

*На правах рукописи*



Давлетшин Ильдар Салихзянович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫХЛОПНЫХ  
УСТРОЙСТВ ГТУ С КОНВЕРТИРОВАННЫМИ  
АВИАЦИОННЫМИ ГТД

Специальности: 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов  
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре «Реактивные двигатели и энергетические установки».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
**Явкин Владимир Борисович;**

Официальные оппоненты:

**Юшко Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», декан факультета информационных технологий;

**Харчук Сергей Иванович**, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Теоретические основы теплотехники»;

Ведущая организация – ООО «Научно-производственное предприятие «35-й Механический завод», г. Калуга.

Защита состоится 25 декабря 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, в зале заседаний Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

Автореферат разослан 18 ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



А.Г. Каримова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в России действует крупнейшая в мире система транспортировки газа, протяженность магистральных газопроводов которой составляет 161,7 тыс. км. На сегодняшний день наиболее эффективным приводом для компрессорных станций (КС), используемых в газотранспортной системе, является газотурбинный. Доля газотурбинного привода в газотранспортной системе России составляет 86,9%, Украины – более 82%. В качестве привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА) часто находят применение авиационные ГТД (конвертированные). Доля авиационного привода в общем балансе мощностей на КС превышает 33%. Потребности газоперекачивающей техники для реконструкций и технического перевооружения КС (в России) оцениваются около 1,5-2 млн. кВт в год (около 125 ГПА). Основные показатели проектируемых магистральных газопроводов представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные показатели проектируемых магистральных газопроводов

СЕГ («Норд стрим»)	55 млрд м <sup>3</sup> /год, 917 км, 7 КС, 1075 МВт
Бованенково-Ухта	127,5 млрд м <sup>3</sup> /год, 1074 км, 9 КС, 2100 МВт; ~280 млрд м <sup>3</sup> /год, 2000 МВт
Ухта-Торжок	150 млрд м <sup>3</sup> /год, 947 км, 7 КС, 1564 МВт
Ухта-Починки	80 млрд м <sup>3</sup> /год, 1275 МВт
«Алтай»	30 млрд м <sup>3</sup> /год, 2685 км, 9 КС, 1120 МВт
Видяево-Волхов	30 млрд м <sup>3</sup> /год, 1365 км, 800 МВт

Вышеперечисленные данные свидетельствуют об актуальности вопросов повышения мощностей и экономичности газотурбинных установок (ГТУ). Одним из способов увеличения экономичности ГТУ является повышение эффективности выхлопных устройств (ВУ). Сложность структуры и большие скорости потока в ВУ не позволяют достаточно точно определить потери с помощью методов одномерной газовой динамики.

Существенный рост производительности компьютерной техники, произошедший за последние десятилетия, создал благоприятные условия для применения численных методов (методов вычислительной гидромеханики) для повышения эффективности ВУ. При этом экспериментальные исследования становятся средством для настройки параметров численного эксперимента, и верификации получаемых результатов.

Применяемые ранее эмпирические методы проектирования выхлопных каналов имеют ряд недостатков, обусловленных, как техническими, так и фундаментальными причинами. Технические трудности обусловлены большой трудоемкостью и стоимостью таких исследований, зависимостью от внешних условий, ограниченностью получаемой информации, а фундаментальные – влиянием масштабного коэффициента.

Таким образом, развивающиеся средства проектирования и математического моделирования сложных технических устройств требуют их интеграции в соответствующую методику оптимизации ВУ ГТУ.

Цель работы. Повышение эффективности ВУ ГТУ с конвертированным авиационным ГТД путем оптимизации геометрии его проточной части и разработка методики проектирования, учитывающей совокупность сложных газодинамических процессов протекающих в проточной части ВУ.

В рамках указанной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов проектировочных и поверочных расчетов ВУ ГТУ.
2. Провести анализ адекватности статистических моделей турбулентности по отношению к расчету течения с положительным градиентом давления.
3. Провести численное исследование структуры течения и потерь давления в осерадиальном диффузоре (ОРД) и газосборнике выхлопной «улитки» ВУ ГТУ.
4. Проанализировать способы уменьшения потерь давления по тракту выхлопной системы, на основе диагностики течения.
5. На основе анализа структуры потока разработать схему организации течения в ВУ, обеспечивающую значительное снижение гидравлического сопротивления и провести оптимизацию конструкции, разработанной в соответствии с выбранной схемой.
6. Разработать методику проектирования ВУ, учитывающая совокупность сложных газодинамических процессов проходящих в них. Провести верификацию методики.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается данными экспериментального исследования с использованием аттестованной измерительной аппаратуры, сравнением 2D расчетов с экспериментальными данными и 3D расчетов с результатами натурных испытаний, а также сравнением результатов, полученных с использованием различных моделей турбулентности, применением численных схем II порядка.

Научную новизну работы составляют:

1. Рекомендации по использованию моделей турбулентности для расчета ВУ ГТУ.
2. Результаты исследования влияния газосборника ВУ на структуру течения в ОРД.
3. Зависимости коэффициента внутренних потерь выхлопной «улитки» от геометрических параметров газосборника с полостями для разворота потока («карманами»).
4. Схема снижения гидравлического сопротивления ВУ за счет изменения организации течения.
5. Методика проектирования ВУ ГТУ на основе 2D и 3D моделирования турбулентного течения.

Практическая ценность работы. Использование разработанной методики позволяет существенно уменьшить (~40%) гидравлические потери ВУ ГТУ и, соответственно, повысить к.п.д. ГПА. Предложенный подход может быть применен при проектировании ВУ ГТУ с конвертированным авиационным ГТД, а также при их модернизации в рамках реализации программ по повышению и поддержанию эффективности ГПА при эксплуатации и капитальном ремонте.

Апробация работы. Диссертационная работа, отдельные ее разделы и результаты докладывались и обсуждались:

- на Международной научно-технической конференции «Образование и наука - производству», ИНЭКА, Набережные Челны, 2010 г.;
- на Международной молодежной научной конференции “XVIII Туполевские чтения”, КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2010 г.;

- на 5-й Международной научно-технической конференции молодых специалистов авиационной отрасли "Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии", ОАО "Мотор Сич", г. Алушта, Украина, 2011 г.;
- на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», СГАУ, Самара, 2011 г.;
- на VI Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2011», КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2011 г.;

Личный вклад автора. Автором разработана методика проектирования ВУ ГТУ с измененной организацией течения на основе 2D и 3D моделирования турбулентного течения, проведено расчетное исследование структуры течения и способов повышения эффективности ВУ ГТУ. Выполнен анализ эффективности разработанных мероприятий по результатам эксплуатации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 статьи, опубликованных в изданиях входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников, включающего 93 наименования. Работа изложена на 127 листах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 68 иллюстраций. Общий объем работы – 136 листов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выделена область исследования и обоснована актуальность темы. Объектом исследования в данной работе является ВУ конвертированных авиационных двигателей семейства «НК» представленное на рис. 1.

В первой главе изложены существующие методы проектных и проверочных расчетов ВУ ГТУ, показаны основные параметры характеризующие эффективность ВУ ГТУ. Проведен аналитический обзор публикаций, посвященных исследованию и оптимизации течений в диффузорах.

Сложность структуры и большие скорости потока в ВУ существенно затрудняют их расчет. В результате, до недавнего времени, единственным методом исследования ВУ сложной геометрии был экспериментальный метод. Расчетным и экспериментальным методам проектирования ВУ посвящена обширная литература. Значительный вклад в развитие этих методов внесли Дорфман А.Ш., Назарчук М.М., Польский Н.И., Сайковский М.И., Дейч М.Е. и Зарянкин А.Е., Мигай В.К. и Гудков Э.И. и др.. Учитывая, что традиционные методы имеют существенные недостатки, которые описаны ниже, наиболее перспективным представляется численный метод расчета.

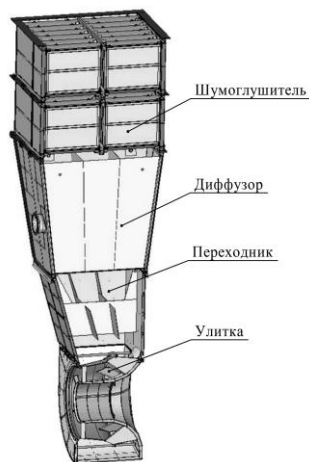


Рис. 1. Базовый вариант ВУ конвертированных авиационных двигателей семейства «НК»

Несмотря на высокую популярность численных методов для анализа течений, результатов их применения при проектировании ВУ ГТУ в литературе практически нет. Одной из причин популярности численного метода является существенный рост производительности компьютерной техники, произошедший за последние десятилетия, а также развитие численных методов и реализующего их программного обеспечения.

Обзор литературных источников показал, что типовой расчет газотурбинного ВУ, как правило, включает следующие этапы: расчет (осерадимального) диффузора и газосборника выхлопной «улитки». Методы расчета ОРД можно условно разделить на:

- 1) метод расчета на основе принципа разделения потерь,
- 2) метод расчета на основе теории пограничного слоя,
- 3) численный метод расчета.

Основным недостатком метода разделения потерь является то, что он основан на использовании коэффициента смягчения удара  $\varphi_o$ , поэтому для получения приемлемых результатов необходима однозначность опытной кривой  $\varphi_o=f(\alpha)$ , которой нет даже для конических диффузоров. Зависимость  $\varphi_o=f(\alpha)$  получена для конических диффузоров при одних и тех же условиях на входе. Разбивка ОРД на участки предполагает, что условия на входе на каждом последующем участке меняются. Коэффициент  $\varphi_o$  не может учитывать данное обстоятельство, поэтому точность расчета оказывается невысокой.

Основным недостатком метода расчета ОРД на основе теории пограничного слоя является использование эквивалентного канала, так как характер течения в нем может значительно отличаться от характера течения ОРД. Наибольшие трудности при расчете ОРД данным методом связаны именно с оценкой характера течения, так как все используемые зависимости справедливы только для безотрывных течений.

Оценка потерь в газосборнике «улитки» представляет большие трудности, связанные со сложной трехмерной структурой потока в них. В виду этого ранее разрабатывались методы оптимального профилирования, основанные на экспериментальных данных, которые условно можно разделить на:

- 1) метод профилирования газосборника с постоянной скоростью по тракту,
- 2) метод профилирования «свободного» газосборника.

В настоящее время, с высокой точностью расчет потерь в газосборнике можно провести только численным методом. Однако вопрос степени адекватности моделей для расчета течений в каналах со сложной геометрией, в частности в ВУ ГТУ, требует дальнейших исследований.

На основе рассмотренных литературных источников сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты методического исследования адекватности моделей турбулентности для расчетов течений в диффузорных каналах. Были проведены численные расчеты течений в модельных и натурных устройствах, выполненные с целью создания методики проведения численного эксперимента и определения границ применимости моделей турбулентности. Проведено сравнение расчетных методов.

Исследование достоверности моделей турбулентности выполнялось в несколько этапов. На первом этапе проводился расчет простейшего диффузорного течения в двухмерной постановке с целью выявления наиболее адекватных моделей. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными (Buice C.U. и Eaton J.K.), полученными для несимметричного плоского диффузора с углом раскрытия  $10^\circ$  (рис. 2) при числе Рейнольдса  $Re=20000$ .

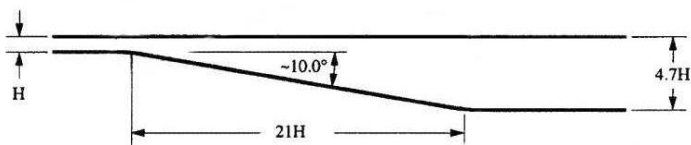


Рис. 2. Плоский несимметричный диффузор

Для исследования выбраны следующие модели турбулентности: стандартная  $k-\omega$  ( $sk\omega$ ), SST  $k-\omega$  ( $sstk\omega$ ), Спаларта-Аллмараса (SA), стандартная  $k-\epsilon$  ( $sk\epsilon$ ), RNG  $k-\epsilon$  ( $rngk\epsilon$ ), Realizable  $k-\epsilon$  ( $rke$ ). В моделях семейства  $k-\epsilon$  использовалась двуслойная пристеночная процедура, а в модели  $k-\omega$  ( $sstk\omega$ ) применялась низкорейнольдсовая коррекция. Расчеты проводились на нескольких сетках, отличавшихся количеством ячеек и значениями  $y^+$  пристеночных ячеек, которые были выбраны следующими  $y^+ \approx 0,5; 1; 10; 30, 50$ .

Важным моментом при сравнении расчетных и экспериментальных данных является точность определения положения точки отрыва и присоединения потока. Приоритет, в нашем случае, отдается точности предсказания точки отрыва потока. Это связано с тем, что при проектировании диффузора ВУ необходимо обеспечить условие безотрывности потока. Незначительное смещение точки отрыва потока приводит к существенному искажению характера течения, например, распределению поля давлений. Из опубликованных экспериментальных данных известно, что отрыв потока происходит при  $x=7H$ , а присоединение – при  $x=29H$ . В расчетах положение точек отрыва и присоединения определялось по смене знака напряжений трения на стенке, результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2– Координаты точек отрыва и присоединения потока

Сетка		$sk\omega$	$sstk\omega$	SA
$y^+ \approx 1$	отрыв, $x/H$	3,3	1,5	6
	присоединение, $x/H$	31,6	28,6	27,4
$y^+ \approx 10$	отрыв, $x/H$	2,3	3,3	5,7
	присоединение, $x/H$	31,8	27,3	28,2
$y^+ \approx 30$	отрыв, $x/H$	5,4	4,8	5,8
	присоединение, $x/H$	31,5	26,8	28,7
$y^+ \approx 50$	отрыв, $x/H$	6,6	6,4	7,9
	присоединение, $x/H$	30	26,4	26,8
$y^+ \approx 0,5$	отрыв, $x/H$	3,4	3,2	5,5
	присоединение, $x/H$	30,5	27,4	26,9

Из таблицы видно, что семейство k- $\omega$  моделей турбулентности предсказывают более раннее положение точки отрыва и большую длину отрыва по сравнению с измерениями, а наилучшее согласование по этому критерию имеет SA модель.

Наибольшее расхождение с экспериментальными данными по распределению коэффициента трения  $C_f$ , профилям скорости и положению точек отрыва и присоединения потока имеет семейство k- $\epsilon$  моделей турбулентности (рис. 3, 4). Наилучшее согласование с экспериментальными данными по параметрам  $C_p$ ,  $C_f$  и профилям скорости имеет семейство k- $\omega$  моделей.

Укрупнение сетки с  $y^+ \approx 0,5$  до  $y^+ \approx 50$  в большинстве случаев не приводит к существенному ухудшению результатов расчета (рис. 5, 6), поэтому применение мелкой сетки не всегда оправдывает увеличение расчетного времени. Наименьшую чувствительность к  $y^+$  имеет модель SA (рис. 6).

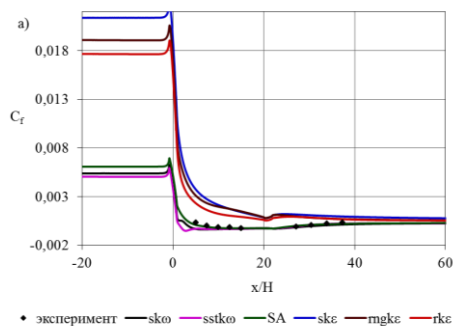


Рис. 3. Распределение коэффициента трения  $C_f$  вдоль нижней стенки для различных моделей турбулентности ( $y^+ \approx 1$ )

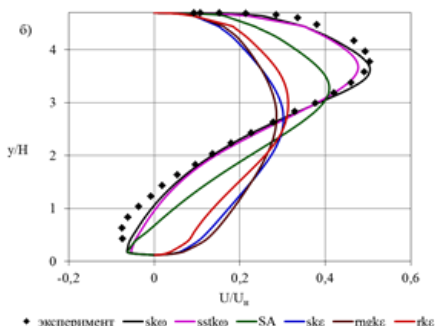


Рис. 4. Профиль скорости в сечении  $x/H=20,32$  для различных моделей турбулентности ( $y^+ \approx 1$ )

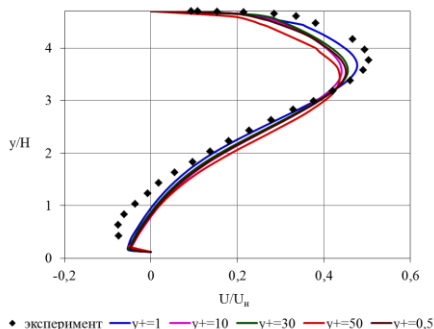


Рис. 5. Профиль скорости в сечении  $x/H=20,32$  для модели sstkomega с использованием различных сеток

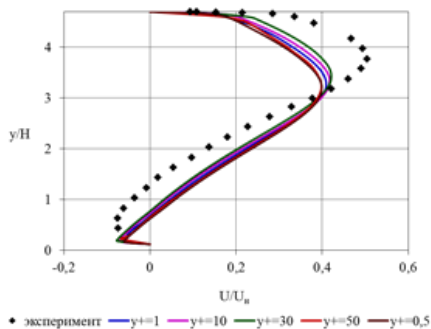


Рис. 6. Профиль скорости в сечении  $x/H=20,32$  для SA модели с использованием различных сеток

Таким образом, семейство k- $\epsilon$  моделей турбулентности не отражают реально-го характера течения, а наиболее подходящими из всех исследованных моделей являются k- $\omega$  модели. На ранних стадиях разработки, при рассмотрении различ-



ных вариантов конструкций, расчеты целесообразней проводить с помощью самой экономичной модели SA на грубой сетке ( $y^+ \approx 50$ ). Для проведения поверочных расчетов рекомендуется использовать мелкую сетку и семейство k- $\omega$  моделей турбулентности.

На следующем этапе проводился анализ применимости моделей турбулентности для расчета течений в ВУ ГТУ. Был рассмотрен базовый вариант выхлопного устройства двигателей семейства «НК» (рис. 1), спроектированный в начале 80-х годов в СНТК им. Н.Д. Кузнецова.

На ОАО КПП «Авиамотор» для базового варианта ВУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 получены экспериментальные данные о структуре потока в сечении, расположенном за переходником выхлопной шахты.

На рис. 7 показана схема препарирования ВУ при испытании базовой выхлопной системы на стенде. Согласно результатам измерений, предоставленных ОАО КПП «Авиамотор», гидравлическое сопротивление штатного ВУ двигателя НК-16СТ (разница между полным давлением на входе в ВУ и атмосферным давлением) на номинальном режиме работы двигателя при температуре окружающей среды  $+15^\circ\text{C}$  составляет 575 мм вод. ст. (без утилизационного теплообменника).

На основе предоставленных ОАО КПП «Авиамотор» экспериментальных данных проведено исследование достоверности моделей турбулентности для численного расчета течения в проточной части ВУ. В расчете использовались три модели: sk $\omega$ , sst $k\omega$  и SA. Выбор моделей проведен по результатам 2D расчетов, выполненных на первом этапе.

3D геометрическая модель ВУ, установленного на испытательном стенде натурального ГТД НК-16СТ, представлена на рис. 8 и состоит из: входного участка, необходимого для создания профиля скорости на входе в ВУ, ОРД, газосборника, переходника, выхлопного канала, обеспечивающего прямолинейность линий тока на выходе для корректности граничного условия «давление на выходе».

Учитывая симметричность относительно вертикальной плоскости, проходящей по оси ОРД, модель выполнена в виде половины ВУ. Для упрощения расчетов тангенциальной скоростью на выходе из свободной турбины, в виду ее малой величины, пренебрегаем. В расчете используются следующие граничные условия: расход на входе в расчетную область, значение которого было выбрано равным  $G_{ax}=54$  кг/с, давление на выходе, принимавшееся равным стандартному атмосферному, непроницаемая стенка, симметрия.

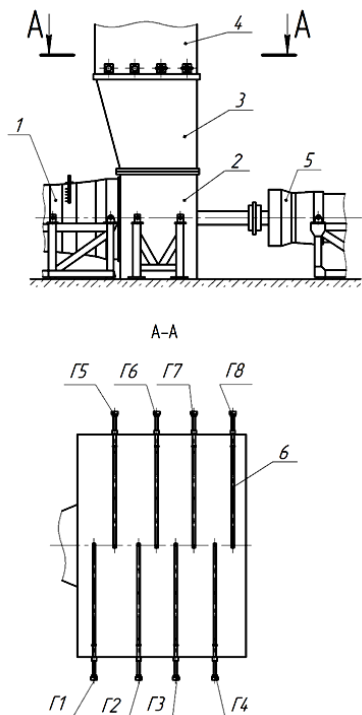


Рис. 7. Схема препарирования ВУ при испытании на стенде: 1 – свободная турбина ГТД, 2 – «улитка», 3 – переходник, 4 – выхлопной канал, 5 – пневмотормоз, 6 – гребенка, Г1...Г8 – гребенка №1...8

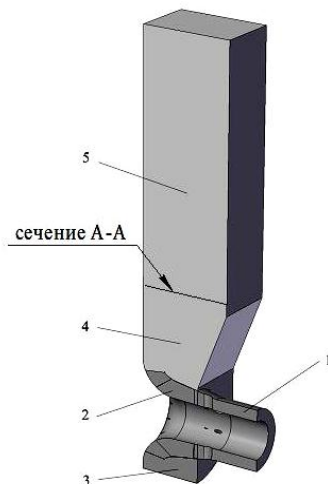


Рис. 8. Геометрическая модель:  
1 – входной участок, 2 – ОРД,  
3 – газосборник, 4 – переходник,  
5 – выхлопной канал

На рис. 9 представлено сравнение расчетных и экспериментальных распределений полного давления в сечении, расположенном за переходником ВУ. Сравнительный анализ расчетных данных и результатов испытаний показывает адекватность всех трех моделей. Однако имеет место существенное расхождение между моделями в пристеночной области  $z/b=0,8...1$  ( $z/b$  – расстояние от вертикальной плоскости проходящей по оси ОРД,  $b$  – ширина выхлопного канала геометрической модели). Наилучшее согласование с экспериментальными данными наблюдается у sstk0 модели турбулентности.

Учитывая, что все три модели имеют практически одинаковую адекватность расчета в ядре потока, в табл. 3 представлено сравнение экономичности моделей по затратам времени. Для удобства процессорное время нормировано по затратам времени для skw модели.

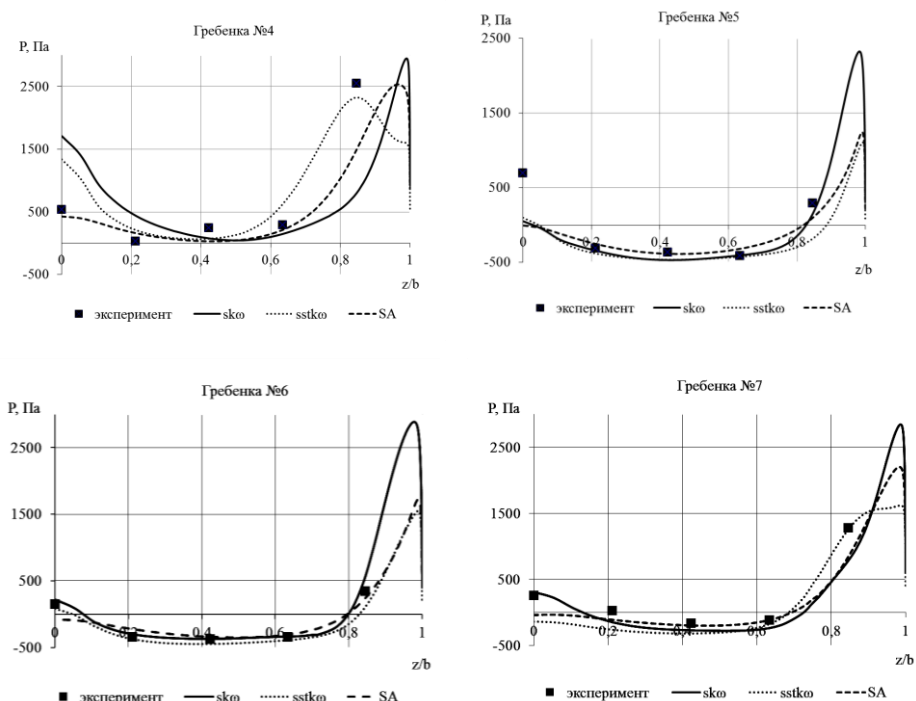


Рис. 9. Экспериментальное и расчетное распределения давления в сечении за переходником ВУ

Таблица 3 – Сравнение вычислительных затрат

$y^+$	Затраты	$sk\omega$	$sstk\omega$	SA
~50	процессорное время	1	1,1	0,99

Таким образом, рассмотренные модели приемлемо отражают реальный характер течения, и, соответственно, позволяют провести анализ структуры турбулентного течения в ВУ ГТУ с целью уменьшения гидравлических потерь.

На последнем этапе было проведено сравнение численного метода расчета с традиционными методами, рассмотренными в первой главе, на примере расчета ОРД ВУ двигателя НК-16СТ. Учитывая, что течение в ОРД ВУ отрывное, расчет по характеристикам пограничного слоя не проводился. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Сравнение расчетных методов

Метод расчета		Коэффициент полных потерь $\xi$
Метод разделения потерь		0,387
Численный метод	$sk\omega$	0,588
	$sstk\omega$	0,568
	SA	0,49

Таким образом, результат расчета коэффициента полных потерь методом разделения потерь занижен на 20-30% по сравнению с численным методом. Учитывая результаты работ других авторов, в которых указывается, что метод разделения потерь показывает заниженные результаты по сравнению с экспериментальными данными, численный метод оказывается более точным.

В третьей главе на основе построенной 3D модели проведена диагностика течения в проточной части штатного ВУ ГТУ с двигателем НК-16СТ. На основе анализа структуры потока в ВУ проведено исследование организации течения.

Структура потока изучалась на основе анализа линий тока, распределений полного давления по тракту и масляных картин на поверхностях обечайки и обтекателя (рис. 11, 12, 13).

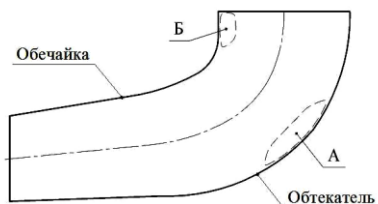


Рис. 10. Характерные области расположения отрывных зон: А — отрывная зона 1, Б — отрывная зона 2

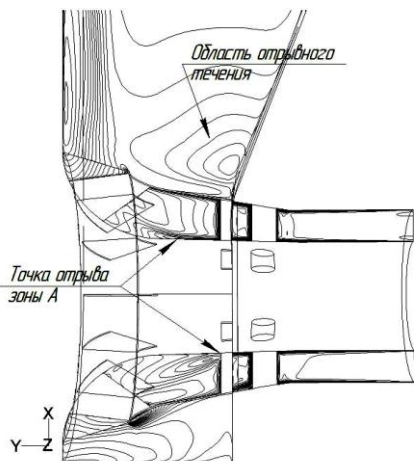


Рис. 11. Контурные полного давления в плоскости симметрии (модель SA)

Все модели показывают наличие отрыва на поверхности обтекателя ОРД (рис. 10, 11, 12, отрывная зона А), с некоторыми различиями в положении и размере отрывного участка. В нижней половине ОРД размеры отрывной области значительно больше, чем в верхней. Данный факт свидетельствует о наличии существенного влияния газосборника на течение в ОРД.

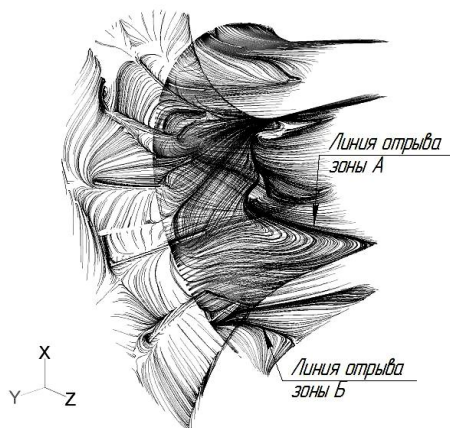


Рис. 12. Масляные картины на поверхностях обтекателя и обечайки ОРД (модель SA)

На поверхности обечайки ОРД отрывная область фиксируется только в нижней части (отрывная зона Б). Предпосылкой к образованию отрывной зоны Б является действие центробежных сил при повороте потока, приводящее к увеличению

давления на обтекатель, уменьшению - на обечайке и, соответственно, возникновению отрывной зоны. Наибольший размер отрывной области и наиболее раннюю точку отрыва показывает  $skw$  модель турбулентности.

Таким образом, газосборник оказывает существенное влияние на течение в ОРД, которое необходимо учитывать при его проектировании.

Течение в ОРД условно разделим на верхний, боковой и нижний поток (рис. 14). Этому условному разделению способствует также наличие радиальных стоек в ОРД. Верхний поток поворачивается на 90 градусов, нижний – на 270. Учитывая также малый объем нижней части газосборника и близкое расположение нижней стенки, течение в нижней половине ОРД происходит в наименее благоприятных условиях, и отрыв потока происходит раньше.

Как правило, профилирование и расчет ОРД ВУ выполняется отдельно от газосборника. При проектировании безотрывного ОРД это приводит к не учёту влияния газосборника, вследствие чего в спроектированном таким образом ОРД возможно образование области с отрывным течением в нижней части потока. Поэтому, профилирование ОРД необходимо проводить с учетом влияния газосборника. В данном случае наиболее очевидны два способа:

1) расчет ОРД проводится для потока с наихудшими условиями течения, то есть нижнего. Профиль ОРД, таким образом, будет определяться параметрами нижнего потока.

2) профилируется ОРД с переменным по окружности сечением. То есть расчет ОРД проводится как для верхнего, так и для нижнего течения. При этом значительно усложняется задача профилирования ОРД и возникает необходимость в исследовании влияния окружного градиента давления на работу свободной турбины.



Рис. 13. Линии тока  
(модель SA)

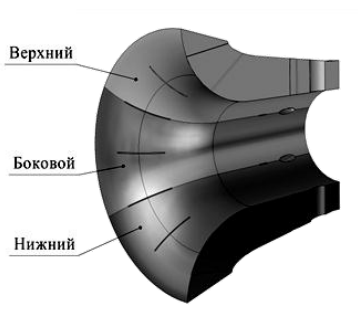


Рис. 14. Условное разделение потока,  
поступающего в газосборник ВУ

Далее проведена диагностика течения в газосборнике рассматриваемого ВУ с целью выявления характера течения и выработки рекомендаций по правильной организации его.

Газосборник находится между ОРД и переходником (рис. 7), от качества его геометрии зависит, как показано выше, течение как в ОРД, так и в переходнике. Другими словами, газосборник занимает центральную позицию и во многом определяет организацию течения во всем ВУ. Поэтому, при наличии высокоэффективного ОРД, основной задачей при создании ВУ является организация течения в газосборнике. Однако рекомендаций в литературе по организации течения в этом элементе ВУ, как показано в первой главе, крайне мало.

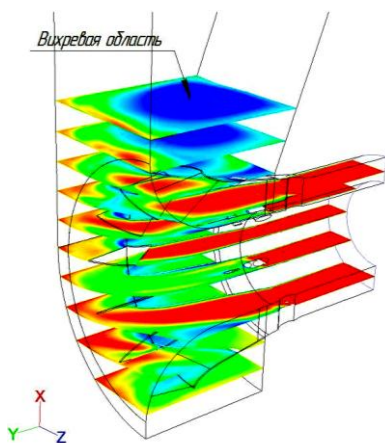


Рис. 15. Распределение полного давления в сечениях газосборника

После ОРД поток, со сниженной скоростью, попадает в газосборник, в котором поворачивается как в осевом направлении, так и в тангенциальном. Это приводит к формированию закрученного в две спирали течения (рис. 13, 15), снижающего эффективность ВУ.

Верхний поток поворачивается на 90 градусов в осевом направлении и имеет наиболее благоприятные условия течения. В данном случае, необходимо после выхода из ОРД обеспечить выравнивание потока плавным увеличением площади. На рис. 11 видно, что в рассматриваемом газосборнике после ОРД верхний поток подвергается внезапному расширению. При этом образуется область отрывного течения, расположенная над ОРД, которая значительно снижает эффективность ВУ.

Нижний поток поворачивается на 270 градусов в осевом направлении, при этом взаимодействует с обечайкой ОРД и оказывает влияние на верхний и боковой поток. Вследствие конструктивных ограничений, недостаточность объема в нижней части приводит к повышению давления и к увеличению положительного градиента выше по потоку, провоцируя отрывы (см. отрыв А на рис.10).

В табл. 5 представлено распределение потерь в элементах ВУ. Эти данные подтверждают условие, что высокоэффективный ОРД является необходимым, но далеко не достаточным средством снижения гидравлических потерь ВУ. Таким образом, при проектировании ВУ ГТУ наиболее важным является профилирование высокоэффективного ОРД и газосборника.

Полученные данные о структуре потока позволяют определить направления оптимизации проточной части штатного ВУ ГТУ с двигателем НК-16СТ:

- 1) Устранение отрывных зон в осерадиальном диффузоре путем изменения закона увеличения площади вдоль средней линии и геометрии средней линии.
- 2) Изменение организации течения в газосборнике путем устранения или минимизации отрывных зон.

Таблица 5 – Распределение потерь полного давления в элементах ВУ

Параметры	Осреднение	Модель	Диффузор	Газосборник	Переходник
$\Delta P^*$ , Па	по площади	SA	1590	2100	348
		sk $\omega$	2131	1658	424
		sstk $\omega$	1627	2164	447
$\Delta P^*$ , Па	по массе	SA	1542	1484	422
		sk $\omega$	1736	1340	470
		sstk $\omega$	1587	1547	351

В соответствии с выдвинутым ранее предложением условно разделить поток на три части, рассмотрим возможные способы организации течения. Для верхнего потока наиболее целесообразным представляется устранение внезапного расширения. После выхода потока из ОРД необходимо обеспечить выравнивание потока.

Для нижнего и бокового потоков наиболее очевидны две группы мероприятий: первое – установка в тракт дополнительных элементов конструкции (например, определенного количества направляющих лопаток) с целью улучшения взаимодействия бокового и нижнего потоков; и второе – проработка геометрии канала газосборника. Первая группа мероприятий, связанная с установкой элементов в канале газосборника, имеет серьезные технологические трудности и неблагоприятным образом сказывается на ресурсе ГТУ.

С целью улучшения их взаимодействия представляется перспективным способ, который заключается в отводе нижнего потока в сторону и его развороте в дополнительной полости – «кармане». Для отвода потока в сторону устанавливается рассекатель и увеличивается ширина ВУ. С учетом организации верхнего потока получим геометрию представленную на рис. 16.

Для оптимального проектирования газосборника, представленного на рис. 16, было проведено исследования влияния его геометрии на потери давления в ВУ. С этой целью созданы 4 модели с относительной шириной газосборника ВУ равной 2,3; 2,7; 3,3 и 4,3 (рис. 17).

Сначала рассмотрим влияние ширины газосборника на коэффициент потерь обычного ВУ, т.е. без «карманов». Из анализа работ Дейча, Дорфмана и др. вытекает однозначный вывод о существовании оптимальных значений, однако имеются существенные различия в подходах к определению этих значений. Например, Дорфман приводит формулу согласно которой ширина определяется условием увеличения площади на выходе из газосборника на 10%. Мигай, в своей работе, в общем случае, рекомендует выбирать значение в пределах от 2,2 до 2,4.



Рис. 16. К организации течения

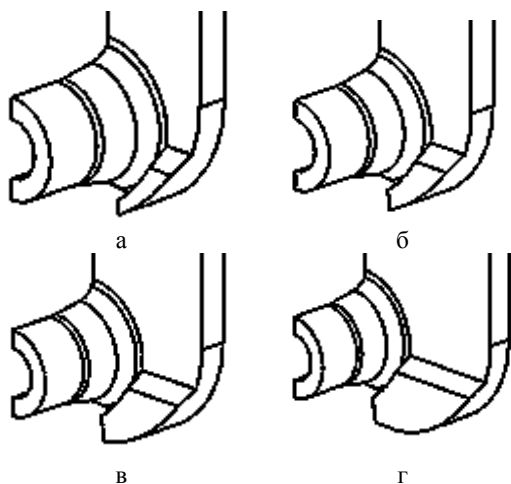


Рис. 17. Расчетные модели:  
а)  $\bar{B} = 2,3$ , б)  $\bar{B} = 2,7$ , в)  $\bar{B} = 3,3$ , г)  $\bar{B} = 4,3$

Из результатов расчетов, представленных на рис. 18, следует, что оптимальные значения коэффициента внутренних потерь располагаются в области  $B \approx 2,7$ . Дальнейшее увеличение ширины газосборника приводит к увеличению потерь. Как видим, оптимальные значения газосборника с «карманом» расположены выше рекомендуемого диапазона приведенного в работе Мигая.

Также следует отметить, что при выборе рекомендуемой ширины газосборника, для вышеописанного способа организации течения, на выходе из него получаем поджатие потока, в отличие от упомянутых в первой главе методов.

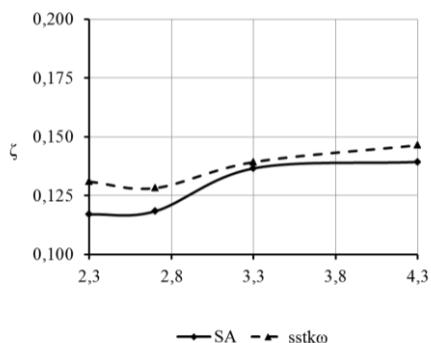


Рис. 18. Зависимость коэффициента внутренних потерь ВУ (с «карманами») от относительной ширины (среднение по массе,  $\bar{L}_\Pi = 1$ ,  $\bar{D} = 1,53$ )

С целью реализации вышеописанного способа исследовано влияние параметров «кармана» на структуру течения и эффективность устройства. Рассмотрен вопрос выбора высоты кармана и его влияние на структуру турбулентного течения в канале газосборника. Для этого созданы 4 модели с высотой кармана равной  $0,35H_F$ ;  $0,5H_F$ ;  $0,75H_F$ ;  $H_F$  (рис. 19).



«Карман» предназначен для разворота нижнего потока на 270 градусов, поэтому его размеры должны обеспечивать пространство для размещения вихревой зоны. При выборе малой высоты «кармана» вихревая зона оказывается поджатой и нестабильной, что, в свою очередь, также оказывает неблагоприятное воздействие на боковой поток, и, в конечном счете, приводит к повышенным потерям. При выборе чрезмерно большой высоты «кармана» в него будет поступать боковой поток. В отличие от нижнего потока, боковой не разворачивается на 270 градусов, поэтому подобное их взаимодействие внутри кармана приводит к увеличению вихревой зоны и потерь. Следовательно, должны существовать оптимальные значения геометрических размеров «кармана».

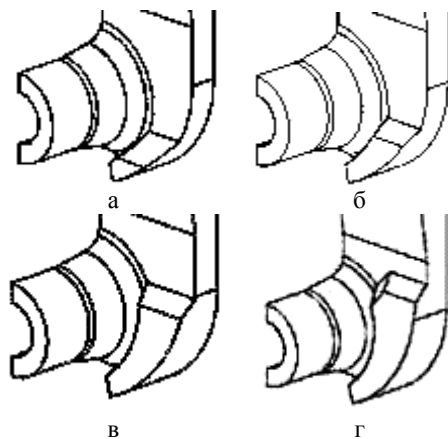


Рис. 19. Расчетные модели:  
а)  $H_K = 0,35H_\Gamma$ , б)  $H_K = 0,5H_\Gamma$ ,  
в)  $H_K = 0,75H_\Gamma$ , г)  $H_K = H_\Gamma$

Для оценки характера течения и потерь в газосборнике использовались линии тока и распределение полного давления (рис. 20, 21). Чтобы понять, как влияет установка «кармана» на течение в ОРД рассматривались масляные картины на поверхности его обечайки и обтекателя, представленные на рис. 23. Границу вихревой области, располагающейся в «кармане» газосборника, можно обнаружить на обечайке ОРД. Из рисунка видно, что вовлечение бокового потока в «карман» приводит к увеличению размеров вихревой области и чрезмерному отклонению потока, вследствие значительного расширения канала.

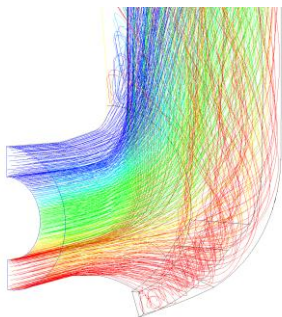


Рис. 20. Линии тока ( $H_K = 0,5H_\Gamma$ )

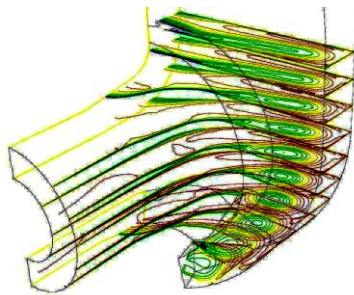


Рис. 21. Распределение полного давления ( $H_K = 0,5H_\Gamma$ )

В результате проведенного исследования получена зависимость коэффициента внутренних потерь выхлопной «улитки» от высоты кармана газосборника, которая представлена на рис. 22.

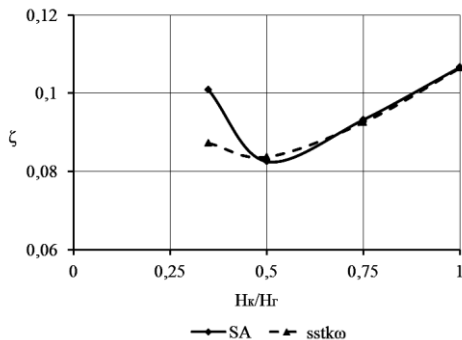


Рис. 22. Зависимость коэффициента внутренних потерь ВУ от высоты «кармана» газосборника (осреднение по массе)

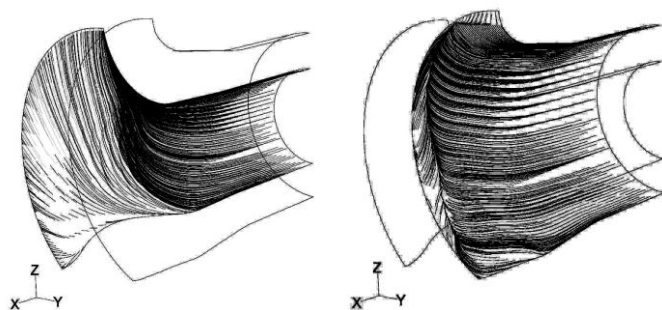


Рис. 23. Масляные картины на поверхности ОРД ( $H_k = 0,5H_r$ )

Четвертая глава посвящена разработке и верификации методики проектирования ВУ ГТУ с конвертированными авиационными ГТД на основе моделирования турбулентного течения.

На рис. 24 представлена блок-схема разработанной методики расчета.

При анализе турбулентных течений в сложных технических устройствах методы расчета являются комбинацией аналитических и эмпирических соотношений. Поэтому необходимо иметь ясное представление о принятых допущениях и существующих ограничениях методов при использовании их в физических ситуациях отличных от тех, для которых они были разработаны. Основными допущениями методики являются:

- при проведении проектировочных расчетов течение в ОРД полагаем осесимметричным;
- тангенциальной скоростью на выходе из свободной турбины пренебрегаем;
- поток на входе в ОРД полагаем однородным.

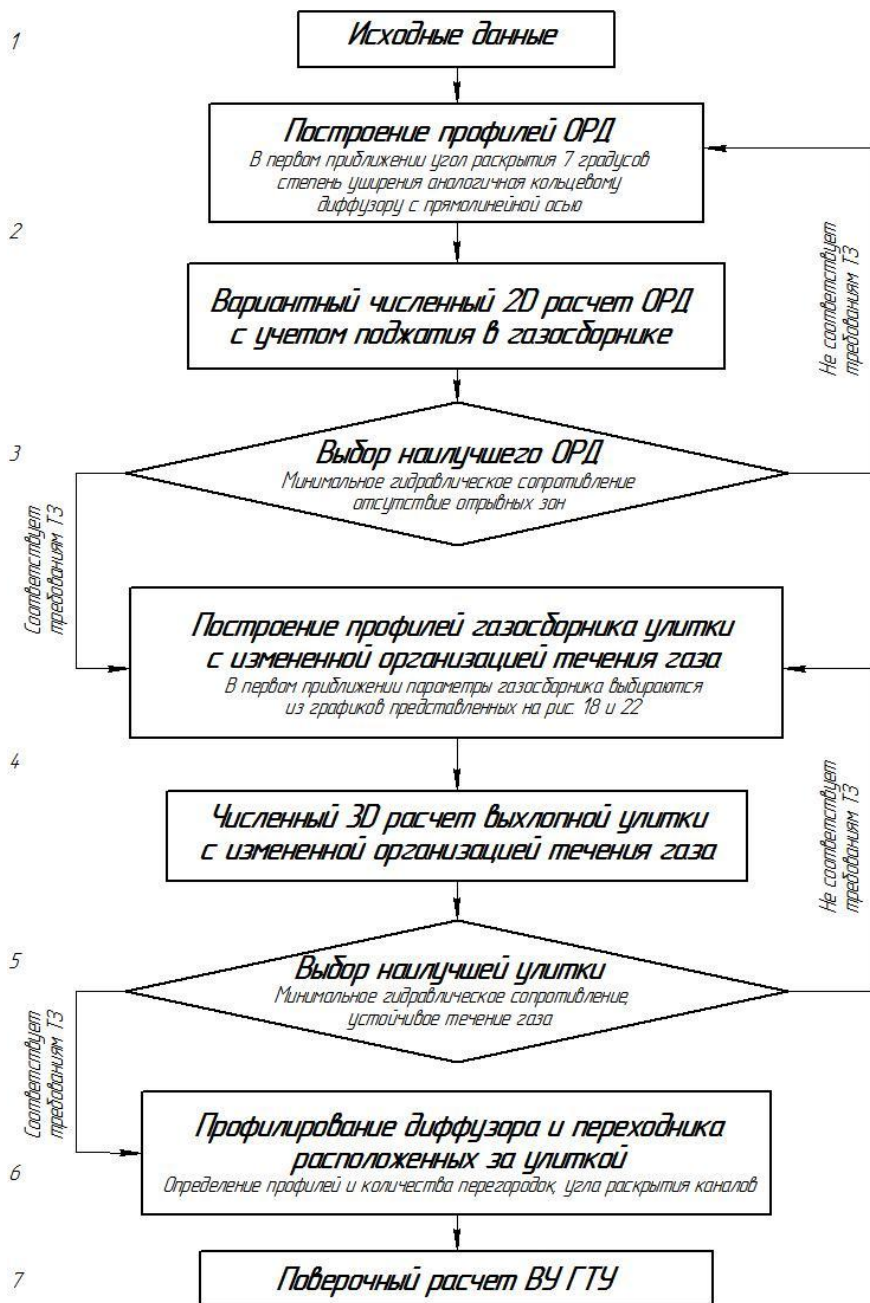


Рис. 24. Блок-схема методики расчета ВУ ГТУ

1. Исходными данными ВУ ГТУ обычно являются радиусы входного сечения ОРД  $R_H$ ,  $r_H$  и габариты выходной «улитки» - ширина  $B$ , длина  $L$  (рис. 25), а также расход и температура газа.
2. Основное торможение потока осуществляется в ОРД, течение в котором имеет окружную неравномерность. Проектирование ВУ начинаем с профилирования ОРД, который желательно выполнить безотрывным, т.к. здесь максимальные скорости потока и наибольшие потери, особенно, если будут отрывы. Наличие окружной неравномерности течения в ОРД создает возможность для возникновения отрывных зон в самой неблагоприятной области течения, то есть в нижней. Поэтому профиль ОРД следует выбирать таким, чтобы не было отрыва в нижней части. Степень расширения ОРД в первом приближении выбирается как у кольцевого диффузора с прямой осью и углом раскрытия 7 градусов. В последующих приближениях, после выбора геометрии средней линии, закон изменения площади корректируется, с учетом обеспечения безотрывности течения. Многовариантный расчет ОРД проводится с учетом поджата потока в двухмерной постановке с использованием семейства  $k-\omega$  моделей турбулентности на мелкой сетке ( $y^+ \approx 1$ ) (рис. 26). То есть при проектировании ОРД рассчитывается нижний поток. С целью сокращения вариантных расчетов следует воспользоваться рекомендациями работ Дейча, Мигая.

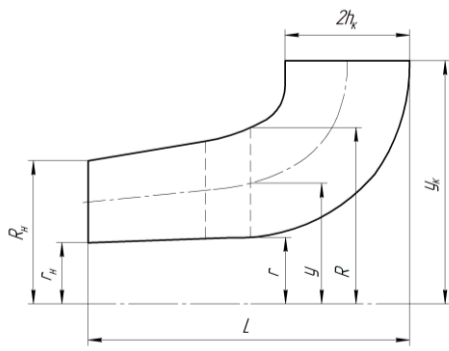


Рис. 25. К расчету ОРД

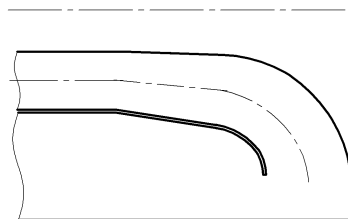


Рис. 26. К профилированию ОРД

3. По результатам расчетов выбирается ОРД с минимальными гидравлическими потерями.
4. После выбора ОРД переходим к расчету «улитки». Метод ее проектирования основан на схеме организации потока, полученной в 3 главе. Расчет газосборника, в виду сложной трехмерной структуры течения, выполняется совместно с ОРД численным методом в трехмерной постановке с использованием SA модели турбулентности на грубой сетке ( $y^+ = 50$ ). В первом приближении высота «кармана» выбирается по зависимости представленной на рис. 22, а ширина – на рис. 18. По результатам диа-

гностики течения в полученном газосборнике прорабатываются его остальные параметры.

5. По результатам расчетов выбирается «улитка» с минимальными гидравлическими потерями и устойчивым течением газа.
6. Профилирование переходника и диффузора (рис. 1), расположенных после «улитки», предусматривает установку перегородок для обеспечения безотрывного торможения потока в плоском диффузоре. Угол расширения каналов, расположенных между перегородками, в первом приближении выбирается в пределах 7 градусов (рис. 27). Каналы профилируются с учетом того, что при повороте под действием центробежных сил давление на стенке обтекателя становится больше, чем на стенке обечайки (рис 10, 11).
7. С целью проверки удовлетворения требованиям технического задания (ТЗ) проводится поверочный расчет спроектированного ВУ ГТУ в трехмерной постановке.

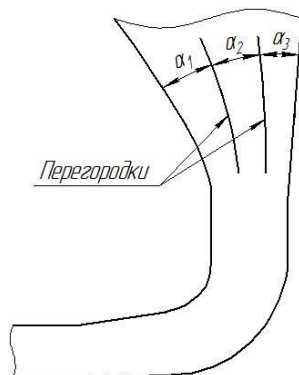


Рис. 27. Организация течения в переходнике и диффузоре ВУ

Для верификации метода использовались данные по гидравлическому сопротивлению, полученные на модернизированном ВУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 разработанном в ОАО КПП «Авиамотор» (совместно с КНИТУ им. А.Н. Туполева) и установленном на компрессорной станции Ныдинского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск» (рис. 28). Внешний вид модернизированной выхлопной улитки представлен на рис. 29. Опытный образец установленного выхлопного устройства препарирован под измерение температуры, полных и статических давлений в проточной части.



Рис. 28. Модернизированная выхлопная система ГПА-Ц-16



Рис. 29. Модернизированная выхлопная «улитка» с уменьшенным гидравлическим сопротивлением

По результатам расчета с использованием модели турбулентности Спаларта-Аллармаса гидравлическое сопротивление ВУ составило 350 мм. вод. ст.. Снижение потерь давления  $\Delta P^*_{BC}$  составило 225 мм вод. ст.. Данному снижению  $\Delta P^*_{BC}$  соответствует увеличение мощности на  $\Delta N_{ПР}=350$  кВт, уменьшение расхода топлива на  $\Delta G_{ТГ\ ПР} = -75$  кг/ч и увеличение эффективного к.п.д. на 0,52%. Проведенная в ОАО КПП «Авиамотор» предварительная сравнительная оценка параметров двигателя (включая оценку мощности по параметрам нагнетателя) до и после реконструкции выхлопной системы при работе ГПА-Ц-16 в магистраль показала, что увеличение мощности после реконструкции составило (при постоянной частоте вращения ротора низкого давления)  $\Delta N_{ПР}=450$  кВт, что соответствует уменьшению расхода топлива на  $\Delta G_{ТГ\ ПР} = -100$  кг/ч и увеличению эффективного к.п.д. на 0,68% при постоянной мощности. Согласно протоколу приемочных испытаний максимальное гидравлическое сопротивление ВУ при максимально допустимых по техническим условиям оборотах компрессора низкого давления составило 3109 Па. То есть снижение гидравлического сопротивления по сравнению со штатным ВУ по результатам приемочных испытаний составило 258 мм. вод. ст.. Нарботка модернизированного ВУ к моменту проведения приемочных испытаний составляла 4486 часов.

Таким образом, использование представленного метода проектирования выхлопных устройств ГТУ позволяет снизить гидравлические потери на  $\approx 40\%$ . Расчетные данные имеют незначительные расхождения и, в целом соответствуют, изменению параметров в результате реконструкции ГПА-Ц-16. Мероприятия, связанные с организацией течения, внедренные при реконструкции газоперекачивающего агрегата, показали свою эффективность и подтверждают эффективность предлагаемой методики проектирования ВУ ГТУ.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ существующих методов проектировочных и поверочных расчетов показал, что лучшим методом расчета ВУ является численный.
2. Получены рекомендации по использованию моделей турбулентности для расчета ВУ ГТУ. На ранних стадиях разработки, при рассмотрении различных вариантов конструкций, расчеты целесообразней проводить с помощью самой экономичной модели SA на грубой сетке ( $y^+ \approx 50$ ). Для проведения поверочных расчетов рекомендуется использовать мелкую сетку и семейство k- $\omega$  моделей турбулентности.
3. Выявлен характер влияния газосборника выхлопной «улитки» на структуру течения в ОРД. Показано сильное влияние газосборника на нижний поток, учет которого позволяет избежать образования обширных отрывов в нижней части ОРД.
4. Получены зависимости коэффициента внутренних потерь выхлопной «улитки» от геометрических параметров газосборника с полостями для разворота потока («карманами»).
5. Разработана схема организации течения, обеспечивающая существенное снижение гидравлического сопротивления ВУ, заключающаяся в отводе

нижнего потока в сторону и его развороте в дополнительной полости – «кармане». Для отвода потока в сторону устанавливается рассекатель и увеличивается ширина ВУ.

6. Разработана методика проектирования ВУ ГТУ на основе моделирования турбулентного течения. В методике используется разработанная схема организации течения и учитывается влияние газосборника на течение в ОРД. Разработанная методика позволяет снизить гидравлические потери до 40%.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. *Давлетшин И.С.* Повышение эффективности выхлопного устройства газотурбинной установки на основе результатов расчетно-экспериментального исследования течения/ Мингазов Б.Г., Кесель Б.А., Явкин В.Б., Воскобойников Д.В., Давлетшин И.С.// Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева - №2 – 2012, - с 69-74.
2. *Давлетшин И.С.* Особенности моделирования турбулентного течения в диффузорных каналах простой и сложной конфигурации/ Давлетшин И.С., Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Кесель Б.А., Воскобойников Д.В.// Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева - №3(27), часть 2, 2011. с. 11-15.
3. *Давлетшин И.С.* Выбор моделей турбулентности и параметров сетки для расчета течений в диффузорных каналах/ Мингазов Б.Г., Давлетшин И.С.// Изв. вузов, Авиационная техника, №4, 2011. с. 24-28.

### **В зарубежных изданиях:**

4. *Давлетшин И.С.* Расчетно-экспериментальное исследование газодинамики течения в проточной части выхлопного устройства ГТУ/ Давлетшин И.С., Кесель Б.А., Воскобойников Д.В.// 5-я Международная научно-техническая конференция молодых специалистов авиастроительной отрасли "Молодежь в авиации: новые решения и перспективные технологии". ОАО «Мотор Сич», Украина, г. Алушта, 2011. с. 35-36.

### **В других изданиях:**

5. *Давлетшин И.С.* Об оптимальном проектировании выхлопных устройств стационарных ГТУ/ Мингазов Б.Г., Давлетшин И.С.// Международная научно-техническая конференция «Образование и наука - производству», ИНЭКА, г. Наб. Челны, 2010. с. 68-70.
6. *Давлетшин И.С.* Поиск направлений оптимизации выхлопного устройства ГПА-Ц-16/ Давлетшин И.С., Мингазов Б.Г.// XVIII Туполевские чтения. Т.2, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. с. 18-19.
7. *Давлетшин И.С.* К вопросу проектирования выхлопных устройств газотурбинных установок/ Давлетшин И.С. Кесель Б.А., Воскобойников Д.В., Маргулис С.Г.// VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ 2011». КНИТУ им. А.Н. Туполева, г. Казань, 2011. с. 300-302.

---

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 110. Заказ Б118.

---

Типография КНИТУ-КАИ 420111, Казань, К. Маркса, 10