

## Литература

1. Лозгачев Г. И., Морозов Г. А., Ярославцев С. В. Методика синтеза скалярных законов регулирования нелинейных одномерных систем. - Воронеж: ДП ТН, 2001.

УДК 629.7.036.3.001

# КОНВЕРТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ И КОРАБЕЛЬНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СТАЦИОНАРНЫЕ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Представлено краткое содержание книги (в двух частях), посвященной конвертированию авиационных и судовых газотурбинных двигателей в стационарные установки для выработки электроэнергии и перекачки газа. В первой части рассмотрено термогазодинамическое проектирование газотурбинного двигателя, включающего трехмерный анализ потока в основных элементах машины. Вторая часть содержит данные относительно методов увеличения ресурса и оценки параметров надежности стационарных установок, а также о методах их вычисления*

*Книга предназначена для специалистов в области газотурбостроения, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей высших учебных заведений*

*Ключевые слова: двигатель, схема, ресурс, надежность, эффективность*

*The summary of the book (in two parts), devoted is presented to converting aviation and ship gas-turbine engines to stationary installations for development of the electric power and swapping of gas. In the first part it is considered thermodynamics designing gas-turbine the engine including the three-dimensional analysis of a stream in basic elements of the machine. The second part contains data concerning methods of increase in a resource and an estimation of parameters of reliability of stationary installations, and also about methods of their calculation*

*The book is intended for experts in the field of gas-turbo plant, and also for students and post-graduate students of corresponding specialties of higher educational institutions*

*Keyword: engine, scheme, resource, reliability, efficiency*

**Ю.М. Ануров**

Доктор технических наук, генеральный конструктор  
ОАО «ГТ ТЭЦ ЭНЕРГО»  
г. Санкт-Петербург, Россия

**В.А. Коваль**

Доктор технических наук, координатор  
НТЦ прогрессивных технологий НАН Украины  
г. Харьков, Украина

**Г.П. Нагога**

Доктор технических наук, заместитель генерального  
конструктора  
НПО «Сатурн»  
г. Рыбинск, Россия

**В.В. Романов**

Кандидат технических наук, технический директор  
ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект»  
г. Николаев, Украина  
Контактный тел.: 8 (0512) 49-36-34

**С.Г. Валюхов**

Доктор технических наук, профессор, генеральный  
конструктор-генеральный директор  
ФГУП «Турбонасос»  
ул. Острогжская, 107, г. Воронеж, Россия, 394052

## Часть 1. Термогазодинамическое проектирование

В первой главе книги раскрыты основные принципы конвертирования авиационных ГТД и пути реали-

зации газотурбинных технологий в энергетических объектах, включая современные и перспективные технологии. При этом обоснованы основные требования, предъявляемые в процессе конверсии. Рассмотрены

термогазодинамические и конструктивные особенности приводных газотурбинных двигателей и установок, а также различные схемные решения при конвертировании авиационных ГТД в стационарные ГТУ. На примере серийного ТРДД небольшой двухконтурности с подпорными ступенями проанализированы возможные его производные для энергетики и перекачки газа. Уделено должное внимание перспективным разработкам с применением различных надстроек к простому термодинамическому циклу: процессам с воздушно-турбинным двигателем (рис.1) и пароводородным силовым циклом. В последнем случае рассматриваются схемы ГТУ с использованием водорода для перегрева пара. Проанализированы схемы с паровым реформингом, применяемым для получения синтетического газа, а также низкотемпературным топливным элементом с электролизером. Приведены данные по выполненным проектам ведущих предприятий России и Украины. Сопоставлены энергетические возможности ГТУ.

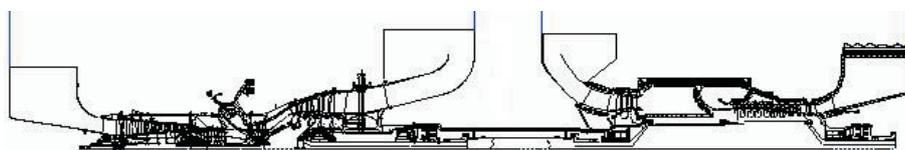


Рис. 1. Конструктивная схема ГТУ с воздушно-турбинным двигателем

**Вторая глава** посвящена расчету параметров термодинамического цикла газотурбинных и парогазовых энергетических установок, работающих по циклам различной конфигурации. С целью принятия экономически обоснованных решений при использовании газотурбинной техники приведены методики расчета стоимости жизненного цикла конвертированного изделия, а также определение эффективности ГТУ при ее комбинированной работе. Описаны выбор параметров и алгоритм теплового расчета ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением рабочего тела при его сжатии и подогревом в процессе расширения, а также регенерацией тепла. Рассмотрена методика теплового расчета конвертированного ТРДД с воздушно-турбинным циклом. При этом отображены подходы к определению энергетических характеристик топлива и термодинамических параметров продуктов сгорания. Уделено внимание математическому моделированию ГТД с целью исследования их эксплуатационных характеристик на установившихся и переходных режимах работы. В этой части работы описаны общие требования к построению математических моделей ГТД и уровни моделирования объектов. Представлены математические модели элементов проточной части двигателя и его лопаточных машин первого уровня моделирования (с возможностью перепуска воздуха и поворота направляющих лопаток). Изложены основные подходы к организации вычислительного процесса при решении системы уравнений невязок приводных ГТД различных конструктивных схем. Раскрыты принципы идентификации математической модели по результатам испытаний двигателя.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные с утилизацией тепла отработанных газов машины. Здесь произведен выбор параметров термодинамиче-

ского цикла приводного ГТД, работающего с теплоутилизационными контурами (ТУК) одного, двух и трех давлений, а также выполнено сопоставление энергетических показателей этих циклов. Дан анализ парогазового цикла STIG и описаны методики тепловых расчетов парогенераторов разных давлений и особенности алгоритма расчета когенерационной установки с подачей пара в камеру сгорания. Приведены примеры выполненных установок. Отдельное место занимает вопрос увеличения энергетических параметров ГТД путем впрыска воды в проточную часть компрессора. Здесь отображены результаты исследований по влиянию места впрыска воды в компрессор ГТУ ГТ – 009, ее количества на увеличение мощности установки и КПД. Даны рекомендации по организации оптимального впрыска в зависимости от типа компрессора, условий его работы, числа и расположения выбранных мест ввода воды в проточную часть.

**В четвертой главе** отображены вопросы, связанные с начальным этапом газодинамического проектирования основных узлов и элементов проточной части ГТД. При стремлении максимально сохранить без изменения конструкцию конвертируемого авиационного двигателя, примерно 20...30% основных деталей и узлов требует конструктивного изменения. К их числу относятся осевой компрессор (добавление группы первых или последних ступеней), камера сгорания, а также входное и выходное устройства. Турбину нового двигателя стремятся скомпоновать из лопаточных венцов исходного ГТД. В связи с этим в разделе уделено внимание выбору параметров и расчету решеток профилей компрессора и формированию рационального облика указанных основных элементов проточной части машины. При этом приведены обобщения результатов продувок решеток профилей, включая их характеристики при больших дозвуковых скоростях, рекомендации по проектированию малотоксичной камеры сгорания и входных/выходных устройств.

**Пятая глава** посвящена 3-D анализу течения в основных элементах проточной части и корректировки их размеров в целях минимизации гидравлических потерь и снижения вредных выбросов в камере сгорания. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса CFX ANSYS, основанного на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и использованием моделей турбулентной вязкости. Рассмотрены основные математические соотношения, как основной модели, так и различных моделей турбулентной вязкости. Проведено сопоставление этих моделей. В качестве примеров представлены результаты расчетов основных элементов проточной части (рис. 2). В целях проверки адекватности программного комплекса CFX выполнено его тестирование на высоконагруженной ступени вентилятора в широком диапазоне режимов, включая предсрывные. Для повышения надежности описания режимов, предшествующих вращающемуся срыву, разработана двухмерная модель течения в плоскости  $S_2$  с учетом особенностей формирования профильного и торцевого пограничных слоев.

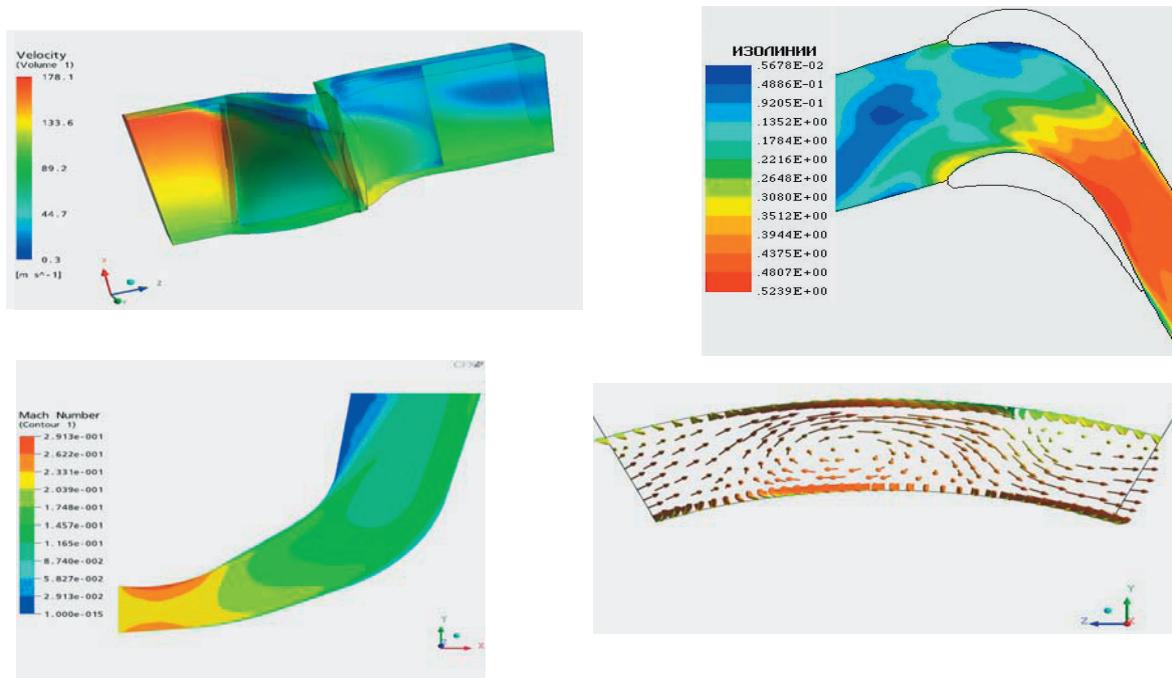


Рис. 2. Примеры 3-D моделирования течения в проточной части ГТД

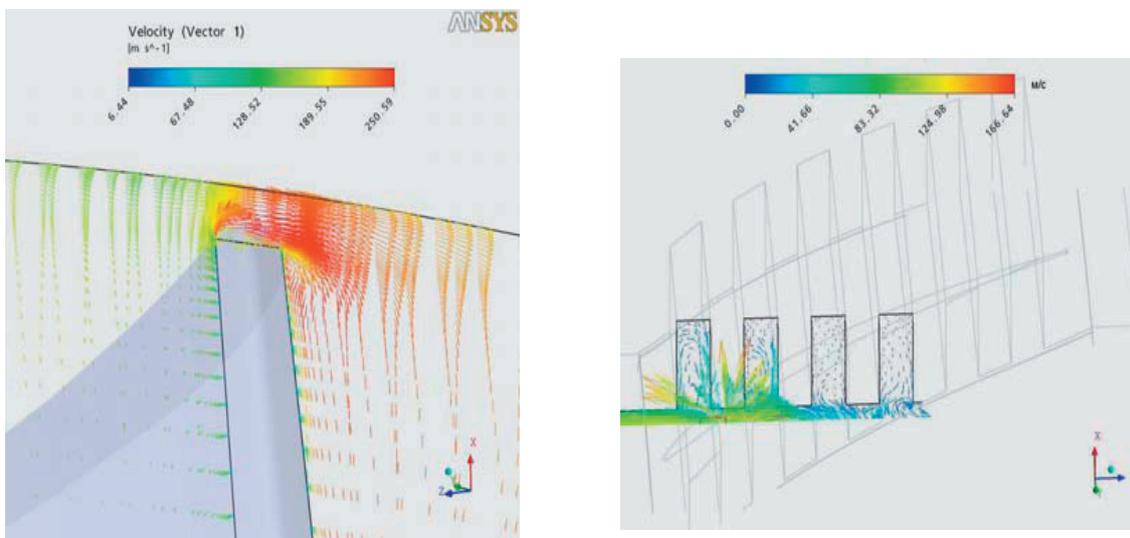


Рис. 3. 3-D картина течения у концов рабочих лопаток

Рассмотрено применение 3-D программного комплекса для анализа возможности повышения КПД осевого компрессора путем пассивного управления течением у концов рабочих лопаток (рис. 3).

**Часть 2. Особенности ресурсного проектирования ГТД**

В шестой главе изложены основные принципы конструирования охлаждаемых лопаток газовых турбин с интенсификацией теплоотдачи в каналах охлаждения. Это связано с тем, что вследствие термомеханической

и вибрационной напряженности лопатки турбин в значительной мере ограничивают межремонтный ресурс двигателя. Обеспечение высокого ресурса для конвертированных ГТД (более 100 тыс. часов) определяет применение новых проектных решений – ограниченных вихревых трактов и обтекаемых поверхностей, сформированных упорядоченными рельефами из сферических углублений (рис. 4). При этом выполнен расчетно- экспериментальный анализ для глубины охлаждения  $\Theta$  и рассмотрена эффективность различных способов интенсификации охлаждения в увеличении долговечности рабочих лопаток газовых турбин.

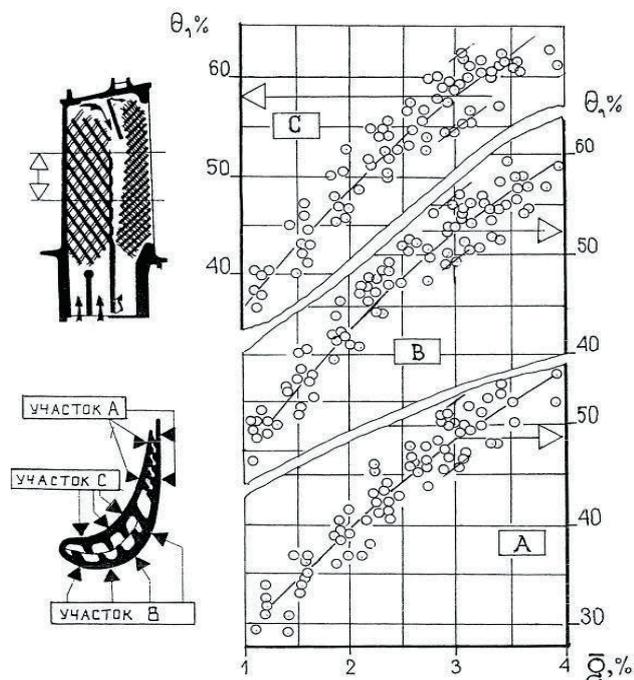


Рис. 4. Влияние относительного расхода воздуха на глубину конвективного охлаждения характерных участков оболочки рабочей лопатки с «вихревыми» трактами для трех поперечных сечений в центральной трети ее высоты

**Седьмая глава** посвящена проблеме теплозащитных покрытий рабочих лопаток (ТЗП) газовых турбин. Раскрыты типы ТЗП, их физико-химические свойства, а также методы нанесения покрытий. Описан механизм разрушения ТЗП в условиях работы ГТУ. Приведена методика оценки теплового состояния оребренной стенки охлаждаемой лопатки с ТЗП. Определены подходы по оценке ресурса лопаточного аппарата турбины с ТЗП при длительных статических и циклических нагрузках, а также его работоспособности в условиях коррозионно-эрозионного воздействия высокоскоростного газового потока. Показаны условия термомеханического разрушения ТЗП. Рассмотрены вопросы, связанные с напряженным состоянием керамического покрытия и оценки ресурса керамического слоя ТЗП (рис. 5). Представлена методика оценки эквивалентности испытаний и эксплуатации по критерию исчерпания ресурса слоя ТЗП.

**В восьмой главе** отражены вопросы надежности при создании (проектировании) ГТД. Здесь раскрыты основные понятия и определения, а также приведены методики расчета различных показателей надежности объекта. Приведенные материалы содержат и метод расчета показателей надежности автономных многоблочных газотурбинных ТЭЦ. ГТД ТЭЦ, рассматриваются как сложные технические объекты ответственного назначения, нарушение функционирования которых вызывает значительный экономический ущерб и может иметь негативные социальные последствия. Это обуславливает повышенные требования к

надежности проектируемых объектов. Для обоснования таких требований разработана соответствующая методика расчета нормативных значений коэффициента готовности и максимально допустимой вероятности аварии объекта в зависимости от величины возникающего ущерба (рис. 6).

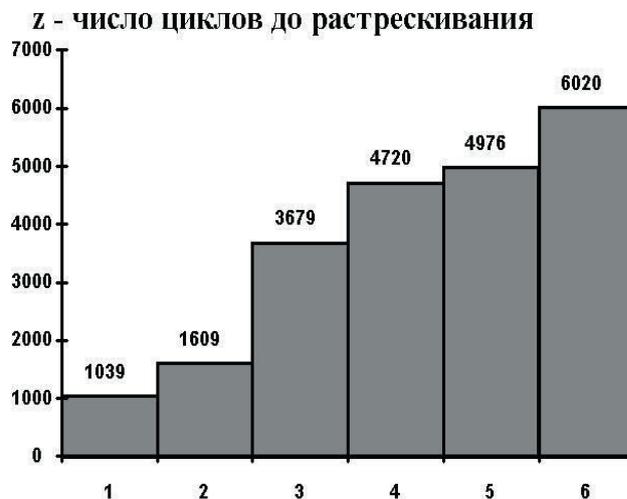


Рис. 5. Результаты испытаний образцов из сплава ЖС6У на термостойкость в продуктах сгорания топлива по режиму  $t = 200-1000-200 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\tau_{\text{H}} - \tau_0 = 30 \text{ с}$ ):

- 1 - без покрытия; 2 - алитирование;
- 3 - основа Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y (60мкм);
- 4 - основа Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y (80мкм) + Ni-16 % Cr-11 % Al-8 % Co-0,05 % Y (20мкм);
- 5, 6- основа Ni-17 % Cr-8 % Al-0,05 % Y (40мкм) + Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y + [Ni-16 % Cr-11 % Al-0,05 % Y + 2 % ZrO<sub>2</sub> - 8 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] (80мкм) толщина микрослоев в вариантах 5 и 6 соответственно 2...3 мкм и 0,5...1 мкм

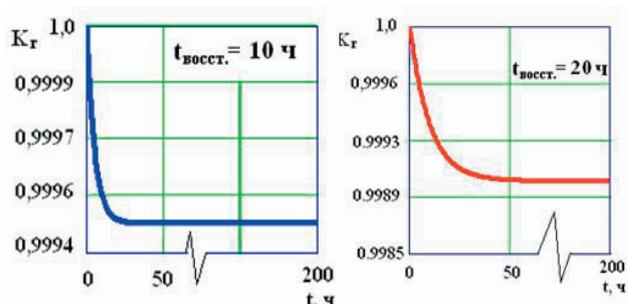


Рис. 6. Зависимость коэффициента готовности ГТЭ от наработки при различном времени восстановления после отказа

С помощью созданной модели решаются не только задачи оценки и анализа надежности создаваемого объекта, но и задача его частичного синтеза, например, за счет введения (или исключения) избыточного структурного резервирования.