

На правах рукописи

Черников Виктор Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВХОДНЫХ ТРАКТОВ,
СТУПЕНЕЙ И ВЫХОДНЫХ ДИФФУЗОРОВ СТАЦИОНАРНЫХ
ГАЗОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ
ГАЗОПАРОВЫХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.04.12 – Турбомашинны и комбинированные турбоустановки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Турбинные двигатели и установки»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Рассохин В.А.

Официальные оппоненты:

Зарянкин Аркадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО МЭИ, кафедра «Паровые и газовые турбины», Москва, профессор

Тихомиров Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, ГОУ ВПО СПбМТУ, кафедра «Судовые турбины и турбинные установки», С.-Петербург, профессор

Михайлов Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, ОАО «НПО ЦКТИ», С.-Петербург, генеральный директор.

Ведущая организация:

ЗАО «РЭП Холдинг», Санкт-Петербург

Защита состоится « 19 » февраля 2013 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, главное здание, ауд. 118.

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

Автореферат разослан « » декабря 2012 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В Российской Федерации на базе комбинированных и газотурбинных станций вырабатывается лишь около 2,9% общего объёма электроэнергии. К тому же оборудование теплоэлектростанций в России, которое в начале 21-го века более чем наполовину выработало свой ресурс, требует замены его на современную технику. В этих условиях ускоренное внедрение комбинированных газопаровых установок в электроэнергетику является неотложной и важной проблемой, которая по экономическим и экологическим причинам не имеет альтернативного решения для ТЭС, работающих на органическом топливе.

В связи с тем, что 85% введённых мощностей комбинированных газопаровых установок работают по тепловой схеме с котлом-утилизатором, важнейшим агрегатом в которой является газовая турбина, то создание высокоэкономичной энергетической газотурбинной установки большой мощности является актуальной проблемой. Аэродинамическое совершенствование проточной части газотурбинных установок нового типа для комбинированных ГПУ является одной из центральных задач в ряду большого числа существующих проблем.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью разработать обобщённые рекомендации, направления и методы проектирования проточных частей важных элементов энергетических ГТУ на основе комплексного изучения физических процессов их работы экспериментальными, численными и теоретическими методами с целью достижения высоких и надёжных показателей их аэродинамической эффективности.

Цель работы. Разработать методы и рекомендации, основанные на обобщении полученных в работе результатов, для проектирования проточных частей входных трактов (ВХТ), высоконагруженных ступеней большой циркуляции и выходных систем последняя ступень-диффузор газовых турбин стационарных ГТУ большой единичной мощности, предназначенных для работы в составе ГПУ с котлом-утилизатором, на основе изучения физических процессов в потоке рабочей среды экспериментальными, численными и теоретическими методами.

Научная новизна работы состоит в нижеследующем:

- Разработан и реализован на практике комплексный подход для экспериментального определения интегральных аэродинамических характеристик в сочетании с исследованием трёхмерной структуры 3D-потока во входных трактах ГТУ, турбинных ступенях и выходных диффузорах турбомашин на основе использования

измерений трёхмерной структуры потока и численного анализа вязкого сжимаемого течения рабочей среды по уравнениям Навье-Стокса.

- Разработаны оригинальные методики по экспериментальному исследованию на крупномасштабных моделях, основанные на измерениях трёхмерной структуры потока и моделировании нестационарных процессов с помощью турбинных ступеней. Эти методики применены для исследований важнейших элементов проточных частей энергетических ГТУ большой единичной мощности: входных трактов, турбинных ступеней и выходных диффузоров.
- Получены и обобщены новые экспериментальные данные по аэродинамическим характеристикам входных трактов современных стационарных ГТУ для комбинированных газопаровых установок. На основе обобщения результатов исследования разработаны рекомендации по выбору конструктивных элементов проточной части ВХТ и оценке их аэродинамических характеристик.
- Разработаны рекомендации по методам проектирования высокоэффективных турбинных ступеней большой циркуляции части высокого давления на основе теоретической оптимизации проточной части ступеней с использованием обобщённых данных по потерям кинетической энергии во вращающихся решетках РК и экспериментальной отработки ступеней большой циркуляции.
- Разработан новый метод аэродинамической оптимизации проточной части выходных диффузоров газовых турбин стационарных ГТУ комбинированных газопаровых установок, основанный на экспериментальных исследованиях блока «последняя ступень-выходной диффузор» и численном анализе 3D-потока.
- Получены новые экспериментальные данные по суммарным характеристикам и структуре 3D-потока для выходных диффузоров и блоков «ступень-диффузор» стационарных ГТУ комбинированных ГПУ, дающих основу для проектирования высокоэффективных диффузоров таких турбин.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций. Основные научные положения и выводы подтверждены результатами экспериментальных исследований и данными численных и теоретических оптимизационных расчётов. Первостепенную роль в обосновании достоверности результатов играли интегральные характеристики исследованных объектов: к.п.д. и расходные характеристики ступеней, коэффициенты потерь в НА и РК ступеней, коэффициенты сопротивления входных трактов и коэффициенты восстановления C_p турбинных диффузоров. Данные численных и теоретических исследований сопоставлялись с результатами эксперимента.

Практическая ценность. Представленные в диссертационной работе выводы и обобщения могут использоваться в качестве практических рекомендаций для проектирования новых и модернизации имеющихся проточных частей исследованных элементов стационарных газовых турбин. К этим рекомендациям относится выбор оптимальных соотношений конструктивных элементов проточной части входных трактов стационарных ГТУ, обеспечивающих полученные в опытах аэродинамические характеристики. Представленные в работе выводы по выбору конструктивных, кинематических и динамических чисел подобия (степени реактивности характеристического числа u/C_0 , коэффициента циркуляции, максимальных чисел Маха) потока в ступенях большой циркуляции, а также по выбору типа закрутки лопаточного аппарата дают чёткие границы по расчёту и проектированию таких высокоэффективных ступеней для турбин стационарных ГТУ. Немаловажны практические результаты исследований блока «последняя ступень-выходной диффузор», показавшие необходимость расчёта и профилирования проточной части последней ступени турбины и диффузора как единого целого.

Практическая ценность результатов исследований подтверждена на действующих стационарных ГТУ: ГТН-16 и ГТН-25 ООО «Турбомоторный завод», ГТН-25 ООО «Невский машиностроительный завод», V64.3, V84.3, V94.3 и SGT5-8000 Н фирмы Siemens AG Power Generation.

Личный вклад.

- Разработана и внедрена в практику методика экспериментальных исследований на моделях входных трактов, турбинных ступеней, переходных и выходных диффузоров, блоков «ступень-диффузор» для стационарных ГТУ комбинированных установок. Отличительные качества методики состоят в широком использовании измерений векторных полей скоростей трёхмерных потоков, измерением расходных характеристик исследуемых объектов, моделированием граничных условий с помощью лопаточных венцов ВНА в моделях ВХТ и посредством турбинных ступеней при исследованиях переходных и выходных диффузоров. Автоматизация систем измерений, являющаяся частью разработанной методики, позволило существенно повысить качество опытов.
- Созданы оригинальные экспериментальные стенды для аэродинамических исследований на моделях входных трактов, одно- и двухвальных турбинных отсеков, блоков «последняя ступень-выходной диффузор» с целью отработки конструкций их проточных частей и валидирования численных моделей течения.

- Разработаны рекомендации по методам проектирования проточных частей входных трактов стационарных ГТУ на основе выполненного комплекса экспериментальных и расчётных исследований (конструктивные меры по предотвращению интенсивных пульсаций потока, рекомендации по выбору оптимальных размеров и формы подводящего тракта и входного конфузора).
- Разработаны рекомендации по выбору конструктивных и газодинамических параметров турбинных ступеней большой циркуляции части высокого давления стационарных газовых турбин, основанные на данных систематических экспериментальных исследований и предварительных оптимизационных расчётов.
- Разработан новый подход к профилированию обводов проточной части выходных турбинных диффузоров, устанавливаемых за ступенью большой циркуляции, на основе полученных экспериментальных данных и численного моделирования потока, полученных при исследованиях блока «ступень-диффузор».

Автор защищает:

1. Методику экспериментальных исследований аэродинамических характеристик проточных частей элементов стационарных ГТУ на модельных опытных стендах, основанную на определении как интегральных характеристик входных трактов, ступеней большой циркуляции и двухступенчатых отсеков, блока «ступень-выходной диффузор», так и на измерениях полей параметров и скоростей трёхмерного потока с помощью 3D-зондов.
2. Результаты экспериментальных исследований аэродинамики проточных частей важнейших элементов стационарных ГТУ комбинированных газопаровых установок, включая также результаты сравнительного анализа полученных опытных данных и данных численных расчётов и теоретических исследований.
3. Разработанные рекомендации по формированию проточных частей входных трактов стационарных ГТУ и рекомендации по оценке их аэродинамических характеристик.
4. Экспериментальные результаты по отработке аэродинамики ступеней большой циркуляции и двухступенчатых отсеков с такими ступенями и рекомендации по их проектированию.
5. Результаты комплексных опытных исследований аэродинамических характеристик блока «турбинная ступень-диффузор» с использованием данных численных расчётов потока в блоке для валидации расчётной модели.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: XLXI Научно-технической сессии комиссии РАН по газовым тур-

бинам в 2004 г.; международных конференциях - XXIV Kraftwerktechnisches Kolloquium (KWTK), Dresden, 1992г.; XXV KWTK, Dresden, 1993г.; XXVI KWTK, Dresden, 1994 г.; 39.KWTK, Dresden, 2007 г.; 40.KWTK, Dresden, 2008 г.; 43.KWTK, Dresden, 2011 г.; WorkShop-Diffusor: I, Leibniz Uniwersität Hannover, 2006 г.; II, Technische Universität Stuttgart, 2007 г.; III, Ruhr-Universität Bochum, 2008 г.; IV, Polytechnische Universität St.Petersburg, 2010 г.; Wissenschaftliches Simposium an der Leibniz Universität Hannover, 2010 г.; Политехнический симпозиум, 2010 г., Санкт-Петербург; Республиканская научно-техническая конференция, Институт проблем машиностроения АН УССР, Харьков, 1982, 1985, 1988 г.; Всесоюзная межвузовская конференция «Газотурбинные и комбинированные установки», МВТУ, Москва, 1983.

Публикации по работе. Основные результаты исследований опубликованы в 46 работах, в том числе 6 изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка, включающего 118 наименований. Работа изложена на 309 страницах, содержит 130 рисунков и 21 таблицу.

Краткое содержание работы

Введение посвящено аргументации актуальности изложенных в диссертации проблем современных инновационных технологий электроэнергетики на основе стационарных газотурбинных установок в комбинированных газопаровых блоках, определению основных задач и целей исследования, изложению главных аспектов практической значимости решаемой научной проблемы.

Глава 1 содержит анализ основных тенденций и научных прогнозов развития тепловой энергетики на базе ископаемых топлив и связанным с этими прогнозами стремительным внедрением в теплоэнергетику стационарных газотурбинных установок большой единичной мощности на базе технологий комбинированных газопаровых циклов.

Изменение структуры первичных теплоносителей в настоящий краткосрочный период показывает, что в масштабах мировой энергетики доля природного газа резко возрастает, и к 2025 г. практически достигнет потребления каменных углей, составив величину 33% всей вырабатываемой энергии. Это обстоятельство дает четкое направление в развитии энергетики, которое ориентировано на применение комбинированных тепловых электростанций с турбомашинами. Такая ориентация определяется целым рядом ключевых аспектов.

Термодинамические аспекты. Мировой опыт в области создания паротурбинных электростанций показывает, что рациональным пределом начальной температу-

ры пара является $t_0 = 600 \dots 650^\circ\text{C}$, а достижимый к.п.д. такой установки лежит в пределах своего максимального уровня - 50...52%.

Реально достигнутый к.п.д. современных ГПУ с котлом-утилизатором составляет величину 60,7% при мощности электростанции около 578 МВт с одной ГТУ и одной ПТУ. В этих условиях количество выбросов CO_2 в атмосферу уменьшается приблизительно на 40% по сравнению с аналогичными выбросами газов в действующих ПТУ. Доля мощности газотурбинной установки в составе ГПУ с котлом-утилизатором (ГПУ КУ) в суммарной мощности всей станции достигает 70%. Поэтому для таких комбинированных установок создание высокотемпературной и мощной стационарной газовой турбины является наиболее важной и одновременно трудной задачей, так как, по выражению академика О.Н.Фаворского, «...газовая турбина – самый сложный по состоянию агрегат из известных человечеству».

Экология и глобальное потепление климата. Эмиссия CO_2 в значительной степени зависит от технологии производства электроэнергии: комбинированные станции ГПУ КУ имеют удельную эмиссию CO_2 (в расчёте на 1 кВт/ч вырабатываемой энергии) почти в 2,5 раза меньше, чем ПТУ, работающие на буром угле, и почти в 2 раза ниже, чем паротурбинные установки на каменном угле.

Высокий уровень к.п.д. ГПУ КУ открывает пути для рентабельного редуцирования или полного удаления эмиссии CO_2 и других вредных газов в атмосферу путем или их химического связывания, абсорбции, или за счёт сжижения в специальных криогенных установках.

Ретроспектива возрастания единичных мощностей стационарных ГТУ и комбинированных ГПУ. Одной из главных тенденций развития стационарного газотурбостроения в индустриальных странах мира явилось стремление к достижению большой мощности в одном агрегате. В течение приблизительно 30 лет единичная мощность стационарного газотурбинного агрегата для ГПУ КУ возросла более чем в 5 раз и достигла величины 375 МВт (ГТУ SGT5-8000 H). Такой рост мощностей единичных энергетических ГТУ и, соответственно, ГПУ КУ объясняется несколькими причинами, главная из которых – экономическая эффективность, связанная со значительным снижением стоимости установленного 1 кВт для агрегатов большой единичной мощности.

Глава 2 посвящена анализу конструктивных особенностей стационарных ГТУ для комбинированных ГПУ и роли аэродинамических качеств входных трактов, высоконагруженных турбинных ступеней и выходных диффузоров в показателях мощ-

ных энергетических ГТУ. Дается подробный анализ особенностей конструкций стационарных ГТУ, предназначенных для работы в комбинированном цикле, крупнейших мировых фирм – Siemens AG PG, General Electric, Alstom, Mitsubishi, а также отечественных фирм – СП ООО «Интертурбо» и ОАО «НПО Сатурн».

Проведенный подробный анализ конструкций стационарных ГТУ сделал возможным выявить общность тенденций в решении конструктивных проблем, а также существенные различия в решении тех или иных особенностей, связанных с совершенствованием установок.

В этой же главе дается анализ аэродинамических характеристик *входных трактов* и их влияния на показатели эффективности ГТУ для комбинированных установок, показаны особенности аэродинамики *ступеней большой циркуляции* газовых турбин стационарных ГТУ, которые ставят ряд новых задач по выбору конструктивных и режимных параметров подобных ступеней, рассматривается также влияние аэродинамических качеств *выходного диффузора турбины* на эффективность ГТУ комбинированной установки.

Глава 3 содержит комплексные экспериментальные и численные исследования аэродинамики входных трактов ГТУ для комбинированных установок 1-го и 2-го поколений новейших электростанций.

Экспериментальные исследования выполнялись согласно общей теории подобия на моделях, в которых выдерживалось кинематическое и динамическое подобие потоков путём достижения равенства определяющих критериев подобия. В данном случае выдерживались числа Маха ($M_{\text{мод}} = M_{\text{нат}} = 0,50 \dots 0,52$), Рейнольдса ($Re_{\text{мод}} = Re_{\text{нат}} \cong 10^6$) и структура турбулентности входящего потока.

Характерной особенностью методики экспериментов являлось определение не только коэффициента потерь ζ_3 ВХТ, но одновременно и его пропускной способности, определяемой приведенным расходом $\bar{m} = \dot{m} \sqrt{T_1^*} / p_{1\text{ср}}^*$.

Схема измерений стенда ВХТ-1 приведена на рис. 1. Подробное описание стенда и схемы измерений представлено в диссертации.

Приборы для измерения давлений и векторов скоростей 3D-потока. Во всех опытах применялись пневмометрические методы измерения структуры потока. Параллельно с этим в особых случаях использовались специальные тензометрические датчики для измерения колебаний давлений, а также термоанемометр фирмы DANTEC для исследований потоков с малыми скоростями течения. В сеч. 3-3, где поток имел сущест-

венно 3-мерную структуру, применялись векторные 3D-зонды: 3D-K - СПБГПУ и 3D-Ц фирмы United-Sensor.

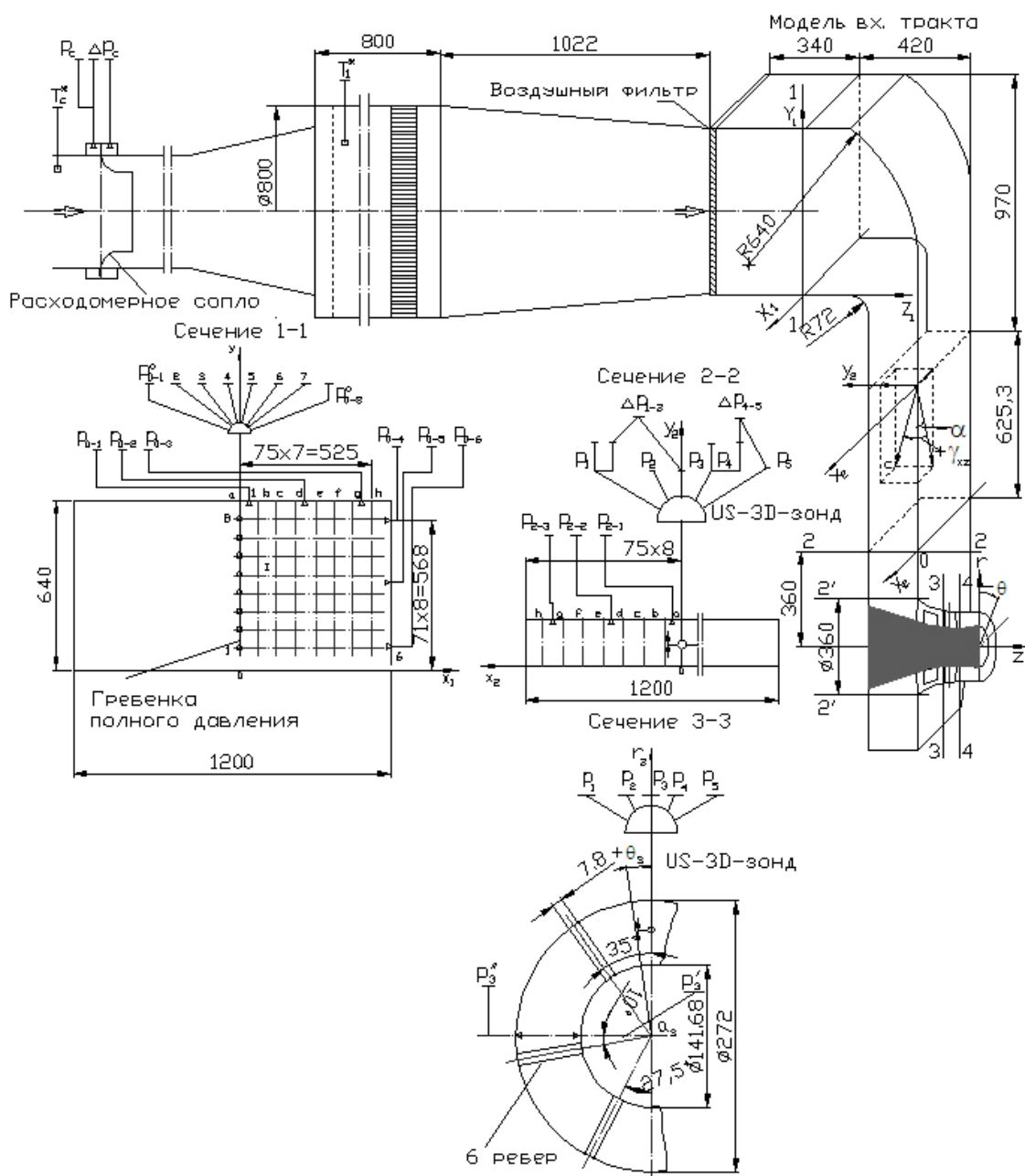


Рис. 1. Схема измерений и системы координат в модели ВХТ

Информационно-измерительная система стенда ВХТ-1 включает в себя координатные устройства для дистанционного управления 3D-зондами, пневметрические интеллектуальные сканеры давления серии 901х, усилители аналоговых сигналов термоэлементов, измерительную стойку и компьютеры с управляющими программами и программами по сбору и обработке данных.

Программное обеспечение системы измерений. Программа сбора экспериментальных данных «Flow Expert» написана на языке C++ и реализована в среде Vis-

ual C++. Она объединяет измерительные средства в единую систему, позволяющую эффективно управлять ходом эксперимента.

Результаты испытаний моделей ВХТ стационарных ГТУ первого поколения относятся к входным трактам упрощенных конструкций, в проточной части которых располагались лишь 6 опорных профильных стоек для крепления переднего подшипника ротора и входной направляющий аппарат компрессора (ВНА) (рис. 2). Первые аэродинамические испытания варианта 1 показали нестабильный, пульсирующий характер течения воздуха, сопровождавшийся интенсивными колебаниями давлений во всём объёме тракта. При этом измеренный коэффициент потерь составил значительную величину – $\zeta_3 = 33,6\%$ (рис. 3).

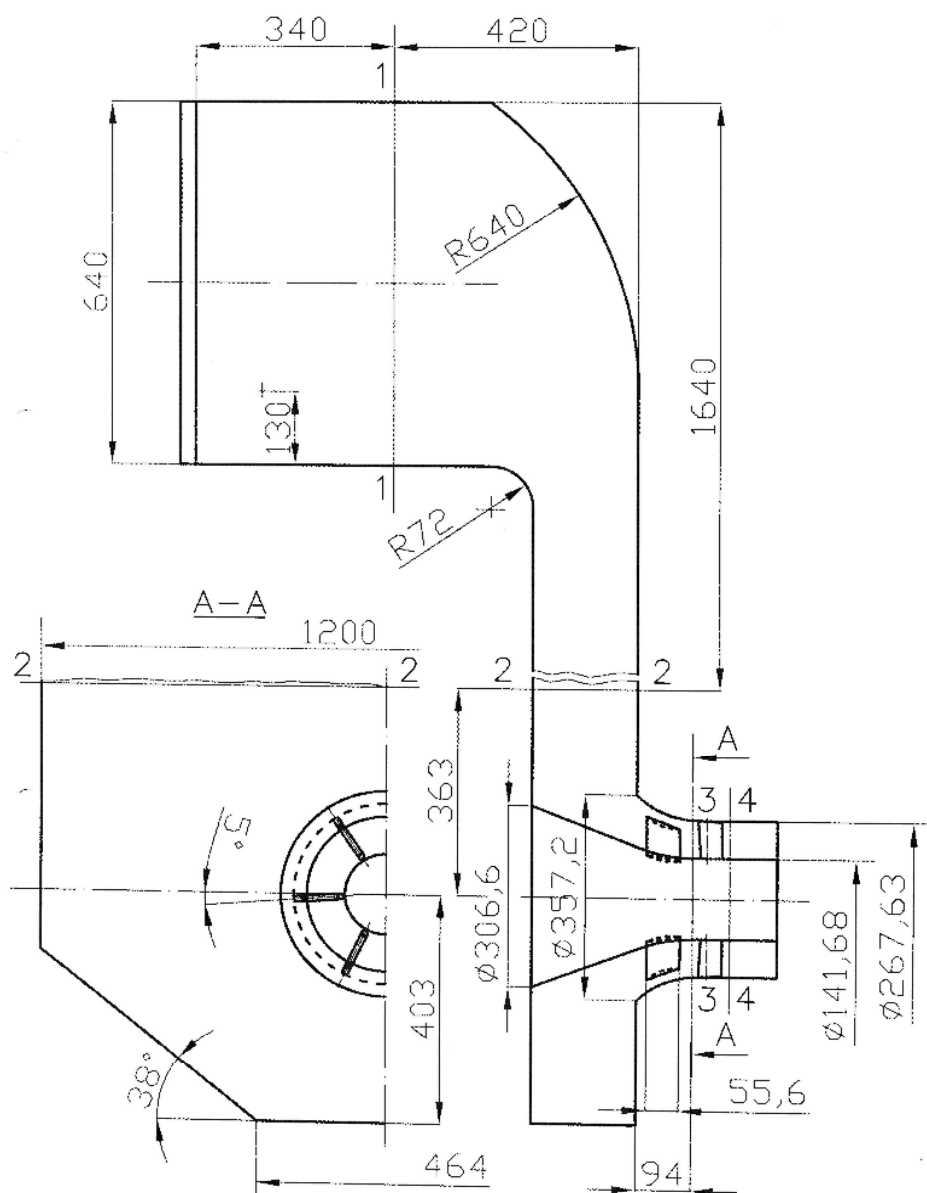


Рис. 2. Проточная часть входного тракта модели ВХТ-1 ГТУ комбинированной ГПУ КУ первого поколения (исходный вариант 1)

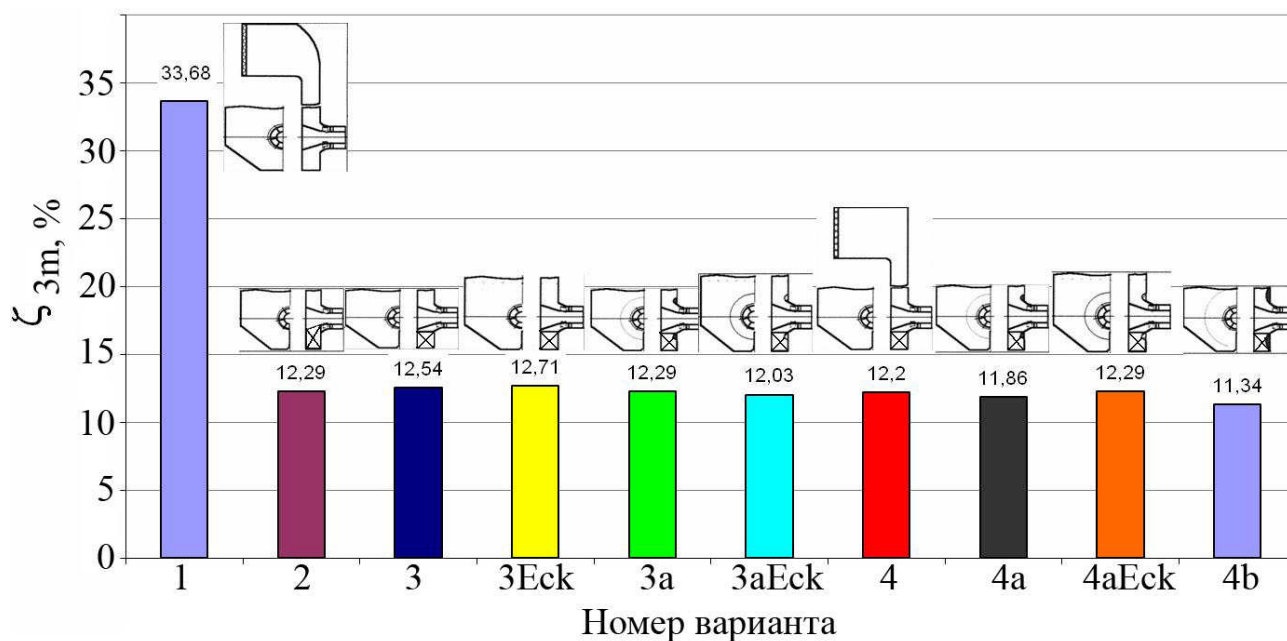


Рис. 3. Исследованные варианты типовой конфигурации входного тракта стационарных газовых турбин ГПУ КУ первого поколения

Измерение пульсаций давления $\overline{\Delta p_{2\tau}} = \Delta p_{2\tau} / \left(\rho_2 c_2^2 / 2 \right)_{\text{ср}}$ в характерной точке

$x_2 = 37,5$ мм, $y_2 = 180$ мм сеч. 2-2 при входе в патрубок компрессора приведено на рис. 4 для номинального режима течения воздуха и двух вариантов тракта.

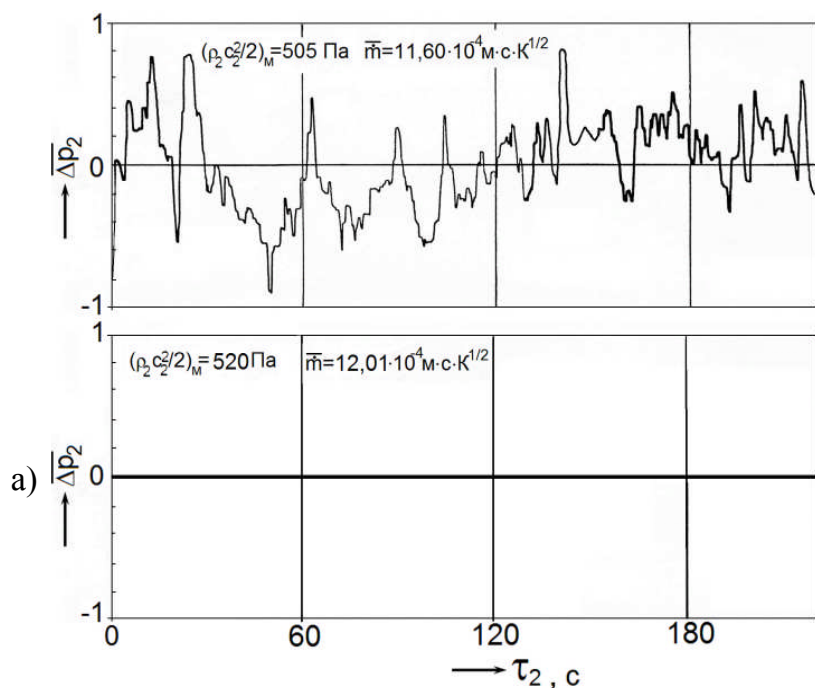


Рис. 4. Сравнение осциллограмм колебаний пристеночного на входе в патрубок (сеч.2-2) давления p_2 при номинальном режиме для вариантов 1 и 2 входного тракта: а) вариант 1; б) вариант 2

Анализ причин неустойчивости течения привел к выводу о двух возможных источниках пульсаций: - отрыв потока в поворотном прямоугольном колене в области малого радиуса после поворота на 90° к оси машины; - интенсивные срывные явления на опорных стойках в выходной кольцевой части тракта.

С помощью тонкостенной разделительной перегородки, установленной в плоскости симметрии входного патрубка (вариант 2 ВХТ), пульсации давления были полностью устранены:

коэффициент сопротивления снизился до величины $\zeta_{3m}=12,29\%$ для варианта 2, т.е. почти в 3 раза по сравнению с вариантом 1, а пульсации давления в сеч. 2-2 уменьшились до $\pm 2\%$, т.е. в десятки раз (рис. 4).

Дальнейшие исследования аэродинамики ВХТ первого поколения были посвящены изучению влияния различных форм кольцевых обтекателей (КО) и кольцевых секторных обтекателей (КСО) при входе в кольцевой канал входного патрубка (вариант 3а), влиянию прямоугольной формы внешнего обвода поворотного участка ВХТ (вариант 4), поиску оптимальной величины угла конусности входной части внешней поверхности кольцевого конфузора и влияние сброса воздуха из противопомпажных клапанов компрессора во входной патрубок с основной целью – достижения минимальных потерь кинетической энергии и по возможности снижения окружной и радиальной неравномерности поля скоростей и параметров потока перед ВНА компрессора. Основные характеристики испытанных вариантов представлены на рис. 3.

Результаты испытаний входных трактов стационарных ГТУ второго поколения ГПУ с одним генератором. Характерной особенностью таких установок является их большая мощность, а следовательно, большие массовые расходы воздуха ГТУ. Новые задачи решались экспериментально на 2-х моделях входных трактов: модель ВХТ-I с боковым подводом воздуха к ГТУ и ВХТ-II с верхним подводом воздуха, выполненных в масштабе 1:7,643. При этом числа Маха выдерживались равными натурным величинам, а числа Re в модели имели одинаковый 6-й порядок с натурой в контрольном сечении 3-3 перед ВНА ($Re_3 \approx 10^6$).

Модель ВХТ-I. Результаты определения суммарного коэффициента потерь ζ_3 для модели ВХТ-I показали, что ни решетки ламелей шумоглушителя, ни распорные стержни и их положение перед патрубком тракта не оказывают большого влияния на его аэродинамическое сопротивление, так как располагаются в области малых скоростей потока.

Модель ВХТ-II по конструктивной концепции базируется на идее симметричной конфигурации тракта, присущей первому поколению ГТУ для комби-ГПУ, а в проточной части ее имеют место все элементы, что и в модели ВХТ-I.

Во всех опытах выполнялось траверсирование потока в сеч. 1-1, 2-2 и 3-3. В качестве примера здесь приводятся некоторые результаты измерений 3D-потока в сеч. 3-3 при входе в ВНА компрессора для вариантов II-2, II-3 и II-3а входного тракта (рис.5). Анализ полученных данных показывает, что качество потока перед компрессором для варианта II-2 вполне удовлетворительное.

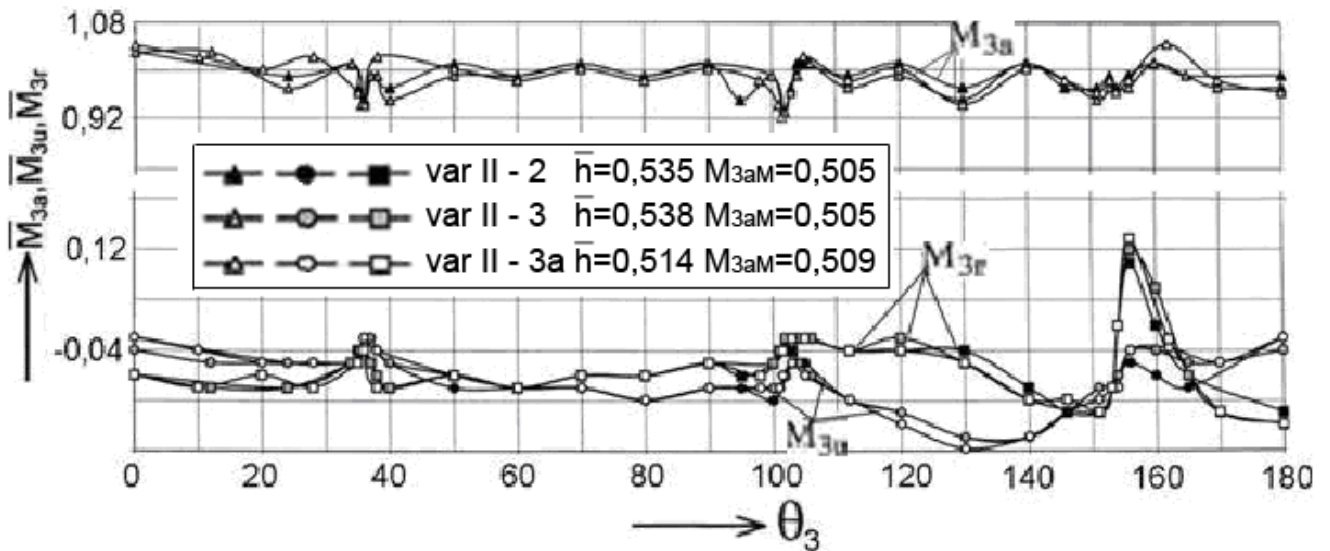


Рис. 5. Поля нормированных компонент скорости (чисел Маха) 3D-потока в сеч. 3-3 перед ВНА входного тракта ГТУ большой мощности для вариантов II-2, II-3 и II-3а

Уменьшение расстояния от нижнего обвода до оси компрессора всего лишь на 5% в сочетании с цилиндрической формой поверхности данного обвода, а также с наличием секторного обтекателя КСО-180° способствовали улучшенной организации течения при входе в кольцевое пространство тракта, в нижней части патрубка.

Численные исследования ВХТ выполнены на математической модели геометрии проточной части ВХТ первого поколения, которая состояла из двух областей: поворотного участка (от сеч. 0-0 до сеч. 2-2 - область I) и входного патрубка (от сеч. 2-2 до сеч. 3-3 перед ВНА - область II). Обе задачи решались в предположении симметричности течения относительно вертикальной плоскости.

Численные исследования потока в области I. Расчетные сетки генерировались на основании их математического представления в криволинейной системе координат с использованием операторов $\Delta\zeta$ и $\Delta\eta$ тензорного дифференцирования системы «сеточных» уравнений. Структуризация сетки выполнялась с помощью программного обеспечения, разработанного кандидатом физ.-мат. наук В.Е. Карякиным. В качестве исходных уравнений течения использовались уравнения Рейнольдса, описывающие течение жидкости в криволинейной неортогональной системе координат: $\nabla_j v^j = 0$. Описание характеристик турбулентного переноса производилось по уравнениям $k - \varepsilon$ модели Джонса-Лаундера.

Некоторые результаты численного исследования области I (поворотной части тракта) представлены на рис. 6.

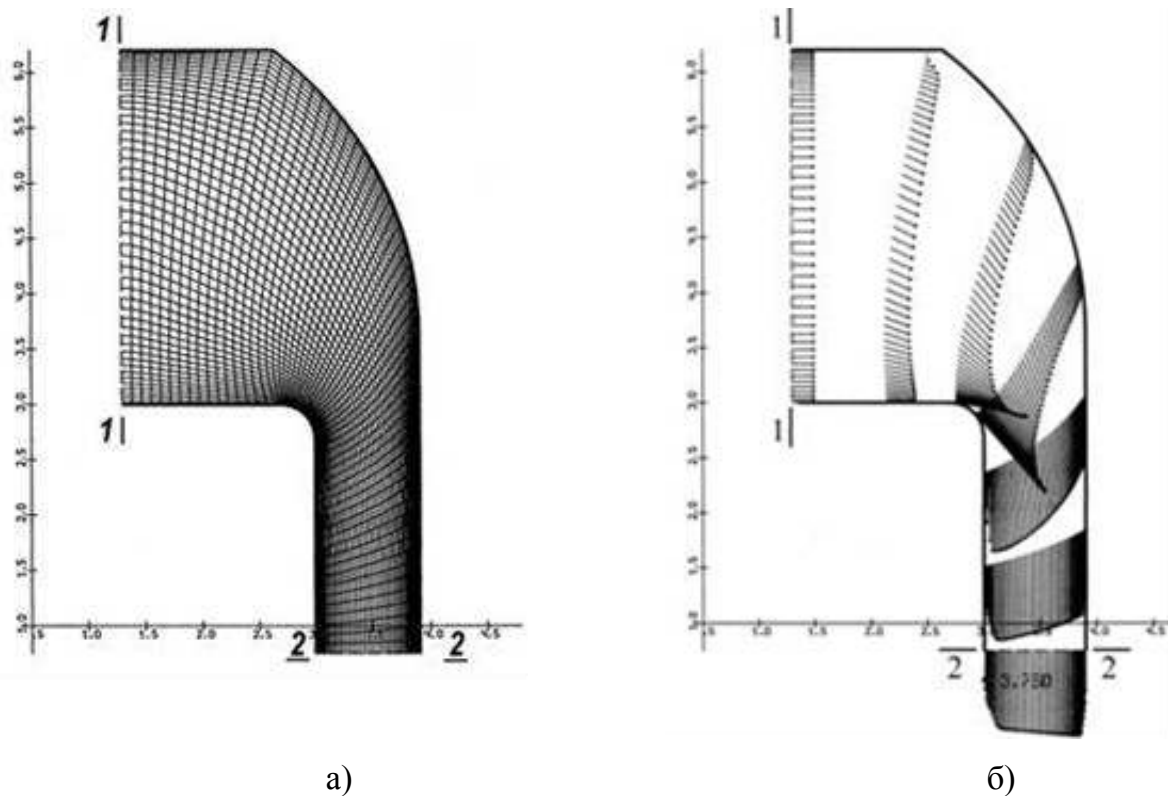


Рис. 6. К расчёту потока в поворотной части тракта ВХТ: а - расчётная сетка поворотной области входного тракта: $d_1 = 50$, $d_2 = 100$; б) – векторные поля скоростей потока в поворотной области ВХТ компрессора

Результаты численных расчетов так же, как и результаты эксперимента, показали отсутствие крупномасштабного отрыва потока в поворотной области, способного генерировать низкочастотные нестационарные явления во всём входном тракте. Расчётные величины потерь кинетической энергии, а также распределение скоростей и параметров потока в выходном сечении 2-2 в эксперименте и расчёте имеют вполне удовлетворительное качественное и количественное соответствие.

Численные исследования второй в области II проточной части патрубков компрессора, отличались сугубо трёхмерным подходом к решению стационарной задачи. При построении сетки в трёхмерной области выполнялась генерация двумерных сеток в осевом сечении области и далее производилось распространение сетки по третьей координате на всю расчётную область.

Численное моделирование проводилось в предположении симметричности течения относительно вертикальной плоскости при расчётном числе Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^5$, которое соответствует условиям экспериментального исследования модели. Результаты расчётов без моделирования силовых стоек и ВНА компрессора представлены на рис. 7 и 8.

О наличии отрыва в этой области свидетельствует только сильная радиальная неоднородность профиля скорости в выходном сечении. В нижней части канала, в об-

ласти, примыкающей к плоскости симметрии, установлена значительная застойная зона, а в выходном сечении – существенная неравномерность потока (рис. 8).

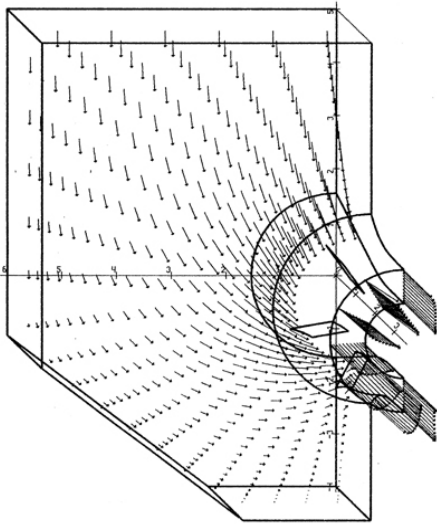


Рис. 7. Поле векторов скоростей 3D-потока в среднем сечении входного патрубка компрессора ВХТ ($z=90$ мм)

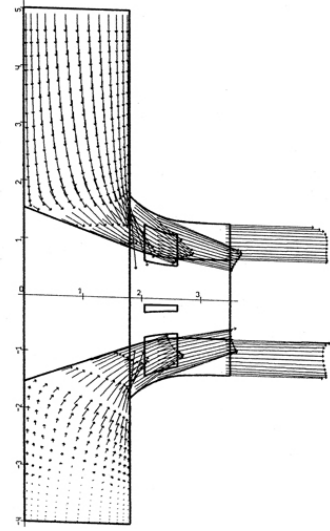


Рис. 8. Поле векторов скоростей в меридиональной плоскости входного патрубка ВХТ (в плоскости симметрии)

Таким образом численные исследования строго симметричного потока так же, как и эксперимент с установкой перегородки в плоскости симметрии, подтвердили отсутствие образования интенсивного вихревого течения в узком кольцевом пространстве при входе в компрессор и связанных с ним нестационарных явлений.

Величина коэффициента потерь по данным расчёта $\zeta_{3m}=0,0798$, что существенно ниже величины $\zeta_{3m_{\text{эксп}}}=0,3368$, полученной в опытах для того же варианта 1 (без разделительной перегородки) и даже заметно меньше величины $\zeta_{3m_{\text{эксп}}}=0,1229$ для варианта 2 (с разделительной перегородкой).

Глава 4 содержит исследования аэродинамики особого типа турбинных ступеней – высоконагруженных ступеней большой циркуляции (СБЦ), широко применяемых в газовых турбинах стационарных ГТУ для комбинированных установок. Такие ступени отличаются от обычно используемых (в том числе и высоконагруженных с осевым выходом потока) существенно большей величиной коэффициента циркуляции $\bar{c}_u = (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) / u_2^2$. Кроме наличия существенной отрицательной закрутки $\Delta_2 = 90^\circ - \alpha_2 = \alpha_2^* - 90^\circ$ потока за ступенью, эти ступени характеризуются большими углами поворота потока $\varepsilon_2 = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)$ в рабочих решётках. Все перечисленные факторы выдвинули новые задачи по созданию высокоэкономичных ступеней такого класса.

Принципы аэродинамического проектирования первых ступеней большой циркуляции одновального и двухвального отсеков основаны на использовании методики оптимизации осевых тепловых турбин, основы которой изложены в монографии К.Л. Лапшина «Оптимизация проточных частей многоступенчатых турбин», 1992. В программе оптимизации турбины в качестве основы целевой функции был использован к.п.д. η^* . В математической модели учтены данные по потерям в лопаточных аппаратах, полученные на ступенях, а также потери от ввода охладителя, потери от протечек в радиальных зазорах и вторичные потери.

Оптимизационные расчётные исследования второй ступени одновального и двухвального отсеков были выполнены на базе той же математической модели и её программной компьютерной реализации, что и для первой ступени, как в осесимметричной, так и в двухмерной проектировочных задачах по профилированию оптимальных плоских сечений решёток профилей ступеней. Основная особенность проектировочного расчёта второй ступени состояла в граничных условиях при входе в ступень, определявшихся по данным расчёта и опытного исследования оптимальных вариантов 1-й ступени большой циркуляции для одновального и для двухвального отсеков.

Основные принципы профилирования проточной части переходного диффузора. Главное предназначение переходного диффузора состоит в сохранении кинетической энергии закрученного потока, покидающего ступень большой циркуляции. При этом восстановительные диффузорные процессы в потоке целесообразно минимизировать. В качестве оптимального варианта был рассчитан изоугольный гиперболоидный диффузор для варианта СБЦ с коэффициентом циркуляции $\bar{c}_u = 1,80$ и $\Delta_{2cp} = -36^\circ$. По условиям конструктивной компоновки ступеней при заданных осевых размерах диффузора был принят угол раскрытия $\theta_{эКВ} = 4,4^\circ$ (полный угол раскрытия $2\theta_{эКВ} = 8,8^\circ$). Контуры этого диффузора представлены на рис.9.

Экспериментальные исследования и отработка ступеней большой циркуляции. Все опыты проведены на модельных ступенях и отсеках. Для одновального отсека масштаб моделирования был выбран 1:2,60, а для ступеней двухвального отсека – 1:3,418 (рис. 9). В соответствии с теорией подобия в экспериментах обеспечивалось кинематическое и динамическое подобие потоков как при испытании отдельных ступеней, так и отсеков в целом.

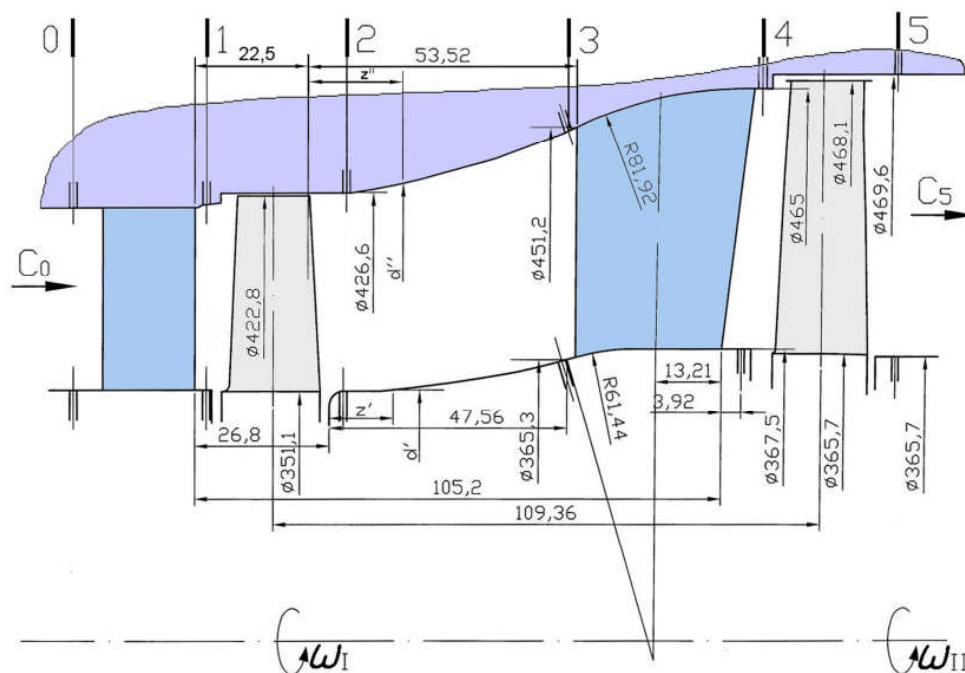


Рис. 9. Проточная часть оптимизированного варианта двухвального двух-ступенчатого отсека со степенью большой циркуляции

Экспериментальные стенды представляют собою универсальные экспериментальные установки, разработка и создание которых - одна из важнейших составных частей работы.

Одновальный двухступенчатый стенд ЭТ-2 имеет оригинальную конструкцию, предусматривающую не только крупномасштабное моделирование, но и обеспечение измерений характеристик ступеней и параметров 3D-потока с достаточной для практики точностью. Подробное описание конструкции стенда приведено в диссертации.

Двухвальный стенд ЭТ-4-2 был разработан и изготовлен специально для аэродинамических исследований отсеков со ступенями большой циркуляции со скольжением роторов (рис. 10).

Методика обработки опытных данных. Интегральные характеристики ступеней и отсеков. К интегральным характеристикам ступеней в работе отнесены: внутренний к.п.д. η ступеней, определённый по полным параметрам рабочей среды перед ступенью и давлению в потоке за нею; к.п.д. η^* ступеней, определённый по полным параметрам рабочей среды перед и за ступенью; степень реактивности ρ_T' и ρ_T'' у корня и периферии ступени; приведенный массовый расход \bar{m} рабочей среды; характеристическое число u/C_0 ступени; коэффициент расхода \bar{c}_Z ступени. Для турбинных отсеков определялись общие к.п.д. отсеков η_Σ и η_Σ^* по аналогии с к.п.д. ступеней в функции числа Парсонса $(u/C_0)_\Sigma$, приведенный расход \bar{m}_Σ и коэффициент

использования кинетической энергии μ потока во второй ступени (только для двухвального двухступенчатого отсека).

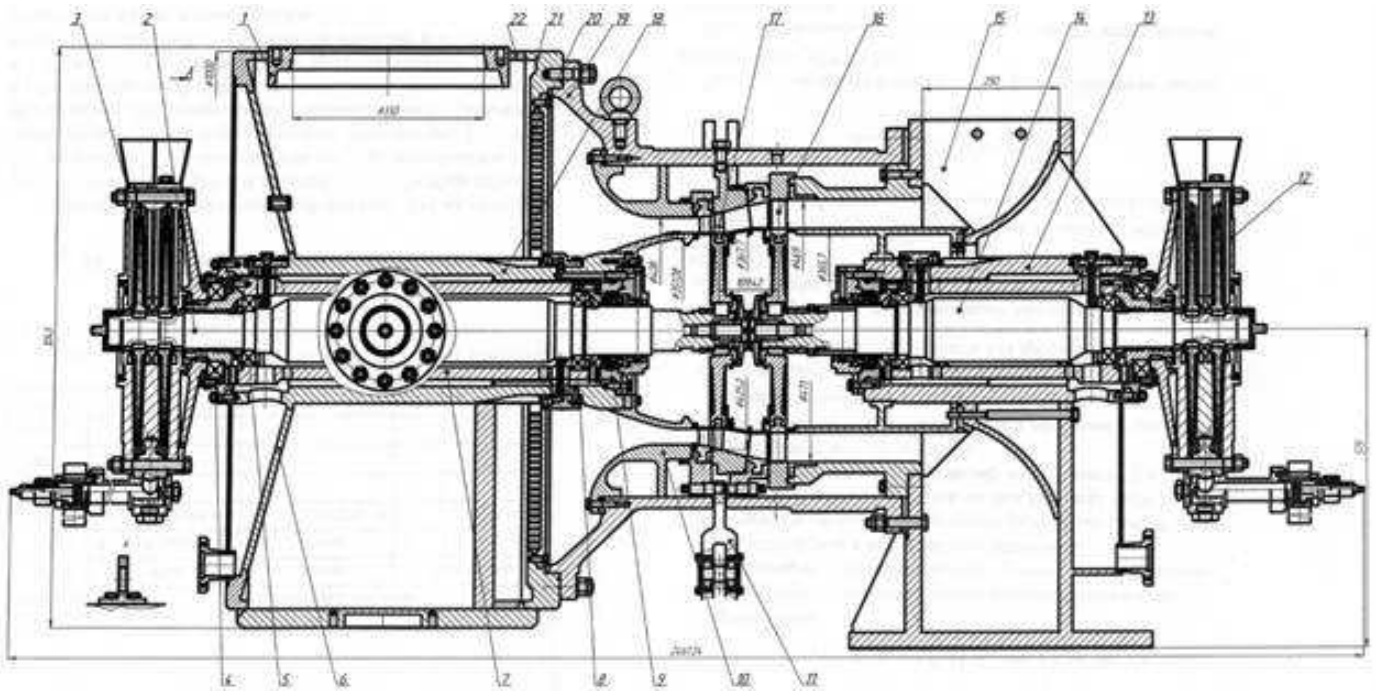


Рис. 10. Продольный разрез экспериментального двухвального стенда ЭТ-4-2 лаборатории турбиностроения СПбГПУ

Интегральной характеристикой переходного диффузора в двухвальном отсеке являлся коэффициент потерь в нём: $\zeta_d = (p_2^ - p_3^*) / (\rho_2 c_2^2 / 2)$ (рис. 9).*

Детальные характеристики элементов проточной части двухступенчатых отсеков. С целью анализа процессов течения в проточной части отсеков выполнялось траверсирование потока в контрольных сечениях (см. рис. 9). По данным траверсирования вычислялись поля векторов скоростей и параметры 3D-потока. Эти данные позволяли вычислять коэффициенты потерь на поверхностях тока как в НА, так и в РК.

Схемы измерений. На рис. 9 показаны контрольные сечения проточной части для двухвального двухступенчатого отсека, в которых измерялись параметры и вектора скоростей 3D-потока. Расход воздуха на обоих стендах определялся с помощью стандартных расходомерных сопел. Крутящие моменты, развиваемые рабочими колёсами, измерялись при помощи гидротормозов, а частота вращения роторов n - с помощью тахометрических систем. Поля параметров и векторов скоростей 3D-потока измерялись только в сечениях 1-1, 2-2 и 4-4 для одновального варианта и в сечениях 2-2, 3-3 и 5-5 для двухвального двухступенчатого отсека.

Результаты экспериментальных исследований ступеней большой циркуляции и двухступенчатых отсеков. Одновальный двухступенчатый отсек. Исходные варианты ступеней 1 и 2 (одиночные испытания). Исследования суммарных характеристик вариантов ступеней 1 и 2 в широком диапазоне изменения u/C_0 и Π_0 показали, что эффективность их невелика и практически одинакова. Для ступени 1 при расчётных значениях Π_0 и u/C_0 $\eta = 0,681$ и $\eta^* = 0,828$, а для ступени 2 $\eta = 0,677$ и $\eta^* = 0,824$ (рис. 11).

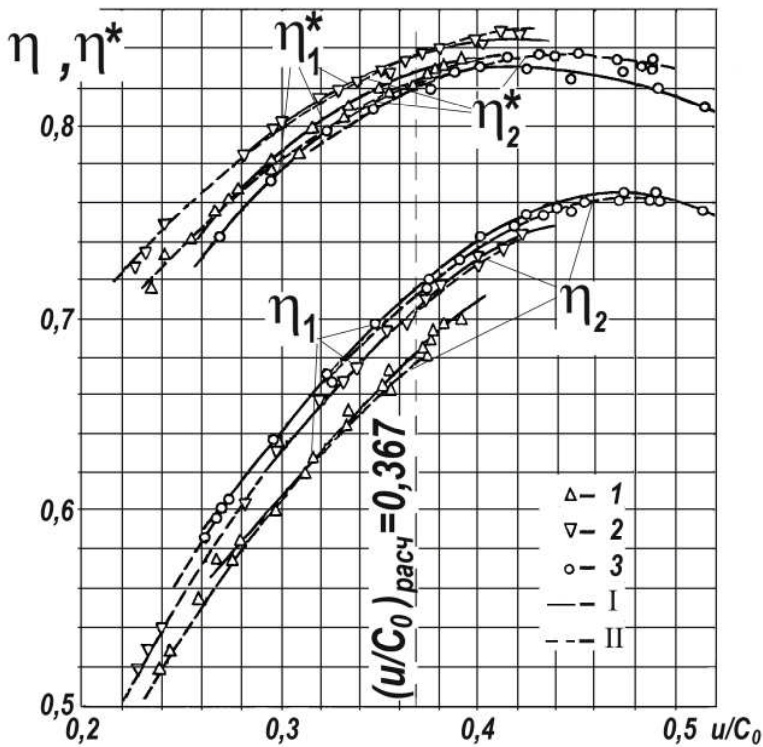


Рис.11. Значения к.п.д. ступеней 1 и 2 при различном отношении давления на ступень: 1 - $\Pi_0 = 0,350$; 2 - $\Pi_0 = 0,435$; 3 - $\Pi_0 = 0,549$; I - ступень 1, II - ступень 2

та РК, применение умеренного тангенциального наклона направляющих лопаток на угол $\delta = 7,5^\circ$) удалось существенно повысить к.п.д. ступени 3 по сравнению со ступенями 1 и 2: на расчётном режиме ($\Pi_0 = 0,404$; $u/C_0 = 0,415$) к.п.д. $\eta^* = 0,868$ (рис. 12). Наиболее высокий к.п.д. $\eta^* = 0,888$ имеет ступень 4 с увеличенным углом $\alpha_{1\text{расч}}$ и тангенциальным наклоном НЛ, а ступень 5 без тангенциального наклона НЛ показала наихудший результат по к.п.д. $\eta^* = 0,839$ в этой серии опытов. Имеющаяся разница в к.п.д. ступеней указывает на резкое изменение потерь в решётке РК с

Оптимизированные варианты СБЦ. В результате оптимизационных расчётов была спроектирована ступень 3 для расчётной величины $u/C_0 = 0,415$ при $\rho_{\text{т.ср}} = 0,289$. При этом температура потока T_{w1}^* сохраняется одинаковой, как и в исходном варианте (ступень 1). В результате ряда мероприятий (уменьшение угла поворота потока ε_2 в рабочей решётке и угла выхода потока

из ступени, тщательное профилирование лопаточного аппарата

большими углами ε_2 поворота потока при относительно малых изменениях условий их обтекания.

Двухступенчатый отсек с СБЦ. С целью оценки влияния ТНЛ и величины угла α_1 в первой ступени большой циркуляции на характеристики двухступенчатого отсека были исследованы три варианта двухступенчатого отсека, отличающихся только ступенью 1: вариант I – со ступенью 3 ($\alpha_1 = 15^\circ 31'$, $\delta^0 = 7^\circ 30'$), вариант II со ступенью 4 ($\alpha_1 = 17^\circ 52'$, $\delta^0 = 7^\circ 30'$) и вариант III со ступенью 5 без ТНЛ ($\alpha_1 = 15^\circ 49'$, $\delta^0 = 0^\circ$). Выполненные мероприятия по улучшению аэродинамики проточной части отсека привели к повышению к.п.д. турбины η_Σ^* на 5,1% (рис. 13).

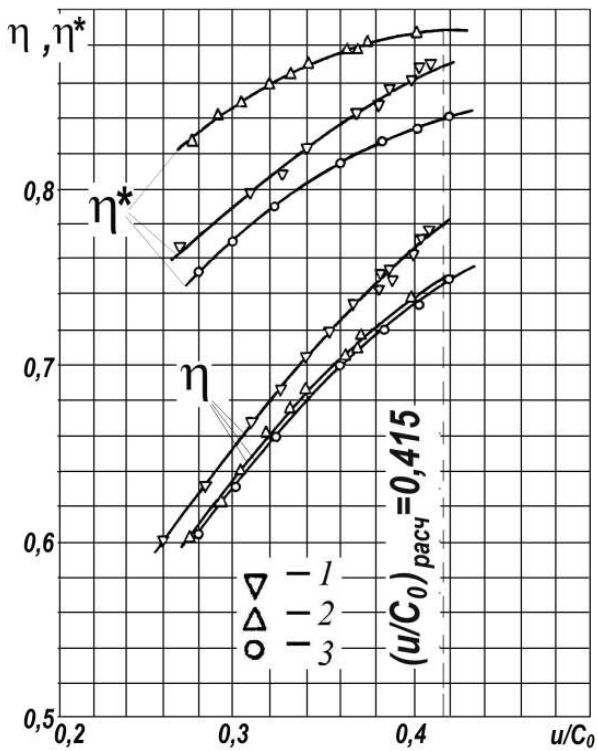


Рис. 12. Значение к.п.д. ступеней 3, 4 и 5 при расчётном отношении давлений на ступень: 1 – ступень 3; 2 – ступень 4; 3 – ступень 5

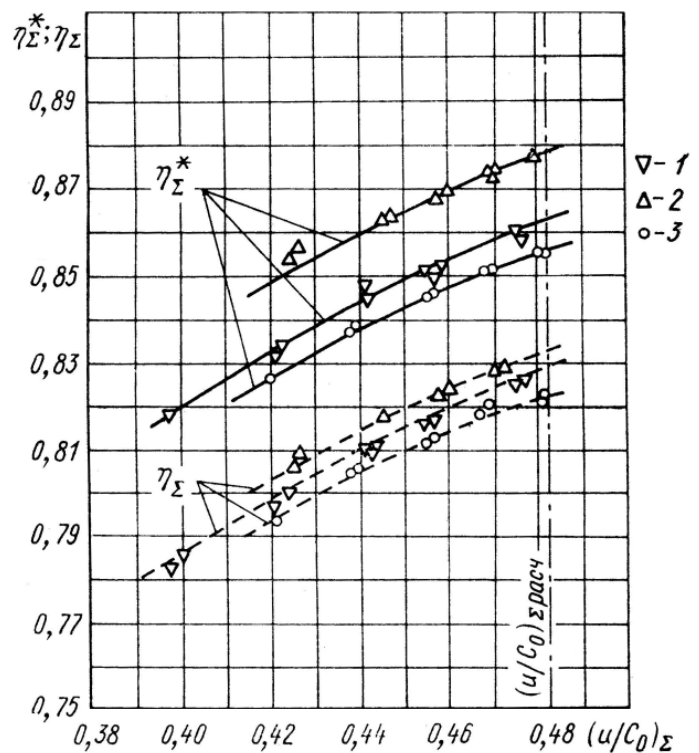


Рис. 13. К.п.д. моделей модернизированного одновального отсека с СБЦ при близком к расчётному отношении давлений ($\Pi_{0\Sigma} \approx 0,25$): 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III

Двухвальный двухступенчатый отсек со ступенью большой циркуляции.

Результаты испытаний одиночных СБЦ. Из испытанных девяти вариантов различных модификаций этой ступени в работе приведены результаты исследований трёх

основных вариантов: ступень 1А – исходный вариант, ступень 1Б - оптимизированный вариант и ступень 1М – модифицированный вариант.

Ступень 1А (исходный вариант 1-ой ступени) показала весьма низкие уровни к.п.д.: $\eta = 0,768$ и $\eta^* = 0,832$ из-за дефицита экспериментальных данных по аэродинамике такого рода ступеней и отсеков на этапе проектирования.

Ступень 1Б (оптимизированный вариант) был разработан уже с учётом полученных данных по ступени 1А и специального профилирования РЛ на цилиндрических поверхностях тока. Экспериментальные значения $\eta^* = 0,894$, $\rho_T' = 0,281$ и $\rho_T'' = 0,439$, полученные при $(u/C_0)_{расч} = 0,471$ при $\Pi_{0расч} = 0,418$, практически совпадают с расчётными величинами (рис. 14).

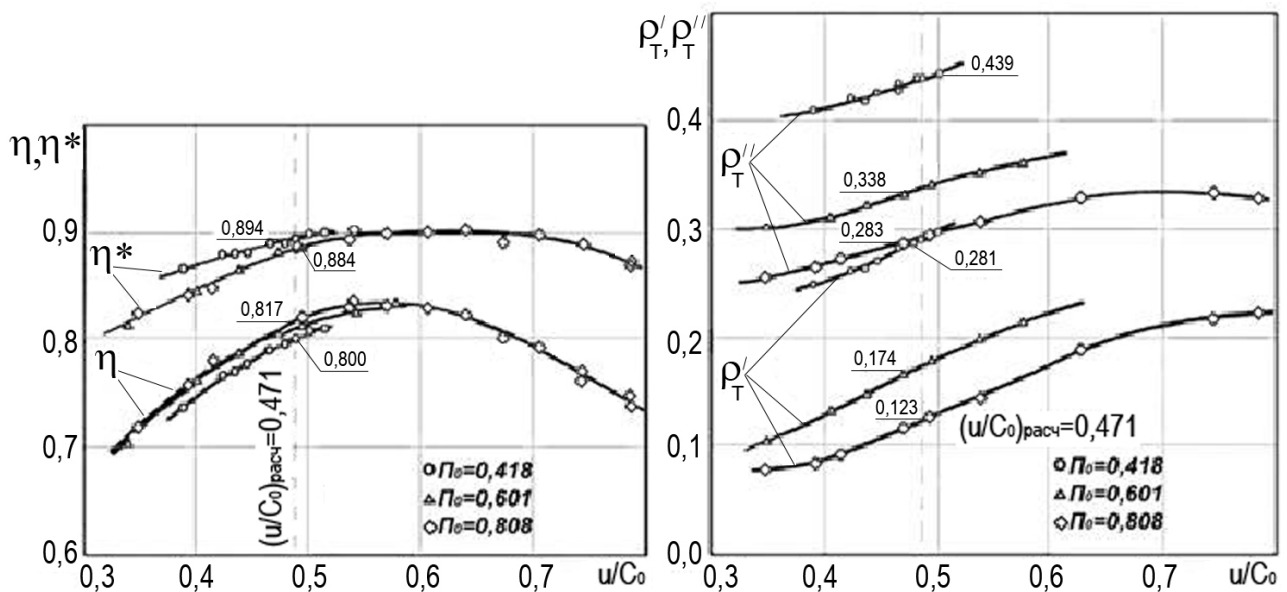


Рис. 14. К.п.д. η , η^* и степень реактивности ρ_T' и ρ_T'' в функции характеристического числа u/C_0 ступени 1Б двухвального отсека

Поэтому имеются все основания признать исследованную конструкцию СБЦ с высоким уровнем к.п.д. $\eta^* = 0,894$ оптимальной для использования в перспективных стационарных ГТУ.

Исследования двухвального отсека проводились в условиях работы ступени 2Б в двухступенчатом отсеке при одном и том же значении $(u/C_0)_{II} = 0,511$ что и при ее испытаниях в равномерном потоке, но при варьировании величиной $(u/C_0)_I$ первой ступени 1М (рис. 15). При этом измерялись углы α_2 потока за первой ступенью 1М и параметры и углы α_3 входа потока в НА второй ступени 2Б.

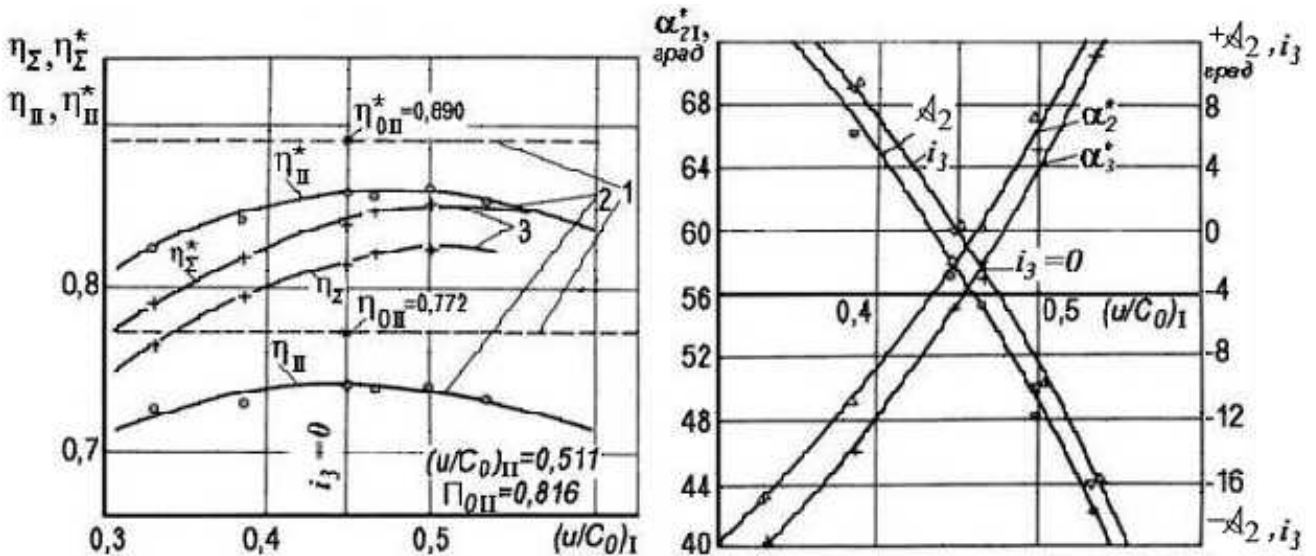


Рис. 15. Характеристики оптимизированного варианта двухвального двухступенчатого отсека со ступенями 1М и 2Б и углы атаки i_3 на НА ступени II при $(u/C_0)_I = \text{var}$ и $(u/C_0)_{II} = 0,511$ (α_2 – угол потока в сеч. 2-2): 1-к.п.д. ст. II при равномерном входном потоке; 2- к.п.д. ст. II в отсеке; 3- к.п.д. отсека

Глава 5 содержит результаты исследований блоков «последняя ступень-выходной диффузор» стационарных ГТУ, необходимость которых диктуется принципиальными аэродинамическими особенностями таких блоков, связанными со спецификой конструкции последних ступеней современных мощных газовых турбин для ГТУ.

Экспериментальные исследования блоков «последняя ступень-выходной диффузор». Программа опытных исследований предусматривала испытание восьми вариантов блоков «ступень - диффузор», два из которых отличались относительной длиной и обводами проточной части без опорных стоек, а остальные 6 вариантов имели опорные стойки различного профиля. Каждый из вариантов диффузоров испытывался при различных режимах работы ступени, который изменялся в пределах от номинальной нагрузки ГТУ (100%) до минимально заданной, т.е. сниженной до 40...50% от номинала. Все исследования проводились на моделях, выполненных в масштабе $M = 1:6,93$ по отношению к оригиналу – ГТУ мощностью 200 МВт.

Кинематическое и динамическое подобие потоков в модельной ступени и в блоке выполнялось с достаточной точностью по отношению к соответствующим натурным критериям.

Экспериментальный стенд ЭТ-4-Д представляет собою сложный технический комплекс. Центральной частью стенда является воздушная турбина ЭТ-4-Д с моделью блока «последняя ступень-диффузор» (рис. 16).

Методика обработки опытных данных. Интегральные характеристики ступени и блока «ступень-диффузор». К.п.д. собственно турбинной ступени, но при наличии

за нею выходного диффузора вычислялся по формуле: $\eta = \frac{N}{\dot{m}H_0}$, где $N = M\omega$ -

мощность, развиваемая рабочим колесом ступени; \dot{m} - массовый расход воздуха; H_0 - изоэнтروпийный перепад энтальпий на ступень.

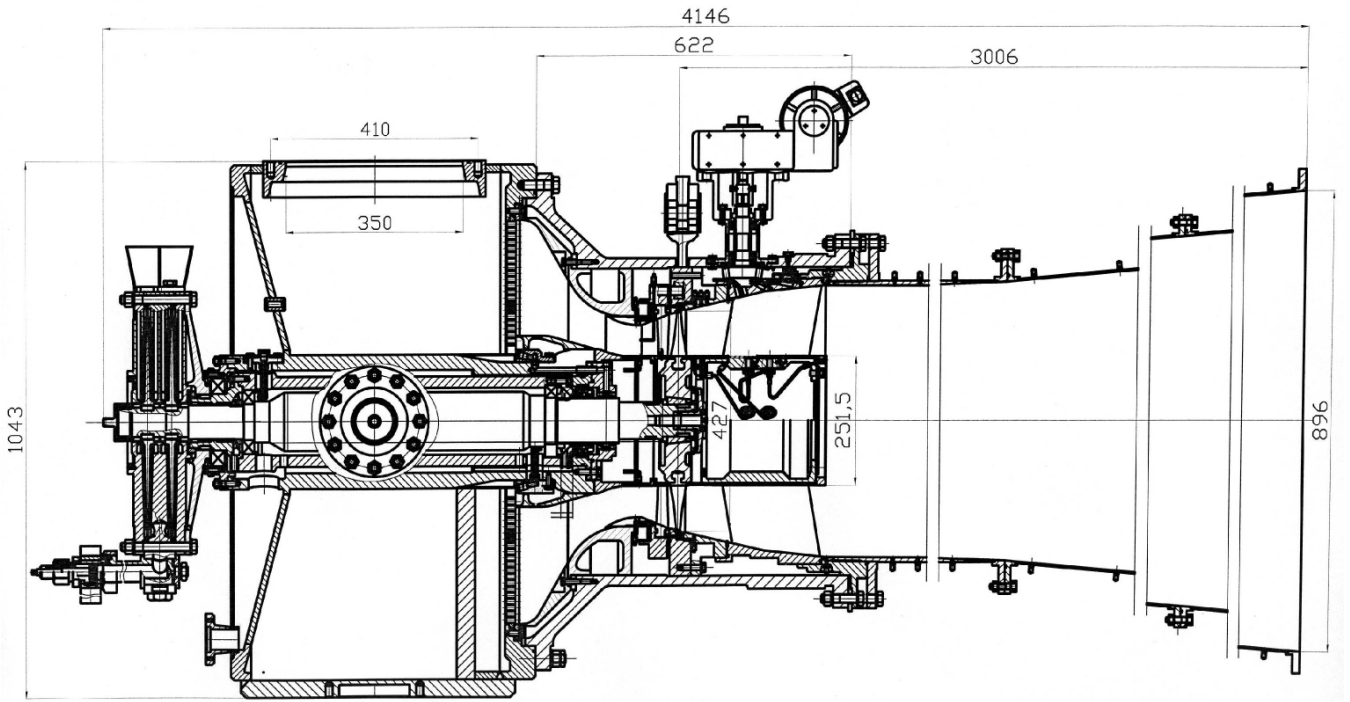


Рис. 16. Экспериментальная турбина ЭТ-4-Д с модельным блоком «последняя ступень - выходной диффузор»

В этих же условиях определялся к.п.д. $\eta_{+Д}$ ступени совместно с диффузором

(система «ступень - диффузор») по формуле: $\eta_{+Д} = \frac{N}{\dot{m}H_{0+Д}}$, где

$$H_{0+Д} = \frac{k}{k-1} RT_0^* \left[1 - \left(\frac{p_8}{p_0^*} \right)^{(k-1)/k} \right] \text{ - изоэнтропийный перепад энтальпий блока.}$$

Сопоставляя эти формулы, можно вычислить нормированную величину прироста к.п.д. $\Delta \bar{\eta}_{+Д}$ вследствие применения выходного диффузора:

$$\Delta \bar{\eta}_{+Д} = \frac{\eta_{+Д} - \eta}{\eta} = \frac{\left(\frac{p_8}{p_0^*} \right)^{(k-1)/k} - \left(\frac{p_2}{p_0^*} \right)^{(k-1)/k}}{1 - \left(\frac{p_8}{p_0^*} \right)^{(k-1)/k}}.$$

Очевидно, что величина $\Delta\bar{\eta}_{+Д}$ сразу даёт качественную и количественную интегральную оценку эффективности собственно диффузора в условиях его работы, близких к реальным.

Интегральные характеристики диффузора. Оценка газодинамических качеств собственно диффузора производится с помощью широко известной характеристики — коэффициента восстановления давления: $C_p = \frac{p_8 - p_2}{\rho_2 c_2^2 / 2}$, где p_2 , ρ_2 , c_2 — средние значения давления, плотности и скорости потока при входе в диффузор; p_8 — среднее давление на выходе из диффузора.

Вычисление средних величин векторов скоростей и средних параметров потока выполнялось методом интегрирования 3D-распределений согласно системе уравнений сохранения, подробно описанных в главе 3 диссертации.

Схема измерений стенда ЭТ-4-Д. Состав и взаимное расположение измерительных инструментов и датчиков, а также системы сбора информации стенда ЭТ-4-Д во всех деталях представлены в главе 5. Для определения суммарных характеристик ступени и блока в целом использовались те же измерительные системы и приборы, что и на стендах ВХТ-1 и ЭТ-4-2 (см. главы 3 и 4).

Результаты экспериментальных исследований. *Интегральные характеристики блока «ступень-диффузор», вариант 1 (без силовых стоек).* В качестве референцной модели испытывался блок «ступень-диффузор» без силовых стоек, чтобы в последующих опытах выявить их влияние на аэродинамику в целом. Исследования проводились для режимов, соответствующих нагрузке на ГТУ от 100% до 40% номинального режима. Во всём исследованном диапазоне режимов ГТУ положительный эффект от установки развитого диффузора весьма существенен, но различен (рис. 17).

Так на режиме 100% номинальной нагрузки $\alpha_{2cp} = 90^\circ - \alpha_2 = -27,6^\circ$ повышение к.п.д. блока составляет $\Delta\eta_{100\%} = \eta - \eta_{+Д} = 5,1\%$ (относительная величина прироста к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+Д100\%} = 7,0\%$), а на режиме 70% от номинальной нагрузки ($\alpha_{2cp} \cong +10,5^\circ$) эта величина достигает $\Delta\eta_{max} = 8,6\%$ ($\Delta\bar{\eta}_{+Дmax} \cong 10,5\%$). Феномен турбинного диффузора с расположенной перед ним ступенью заключается в безотрывности течения в нем даже при углах раскрытия $20 - 23^\circ$ на начальном участке диффузора.

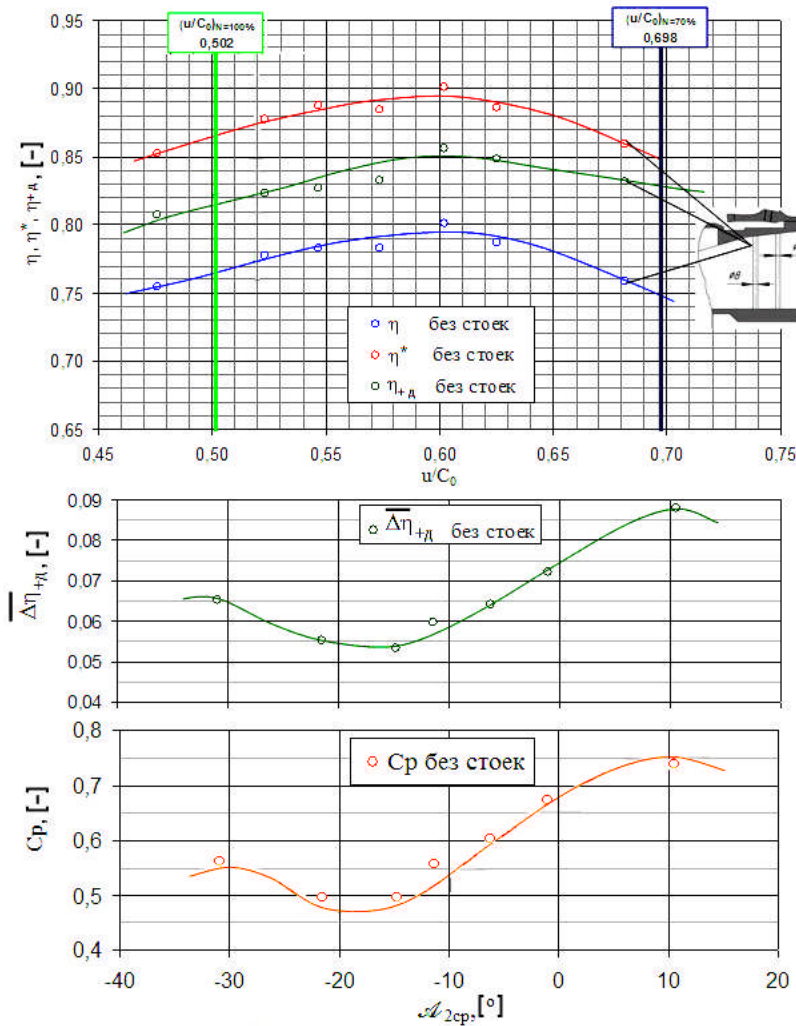


Рис. 17. К.п.д. η и η^* ступени, η_{+D} блока «ступень-диффузор», $\Delta\eta_{+D}$ прироста к.п.д. и коэффициент восстановления давления C_p в функции характеристического числа u/C_0 и угла закрутки потока α_{2cp} . Вариант 1

аналогию этих зависимостей для различных величин \dot{m} , а следовательно, чисел Маха и Рейнольдса.

Структура 3D-потока, генерируемая ступенью перед диффузором и физические процессы в нём. Все выявленные особенности энергетических преобразований потока в диффузоре обусловлены исключительно различной структурой входящего потока, который генерирует ступень на том или ином режиме. В работе приведены полные результаты траверсирования полей параметров и скоростей потока в контрольных сечениях диффузора для всех испытанных вариантов.

Характерной особенностью всех кривых $C_p = f(\alpha_{2cp}, M_{2cp})$ является наличие двух экстремумов в исследованном диапазоне углов закрутки потока α_{2cp} : $C_{p_{max}}$ при $\alpha_{2cp} = +9^\circ \div +12^\circ$ ($\alpha_2^* = 99^\circ \div 102^\circ$) и $C_{p_{min}}$ при $\alpha_{2cp} = -20^\circ \div -15^\circ$ ($\alpha_2^* = 70^\circ \div 75^\circ$). Несмотря на осесимметричную конструкцию диффузора, отрицательная закрутка в пределах $-15^\circ \dots -20^\circ$ ухудшает процесс восстановления, а некоторая положительная закрутка в пределах $\alpha_{2cp} = +9^\circ \dots 12^\circ$ улучшает этот

процесс. Представленные на рис. 18 графики функций $C_p = f(\alpha_{2cp}, M_{2cp})$ для различных расходов воздуха \dot{m} показывают качественную ана-

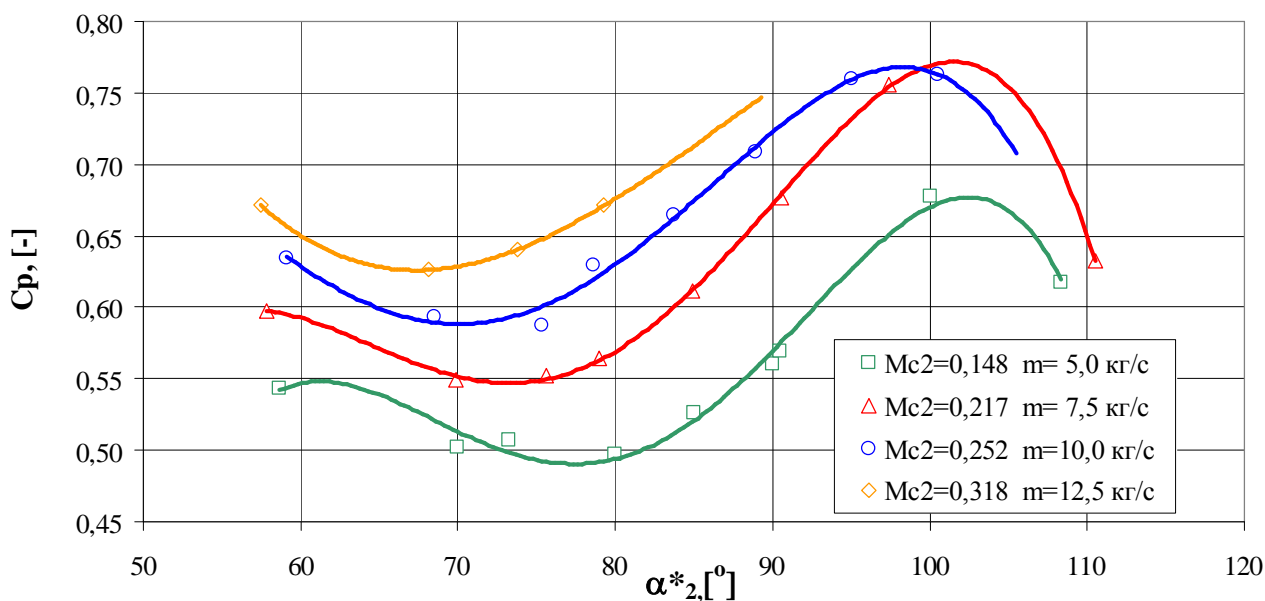


Рис. 18. Коэффициент восстановления давления в диффузоре в зависимости от угла α_2^* и расхода рабочей среды: $C_p = f(\alpha_2^*, \dot{m})$

В автореферате в качестве примера приведены только результаты измерений полей скоростей трёхмерного потока в сечении 2-2 (рис. 19). По результатам осреднения вычислялись величины C_p для всех контрольных сечений. Различие восстановительных процессов в диффузоре у периферии и у втулки обусловлены существенной радиальной и пространственной неравномерностями параметров потока на выходе из ступени и зависимостью этой неравномерности от угла закрутки Δ_{2cp} .

Графики изменения C_p по длине диффузора для расхода $\dot{m} = 10$ кг/с при различных углах потока α_{2cp}^* (рис. 20) показывают, что при снижении угла закрутки наблюдается появление немонотонности у некоторых зависимостей в сечении за втулкой. Это свидетельствует о преобладающем влиянии отрыва от втулки при $-15^\circ \leq \Delta_{2cp} \leq -20^\circ$. Если последняя ступень турбины имеет необандаженное рабочее колесо, то выходной диффузор проявляет свои наилучшие восстановительные качества при некоторой величине положительной закрутки основного потока (рис. 20). Наличие такого оптимума является, по-видимому, общей закономерностью для осевых турбинных диффузоров со ступенями такого типа.

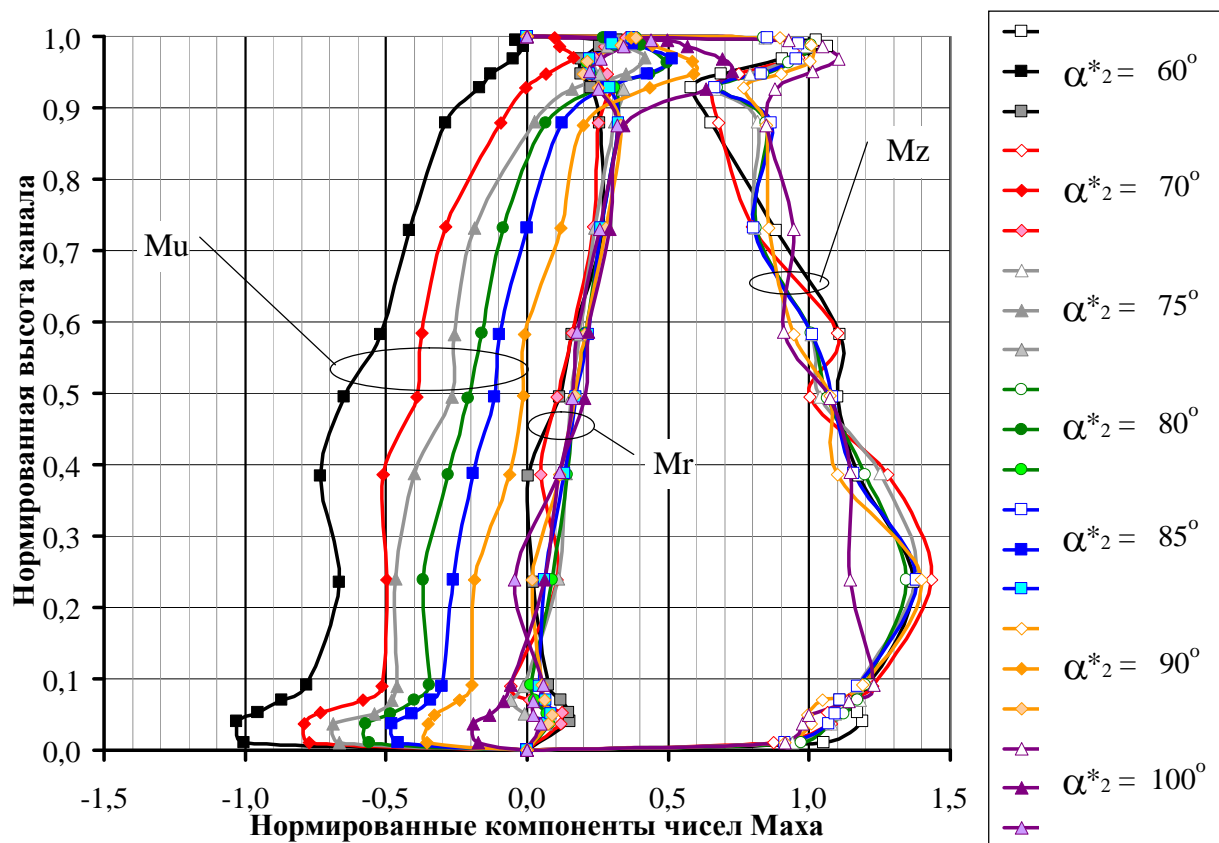


Рис. 19. Распределение компонент чисел Маха по высоте канала в сечении за РЛ. Вариант 1 (без силовых стоек, $M_2 = 0,252$)

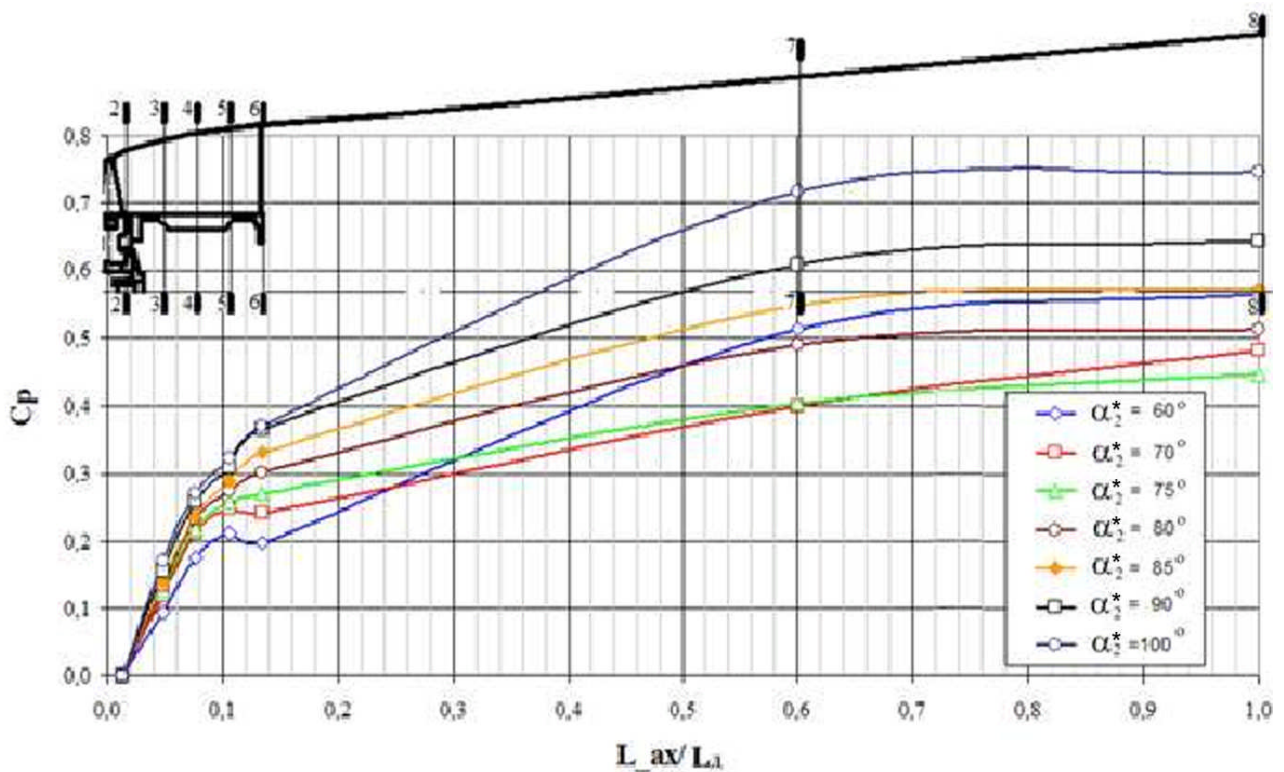


Рис. 20. Изменение коэффициента восстановления давления C_p по длине диффузора в функции угла α_2^* ($\dot{m} = 10$ кг/с). Вариант 1 (без силовых стоек)

Процесс в осевом диффузоре, как показали опыты, существенно зависит от проявления совместного влияния числа Рейнольдса и сжимаемости рабочей среды. Только при числах Маха $M_{2cp} > 0,30 \dots 0,35$, когда $Re_{2д} = 0,44 \cdot 10^6$, это совместное влияние практически исчезает.

Влияние силовых стоек в диффузоре на интегральные характеристики и структуру потока в блоке «ступень-диффузор». Применение стоек по варианту 2, спрофилированных под безударный вход потока на среднем диаметре ступени для режима 100% нагрузки, во всём диапазоне режимов привело к снижению величин $\overline{\Delta\eta}_{+д}$ блока и коэффициента C_p диффузора. При угле закрутки потока $\alpha_2 = +27^\circ$, что соответствует нагрузке на ГТУ примерно 70%, наступал полный срыв потока с вогнутой поверхности стоек, так как в этом случае угол атаки $i_{стойек} \approx -53^\circ$ ($\alpha_{2cp}^* = 117^\circ$). Срывные явления сопровождались весьма интенсивными низкочастотными пульсациями давлений, которые распространялись против потока вплоть до расходомерного сопла. Соответствующие колебания наблюдались при измерениях частоты ротора турбины и крутящего момента РК. Очевидно, что при таких явлениях в диффузоре возникает серьёзная угроза вибропрочности рабочих лопаток турбины.

В работе представлены результаты опытов, показывающие, что во всем диапазоне режимов от 100% до 70% номинальной нагрузки блок «ступень-диффузор» с вариантом 3 силовых стоек симметричного профиля имеет явные преимущества по сравнению с вариантами 1 и 2.

Вариант 4 диффузора с тангенциально наклонёнными на угол 25° (в сторону вращения РК) силовыми стойками симметричного профиля был испытан в блоке «ступень-диффузор» тоже в широком диапазоне режимов: от 100% до 40% номинальной нагрузки ГТУ. В опытах получено негативное влияние такого наклона симметричных стоек на интегральные характеристики блока при отрицательной закрутке $\alpha_{2cp} = -12^\circ \dots 0^\circ$, что соответствует нагрузке ГТУ, близкой к номинальной и сниженной до величины $\sim 80\%$. В области сниженных нагрузок ГТУ, где $\alpha_{2cp} > +10^\circ$, вариант 4 показал примерно те же интегральные характеристики, что и референсный вариант 3 с радиальными рёбрами.

Численное моделирование потока в блоке «ступень - выходной диффузор».
Расчетная модель. Расчетная область в осевом направлении включает в себя предварительный направляющий аппарат 1, модельные венцы ступени 2, 3 и выходной диф-

фузор, состоящий из кольцевой 4 и конической 5 частей. В окружном направлении расчетная область охватывает сектор 72 град, так как в кольцевом диффузоре равно расположены 5 стоек задней опоры подшипника.

Расчетные сетки для лопаточных аппаратов и для диффузора структурированные, гексаэдральные, со сгущениями ячеек вблизи стенок для разрешения течения в пограничном слое. Основные характеристики расчетной сетки исследованной модели представлены в таблице, а сама модель – на рис. 21.

	Количество узлов	Минимальный угол скоса ячейки, [град.]	Максимальное соотношение ребер ячейки	Максимальное соотношение объемов соседних ячеек
ПНА	910.000	23,5	670	16
Направляющие лопатки	810.000	22,3	705	6,3
Рабочие лопатки	1.000.000	20,6	1545	21,5
Диффузор	1.250.000	37,5	720	5
Выходной участок	33.000	55	930	2

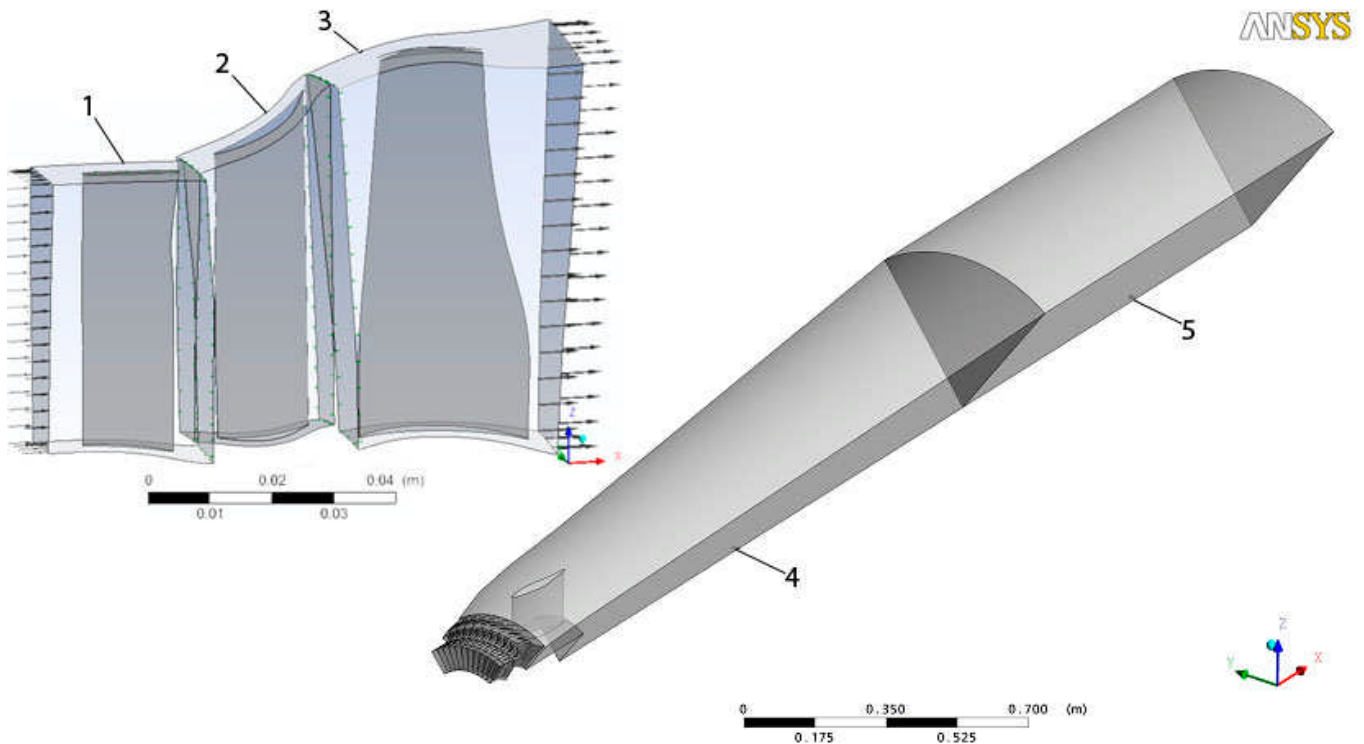


Рис. 21. Расчетная модель блока «ступень-диффузор» для CFD-анализа

Граничные условия. На азимутальных границах расчетной области было использовано условие периодичности. На стенках и поверхностях лопаток ставилось

условие «прилипания» потока. При входе в расчетную модель задавалось граничное условие типа дозвуковой вход с заданием величин полного давления и температуры, а так же направления потока. На выходе из расчетной модели ставилось граничное условие типа дозвуковой выход с заданием статического давления. Граничные условия были взяты по данным эксперимента. При переходе от домена 2 (область НА) к домену 3 (область РК) использовался интерфейс Stage, при переходе от домена 3 к домену 4 (диффузор) – интерфейс Frozen Rotor.

Расчеты проводились в коммерческом пакете ANSYS CFX. Для описания трехмерного течения использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения движения жидкости (RANS – Reynolds averaged Navier-Stokes equations). Система уравнений неразрывности, импульса и энергии замыкалась уравнением, моделирующим турбулентность. Для ее описания была использована SST модель (shear stress transport), двухпараметрическая модель турбулентности, гибридный вариант моделей k-ε и k-ω, предложенная Ментером (Florian Menter).

Результаты численного моделирования. Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Численное исследование было выполнено для расхода $\dot{m} = 10$ кг/с. Для варианта модели с симметричными стойками по результатам экспериментальных и расчетных исследований было выполнено сравнение интегральных характеристик отсека, а также проведен сравнительный анализ 3D- полей скоростей в контрольных сечениях.

Интегральные характеристики. Качество работы блока оценивалось по следующим интегральным характеристикам: кпд η ступени, к.п.д. η^* ступени, кпд блока $\eta_{+д}$, прирост к.п.д. блока $\Delta\bar{\eta}_{+д}$ и C_p диффузора. Результаты сопоставления интегральных характеристик блока, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведены на рис. 22. Максимальные расхождения между экспериментальными и расчетными результатами наблюдается для к.п.д. η^* и составляет величину 1,5% в диапазоне режимов от 100% до 70% номинальной нагрузки. Расхождения расчетных и экспериментальных величин прироста к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+д}$ достигают 2,6%, а расхождения C_p - 12%. Характер изменения зависимости к.п.д. $\Delta\bar{\eta}_{+д}$ от угла закрутки потока, полученной в расчёте, повторяет характер экспериментальной кривой изменения C_p .

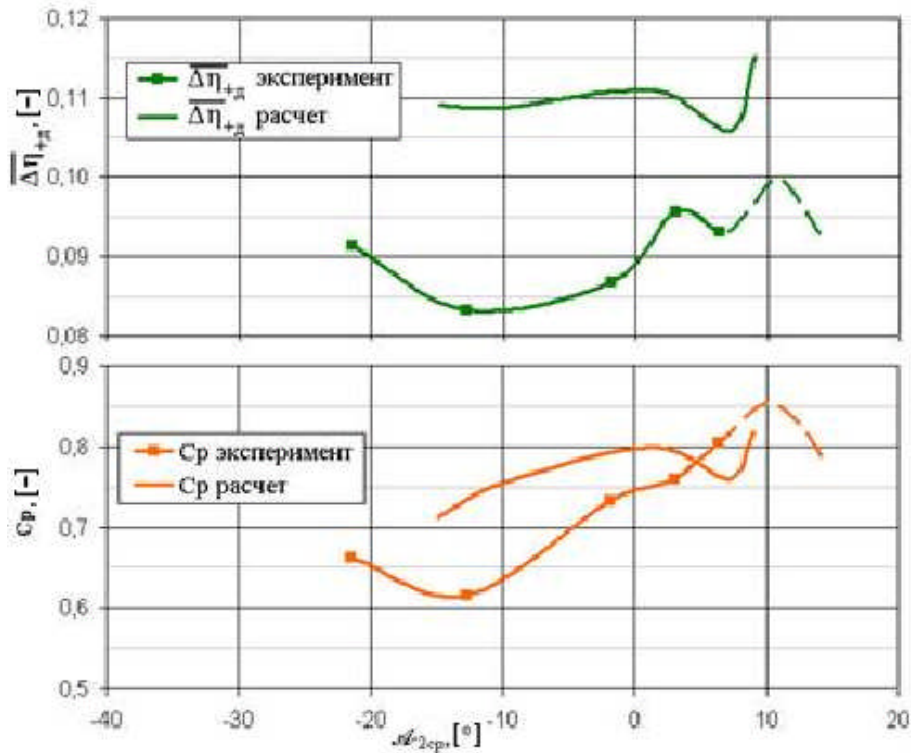


Рис. 22. Изменение прироста к.п.д. блока $\overline{\Delta\eta}_{+д}$ и C_p диффузора в зависимости от угла закрутки потока в сечении за РЛ. Вариант 1 диффузора

Это ещё одно подтверждение значительного влияния качества диффузора на улучшение работы блока. В работе приводится углублённый анализ расхождений данных эксперимента и расчёта по результатам исследований структуры 3D-потока в контрольных сечениях 2-2, 6-6, 7-7 и 8-8 (рис. 23).

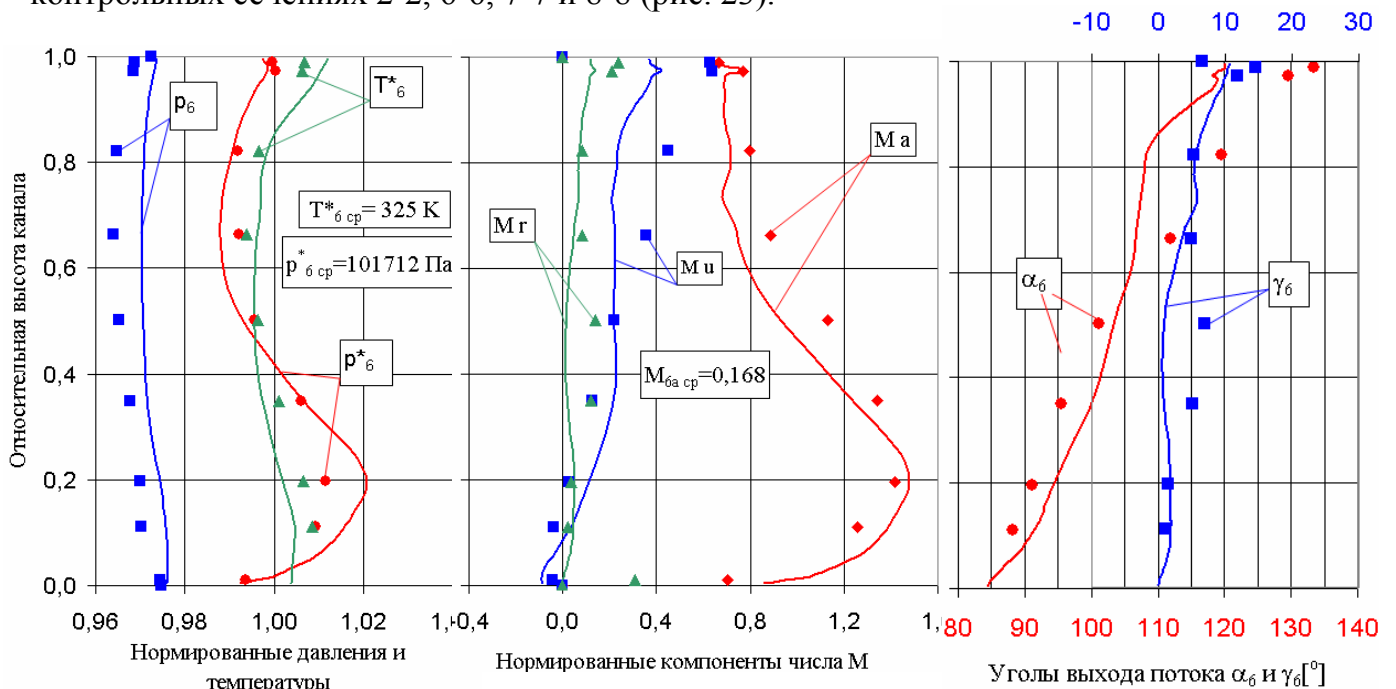


Рис. 23. Изменение параметров и скоростей потока по радиусу в сечении 6-6 кольцевого диффузора (вариант 1 диффузора, $\alpha_{2ср} = +5^\circ$, $M_{2ср} = 0,30$)

Выводы

1. Комплекс выполненных работ содержит совокупность научных и технических решений в области новой техники по совершенствованию проточных частей для современных комбинированных газопаровых установок, подкреплённых экспериментальными, теоретическими и численными исследованиями. Полученные научные и практические результаты позволяют обеспечить высокий уровень технико-экономических показателей при проектировании новых и модернизации действующих стационарных газотурбинных установок таких, как их газодинамическая эффективность надёжность и экономичность комбинированных газопаровых станций.
2. Разработаны методики экспериментальных исследований аэродинамических характеристик входных трактов, одиночных ступеней и двухступенчатых отсеков, а также блоков «последняя ступень-выходной диффузор» стационарных ГТУ, включающие определение интегральных характеристик и измерения полей параметров и скоростей трёхмерного потока в контрольных сечениях их проточных частей. В соответствии с методикой разработаны и внедрены в практику автоматизированные опытные стенды ВХТ-1, ЭТ-2, ЭТ-4-2, ЭТ-4-Д для испытаний указанных элементов ГТУ.
3. Разработаны обобщённые рекомендации по выбору основных конструктивных параметров оптимизированных входных трактов стационарных ГТУ для комбинированных установок, а также представлены интегральные аэродинамические характеристики этих трактов на основе обобщения данных систематических экспериментальных исследований и численного моделирования потока CFD-методами для применения в инженерных расчётах.
4. На основе обобщения экспериментальных данных и результатов оптимизационных расчетов ступеней большой циркуляции выработаны следующие рекомендации по выбору важнейших газодинамических параметров, кинематических характеристик и геометрических особенностей указанных ступеней с умеренными окружными скоростями u_2 и коэффициентами расхода $\bar{c}_z = 0,50 \div 0,65$ в части высокого давления: степень реактивности у корня ступени $\rho_T = 0,20 \div 0,25$; диапазон углов выхода потока из НА $\alpha_1 = 16^\circ \div 18^\circ$; угол поворота потока в решетке РК $\varepsilon_2 \leq 125^\circ$; коэффициент циркуляции $\bar{c}_u = 2,1 \div 2,5$.
5. Разработан метод профилирования проточной части переходного диффузора оптимальной конструкции для двухвальных газовых турбин со ступенями большой

циркуляции. Проведены его аэродинамические испытания с моделированием граничных условий посредством предвключённой и последующих ступеней в двухвальной турбинной секции со скольжением роторов.

6. Выходные турбинные диффузоры имеют безотрывное течение при увеличенных углах раскрытия периферийных обводов до $20^\circ \div 23^\circ$ за счет энергетизации и турбулентности периферийной области потока течением из радиального зазора РК последней ступени. Это подтверждено экспериментальными данными, полученными на модели блока «ступень-диффузор», и численным моделированием потока в этой области.
7. На основании обобщения экспериментальных данных получена оптимальная область средней величины закрутки потока $\Delta_{2cp} = + 8^\circ \div 12^\circ$ за необандаженной последней ступенью, при которой эффективность работы диффузора достигает максимума при соответствующем профилировании силовых стоек.
8. Результаты численного моделирования потока CFD-методами в блоке «последняя ступень – выходной диффузор» показали удовлетворительное качественное совпадение с экспериментом. Для достижения точности численных исследований, отвечающей требованиям к стационарным газовым турбинам большой мощности, целесообразно решать задачу в квазинестационарной или нестационарной постановке, чтобы «перенести» вихревые структуры, покидающие НА, во вращающийся РК, а затем – в диффузор.

Перечень публикаций автора по теме диссертации

1. Черников, В.А. Исследование и отработка ступеней для высокотемпературных газовых турбин. / И.И. Кириллов, Б.Н. Агафонов, В.А. Черников и др. // Теплоэнергетика. - 1983. – N 3. - С. 50 – 55.
2. Черников, В.А. Возможные пути повышения экономичности проточных частей паровых и газовых турбин / К.Л. Лапшин, Н.Н. Афанасьева, В.А. Черников и др.// Теплоэнергетика. – N 3. - 1993. - С. 16 – 18.
3. Черников, В.А. Исследование аэродинамических характеристик блока «ступень - выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы. / В.А. Черников, М.С. Зандер // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— СПб. – 2011. - N 2(123): Наука и образование. - С. 61 – 68.
4. Черников, В.А. Экспериментальный стенд для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин. / Черников В.А. // Теплоэнергетика. - 2008. - N 6. - С. 49 – 54.

5. Черников, В.А. Оптимизация выходного патрубка ЦНД мощной паровой турбины на базе экспериментальных исследований. / А.С. Лисянский, В.А. Рассохин, Е.Ю.Семакина, В.А.Черников // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— СПб. - 2012.— N 2-1(147): Наука и образование. — С. 48 – 56.
6. Черников, В.А. Характеристики работы переходного диффузора между турбинными ступенями при переменных режимах / В.А. Черников, С.С. Антонов, В.Н. Садовничий // Теплоэнергетика. - 1996. - N 6. – С. 21 – 23.
7. Черников, В.А. Экспериментальные исследования газодинамики блока «турбинная ступень - осевой диффузор». / В.А. Черников, М.С. Зандер // Материалы конференций Политехнического симпозиума. Изд-во Политехнического ун-та. С.Петербург. - 2010. - С. 185 – 187.
8. Черников, В.А. Исследование пограничного слоя в элементах проточных частей турбомашин методом PIV / В.А. Черников., Д.С. Смирнов, А.С. Сайченко, М.С. Зандер // Материалы конференций Политехнического симпозиума. Изд-во Политехнического ун-та. С.Петербург. - 2010. - С. 188 – 190.
9. Черников, В.А. Влияние режима работы стационарной газовой турбины на эффективность блока «последняя ступень-выходной диффузор». / В.А. Черников, М.С. Зандер // XXXIX неделя науки СПбГПУ. Изд-во Политехнического ун-та. С.-Петербург. - 2010. - С. 34 - 35.
10. Черников, В.А. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Н.Н. Афанасьева, В.Н. Бусурин, И.Г. Гоголев, В.А. Черников др.; Под общ. ред. В.А. Черникова. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. - 1980. - 263 с.
11. Черников, В.А. Комбинированные установки с паровыми и газовыми турбинами / Л.В. Арсеньев, В. Рисс, В.А. Черников // СПб: Изд-во СПбГТУ, 1996. – 124 с.
12. Черников, В.А. Энергетические машины. Измерение вектора скорости и параметров потока в турбомашинах: учебное пособие для студентов специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели» / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина. – СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, - 2009. - 48 с.
13. Черников, В.А. Эффективные энергетические комбинированные установки с современными газовыми турбинами и их показатели / Л.В. Арсеньев, В. Рисс, В.А. Черников // СПбГТУ, Научно-исследовательские работы ученых СПбГТУ и Ганноверского университета. - 1995. - С. 20 – 26.

14. Черников, В.А. Некоторые результаты аэродинамического исследования выхлопного патрубка транспортного двигателя / И.Д. Винник, М.П. Уманский, В.А. Черников // Энергомашиностроение. - 1959. - N 4. – С. 14 – 18.
15. Черников, В.А. Дистанционный координатник для ориентирования пневмо-и термонасадков при газодинамических исследованиях турбомашин // В кн.: Учёные записки аспирантов и соискателей. ЛПИ им. М.И.Калинина. Серия Энергомашиностроение. - 1964. - С. 97 - 102.
16. Черников, В.А. Принципы аэродинамического проектирования высоконагруженных ступеней для стационарных газовых турбин / И.И. Кириллов, К.Л. Лапшин, Н.Д. Саливон, В.А. Черников // Энергомашиностроение. - 1985. - N 2. - С. 2-3.
17. Черников, В.А. Методы оптимального проектирования и экспериментальной доводки высоконагруженных ступеней стационарных высокотемпературных газовых турбин / К.Л. Лапшин, С.Ю. Олейников, В.А. Черников / XXXVI всесоюзная научно-техническая сессия «Состояние и перспективы газодинамических тепловых исследований в обеспечение повышения температуры газа в стационарных газотурбинных установках». - 1989. - С. 3.
18. Черников, В.А. К оценке потерь в рабочих решётках осевых турбинных ступеней в зависимости от углов атаки / К.Л. Лапшин, В.А. Черников // Известия вузов. Энергетика. – 1984. - N 1. - С. 62 - 68.
19. Черников, В.А. Оптимизация НА турбины низкого давления газогенератора со ступенью большой циркуляции ГТУ ГПА на стадии проектирования / В.А. Черников, Ю.В. Лач, Ф.В. Мокравцов // Энергетическое машиностроение. – 1987. - N 6. - С. 5-9.
20. Черников, В.А. Оптимизация переходного диффузора с неосевым входом потока за ступенью большой циркуляции / В.А.Черников, К.Л. Лапшин, Ю.В. Лач и др.// Тезисы докл. респ. конф.- Харьков: ИПМ АН УССР. - 1988.- С. 9-10.
21. Tschernikow, V.A. Zur Erhöhung der Effektivität von Hochtemperaturgasturbinen / V.A. Tschernikow, L.V. Arsenjew // Energieanwendung und Energietechnik. - 1993. - Heft 4.- S. 201-205.
22. Черников, В.А. Исследование влияния радиального зазора у периферии рабочего колеса на характеристики необандаженной турбинной ступени: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Черников Виктор Александрович. - Л., 1969. - 16 с.
23. Черников, В.А. Аэродинамические характеристики выходного диффузора стационарной газовой турбины при различных режимах её работы / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Энергетические машины и установки. - 2009. - N 2. - С. 42 – 48.

24. Черников, В.А. Влияние углов атаки на потери в рабочих решётках осевых турбинных ступеней / К.Л. Лапшин, В.А. Черников // В кн.: Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в САПР. Харьков: ИПМ АН УССР. - 1982. - С. 113 – 114.
25. Черников, В.А. Система измерений в аэродинамическом эксперименте / В.А. Черников, М.Б. Биржаков, В.Н. Садовничий // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. М.: 1-08-08. - 1982. - С. 14 – 18.
26. Черников, В.А. Результаты экспериментальных исследований высоконагруженных турбинных ступеней большой циркуляции для мощных газовых турбин / Н.Н. Афанасьева, А.И. Кириллов, В.А. Черников // В кн.: Газотурбинные и комбинированные установки. М.: МВТУ. - 1983. – С. 16 – 21.
27. Черников, В.А. Экспериментальные характеристики переходного диффузора турбины газогенератора со ступенью большой циркуляции ГТУ ГПА / А.С. Ерёмин, Ф.В. Мокравцов, В.А. Черников // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. - 1984. - N 4. – С. 18 – 24.
28. Черников, В.А. Оптимальное проектирование и доводка высоконагруженных турбинных ступеней / И.И. Кириллов, К.Л. Лапшин, С.Ю. Олейников, В.А. Черников // В кн.: Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в САПР. Харьков: ИПМ АН УССР. - 1985. - С. 3.
29. Черников, В.А. Оценка потерь энергии в направляющем аппарате с большим углом изогнутости профиля и неосевым входом в условиях реального входного потока / Ю.В. Лач, В.А. Черников // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. – 1985. - N 4. – 5 с.
30. Черников, В.А. Оптимальное проектирование и доводка высоконагруженных турбинных ступеней / И.И. Кириллов, К.Л. Лапшин, В.А. Черников, С.Ю. Олейников // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение, - 1986. - N 5. – 4 с.
31. Черников, В.А. Оптимизация направляющего аппарата турбины низкого давления газогенератора со ступенью большой циркуляции для ГТУ ГПА / В.А. Черников, Ю.В. Лач, Ф.В. Мокравцов, В.Н. Попов // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. - 1986. - N 6. – 5 с.
32. Черников, В.А. Выбор оптимального переходного диффузора турбины газогенератора ГТУ ГПА со ступенью большой циркуляции на базе экспериментальных характеристик / В.А. Черников, А.С. Ерёмин, Т.Ф. Баранова, Ф.В. Мокравцов // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. - 1986. - N 7. – 4 с.

33. Черников, В.А. Методика исследований ступеней и отсеков на двухвальном стенде / В.А. Черников, С.Ю. Олейников, А.С. Ерёмин, Ю.А. Ханкин // НИИЭинформэнергомаш. Энергетическое машиностроение. - 1986. - N 8. – 3 с.
34. Черников, В.А. К вопросу оптимизации выходных диффузоров современных мощных ГТУ / В.А. Черников, Л.В. Арсеньев, С.М. Ланговой, А.И. Первушин // Н.-техн. ведомости С.-Пб. техн. ун-та. - 1996. - N 3. С. 36 – 40.
35. Tschernikow, V.A. Erhöhung der Effektivität von Gasturbinen- und kombinierten Gasturbinen-Dampfturbinen Anlagen durch Einführen von Wasser bzw. Dampf in den Luft-Gas-Trakt / V.A. Tschernikow, L.V. Arsenjew, W. Bernstein, A.L. Berkowitch // Журнал «Energie Anwendung». - 1995. - N 4.- S. 5.38 - 5.44.
36. Tschernikow, V.A. Zur Erhöhung der Effektivität von Hochtemperaturgasturbinen / L.V. Arsenjew, V.A. Tschernikow // XXIV. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden. November. - 1992. - S. 49 - 64.
37. Tschernikow, V.A. Hauptrichtungen des Umbaus von Kraftwerken in Russland und der GUS / L.V. Arsenjew, R. Pfeiffer, V.A. Tschernikow // XXV. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden. November. - 1994. - S. 218 - 239.
38. Черников, В.А. К вопросу об оценке роли выходного диффузора турбины в повышении эффективности современных ГТУ / В.А. Черников, К.В. Петросов // XLXI научно-техн. сессия по проблемам газовых турбин. Самара: АН РФ. - 2004. – С. 16 -17.
39. Chernikov, V.A. Hocheffektive Regelungsstufe zur Anwendung für überkritische Frischdampfparameter der Dampfturbinenkraftwerke / V.A. Rassochn, S.J. Olennikow, V.A. Chernikov und andere. // XXXVI. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden. Oktober. - 2004. – S. 35 – 36.
40. Черников, В.А. Газодинамические исследования выходных диффузоров: физический эксперимент и численные симуляции / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, М. Брёкер // XXXIX. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden. - 2007. - S. 45 -46.
41. Черников, В.А. Информационно-измерительная система аэродинамического стенда для исследований потока в проточной части отсека «ступень-диффузор» и некоторые результаты испытаний на модели мощной газовой турбины / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, Т.Ф. Баранова // Энергетические машины и установки. - 2009. - N 1. - С. 24 - 34.
42. Черников, В.А. Оптимизация диффузоров турбомашин в условиях закрученного потока / В.А. Черников, А.И. Первушин // Компрессорная техника и пневматика. - 1997. – Вып. 3-4. - С. 88 - 92.

43. Chernikov, V.A. Joint research in experimental aerodynamics of exit diffusers of turbines and stage-diffusers unit performed by the sub-department of turbine engines and plants, St.-Petersburg State Polytechnic University and the Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamics, Leibniz University of Hannover / V.A. Rassoichin, V.A. Chernikov, M.S. Zander, E.U. Semakina // Polytechnic University Publishing House. - 2010. - С. 141-156.
44. Черников, В.А. Aerodynamische Untersuchungen zur Steigerung der Effizienz der Systems «Turbinenstufe-Abgasdiffusor» der stationaeren Gasturbine bei ihren verschiedenen Betriebszustaenden / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, М.С. Зандер // 43. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden. - 2011. – S. 125 – 126.
45. Черников, В.А. Лопаточная решётка безбандажного рабочего колеса: авторское свидетельство № 261395 на изобретение / И.И. Кириллов, В.Н. Бусурин, В.А. Черников // Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 03.11.1969 г.
46. Черников, В.А. Ступень осевой турбины: авторское свидетельство № 1469966 на изобретение // Н.Н. Афанасьева, А.И. Кириллов, В.А. Черников // Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений 01 декабря 1988 г.