

На правах рукописи

ГОЛУШКО Андрей Николаевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАМЕРЫ ЗА РЕГУЛИРУЮЩЕЙ
СТУПЕНЬЮ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность: 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Брянском государственном техническом университете» на кафедре «Тепловые двигатели».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Буглаев Владимир Тихонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Вохмянин Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Галаев Сергей Александрович

Ведущая организация: ЗАО «Институт энергетического
машиностроения и электротехники»

Защита состоится « 13 » декабря 2011 года в 18⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29, Главное здание, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «___» ноября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Талалов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективность работы паротурбинной установки в значительной степени зависит от аэродинамического совершенства ее отдельных элементов. В наиболее тяжелых условиях работы (высокие температуры, давления) оказывается цилиндр высокого давления (ЦВД). Отсек, включающий регулируемую ступень (РС), камеру за ней и первую ступень давления (СД) (далее отсек), существенно влияет на КПД ЦВД.

Парциальный выпуск рабочего тела (р.т.) в камеру согласно численно-экспериментальным исследованиям значительно влияет на работу примыкающей к ней СД, что связано с окружной и радиальной неравномерностями параметров потока в камере, сложным вихреобразным характером течения в ее пространстве. При этом экономичность смежных ступеней снижается.

В результате анализа численных и экспериментальных данных выяснилось, что влияние конструктивных и режимных параметров на работу подобных отсеков продолжает оставаться малоизученным. Поэтому исследования влияния геометрии камеры в сочетании с режимом работы РС на экономичность отсеков паровых турбин с сопловым парораспределением и их совершенствование остаются актуальными и представляют практическую значимость.

В настоящее время для решения задач в области газодинамики широко применяются численные методы с использованием пакетов программ по вычислительной гидрогазодинамике, реализующих *CFD*-технологии (*Computational Fluid Dynamics*). К наиболее распространенным и экспериментально апробированным программам можно отнести *Ansys CFX*, *Ansys Fluent*, *Star-CD*.

Цель и задачи работы – повышение экономичности отсеков паровых турбин с сопловым парораспределением при переменных режимах работы РС. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- разработать методику аэродинамического исследования отсека численными методами;

- создать расчетную модель отсека, позволяющую учитывать изменение степени парциальности и режима работы РС, конструкции камеры;
- провести расчет потерь располагаемой кинетической энергии потока и степени неравномерности течения р.т. на входе в СД при изменении конструктивных и режимных параметров отсека;
- исследовать структуру потока на входе в СД в радиальном и окружном направлениях;
- на основе анализа выполненных расчетов предложить практические рекомендации по модернизации конструкций отсеков с сопловым парораспределением.

Предметом исследования является камера за РС, характеристики р.т. в ней при различном конструктивном оформлении (относительный межступенчатый зазор (ОМЗ) Δz , корневой и периферийный обводы).

Метод исследования. Для решения поставленных задач использовались методы численного моделирования, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкаемых SST моделью турбулентности, методы экспериментального исследования параметров течения в камере при различных конструктивных и режимных параметрах отсека и анализ структуры потока в характерных сечениях.

Достоверность результатов расчета течения в камере подтверждается экспериментальными данными из специальной литературы, а также проведенными автором экспериментальными исследованиями.

Научная новизна работы:

- предложена методика определения влияния конструктивных и режимных параметров на экономичность прилегающей к камере СД;
- выявлена зависимость влияния парциальности и режима работы РС, геометрии камеры на потери располагаемой кинетической энергии и неравномерность параметров р.т. на входе в направляющий аппарат (НА) СД;

- предложены методические рекомендации по выбору конструктивных параметров камеры для обеспечения эффективной работы отсека.

Практическая ценность работы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации эксплуатируемых турбин, оснащенных исследуемыми отсеками с сопловым парораспределением, что повысит их экономичность.

На защиту выносятся:

- разработанная методика для выполнения численных расчетов исследуемых отсеков паровых турбин;
- результаты течений р.т. в камере за РС;
- полученные оптимальные конструктивные параметры камеры;
- характер изменения коэффициента потерь располагаемой кинетической энергии и степени неравномерности параметров р.т. в зависимости от конструктивных и режимных параметров.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования течения р.т. в камере в программном комплексе *Ansys CFX*, в проведении расчетов, в анализе полученных результатов, в создании модельного отсека (МО) и проведении экспериментальных работ по теме диссертации.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на научно-технической конференции студентов и аспирантов (Брянск, 2008), на международных научно-практических конференциях по проблемам энергетики и теплоснабжения (Брянск, 2010 и 2011), на научно-техническом семинаре кафедры «Турбинные двигатели и установки» СПбГПУ (С.-Петербург, 2011).

Публикации. Основные материалы диссертации представлены в 5 статьях, из них 3 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК России, а также в материалах 4 научно-технических конференций и патенте на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заклю-

чения, библиографического списка, содержащего 75 наименований. Общий объем диссертации составляет 125 страниц текста, включая 70 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, указаны применяемые методы исследований, определены научная новизна и практическая ценность работы, описана ее структура и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор известных численных и экспериментальных работ по исследованию отсеков паровых турбин с сопловым парораспределением и по проблемам совершенствования их конструкции. Сформулированы задачи исследования. Физические и аналитические исследования отсека подтверждают существование окружной и радиальной неравномерностей в камере за РС, на входе в НА и на выходе из РК СД.

Анализ литературных данных позволяет установить следующие недостаточно изученные проблемы проектирования подобных отсеков:

- влияние режимов работы РС на экономичность отсека;
- поиск путей конструктивного совершенствования камеры с целью снижения потерь располагаемой кинетической энергии в ней и снижения неравномерности параметров р.т. на входе в НА СД.

С целью сравнения многочисленных наработок по исследуемому отсеку и дальнейшего его совершенствования определены основные условия работы (конструктивные и режимные параметры), оказывающие влияние на его эффективность. К ним относятся степень парциальности РС (e), режим работы РС ($x < x_{opt}$, $x = x_{opt}$, $x > x_{opt}$), ОМЗ $\bar{\Delta z} = \Delta z / l_{21}$ (Δz – межступенчатый зазор между РС и последующим НА СД; l_{21} – высота рабочей лопатки РС), периферийный и корневой меридиональные обводы камеры. Указанные направления требуют детального численно-экспериментального исследования при определении опти-

мального варианта камеры для каждой конкретной конструкции отсека.

Исследование течения р.т. в камере за РС при различных условиях работы является сложной задачей. В настоящее время существует тенденция доводки экспериментальной модели численными методами на основе коммерческих и разработанных собственными усилиями научных организаций гидрогазодинамических пакетов. К ним относятся, например, *Ansys CFX*, *SINF*, *Ansys Fluent*, *CFX-TASCflow*, *Star-CD*, *Fine Turbo* и др. В настоящей работе выбран программный комплекс *Ansys CFX* с применением модели турбулентности *SST (Shear Stress Transport)*, которая наилучшим образом подходит для подобных вычислений. Данная модель поддерживает метод пристеночных функций, которые связывают параметры течения с расстоянием от стенки, что позволяет избегать очень мелких сеток вблизи стенки.

Во второй главе кратко рассматривается методика проведения физического эксперимента необходимого для апробации расчетов на основе численного моделирования, дается описание экспериментального МО. Приводится методика осреднения параметров потока при обработке полученных результатов. Описываются методы оценки потерь располагаемой кинетической энергии и неравномерности параметров течения р.т. в камере.

Опыты проводились при значениях чисел Маха $M_{C_{1r}} = 0,4 \dots 0,45$ и Рейнольдса $Re_{C_{1r}} = (3,5 \dots 4) \cdot 10^5$, определяемых по теоретической скорости в НА РС.

Потери располагаемой кинетической энергии в камере оценивались по следующей зависимости: $z = 1 - \left(1 - (p_{02} / p_{02}^*)^{\frac{k-1}{k}} \right) / \left(1 - (p_{02} / p_{21}^*)^{\frac{k-1}{k}} \right)$. Для количественной оценки степени окружной неравномерности, например входного поля полного давления перед НА СД, использовался следующий коэффициент неравномерности: $\Phi = \left(\Delta p_{02}^{*\max} - \Delta p_{02}^{*\min} \right) / \Delta p_{02}^{*cp}$.

В третьей главе описаны уравнения движения, энергии, неразрывности,

модели турбулентности, используемые при решении поставленных задач численными методами. Приведена методика расчета отсека в *Ansys CFX*.

Расчетная модель (РМ) отсека включала сеточные модели НА РС, РК РС, камеры, НА СД. Геометрические и сеточные модели (ГМ и СМ) НА и РК создавались в специализированных модулях *Ansys BladeGen* и *Ansys TurboGrid*. ГМ и СМ камеры создавались в *Ansys Design Modeling* и *Ansys Meshing*.

Для расчета применялся режим потока *Steady State* (установившийся режим течения р.т.); режим течения с теплопереносом *Heat Transfer*. Осредненная по Рейнольдсу система уравнений Навье-Стокса замыкалась двухпараметрической моделью турбулентности *SST (Shear Stress Transport)* – модель переноса сдвиговых напряжений. Данная модель обеспечивает хорошую сходимость при отрыве потока от гладких поверхностей, поддерживает метод пристеночных функций.

Условие сопряжения на поверхности интерфейса – *Frozen Rotor* («замороженный» ротор). В процессе расчета роторные элементы проточной части полагаются зафиксированными в определенном угловом положении относительно статорных элементов. Осреднение на поверхности интерфейса не выполняется, что позволяет моделировать парциальный подвод р.т. и воздействие явлений на концах сегментов сопел в камере за РС.

Программа *Ansys* при дискретизации уравнений математической модели использует метод взвешенных невязок. В данном методе решение считается выполненным при очень малых значениях невязок, поэтому задавалось значение невязок в диапазоне от 10^{-4} (для грубой сетки) до 10^{-5} (для мелкой сетки).

Расчет течения р.т. выполнялся путем численного решения системы уравнений, описывающих наиболее общий случай движения жидкой среды. Таковыми являются уравнения Навье – Стокса и неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(ru_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(ru_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i; \quad \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(ru_j) = 0.$$

Здесь использована сокращенная запись уравнений, $i, j = 1 \dots 3$, предполага-

ется суммирование по одинаковым индексам, x_1, x_2, x_3 – оси координат, t – время. Член f_i отражает действие массовых сил. В этой системе из 4 уравнений независимыми параметрами являются 3 компонента скорости u_1, u_2, u_3 и давление p .

Четвертая глава посвящена повышению эффективности рабочего процесса отсека в *Ansys CFX*. Исследовано влияние качества расчетной сетки на результат численного решения. Для этого проведена серия численных экспериментов, в которых рассматривалось влияние форм-параметра РМ ($Mesh = V_{\text{модели}} / N_{\text{элемент}} \cdot 10^8$, где $V_{\text{модели}}$ – объем ГМ; $N_{\text{элемент}}$ – число конечных элементов) на результат расчета. Диапазон форм-параметра составил 0,023...6,329. Для получения достоверных результатов и сравнения различных численных экспериментов необходимо применение РМ с одинаковым значением форм-параметра *Mesh*. Необходимо стремиться получить *Mesh* равным 0,8...0,9. Качество сетки необходимо выбирать оптимальной с точки зрения правильного физического описания потока р.т. в сложных местах. Дальнейшее уменьшение значения форм-параметра *Mesh* нецелесообразно с точки зрения значительного увеличения затрат вычислительных ресурсов.

В периферийной и корневой областях камеры за РС образуются развитые вихри. Для устранения этих вихрей применялись меридиональные обводы, и анализировалось их влияние на течение основной массы р.т. Целью данного расчета являлось сравнение коэффициентов неравномерности параметров потока в выходном сечении камеры базового и усовершенствованных вариантов с обводами, сравнение потерь располагаемой кинетической энергии. Неравномерность абсолютной скорости потока при установке меридиональных обводов снизилась 0,839...0,624. Для радиальной и осевой составляющих абсолютной скорости показатели неравномерности снизились соответственно 0,781...0,629 и 0,863...0,625. Неравномерность полного давления снизилась 0,869...0,767. Наблюдалось снижение неравномерности угла выхода потока из камеры в меридиональной плоскости 0,627...0,46. Применение меридиональных обводов сни-

зило показатели неравномерности параметров потока: $\Phi_{C_{O_2}}$ – на 25,6%, $\Phi_{CZ_{O_2}}$ – на 27,6%, $\Phi_{CR_{O_2}}$ – на 11,4%, $\Phi_{P_{O_2}^*}$ – на 11,8%, $\Phi_{g_{O_2}}$ – на 26,6%. Эти показатели позволяют говорить об эффективности применения периферийного и корневого обводов в камере за РС. Коэффициент потерь располагаемой кинетической энергии снизился на 40%.

Снижение коэффициентов неравномерности параметров р.т. объясняется отсутствием в камере с обводами развитых вихревых течений, в которых составляющие абсолютной скорости принимают существенные значения. Плавный переход основного течения от входа к выходу камеры без прохождения через зоны разряжения периферийной и корневой областей приводят к минимуму радиальной составляющей скорости на выходе и лучшему сохранению кинетической энергии потока. Таким образом, применение меридиональных обводов необходимо для снижения потерь кинетической энергии и неравномерности параметров

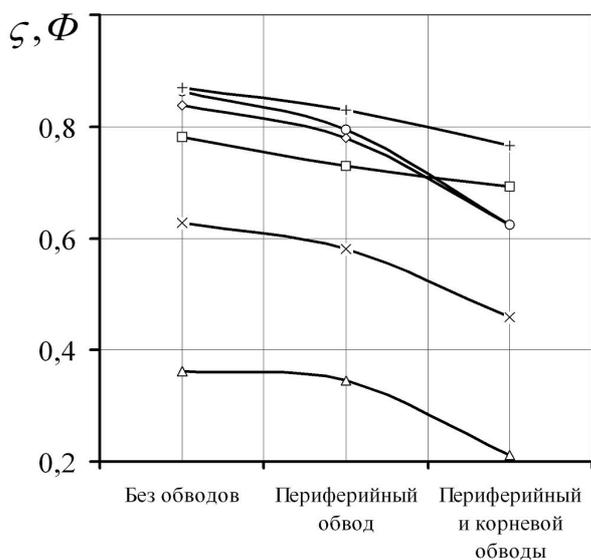


Рис. 1. Зависимость потерь располагаемой кинетической энергии и неравномерности параметров р.т. от наличия меридиональных обводов в камере:

$\Delta - V = f$ (наличие обводов); $\diamond - \Phi_{C_{O_2}} = f$ (наличие обводов); $o - \Phi_{CZ_{O_2}} = f$ (наличие обводов); $\square - \Phi_{CR_{O_2}} = f$ (наличие обводов); $+ - \Phi_{P_{O_2}^*} = f$ (наличие обводов); $\times - \Phi_{g_{O_2}} = f$ (наличие обводов)

р.т. в камере (рис. 1).

Увеличение угла разворота РМ q (например, переход решения задачи от сектора к полной 360°-й модели) не приводит к значительным отличиям результатов осредненных параметров потока (<1%), но приводит к увеличению времени проведения расчета. Следовательно, в зависимости от поставленной задачи (осесимметричное течение или парциальный впуск р.т.) рекомендуется использовать один из подхо-

дов. В первом случае – секторный, во втором случае – рассчитывать полную модель. При расчете отсека с сопловым парораспределением необходимо применение РМ с углом разворота $q = 360^\circ$.

Потери располагаемой кинетической энергии, неравномерность параметров р.т. на входе в НА СД зависят от степени парциальности РС и ОМЗ. Количественно данные показатели оценивались в эксперименте, в котором $\Delta\bar{z} = 1; 2,5; 3,5; 5$ при значениях степени парциального впуска $e = 1; 0,875; 0,75$. Меридиональные обводы обеспечивали плавный переход основного потока от входа к выходу. Геометрический профиль камеры конструктивно менялся следующим образом (рис. 2).

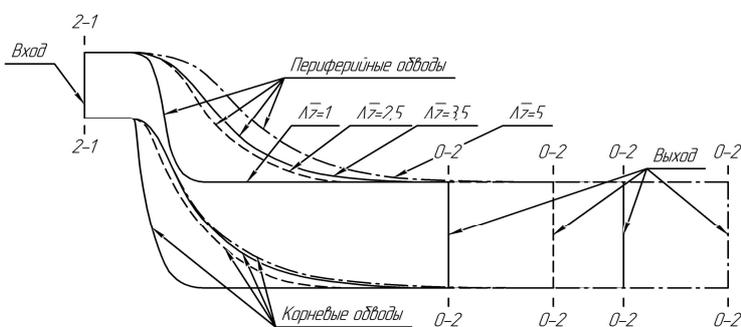


Рис. 2. Геометрия профиля камеры при изменении относительного межступенчатого зазора $\Delta\bar{z}$

Рассматривался оптимальный режим работы камеры за РС, при котором угол выхода потока из РК РС равнялся $\alpha_{21} = 90^\circ$. Таким образом, закрутка потока на входе отсутствовала, и ее влияние на структуру потока в камере не учитывалось. РМ представля-

ла собой кольцевой канал с заданной степенью парциальности e на входе.

Число конечных элементов расчетной сетки моделей варьировалось в зависимости от степени парциальности e и ОМЗ $\Delta\bar{z}$ в пределах 1653504...1953950. Полученные в результате эксперимента данные представлены на рис. 3.

Общей тенденцией является снижение коэффициента потерь при увеличении ОМЗ. Коэффициент повышения полного давления $\Pi = p_{02}^* / p_{21}^*$ с увеличением $\Delta\bar{z}$ повышается, что и обуславливает снижение потерь в камере. При увеличении $\Delta\bar{z} = 1; 2,5; 3,5; 5$ при $e = 0,75$ коэффициент потерь соответственно уменьшился 0,647; 0,538; 0,535; 0,511 (снизился на 21%) при одновременном

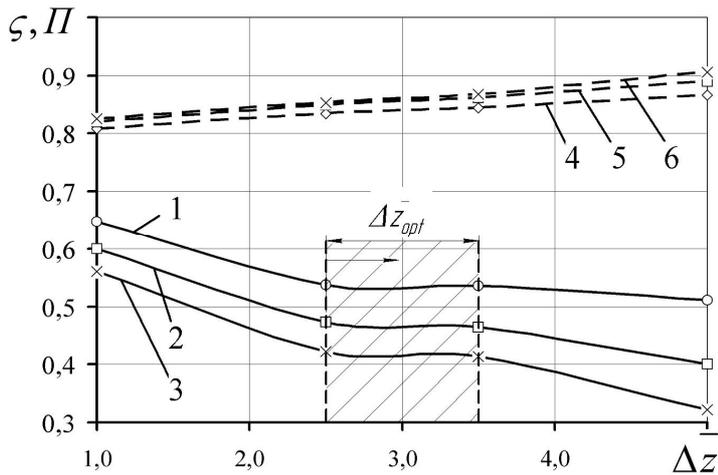


Рис. 3. Зависимость потерь z в камере и числа $\Pi = p_{02}^* / p_{21}^*$ от ОМЗ $\Delta \bar{z}$ и парциальности РС e : 1,2,3 – $z = f(\Delta \bar{z})$ соответственно при $e = 0,75$; 0,875 и 1; 4,5,6 – $\Pi = f(\Delta \bar{z})$ соответственно при $e = 0,75$; 0,875 и 1

снижении градиента потерь. При изменении ОМЗ $\Delta \bar{z} = 1...2,5$; $\Delta \bar{z} = 2,5...3,5$; $\Delta \bar{z} = 3,5...5$ коэффициенты потерь V снизились соответственно на 16,8%, 0,5% и 4,5%. При увеличении $\Delta \bar{z} = 1; 2,5; 3,5; 5$ при $e = 0,875$ коэффициент потерь снизился на 33%. Обнаруженная закономерность объясняется возникновением сложных и достаточно мощных вихревых течений, на

создание которых затрачивается значительная часть располагаемой энергии р.т., и тем самым уменьшается полезная работа СД. В расчетах численными методами образование вихревых течений доказывается в области тени неактивной дуги (рис. 4б).

Таким образом, при значении $\Delta \bar{z} = 2,5...3,5$ градиент снижения потерь значительно уменьшается, и потери в камере мало зависят от $\Delta \bar{z}$. При $\Delta \bar{z} > 3,5$ градиент снижения потерь увеличивается, но по значению становится меньше, чем при $\Delta \bar{z} = 1...2,5$. Полученные данные хорошо согласуются с физическим экспериментом.

При увеличении $\Delta \bar{z} = 1; 2,5; 3,5; 5$ при $e = 0,75$ коэффициенты неравномерности абсолютной скорости $\Phi_{C_{02}}$, осевой составляющей абсолютной скорости $\Phi_{C_{Z_{02}}}$, полного давления $\Phi_{P_{02}^*}$ снизились соответственно на 21%, 2,5%, 38%. Результаты расчетов коэффициентов неравномерности параметров потока на выходе из камеры представлены в табл. 1.

Зависимость степени неравномерности параметров р.т. на входе
в НА СД от степени парциальности РС e и ОМЗ $\Delta\bar{z}$

Неравномерность	Относительный межступенчатый зазор, $\Delta\bar{z}$			
	1	2,5	3,5	5
$\Phi_{C_{O_2}}$ при $e = 0,875$	0,852	0,409	0,211	0,098
$\Phi_{C_{O_2}}$ при $e = 0,75$	1,171	0,513	0,269	0,172
$\Phi_{CZ_{O_2}}$ при $e = 0,875$	1,511	0,613	0,152	0,102
$\Phi_{CZ_{O_2}}$ при $e = 0,75$	1,764	0,751	0,272	0,179
$\Phi_{CR_{O_2}}$ при $e = 0,875$	0,865	0,54	0,42	0,365
$\Phi_{CR_{O_2}}$ при $e = 0,75$	1,063	0,615	0,513	0,423
$\Phi_{P_{O_2}^*}$ при $e = 0,875$	2,508	0,951	0,352	0,271
$\Phi_{P_{O_2}^*}$ при $e = 0,75$	2,901	1,115	0,458	0,332

Поток приобретает наименьшую неравномерность распределения параметров потока при наибольшем $\Delta\bar{z}$ и наибольшем значении парциальности e .

Таким образом, при увеличении $\Delta\bar{z}$ уменьшается наличие конфузорных участков, приводящих к локальным увеличениям скорости, уменьшаются потери энергии на образование сложных вихревых течений. Как следствие, снижаются потери располагаемой кинетической энергии V и коэффициенты неравномерности параметров р.т. $\Phi_{C_{O_2}}$, $\Phi_{CZ_{O_2}}$, $\Phi_{CR_{O_2}}$, $\Phi_{P_{O_2}^*}$, что позволяет повысить эффективность работы последующей СД.

Качественно представленные расчеты можно оценить по рис. 4. При отсутствии тангенциальной закрутки на входе ($a_{21} = 90^\circ$) поток в камере не растекается в окружном направлении, и на выходе из нее создается значительная неравномерность параметров р.т. (рис. 4а). Безрасходная зона пониженного давления в области тени неактивной дуги является причиной образования встречных вихрей (рис. 4б), что приводит к существенным потерям кинетической энергии в камере. Наличие центростремительной закрутки потока в камере определяет радиальную неравномерность параметров на выходе из нее (рис. 4а).

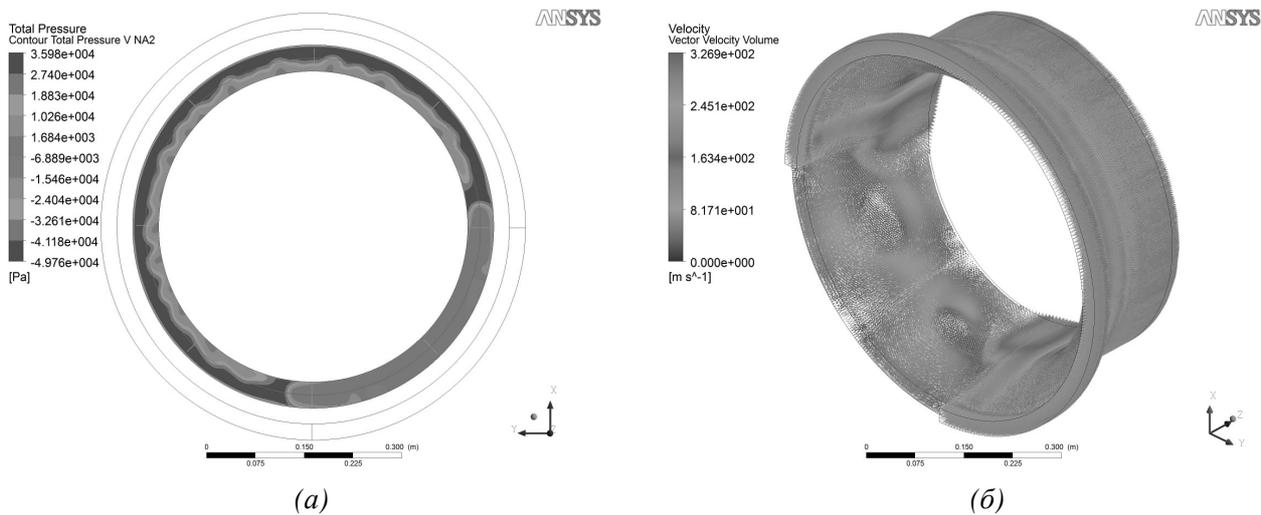


Рис. 4. Распределение параметров потока в камере за РС при $e = 0,75$ и $\Delta \bar{z} = 5$:
 (а) – полного давления на выходе из камеры p_{02}^* ;
 (б) – распределение векторов абсолютной скорости в камере

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Опыты показали, что необходимо стремиться получить форм-параметр РМ *Mesh* равным 0,8...0,9.

2. Эффективным методом снижения потерь кинетической энергии в камере и снижения неравномерности течения р.т. является применение меридиональных обводов. Так, применение меридиональных обводов снизило показатели неравномерности параметров потока: $\Phi_{C_{02}}$ – на 25,6%, $\Phi_{CZ_{02}}$ – на 27,6%, $\Phi_{CR_{02}}$ – на 11,4%, $\Phi_{P_{02}^*}$ – на 11,8%, $\Phi_{g_{02}}$ – на 26,6%. Коэффициент потерь располагаемой кинетической энергии снизился на 40%, что не является предельным, так как возможны резервы понижения потерь энергии в камере, применяя более оптимизированные профили обводов.

3. В исследованном отсеке при работе на режимах, близких к оптимальным, обнаружено различное влияние на потери энергии в камере и неравномерность параметров р.т. перед НА СД ОМЗ и степени парциальности. Общей тенденцией является снижение коэффициента потерь и неравномерности при увеличении ОМЗ. Например, при увеличении $\Delta \bar{z} = 1; 2,5; 3,5; 5$ при $e = 0,75$ коэффициент не-

равномерности абсолютной скорости $\Phi_{C_{02}}$ снизился на 21%. При значении $\Delta \bar{z} > 2,5$ градиент снижения потерь значительно уменьшается, и потери в камере мало зависят от $\Delta \bar{z}$.

4. Для повышения экономичности отсеков с сопловым парораспределением следует рекомендовать:

- на стадии проектирования принимать меры по закрутке потока за РС в пределах рабочего диапазона переменных режимов работы;
- применять корневой и периферийный меридиональные обводы оптимально профиля для данной конструкции камеры;
- в зависимости от выбранной степени парциальности РС выбирать оптимальное значение ОМЗ $\Delta \bar{z} \geq 2,5$;
- подбирать оптимальные конструктивные параметры камеры по изложенной методике расчета отсека численными методами.

Публикации по теме диссертации:

1. А.Н. Голушко. Постановка задачи исследования неравномерного течения в отсеке турбомашин с использованием программных комплексов, основанных на методе конечных элементов // Материалы 63-й студенческой научной конференции / под ред. И.В. Говорова. – Брянск: БГТУ, 2008. – С. 138-139.
2. **А.Н. Голушко, А.В. Бирюков, А.В. Осипов. Повышение эффективности работы парциального отсека паровой турбины благодаря физическому и численному моделированию // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – С.-П. – 2010. – №3. – С. 40-45.**
3. А.Н. Голушко. Исследование влияния межступенчатого зазора на работу парциального отсека паровой турбины в Ansys CFX // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под ред.

И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2010. – С. 39-41.

4. А.Н. Голушко, А.В. Бирюков, В.Т. Буглаев, А.В. Осипов. Определение интегральной характеристики полноподводной одновенечной турбинной ступени численными методами // Вестник БГТУ. – 2011. – №2. – С. 47-54.
5. А.Н. Голушко, А.В. Бирюков, А.В. Осипов. Результаты экспериментального исследования течения потока в уравнивательной камере // Вестник БГТУ. – 2011. – №3. – С. 80-87.
6. А.Н. Голушко. Структура подхода к определению оптимальной геометрии уравнивательной камеры парциального отсека турбины методом численного моделирования // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докладов IV-й Междунар. науч. заоч. конф. / ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – С. 97-98.
7. А.Н. Голушко. Газодинамический расчет системы автоматического регулирования направлением потока в камере регулирующей ступени паровой турбины // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2011. – Ч. 1. – С. 72-74.
8. А.Н. Голушко, А.В. Бирюков, В.Т. Буглаев, А.В. Осипов. Пат. Российская Федерация, МПК F01D 17/14, F01D 9/04. Система регулирования направлением потока в камере регулирующей ступени паровой турбины. – № 2010112724/06(017880); заявл. 01.04.2010. – 6 с. (Получено положительное решение о выдаче 04.05.2011).