

---

УДК 629.78

## **Применение информационных технологий при проектировании газотурбинных установок**

Ю.С. Елисеев, В.А. Поклад, Д.Н. Елисеев

### **Аннотация:**

В статье показана роль CALS-технологий при проектировании высокотехнологичных наукоемких изделий. Рассмотрено комплексное использование CALS-технологий при проектировании энергетической газотурбинной установки. Приведены конкретные примеры использования специализированных систем проектирования при создании отдельных элементов ЭГТУ.

### **Ключевые слова:**

информационные технологии; CALS-технологии; жизненный цикл изделия; системы автоматизированного проектирования.

Наиболее перспективным направлением развития энергетики является использование энергетических газотурбинных установок (ЭГТУ). Применение в них современных газотурбинных двигателей (ГТД) позволяет существенно повысить эффективность использования органического топлива при производстве электрической и тепловой энергии. Незаменимы ЭГТУ для автономного энергоснабжения промышленных предприятий, жилых комплексов, а также любых потребителей, удаленных от теплоэлектростанций и линий электропередачи.

Сегодня основной стратегией повышения эффективности всех процессов, выполняемых в ходе жизненного цикла создания конкурентоспособной продукции (ГТД) является высокий уровень внедрения передовых информационных CALS-технологий поддержки жизненного цикла изделий, эффективное использование систем автоматизированного проектирования, расчета, управления проектами на этапах конструирования, сопровождения изготовления в производстве и испытания.

Для достижения высокого уровня внедрения CALS-технологий на всех этапах жизненного цикла изделий - в маркетинге, проектно-конструкторских работах, технологической подготовке производства, в производстве, испытаниях, эксплуатации и утилизации - на предприятии должно быть создано единое информационное пространство научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, техпроцессов производства, объединяющее все используемые CALS-технологии во взаимосвязанную среду за счет интеграции систем и преемственности информации, отражающей все этапы создания ГТД, ГТУ и ЭГТУ. На сегодняшний момент этот процесс обеспечивается прежде всего за счет следующих составляющих.

1. Современные аппаратные средства вычислительной техники.
2. Обязательное наличие PDM-системы, обеспечивающей хранение и управление проектно-конструкторской документацией и инженерными данными на разрабатываемые изделия, ведение изменений в документации, сохранение истории этих изменений и т.п.
3. Методы 3D-моделирования со сквозными технологиями выполнения проектных, технологических, производственных, доводочных мероприятий, компьютеризованного контроля качества на основе CAD-систем высокого и среднего уровня.
4. Многоцелевые программные CAE-системы для выполнения газодинамических, теплофизических, прочностных расчетов, проведения анализа динамики жидкостей, газов и электромагнетизма и т.д.
5. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, пяти- и шестикоординатных станков с ЧПУ, роботизированных участков с компьютерным управлением, систем быстрого прототипирования и т.д.
6. Корпоративная ERP-системы планирования и управления ресурсами предприятия.
7. Система автоматизированного сбора, обработки и передачи данных во время испытаний и эксплуатации.
8. Интерактивные электронные руководства и компьютерные обучающие программы для эксплуатирующих организаций.

Проектирование такого сложного изделия, как газотурбинный двигатель, требует согласованной работы всей команды разработчиков. PDM-система Teamcenter Engineering совместно с CAD-системой 3D-моделирования высокого уровня Unigraphics предусматривают такие средства и процессы, благодаря которым инженеры могут работать параллельно в рамках единой концепции и единых требований к изделию в целом, используя единую базу данных.

Более детально рассмотрим комплексное использование CALS-технологий при проектировании основного компонента ЭГТУ - ГТД.

На первом этапе проектирования предварительно определяется облик компрессора. Для этого необходимо рассмотреть большое количество его вариантов. Целесообразным оказывается применение одномерных математических моделей. В используемом программном комплексе реализован численный метод решения в переменных Лагранжа обратной гидрогазодинамической задачи решеток газовых гидравлических турбомашин, располагаемых на пространственных поверхностях проточной части. При этом учитывается развитие пограничного слоя на профилях по интегральной теории в ламинарном и турбулентном режимах, а также его обратное влияние на основной поток и форму профилей. В метод решения введены кинематическая функция, предопределяющая закон движения частиц потока вдоль средней линии в межпрофильном канале, а также распределение аэродинамической нагрузки вдоль профилей, которое предопределяет величину остаточной шаговой градиентности ядра потока на выходном срезе межпрофильного канала.

Результаты одномерного проектирования используются в качестве исходных данных для следующего этапа расчета.

В основу второго этапа положено решение обратной задачи расчета осесимметричного течения в проектной точке. Кинематика потока должна обеспечивать подвод и преобразование энергии, необходимой для получения заданных суммарных параметров компрессора и его элементов. Определяются конструктивные параметры компрессора, обеспечивающие реализацию расчетного поля течения. Уже на этом этапе проектирования предусматривается параллельный расчет прочности наиболее ответственных деталей (лопаток и дисков ротора) и при необходимости коррекция их геометрии и повторный расчет течения.

На третьем этапе предусматривается дальнейшая оптимизация компрессора, основанная на совершенствовании аэродинамики трехмерного вязкого течения. Для этого используются программные комплексы, в которых реализовано решение уравнений Навье - Стокса: FlowER, FlowVision, ANSYS CFX, Fluent, StarCD, Phoenix и т.д.

Программный комплекс FlowER предназначен для расчета газодинамических характеристик многоступенчатых лопаточных машин. В нем реализованы передовые технологии пространственного профилирования лопаточных аппаратов. Течение газа в компрессоре описывается осредненными по Фавру уравнениями Навье-Стокса. Для моделирования турбулентности привлекаются алгебраическая модель Болдуина-Ломакса или двухпараметрическая дифференциальная модель переноса сдвиговых напряжений Ментера.

Последняя объединяет лучшие черты двухпараметрических моделей, лишена многих их недостатков и считается в настоящее время одной из лучших моделей турбулентности для широкого класса внутренних и внешних течений с отрывом, скачками уплотнения и теплообменом.

На входе в проточную часть турбомашин задаются распределения углов потока, полного давления и температуры, а на выходе — статического давления. В качестве альтернативного граничного условия в выходном сечении предлагается задавать инвариант Римана, рассчитанный по осевой скорости и скорости звука на выходе. В обоих случаях распределение параметров по радиусу на выходе может быть либо задано, либо определено из условия радиального равновесия.

Осредненные в окружном направлении параметры на выходе лопаточного венца используются в качестве условий на входе в следующий венец. Подобным же образом определяются условия на выходе из предыдущего венца. В обоих случаях используется принцип не отражающих граничных условий, что позволяет уменьшить погрешности, вызванные применением процедуры осреднения вблизи кромок лопаток.

Исходные уравнения, включая уравнения модели турбулентности, решаются численно с применением неявной разностной схемы повышенной точности.

Комплекс программ FlowER имеет препроцессоры и постпроцессоры, которые обеспечивают возможность работы с единой базой данных проточных частей, разностных сеток и результатов расчетов обтекания. Графическое представление геометрии лопаточных венцов, подробная визуализация течений, диалоговый режим работы и развитая система справок позволяют конструктору в кратчайшие сроки подготовить исходные данные для расчета и обработать его результаты в CAD-системах.

Расчет газодинамических характеристик многоступенчатых компрессоров с помощью CFD-пакетов, таких как ANSYS CFX, Fluent, StarCD и т.д., позволяет во много раз сократить объемы дорогостоящих натурных экспериментов, заменив их численными.

Учет нестационарного взаимодействия вращающихся и неподвижных лопаточных венцов позволяет существенно улучшить аэродинамику компрессора. Методология проектирования компрессоров ГТД ЭГТУ приведена на рисунке 1.

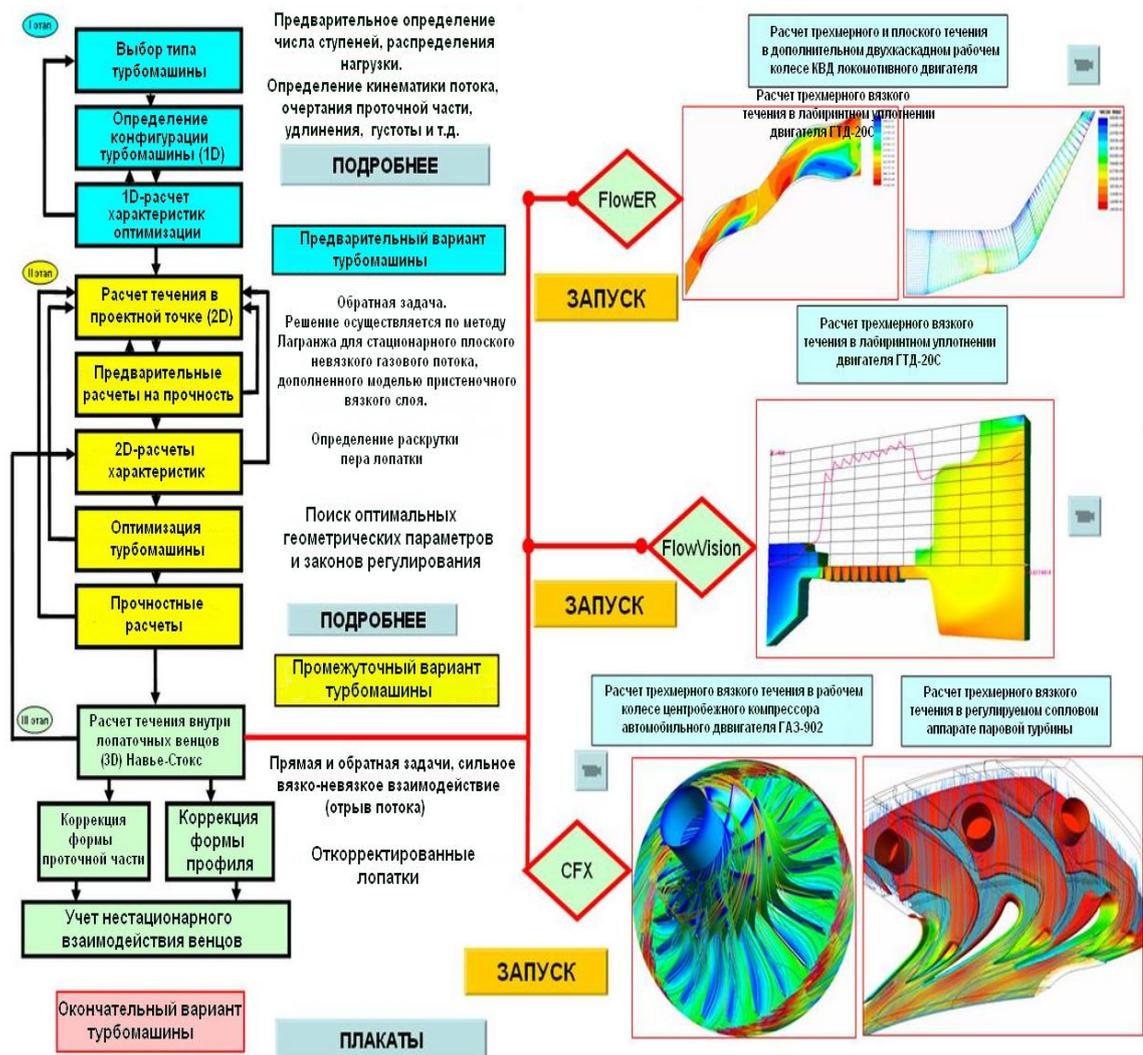


Рисунок 1 - Методология проектирования компрессоров ГТД ЭГТУ

Приоритетными требованиями для камер сгорания ГТД ЭГТУ являются:

- способность работы на газообразном топливе;
- ресурс работы 100 000 часов и более;
- легкая замена на объекте эксплуатации;
- экологическая безопасность.
- низкая себестоимость в изготовлении.

При этом не снимаются и традиционные требования по неравномерности температурного поля, полноте сгорания и т.д.

Проектирование камеры сгорания начинается с термогазодинамического расчета проточной части, на основании которого происходит построение геометрии камеры сгорания и ее основных элементов - жаровой трубы с фронтальным устройством, диффузором и форсунками.

Поверочные и оптимизационные газодинамические расчеты сложных течений в нестандартных каналах, выполняемые в настоящее время с помощью комплексов программ для трехмерных вязких течений FlowVision, ANSYS CFX, Fluent и т.д., обеспечивают профилирование сложных осерадиальных диффузоров и межтрубных пространств камер сгорания. При этом учитываются как реальные поля скоростей на входе в диффузор, так и наличие в проточной части различных стоек, форсунок, фиксаторов и т.д. Немаловажным фактом при работе по модернизации камер сгорания является использование в расчетах имеющихся данных по исходным камерам сгорания ГТД.

Современные программные комплексы позволяют рассчитывать не только газодинамику однородного потока, но и учитывают многокомпонентность среды. Рассчитывается смешение различных сред с учетом химической реакции горения: воздуха, топлива и продуктов сгорания.

Для обмена данными между расчетными программами и конструкторской системой используются специальные пре- и постпроцессоры, позволяющие тесно переплести процессы проектирования и расчетов элементов конструкций. Сетка конечных элементов на основе модели может быть построена непосредственно в CAD-системе, при этом она ассоциативно связана с геометрией детали и может передаваться в расчетные программы. При этом обеспечивается минимальное время создания расчетных моделей любой сложности. Расчетные комплексы позволяют выполнять углубленный анализ поведения нелинейных конструкций с учетом изменения их геометрии и свойств материалов от наработки, а также решать трехмерный контакт, в том числе с жидкостью, что позволяет исследовать процессы, связанные с работой камеры сгорания на жидком топливе.

Моделирование, проектирование и оптимизация турбины ГТД проводятся на основе совокупности высокоточных регрессионных методов оценки различных видов потерь в проточной части; квазивязких 2D- и 3D-методов расчета вязкого течения на основе уравнений Навье - Стокса. При этом уточняются пространственная структура течения, а также суммарные потери и их распределение в каждом лопаточном аппарате.

Для оценки параметров потока и их распределения в проточной части многоступенчатой турбины проводится осесимметричный расчет. Полученные параметры используются далее в качестве граничных условий для расчета 3D-течения в каждом

лопаточном аппарате. В современных высоконагруженных турбинах уровень скоростей на выходе из лопаточных аппаратов, как правило, превышает скорость звука, что приводит к возникновению системы интенсивных скачков уплотнений на выходе и, следовательно, к существенному изменению угла выхода потока. Поскольку волновая структура потока может быть выявлена только в результате расчета 3D-течения, предпочтение отдается именно ему.

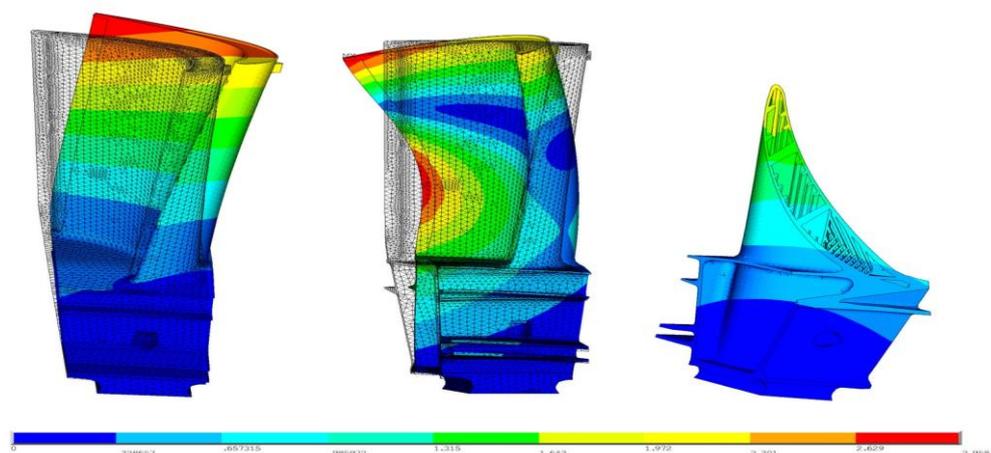
Для расчета 3D-течения вязкого газа в проточной части турбины применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье - Стокса.

Таким образом, оценка газодинамической эффективности турбины проводится с использованием ряда независимых моделей:

- регрессионных — оценка различных видов потерь в зависимости от формы проточной части и режима работы;
- газодинамических квазивязких - анализ кинематики 2D- и 3D-невязкого и квазивязкого течений в проточной части;
- газодинамической вязкой - анализ кинематики вязкого течения, оценка потерь и их распределения в лопаточных аппаратах на основе 3D-уравнений Навье - Стокса.

Совместное использование этих моделей существенно повышает достоверность прогноза КПД турбины. При этом объем расчетных и оптимизационных исследований на стадии проектирования увеличивается в сотни раз, однако это позволяет уже на первом образце изделия получать КПД турбины, близкий к максимальному. Поэтому продолжительность экспериментальных исследований и затраты на стадии доводки сокращаются в 4-5 раз.

Новое качество в проектировании лопаток турбин и компрессоров - это возможность точного определения частот собственных колебаний. Пакеты ANSYS и MSC.Nastran позволяют рассчитать весь спектр возможных частот и исключить резонансы в рабочем диапазоне (рисунок 2).



## Рисунок 2 – Собственные формы колебаний лопаток турбины

Для охлаждаемых лопаток турбин надежность проектирования возросла из-за увеличения точности расчета системы охлаждения и точного определения частот собственных колебаний. Процесс доводки системы охлаждения и теплового состояния пера лопатки с использованием CALS-технологий занимает один месяц вместо десятков экспериментов, длившихся годами. Так, например, результаты гидравлического расчета внутренней полости рабочей лопатки первой ступени турбины установки ГТД-20С полностью совпали с данными расчетов, доводочных работ по лопатке не было. Частоты собственных колебаний по этой лопатке были намеренно сдвинуты изменением стрелы прогиба корневого сечения в нерабочую зону. Совпадение расчета с экспериментом было полным и по частотам полки собственно лопатки и по частотам совместных колебаний лопаток с диском.

При прогнозировании ресурса деталей и узлов ГТД ЭГТУ используются программные комплексы ANSYS и MSC.PATRAN + NASTRAN + MARK. Универсальность системы обеспечивает решение любых прочностных задач любой степени сложности:

- анализ напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия;
- развитие пластических деформаций и ползучести вплоть до разрушения;
- определение собственных частот колебаний рабочих колес и критических частот вращения роторов;
- устойчивость и ударные воздействия для корпусных конструкций;
- прогнозирование ресурса сложных деталей и узлов ЭГТУ;
- углубленный анализ поведения нелинейных конструкций с учетом изменения их геометрии и свойств материалов от наработки;
- учет влияния гироскопического эффекта;
- решение трехмерного контакта, в том числе с жидкостью, что позволяет исследовать процессы, происходящие в подшипниках и зубчатых передачах.

На рисунке 3 представлена объемная конечно-элементная (КЭ) модель составного диагонального рабочего колеса компрессора высокого давления (КВД) изделия ГТД-1С. Расчетная модель создавалась, учитывая циклическую симметрию конструкции, на основе твердотельной модели системы Unigraphics. При построении сетки КЭ использовали высокоточные изопараметрические гексаэдры с квадратичной аппроксимацией поля перемещений.

Упругий расчет напряженно-деформированного состояния проводился при суммарном воздействии центробежных сил, перепадов давления и температурного поля, перенесенного на модель из расчета температурного состояния; взаимодействие между составными частями - крыльчатками рабочего колеса учитывалось наложением связей, соответствующих посадкам в узле (рисунок 4).



Рисунок 3 – Объемная КЭ-модель циклически-симметричного сегмента крыльчатки КВД ГТД-1С

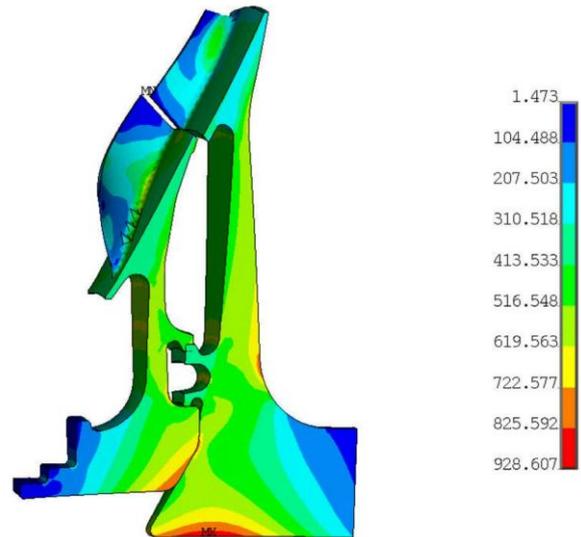


Рисунок 4 – Результаты прочностного расчета крыльчатки КВД ГТД-1С

Одной из наиболее сложных проблем, решаемых при проектировании ГТД, является обеспечение необходимых жесткостных и динамических характеристик в системе «ротор - корпус» для достижения допустимых запасов по критическим частотам вращения. Существование резонансных состояний роторов в рабочем диапазоне способствует повышению общего уровня вибрации двигателя, при этом длительная эксплуатация на резонансных режимах может приводить к дефектам подшипников, рабочих лопаток и замковых соединений.

При использовании современных систем проектирования точность определения критических частот вращения роторов существенно повышается, гарантируя тем самым надежность частотной отстройки и сокращая длительность экспериментальной доводки ГТД. Так, например, расчет двигателя ГТД-18С с многоопорной двухроторной системой в газогенераторе проводили с разбиением на 8-узловые гармонические элементы и

наложением связей, имитирующих характер взаимодействия между деталями конструкции. Податливости опорных узлов, реализованные в расчетной модели упругими элементами, принимали по данным экспериментальных продувок. Результаты расчетного анализа собственных частот и формы колебаний в системе роторов, а также последующие экспериментальные исследования на двигателе, включая тензометрирование упругих опор и виброобследование, подтвердили правильность построения расчетной модели при высоком совпадении результатов расчета и эксперимента.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что применение CALS-технологий при проектировании ГТД ЭГТУ позволяет реализовать необходимые условия для обеспечения прочностной надежности при существенном сокращении сроков и снижении затрат на экспериментальную доводку с устранением дефектов проекта.

Программные комплексы инженерного анализа требуют применения мощных 64-разрядных вычислительных систем, только в этом случае достигается снижение издержек при создании новой продукции и рационально используется рабочее время конструкторов и расчетчиков. Применение кластерных вычислительных технологий в процессе создания ГТД позволяет создать максимально точную математическую модель двигателя и процессов его работы. Это существенно сокращает время разработки, дает возможность проработать множество вариантов конструкций, повысить качество проектирования, улучшить технические характеристики изделия. Модель разбивается на сотни миллионов элементов. Точность расчетов постоянно повышается. В целом внедрение CALS-технологий и создание единого интегрированного информационного пространства на предприятии позволяет:

- сократить сроки разработки новой газотурбинной техники;
- повысить качество проектирования;
- улучшить технические характеристики изделия;
- снизить затраты на создание нового двигателя;
- вовремя завершать подготовку производства и запуск новой продукции;
- повысить загрузку оборудования;
- снизить производственный брак и повысить качество выпускаемой продукции;
- снизить уровень складских запасов.

Высокий уровень внедрения передовых информационных технологий позволяет создавать наиболее конкурентоспособные современные конструкции, с каждым новым изделием переходя на новый уровень экономической эффективности и экологического совершенства и надежности.

### **Библиографический список**

1. Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / Под общ. ред. А.Г. Братухина. Киев: Техника, 2001. 728 с.
2. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А. и др. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Изд-во МАИ, 2005. 540 с.
3. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. 640 с.: илл.

### **Сведения об авторах**

Елисеев Юрий Сергеевич, профессор, генеральный директор ОАО "Кузнецов" д.т.н.,  
e-mail:rassiec@mail.ru

Поклад Валерий Александрович, главный инженер ФГУП "НПЦ газотурбостроения  
"Салют", к.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru

Елисеев Дмитрий Николаевич, директор по информационным технологиям ФГУП "НПЦ  
газотурбостроения "Салют" к.т.н.,e-mail:rassiec@mail.ru