели определющие критерии подобия потоков при входе в выходной тракт ГТУ. Имеющиеся отложении чисел M_2 и Re_2 в модели от натурных значений не могут оказать заместного влияния на основные характеристики исследуемой модели.

На рис. 2. представлена схема всех измерений в потоке данной модели. Характерными особенностями схемы измерений являются траверсирование не осесимметричного 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 натурного и модельного выходного тракта «Д-П» и «С-Д-П»:

Наименование и формула	Размер	Величина		
		Натура	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
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

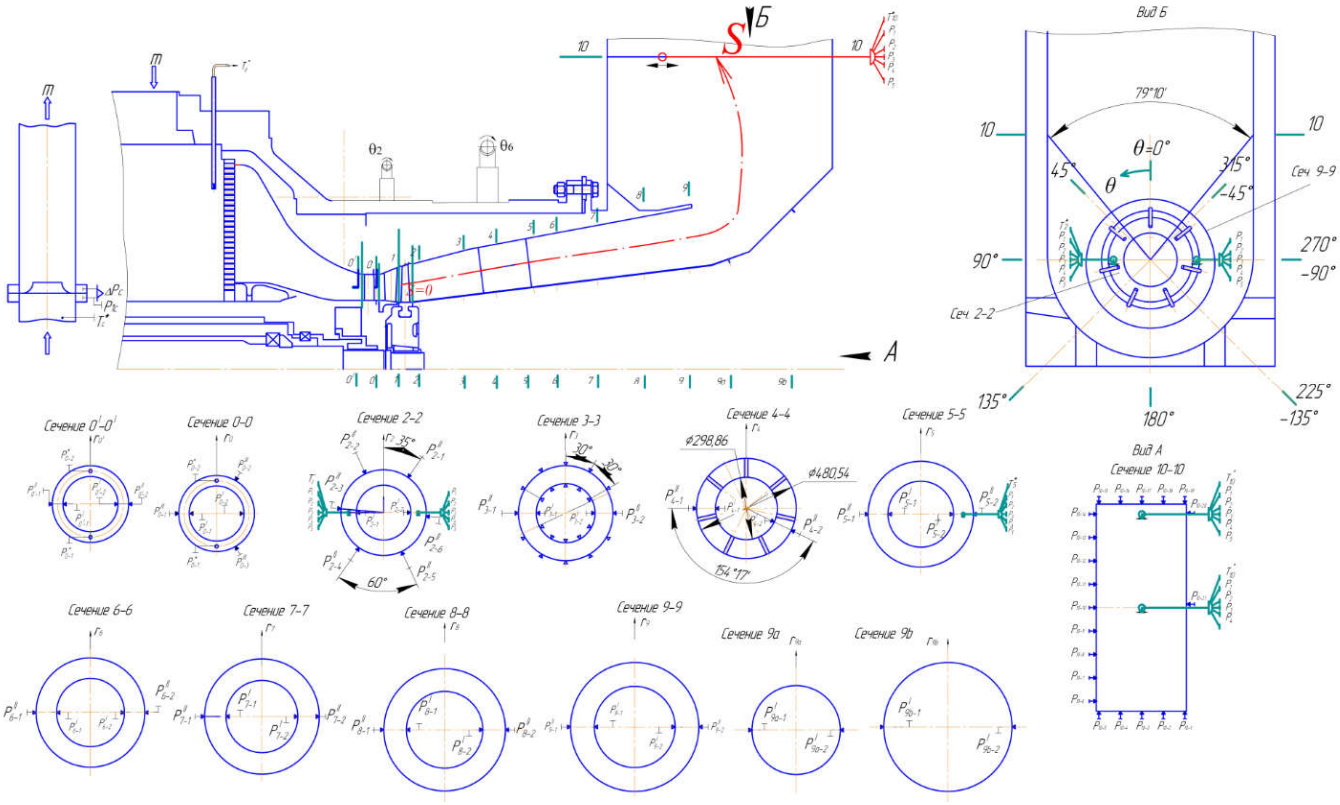

Рис.2. Схема измерений стенда ЭТ4–С-Д-П с ПНА

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, соотвествующая 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 $T_0^* = 383^oK$, а в сечении 2-2 - $p_{2ср}^* = 102{,}8$ кПа и $T_{2ср}^* = 351^oK$. В опытах без ступени : $p_{2ср}^* = 104{,}3$ кПа и $T_{2ср}^* = 368^oK$ при расходе $G = 8$ кг/с. Угол закрутки потока на среднем диаметре в сечении 2-2 в опытах с предвключенной ступенью $\alpha_{2ср}^* = 103{,}9^o$ и без ступени - $\alpha_{2ср}^* = 95^o$.

Сравнительные исследования изолированного выходного тракта «Д-П» и блока выходного тракта с предвкюченной турбинной ступенью «С-Д-П» 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 (см. таблицу 1). 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 «Д-П».

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

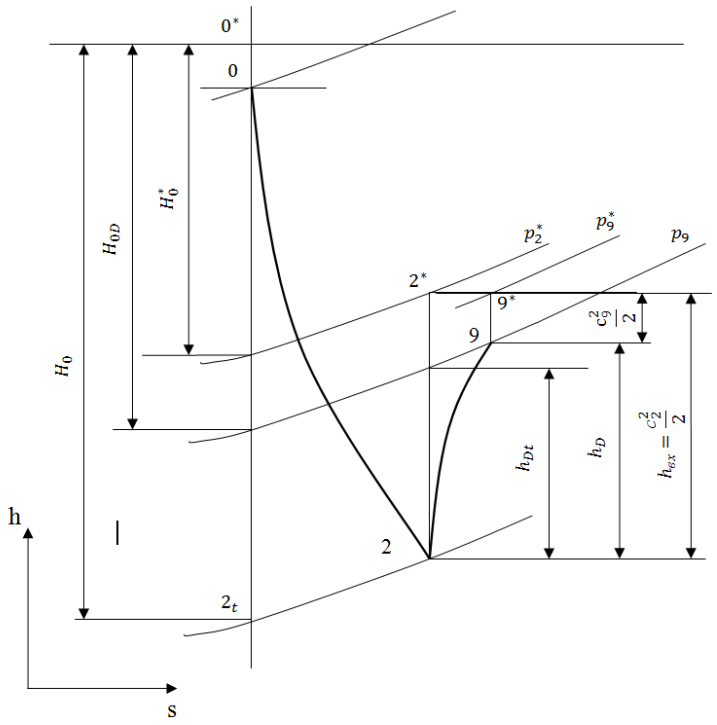

Рис.3. Процесс расширения в ступени и сжатия в диффузоре

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

По уравнении Бернулли процесса сжатия в диффузоре канале по ходу течения кинетическая энергия потока уменьшается, а давление в потоке растет и уравнение сохранения энергии:

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

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

Коэффициент восстановления давления в диффузоре можно выразит как:

$$C_{p_Д} = \left(p_{9ср} - p_{2ср}\right) \Big/ \left(\frac{\rho_2 c_2^2}{2}\right) = \left(p_{9ср} - p_{2ср}\right) \Big/ \left(p_{2ср}^* - p_{2ср}\right).$$

Кинетическая энергия на выходе из диффузора не используется, а следовательно является потерей; удобно пользоваться еще одним важным энергетическим показателем- коэффициент полных потерь диффузора $\zeta_Д$:

$$C_{p_Д} + \zeta_Д = 1,$$

тогда $\zeta_Д = 1 - C_{p_Д} = \left(p_{2ср}^* - p_{9ср}\right) \Big/ \left(p_{2ср}^* - p_{2ср}\right).$

Коэффициент восстановления давления блока «Д-П» можно выразит как:

$$C_{p_{Д+П}} = \left(p_{10ср} - p_{2ср}\right) \Big/ \left(p_{2ср}^* - p_{2ср}\right);$$

– коэффициент польных потерь блока «Д-П»

$$\zeta_{Д+П} = \left(p_{2ср}^* - p_{10ср}\right) \Big/ \left(p_{2ср}^* - p_{2ср}\right);$$

– распределение местных значений коэффициента восстановления давления в диффузоре:

$$C_{p_{Дi}} = \left(p_9(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right) \Big/ \left(p_2^*(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right).$$

где θ - угловая координата принимала фиксированные значения в пределах от 0^0 до 180^0;

– распределение местных значений коэффициента восстановления давления по корневому ($C_p^{/} = f(L_j, \theta_i)$) и периферийному $C_p^{//} = f(L_j, \theta_i)$ обводам диффузора для различных значений угловой координаты θ:

$$C_{p_{Дi}}^{/}(L_j, \theta_i) = \left(p_j^{/}(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right) \Big/ \left(p_2^{*}(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right)$$

$$C_{p_{Дi}}^{//}(L_j, \theta_i) = \left(p_j^{//}(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right) \Big/ \left(p_2^{*}(\theta_i) - p_2(\theta_i)\right)$$

где j – номер контрольного измерительного сечения пристеночных давлений в диффузоре.

Таблица 2. Интегральные характеристики выходного тракта

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

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).

Для КПД дуффузора получим:

$$\eta_Д = H_{Дt} / H_Д = (h_{9t} - h_2) / (h_9 - h_2) = C_p \frac{AR^2}{AR^2 - 1}$$

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

– к.п.д. турбинной ступени:

$$\eta = N / \dot{m} H_0 = M.\omega / \dot{m} H_0 = 0{,}78;$$

– к.п.д. $\eta_{+Д}$ турбинной совместно с диффузором («ступень-диффузор»):

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

– к.п.д. $\eta_{+Д+П}$ ступени совместно с диффузором и патрубком («ступень - диффузор - патрубок»):

$$\eta_{+Д+П} = N / \dot{m} H_{0+Д+П} = 0{,}842;$$

– нормированная величина прироста к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+Д}$, которую дает применение выходного дуффузора:

$$\Delta\bar{\eta}_{+Д} = (\eta_{+Д} - \eta) / \eta = 8{,}3\%;$$

– нормированная величина прироста к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+Д+П}$, которую дает применение выходного дуффузора и патрубка:

$$\Delta\bar{\eta}_{+Д+П} = {(\eta_{+Д+П} - \eta)}/{\eta} = 8{,}6\%;$$

Разработана новая методика обработки экспериментальных данных. В результате получила величина "прямого" выиграсился к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+Д+П}$ блока «С–Д–П» от установки дуффузора и патрубка. Эта величина выиграшее $\Delta\bar{\eta}_{+Д+П} = 8{,}6\%$;

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

На рис. 4 и рис. 5 представлены распределение коэффициента восстановления давления C_p по длине выходного тракта Д–П по результатам испытаний изолированного выходного тракта и в блоке со ступенью. По результатам измерений пристеночных давлений вдоль периферийного и корневого обводов диффузора распределения локальных коэффициентов восстановления $C_p^{'}$ и $C_p^{''}$ представлены на рис. 4 и рис. 5 как функций осевой координаты для различных значений угла θ. На рис. 4 приведены прикорневые $C_p^{'}$ и периферийные $C_p^{''}$, осредненные по углу θ для левой ($\theta = 0 - 180^o$) и правой ($\theta = 180 - 360^o$) частей потока. На рис. 5 показаны локальные графики $C_p^{'}$ и $C_p^{''}$ для верхней ($\theta = 0^o$) и нижней ($\theta = 180^o$) струек потока. Из графиков рис. 4(а) и рис. 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).

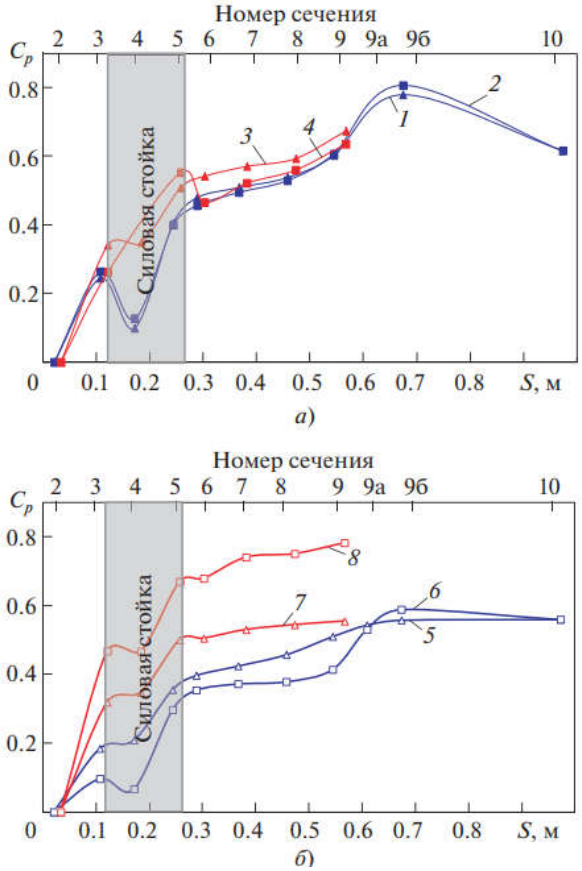

Рис.4. Зависимость прикорневого $C_p^{'}$ и периферийного $C_p^{''}$ коэффициента восстановления давления от длины выходного тракта Д–П при испытаниях со ступенью (а) и без ступени (б):

1, 5 – $C_p^{'}$, $\theta = 0 - 180^o$; 2,6 – $C_p^{'}$, $\theta = 180 - 360^o$; 3,7 – $C_p^{''}$, $\theta = 0 - 180^o$; 4,8 – $C_p^{''}$, $\theta = 180 - 360^o$

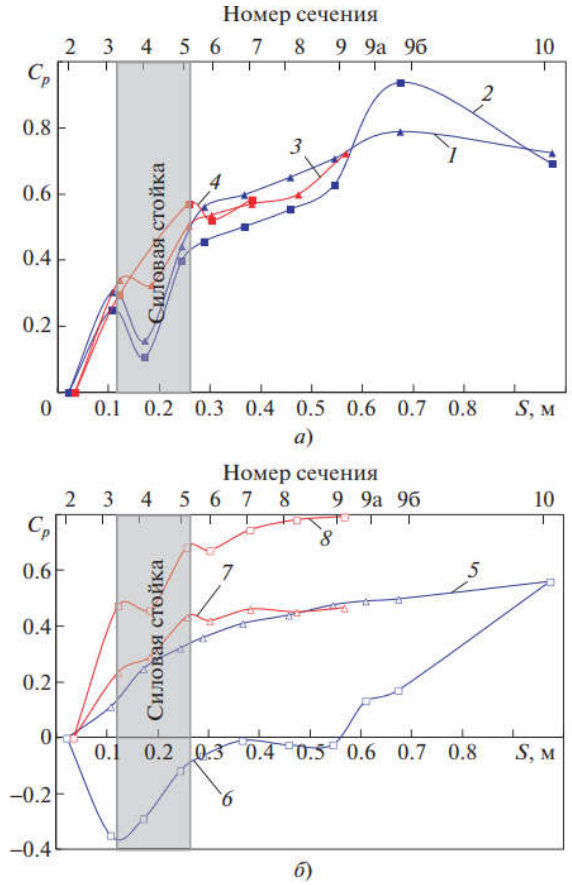

Рис. 5. Зависимость прикорневого $C_p^{'}$ и периферийного $C_p^{''}$ коэффициента восстановления давления от длины выходного тракта Д–П при испытаниях со ступенью (а) и без ступени (б): 1, 5 – $C_p^{'}$, $\theta = 0^o$; 2, 6 – $C_p^{'}$, $\theta = 180^o$; 3,7 – $C_p^{''}$, $\theta = 0^o$; 4,8 – $C_p^{''}$, $\theta = 180^o$

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. 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 имело место при испытаниях выходного тракта без ступени.

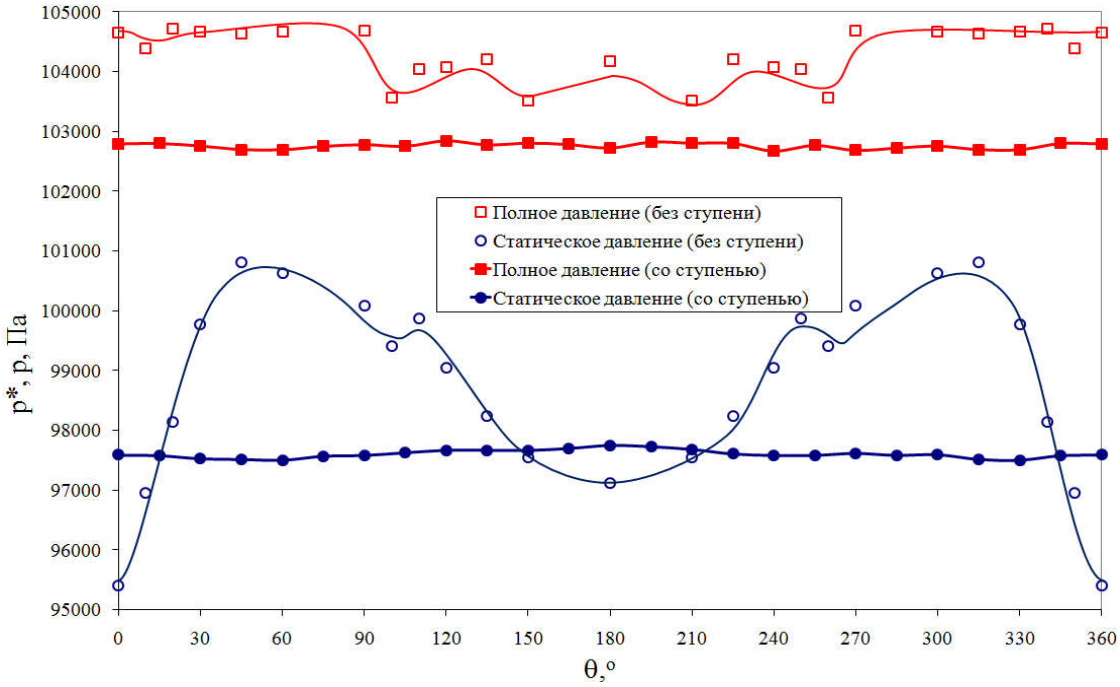

Рис. 6. Окружное распределение полного и статического давлений во входном сечении 2-2 диффузора при испытаниях изолированного выходного тракта «Д–П» и в блоке с предвключенной ступенью «С–Д–П»

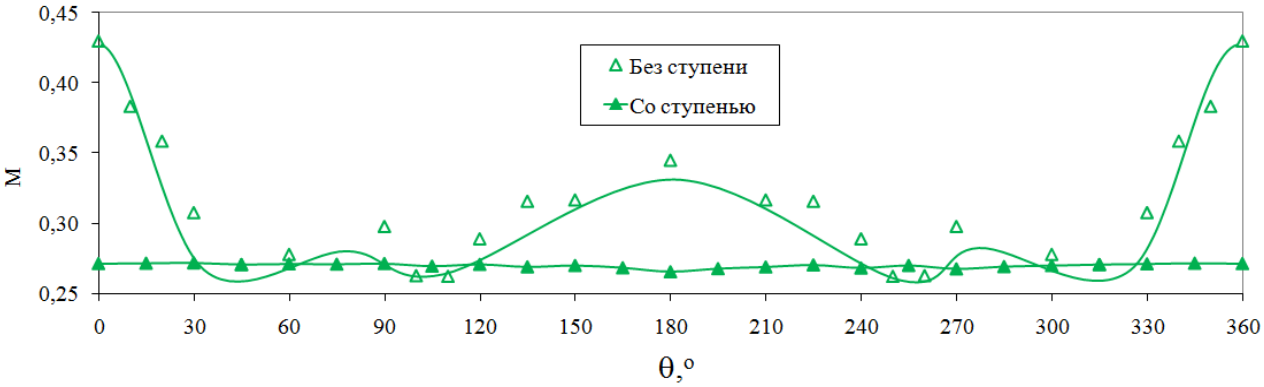

Рис. 7. Окружное распределение чисел Маха $Mc_{2\ ср}$ на входе в диффузор

Численное моделирование течения в системе «Диффузор - Патрубок»: Характерная картина течения, полученная по материалам эксперимeтальных исследований, а таже с помощью CFD моделирования. На основании этих

данных можно сделать вывод, что течения в подобных трактах имеют ряд особенностей:

1. на выходе из диагонального диффузора наблюдаются локальные (по окружности) области отрыва потока, размер и положения которых определяется режимом работы ГТУ.

2. в выходном патрубке течение носит струйный характер с развитыми вихревыми течениями в центре или у передней стенки патрубка и достаточно большими расходными составлющими скоростей в близи задней стенки патрубка.

3. обтекание силовых стоек (опоры заднего подшипника) с большими углами атаки порождает мощные отрывные течения и образования вихревых зон за диагональным диффузором и в патрубке.

схема течения в выходном тракте представлена на рис. 8.

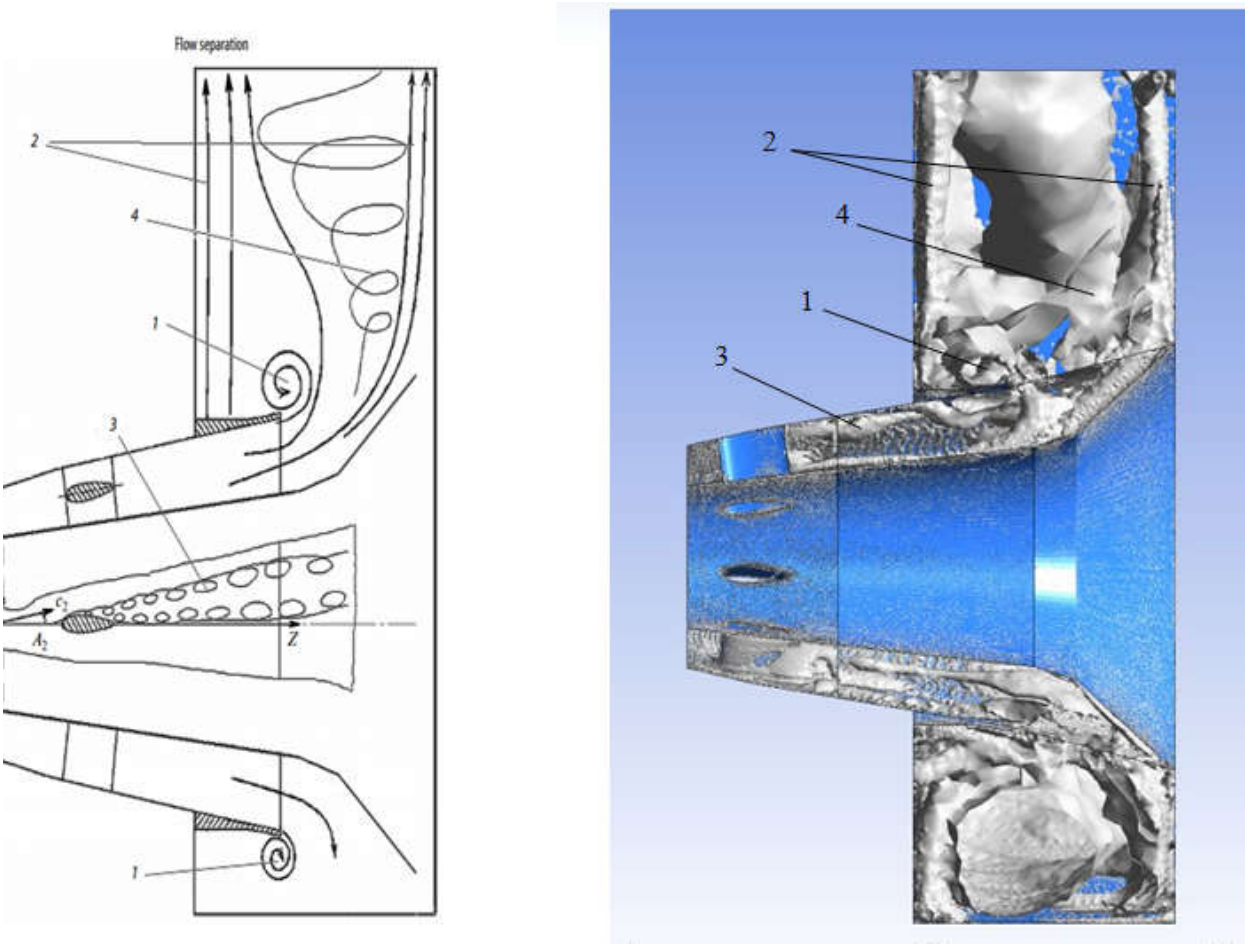

Рис. 8. Схема течения в выходном тракте: 1 - область локаьных открывных течений; 2 - область струйного течения; 3 - область отрывного течения за силовыми стойками; 4 - область развитого вихревого течения.

Заключение

В результате выполненной работы показана:

1. Получены интегральные характеристики диффузора в блоке с предвключенной ступенью: коэффициент восстановления давления для блока $C_p = 0{,}600$; относительный прирост к.п.д. блока «С-Д-П» $\Delta\bar{\eta}_{+Д+П} = 8{,}6\%$; коэффициент внутренних потерь выходного тракта «Д–П» $\zeta_{Д-П} = 0{,}343$.

2. Основные источники потерь кинетической энергии в выходном тракте - недостаточно совершенная организация потока в осерадиальной части диффузора и в выходном патрубке, а также силовые стойки в диффузоре.

3. При аэродинамических исследованиях выходных трактов турбин определяющим фактором в создании реальных входных граничных условий является радиальная неравномерность распределения параметров потока, генерируемая последней ступенью турбины.

4. Повышенная величина $C_p = 0{,}600$ для выходного тракта в блоке с предвключенной ступенью «С-Д-П» 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 научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

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.

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.

Публикации вдругих из даниях

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.
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 научки 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.

Аспирант _____ФИО

(подпись)