

УДК 621.45.01:004.942

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2015 В.С. Кузьмичев, Я.А. Остапюк, А.Ю. Ткаченко, Е.П. Филинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

В статье приведен обзор существующих в настоящее время автоматизированных систем концептуального проектирования и инженерного анализа (CAE-систем) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ). Приведено описание и сравнительный анализ функциональных возможностей и особенностей компьютерной реализации систем АСТРА, DVIgWT, EngineSim, GasTurb, GSP, Uni\_TTF. Указаны направления развития CAE – систем газотурбинных двигателей.

*Ключевые слова:* система, проектирование, математическая модель, компьютерная модель, функциональные возможности, двигатель газотурбинный.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для концептуального проектирования и инженерного анализа авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок наземного применения (ГТУ) широко применяются различные CAE-системы, которые можно разделить на две категории.

К первой категории относятся программные продукты, созданные на основе универсальных средств, такие как Dymola (основана на языке проектирования Modelica) [1, 2, 3], Simulink (интегрирован в среду MATLAB) [3, 4, 5, 6, 7], TRANSEO (основана на среде MATLAB) [8], PROOSIS (основан на системе EcosimPro) [9] и др., которые позволяют решать достаточно большой круг инженерных задач.

Ко второй категории относятся специализированные программные продукты, такие как DCOGEN [10], DVIgWT [11, 12], EngineSim [13], GasTurb [6, 7, 14, 15], Graphical Engine Cycle Analysis Tool (GECAT) [16], Gas turbine Simulation Program (GSP) [17], Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) [3, 18], TERA [19], Uni\_TTF [20], WebEngine [21], АСТРА [22, 23, 24] и другие.

Из второй категории стоит выделить программы, разработанные в конструкторских бюро

(КБ) двигателестроительных предприятий для использования в рамках задач этих КБ (Uni\_TTF и др.). Их математические модели, как правило, максимально возможно учитывают особенности создаваемых фирмой двигателей и накопленный методический и экспериментальный опыт.

Стоит отметить, что разработка универсального инструмента для решения комплексных задач концептуального проектирования ГТД с использованием многоуровневого и многодисциплинарного подхода является весьма сложной задачей [25].

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ CAE-СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрим специализированные CAE-системы концептуального проектирования и анализа ГТД, которые основаны на математическом моделировании.

Сравнение CAE-систем проводилось по двум направлениям:

- уровень используемых математических моделей и функциональные возможности;
- компьютерная реализация (удобство интерфейса, интеллектуализация и т.д.).

Результат анализа наиболее известных в настоящее время CAE-систем представлен в табл. 1.

Рассмотрим более подробно особенности рассматриваемых CAE-систем.

**CAE-система DVIgWT** (рис. 1) разработана в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ). Программа работает под операционными системами Microsoft Windows 95/98/2000/Me/XP, а также Windows NT.

Данная CAE-система обладает простым интуитивно понятным интерфейсом, поскольку ос-

*Кузьмичев Венедикт Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: kuzm@ssau.ru*

*Остапюк Ярослав Анатольевич, аспирант.*

*E-mail: oya92@mail.ru*

*Ткаченко Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: tau@ssau.ru*

*Филинов Евгений Павлович, аспирант.*

*E-mail: filinov. evg@gmail.com*

Таблица 1. Сравнительный анализ CAE-систем

Признак сравнения	CAE-системы					
	DVIGwT, УГАТУ	EngineSim v.1.8a, NASA Glenn Research Center	GasTurb v.12, J.Kurzke	GSP v.11, NLR	Uni_TTF v.5.22, ОКБ имени А.Люльки ОАО «УМПО»	АСТРА, СГАУ
1	2	3	4	5	6	7
Принцип построения схемы двигателя	Модульная декомпозиция	Набор готовых схем	Набор готовых схем	Модульная декомпозиция	Универсальная схема ТРДД	Модульная декомпозиция, набор готовых схем
Область применения	Авиационные ГТД, ГТУ, ПТУ, ПГУ, гибридные ГТД, ТНУ	Авиационные ГТД	Авиационные ГТД, ГТУ	Авиационные ГТД, ГТУ	Авиационные ГТД	Авиационные ГТД, ГТУ
Применяемые топлива	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_c$	Керосин, водород, произвольного состава	Керосин, дизельное, природный газ, водород, произвольного состава	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_cN_dAr_e$	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_c$	Произвольное топливо, описываемое обобщенной формулой $C_aH_bO_cS_dN_eNe_fAr_g$
Представление характеристик узлов	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	–	Типовые и произвольные характеристики и узла с возможностью переразмеривания	Типовые и произвольные характеристики и узла с возможностью переразмеривания	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Типовые и произвольные характеристики и узла с возможностью переразмеривания
Расчёт характеристик ГТД	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические, нагрузочные	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические	Дроссельные, высотно-скоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные, климатические, нагрузочные
Визуальное формирование проточной части, оценка массы и габаритных размеров	Нет (есть в отдельных версиях: RasCAD, DVIGwP)	Есть	Есть	Нет	Нет	Есть (подсистема АСТРА-ТК)
Оценка прочностных характеристик основных узлов	Нет (есть в повенцовой системе Компрессор)	Нет	Есть	Нет	Нет	Есть (подсистема АСТРА-ТК)
Оценка эмиссии вредных веществ	Нет (есть в отдельной версии)	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
Расчёт переходных режимов	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть

Таблица 1. Сравнительный анализ САЕ-систем (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
Имитация изменения зазоров и утечек тепла	Нет (есть в повенцовой системе Компрессор)	Нет	Есть	Есть имитация утечек тепла	Есть имитация утечек тепла	Есть
Учет инерции ротора	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть
Учет пневматической емкости	Есть	Нет	Нет	Есть	Есть	Есть
Учет впрыска воды (пара) в проточную часть двигателя	Есть	Нет	Есть	Есть, только в КС	Нет	Есть
Учёт термической диссоциации	Есть (в специальной версии)	–	Есть	Есть	–	Нет
Возможность использования разных характеристик для внутреннего и наружного контуров	Есть	–	Есть	Есть	Есть	Есть
Учёт влияния числа Re	Есть	–	Есть	Есть	Есть	Есть
Расчёт многоступенчатых охлаждаемых турбин с промежуточным охлаждением ступеней	Есть	Нет	Нет	Есть	Нет	Есть
Расчёт компрессора с отбором охлаждения из промежуточных ступеней	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть	Есть
Расчёт характеристик двигателя в составе силовой установки ЛА (согласование характеристик силовой установки и планера)	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть
Решение задач оптимизации параметров рабочего процесса	Есть	Нет	Есть	–	Нет (есть в связке с другими системами)	Есть
Моделирование полетного цикла ЛА	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть
Решение задач многокритериальной оптимизации программ регулирования двигателя	Нет	Нет	Нет	–	–	Есть
Решение задач имитационного моделирования работы двигателя в реальном масштабе времени (виртуальные испытания)	Нет	Нет	Есть	Нет	Есть	Есть

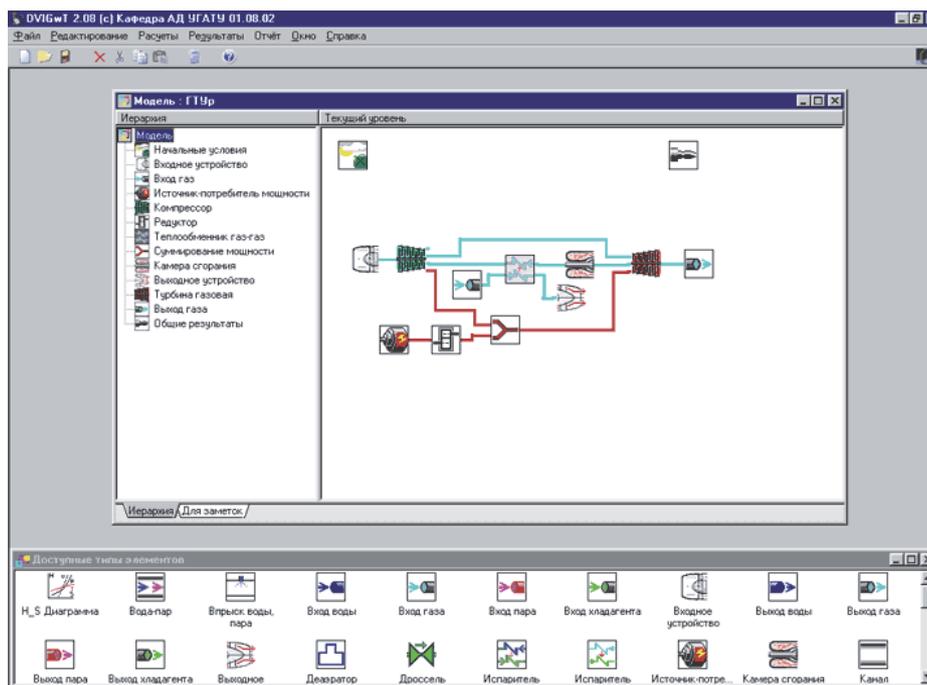


Рис. 1. Графический интерфейс DVIGwT

нована на компонентной технологии построения модели газотурбинного двигателя.

Выходные данные могут быть представлены в следующем виде:

- выдача результатов расчета в файл или базу данных в нескольких вариантах (полный, стандартный, определяемый пользователем), а также табличное представление результатов расчета с набором параметров, определяемых пользователем;

- графическое представление результатов расчета (рис. 2) в виде взаимозависимостей по параметрам, указываемым пользователем, с возможностью наложения зависимостей из других

массивов результатов. При этом аргументом и функцией могут быть не только результаты расчета узлов, но и дополнительно рассчитываемые величины, определяемые пользователем;

- графическое представление характеристик узлов.

Система DVIGwT используется как для учебного процесса (успешно применяется в УГАТУ), так и для сложных инженерных расчетов.

CAE-система *EngineSim v.1.8a* (рис. 3) разработана в NASA Glenn Research Center. Интерактивная программа выполнена в виде апплета, что делает ее кроссплатформенной, но требует наличие браузера и среды исполнения Java Virtual

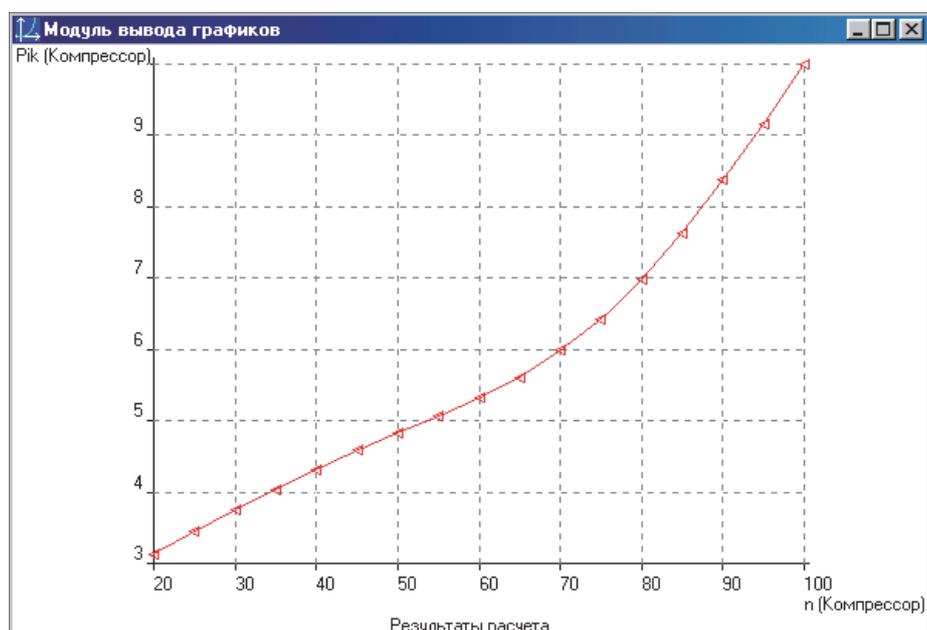


Рис. 2. Выходные данные в графическом виде

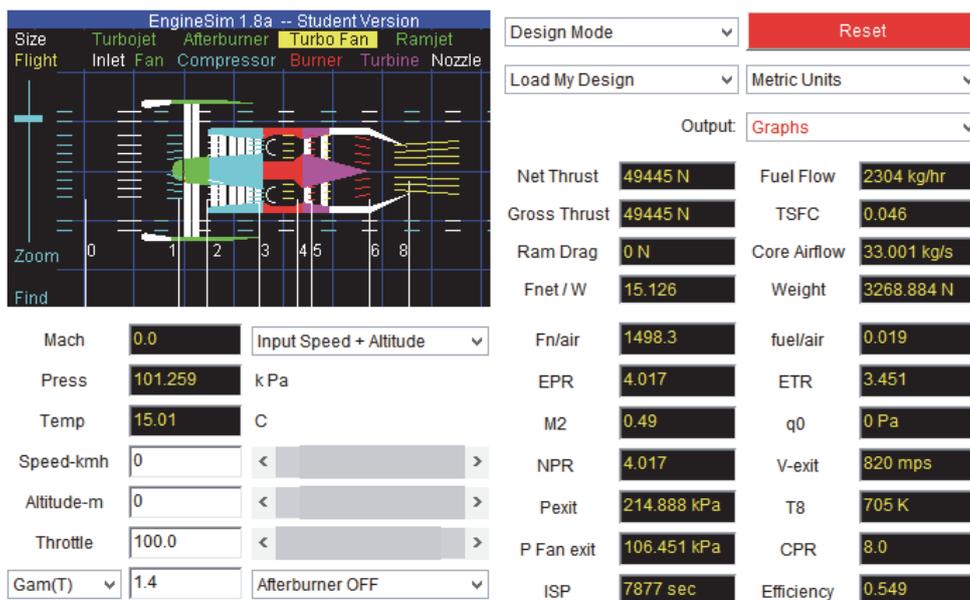


Рис. 3. Графический интерфейс EngineSim v.1.8a

Machine. Данную программу можно считать наиболее простой из числа рассматриваемых с точки зрения конечного пользователя, поскольку она имеет самый простой интуитивно понятный интерфейс.

Простота программы также обусловлена небольшим функционалом, имеется всего два режима работы:

- режим проектирования (Design Mode), в котором можно изменять условия полета, размерность двигателя, а также параметры основных узлов двигателя;

- режим тестирования в аэродинамической трубе (Tunnel Test Mode), в котором можно изменять только условия полета и дросселирование двигателя. Облик двигателя при этом остается неизменным.

Выходные данные могут отображаться в следующем виде:

- графический вывод данных, который позволяет отобразить графики изменения температу-

ры и давления по сечениям проточной части двигателя, а также графики в T-s, p-V координатах;

- вывод значений параметров двигателя и вывод значений параметров узлов;

Интересной особенностью данной программы является предупреждение о том, что температура в проточной части двигателя превысила температуру, которую может выдержать материал. Это ограничение отображается также на графике (Limit) (рис. 4).

В этой программе реализован ограниченный выбор схем двигателей: одновальные ТРД, ТРДФ, ТРДД и ПВРД. При этом имеется набор готовых схем двигателей: J85, F100, CF6 и ПВРД.

Таким образом, EngineSim может использоваться начинающими пользователями, например, студентами, для исследования влияния различных параметров двигателя на его тягу.

**CAE-система GasTurb v.12** (рис. 5) разработана Joachim Kurzke. Программа работает под операционными системами Microsoft Windows XP with SP2, Vista и Windows 7.

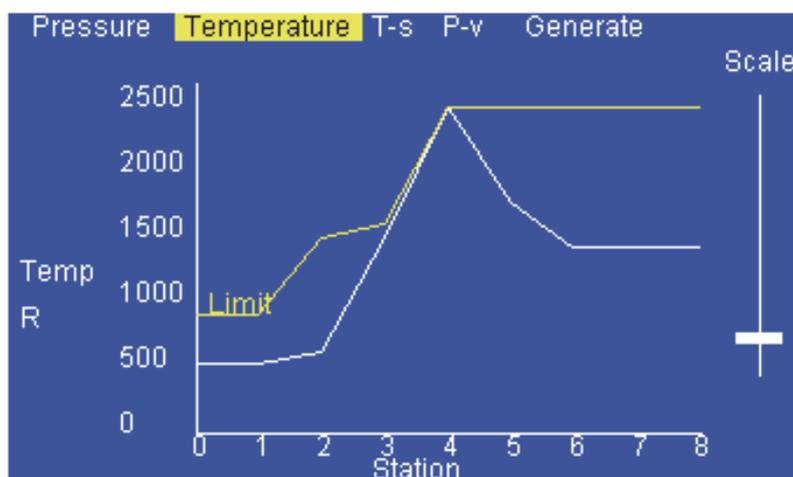


Рис. 4. График изменения полной температуры по сечениям

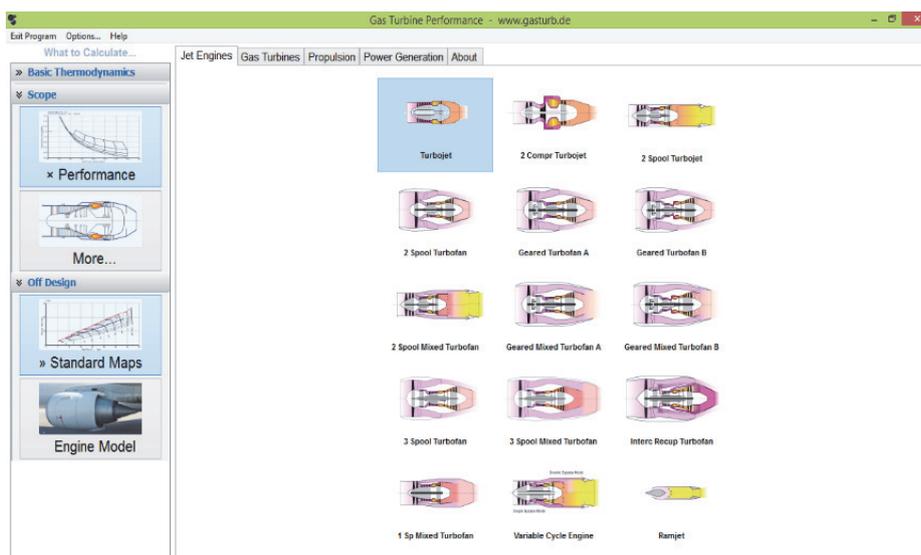


Рис. 5. Графический интерфейс GasTurb v.12

Данная САЕ-система обладает непростым, но в целом интуитивно понятным интерфейсом, поэтому больше подойдет опытным пользователям. Имеется возможность использовать набор моделей ГТД, включающий 15 наименований, и набор моделей ГТУ, включающий 12 наименований. Конечно, использование готовых моделей делает систему менее универсальной, но их разнообразия достаточно для большинства пользователей.

Как видно из таб. 1, главными преимуществами системы GasTurb являются визуальное формирование проточной части (рис. 6), оценка эмиссии, габаритно-массовых и прочностных характеристик основных узлов, а также моделирование полетного цикла летательного аппарата (ЛА) и имитационное моделирование работы двигателя. Эти возможности приближают GasTurb к универсальному инструменту для решения комплексных задач концептуального проектирования ГТД с использованием многоуровневого и междисциплинарного подхода.

Концептуальное проектирование ГТД и ГТУ связано в первую очередь с выбором параметров рабочего процесса, который осуществляется с помощью оптимизации, при этом критерий оптимизации должен отражать показатель качества системы более высокого уровня – ЛА. GasTurb позволяет решить такую задачу.

По мнению разработчиков, основными отличиями GasTurb от аналогичных программных систем являются пользовательский графический интерфейс и качество графических выходных данных (рис. 7) [26].

Данная система помимо типовых характеристик узлов позволяет использовать произвольные (пользовательские) характеристики посредством загрузки файла в текстовом формате, а также проводить их редактирование и переразмеривание в интерфейсе пользователя (рис. 8). Также стоит отметить возможность экспорта входных и выходных данных в MS Excel для последующей обработки.

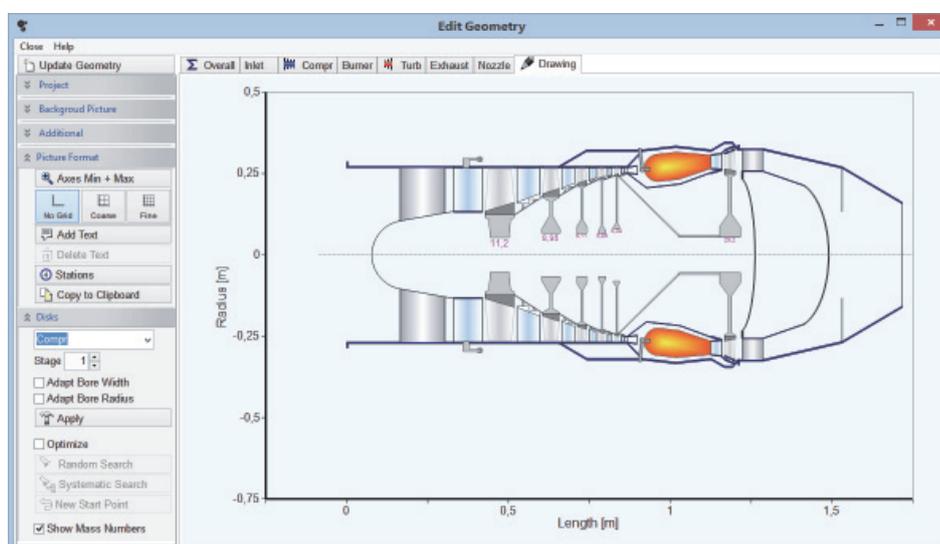


Рис. 6. Редактор геометрии GasTurb

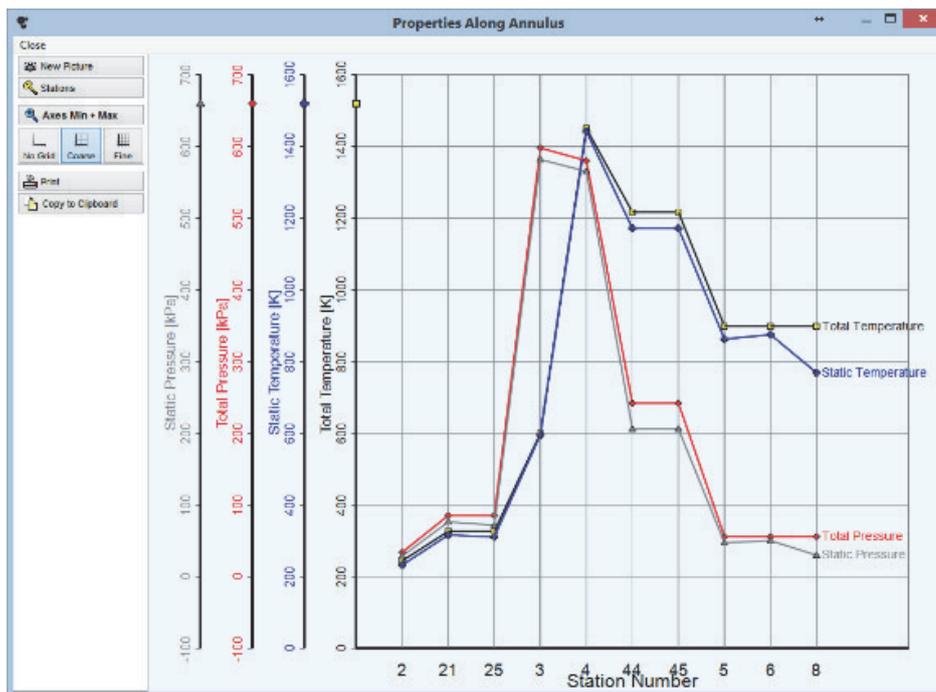


Рис. 7. Выходные данные в графическом видекомпрессора

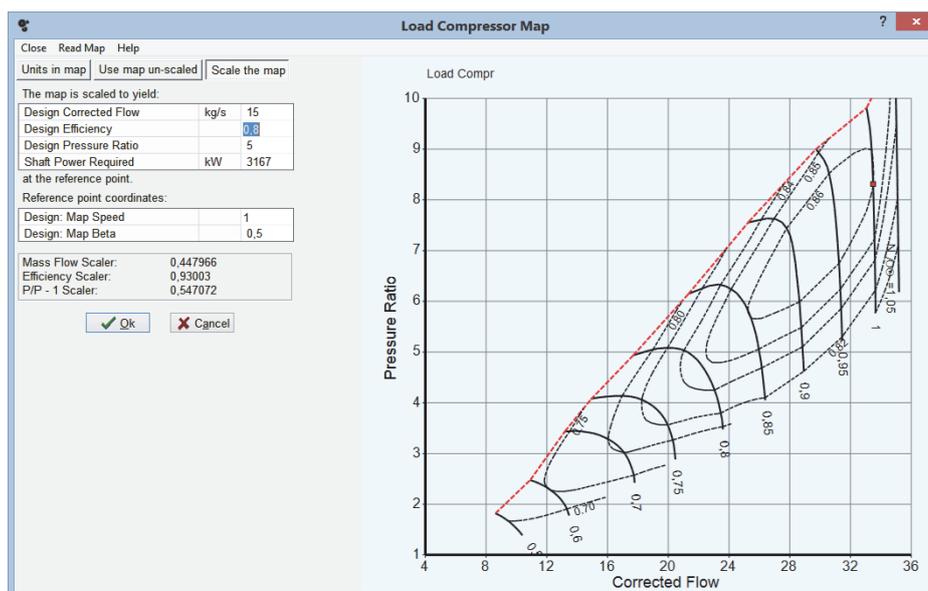


Рис. 8. Переразмеривание характеристики компрессора

Система GasTurb может использоваться как для учебного процесса, так и для сложных инженерных расчетов.

**CAE-система GSP v.11** (рис. 9) разработана National Aerospace Laboratory (NLR). Программа работает под операционными системами Microsoft Windows Vista, Windows 7 и Windows 8. Данная CAE-система обладает простым интуитивно понятным интерфейсом. Простота интерфейса обусловлена тем, что все модули разделены по категориям, что позволяет быстро в них ориентироваться. Каждый модуль содержит в себе все необходимые для него параметры и настройки, что значительно упрощает работу с данной системой. По мнению разработчиков, интерфейс GSP позволяет новым пользователям

легко выполнить “быстрый старт” задачи анализа без необходимости знать все о расширенных возможностях.

Интерфейс системы позволяет отобразить используемые характеристики узлов в графическом формате (рис. 10) и загрузить их в текстовом формате.

Графические выходные данные, как и в системе GasTurb, реализованы на хорошем уровне (рис. 11) – система позволяет выводить одновременно до 4 графиков.

Бесспорным достоинством CAE-системы GSP является оценка эмиссии вредных веществ тремя различными методами: с помощью интерполяции таблицы ИКАО, метод прямого прогнозирования и с помощью многореакторной модели.

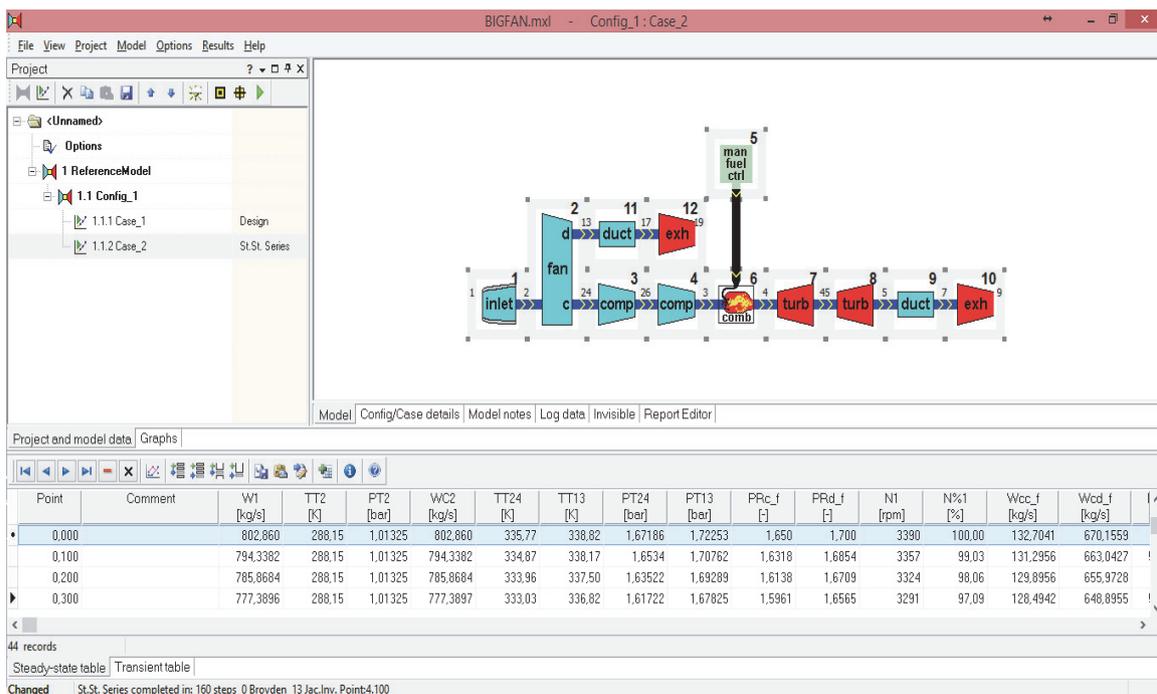


Рис. 9. Графический интерфейс GSP

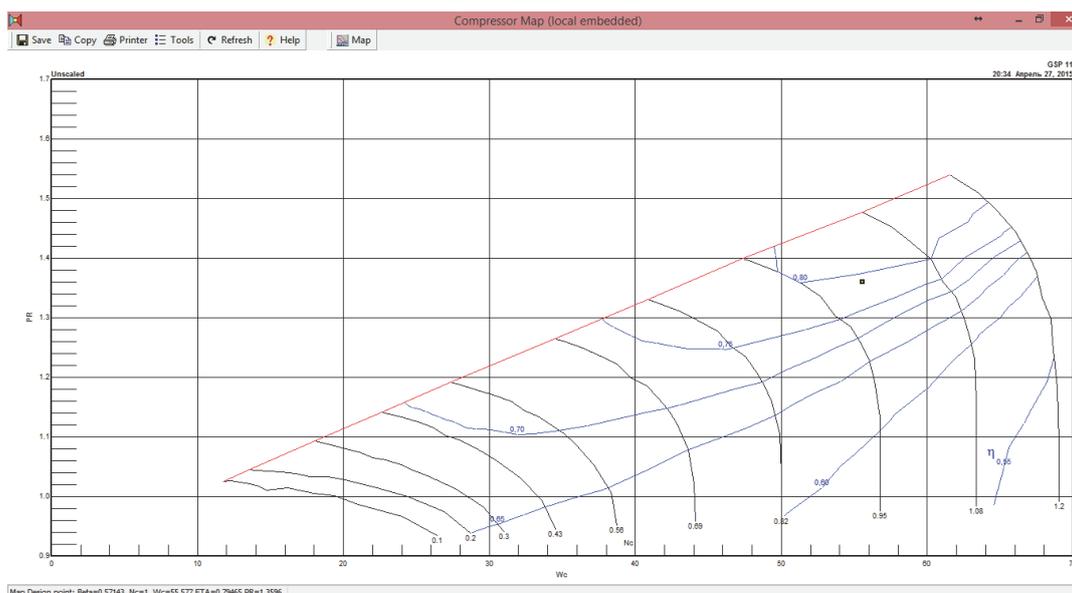


Рис. 10. Графическое отображение характеристики компрессора

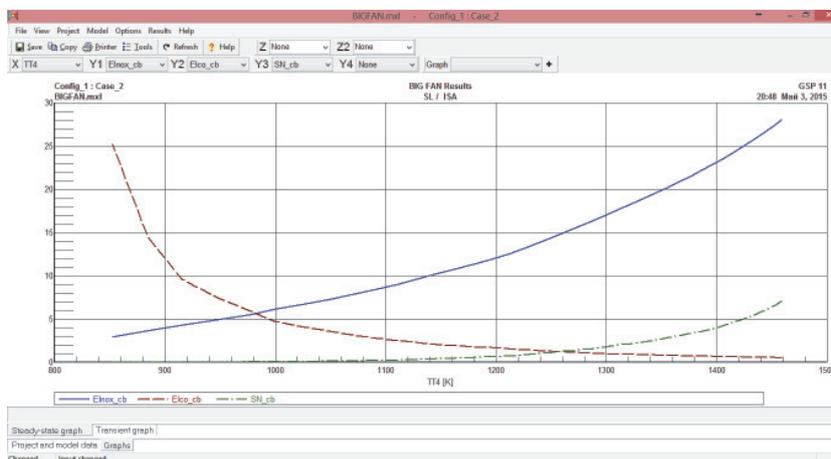


Рис. 11. Зависимость  $EI_{NOx}$ ,  $EI_{CO}$  и числа дымности от температуры газа перед турбиной

Многоуровневая реализация структуры модели позволяет включать в модель верхнего уровня модели с различными компоновками двигателя, каждая из которых может содержать различные задачи.

Система GSP может использоваться как начинающими пользователями для учебного процесса, так и опытными - для сложных инженерных расчетов.

**CAE-система Uni\_TTF v.5.22** разработана в ОКБ имени А.Льюльки ОАО «УМПО». Программа работает под операционными системами семейства Microsoft Windows.

Данная CAE-система обладает простым интуитивно понятным интерфейсом. Простота интерфейса, как и в случае с EngineSim, обусловлена ограниченным выбором схем двигателей, а именно использованием универсальной схемы ТРДД, и небольшим функционалом. Имеется возможность использовать только модели различных компоновок ТРДД, который является наиболее распространенной схемой ГТД. Система Uni\_TTF аналогично GasTurb и GSP помимо типовых характеристик узлов позволяет использовать произвольные (пользовательские) характеристики посредством загрузки файла в

текстовом формате, которые также отображаются в пользовательском интерфейсе (рис. 12).

Полезной опцией данной системы является отображение отборов воздуха как на нужды двигателя, так и на самолетные нужды в графическом виде (рис. 13). У начинающих пользователей может вызвать затруднение увязка двигателя, поскольку большинство действий выполняется вручную, для чего пользователю необходимо обладать теоретической базой. Система Uni\_TTF может использоваться как для учебного процесса, так и для инженерных расчетов ТРДД (используется в НТЦ им. А. Льюльки, НПО «Сатурн» и др.).

**CAE-система АСТРА** (рис. 14) разработана в Самарском государственном аэрокосмическом университете (национальном исследовательском университете) (СГАУ). Программа кроссплатформенная, что одновременно является ее преимуществом и недостатком – для ее работы необходима среда исполнения Java Virtual Machine.

Данная программа обладает достаточно простым интуитивно понятным интерфейсом. Начинающие пользователи могут использовать набор моделей стандартных схем двигателей,

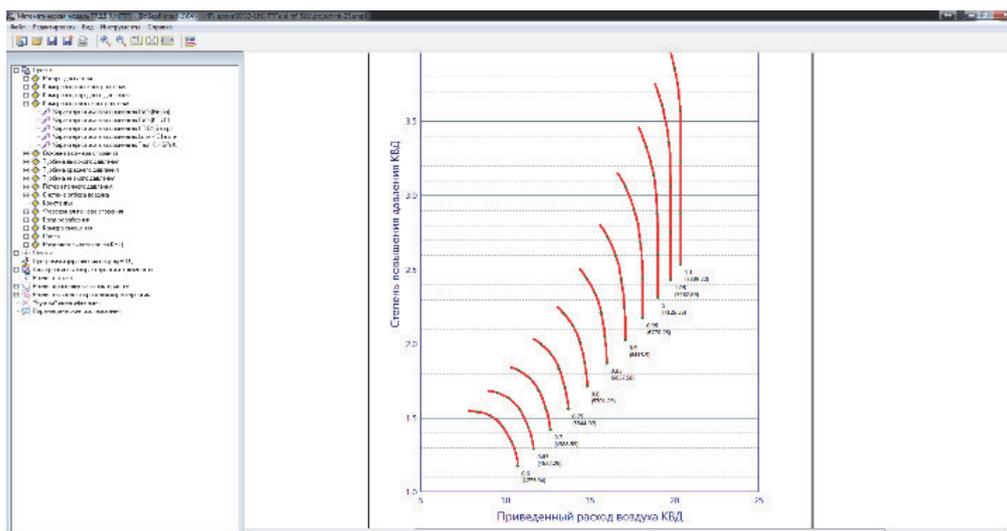


Рис. 12. Графическое отображение характеристики компрессора в интерфейсе Uni\_TTF

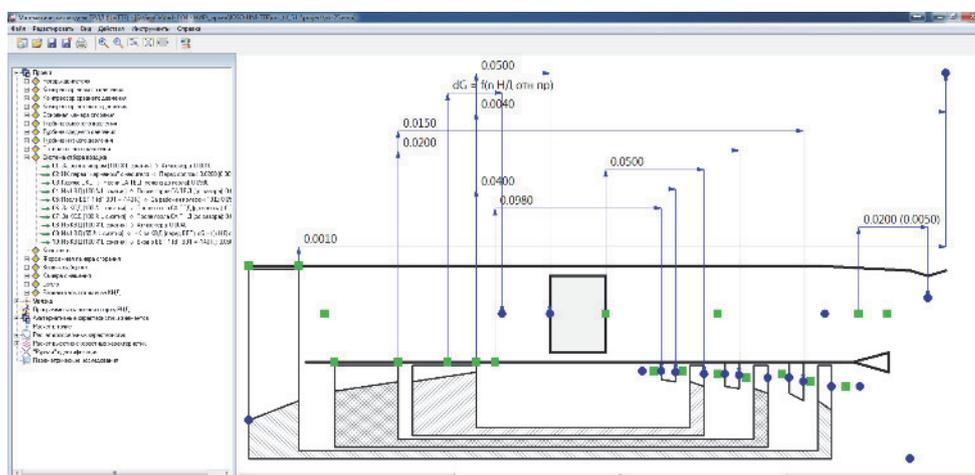


Рис. 13. Графическое отображение отборов воздуха

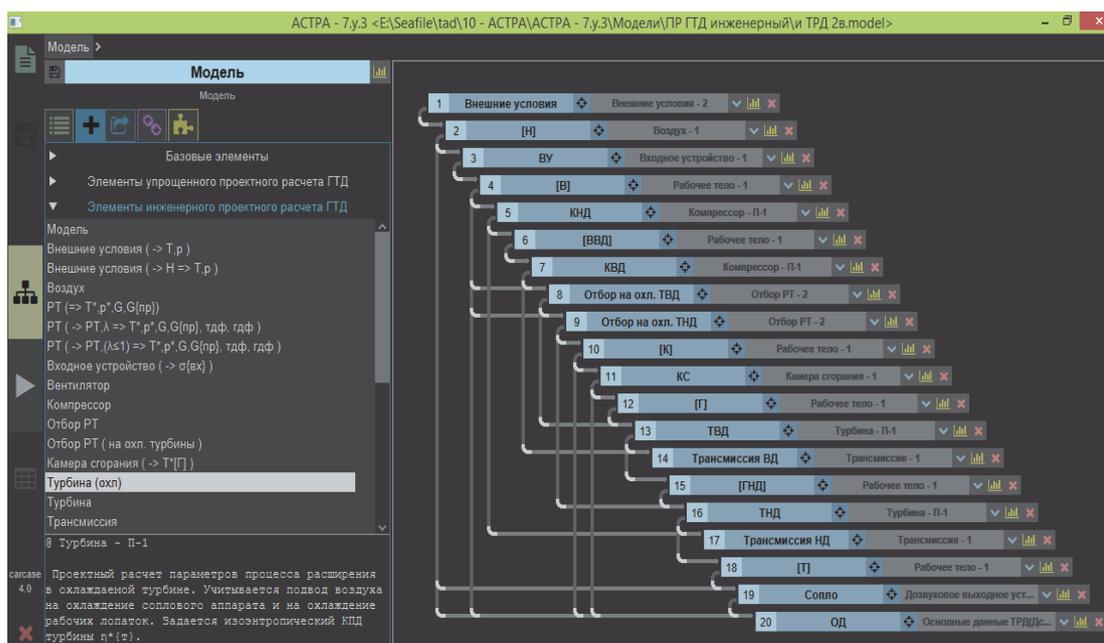


Рис. 14. Графический интерфейс АСТРА

включающий 15 наименований. Более опытные пользователи могут формировать сложные многоуровневые модели, используя как модели стандартных схем двигателей, так и модели отдельных узлов и элементов (модули). Как и в системе GSP, все модули для удобства разделены по категориям. В случае отсутствия необходимых моделей, их можно сформировать посредством базовых математических элементов. Для удобства любую модель, элемент или параметр можно переименовать. Для исключения ошибок при вводе данных система не позволяет задавать некорректные значения параметров.

Как видно из таб. 1, система АСТРА, как и GasTurb, позволяет формировать проточную часть, а также оценивать габаритно-массовые и прочностные характеристики основных узлов.

САЕ-система АСТРА позволяет моделировать полетный цикл ЛА. При этом на основе определения показателей эффективности по результатам моделирования основных этапов полетного цикла ЛА с проектируемым двигателем может быть проведена многокритериальная оптимизация параметров рабочего процесса двигателя [27, 28].

При достигнутом высоком уровне параметров рабочего процесса газотурбинных двигателей актуальной является задача дальнейшего повышения эффективности эксплуатации летательных аппаратов путем оптимизации управления ГТД по критериям эффективности ЛА, рассчитываемых с учетом моделирования полета. САЕ-система АСТРА позволяет решить данную задачу [29].

Совокупность взаимосвязанных элементов и модулей операций представляет собой модель задачи, решаемой с использованием модели исследуемого двигателя. Модель задачи, в свою очередь, может комбинироваться с моделями других задач, тем самым, возможно создавать

модели комплексных задач с автоматической передачей данных между подзадачами. Данная возможность несомненно является достоинством САЕ-системы АСТРА. Например, обобщенная постановка задачи выбора параметров рабочего процесса семейства ГТД на базе унифицированного газогенератора (ГГ) формулируется следующим образом: необходимо определить рациональные значения параметров рабочего процесса унифицированного ГГ для семейства ГТД и параметры рабочего процесса каждого из двигателей семейства.

Искомые параметры должны обеспечивать максимально возможную эффективность проектируемых двигателей по совокупности критериев летательного аппарата, при ограничениях, гарантирующих работоспособность ГТД. При такой постановке решаются две вложенные задачи оптимизации: выбор рациональных параметров ГГ для всего семейства двигателей и оптимизация параметров каждого двигателя при заданном унифицированном ГГ [30].

САЕ-система АСТРА позволяет решать задачи имитационного моделирования (рис. 15), которые становятся все более востребованными [31]. Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования, в котором испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель (виртуальный прототип), позволяющая, в том числе, контролировать и изменять параметры в процессе вычисления в реальном масштабе времени (рис. 16).

Необходимо отметить, что в системе АСТРА пользователю при формировании модели ГТД не нужно в явном виде описывать систему невязок и указывать варьируемые переменные. Достаточно указать способ определения параметров элемен-



Рис. 15. Виртуальная лаборатория испытаний микроТГД в АСТРА

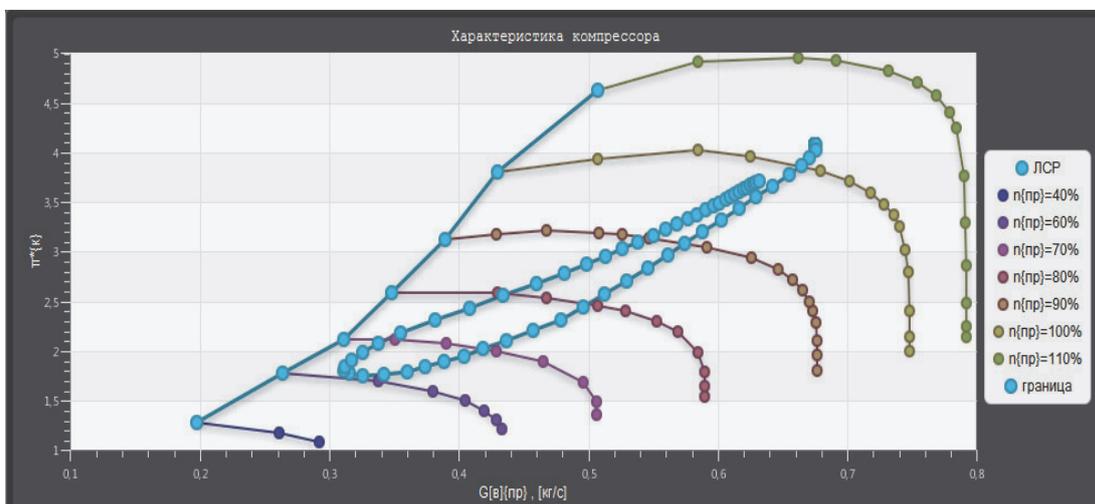


Рис. 16. Характеристика компрессора с положениями рабочих точек в различные моменты времени

тов (рассчитывается, задается пользователем, связан с другим параметром). Если указывается, что входной параметр определяется путем расчета, он автоматически становится варьируемым параметром. Если выходному параметру задано конкретное числовое значение или он связан с другим параметром – автоматически формируется невязка. Для проведения большого числа расчетов, либо для упрощения сложных таблицей есть возможность распараллеливания расчетов путем запуска неограниченного количества экземпляров программы, которая ограничивается лишь конфигурацией компьютера.

Система АСТРА используется как для учебного процесса (успешно применяется в СГАУ), так и для сложных инженерных расчетов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все рассмотренные САЕ-системы имеют примерно одинаковые функциональные возмож-

ности и применяются различными категориями пользователей для решения широкого круга задач, как при концептуальном проектировании ТГД, так и в процессе подготовки специалистов.

Для расчета и анализа энергетических установок со сложными циклами (паротурбинных, парогазовых установок, тепловых насосных установок и т.д.) наиболее приспособлена система DVIGwT.

Для предварительной оценки параметров ТГД классических схем с минимальными временными затратами целесообразно использовать систему EngineSim.

Система GasTurb более других подходит при решении междисциплинарных задач, в которых необходимы оценки массы, габаритных размеров с последующим визуальным формированием проточной части и оценки эмиссионных характеристик ТГД и ГТУ.

Для решения задач имитационного моделирования могут быть использованы GasTurb, Uni\_TTF и АСТРА.

При обязательном учете эмиссии вредных веществ целесообразно использовать систему GSP, позволяющую оценивать эмиссионные характеристики несколькими методами.

Задачи многокритериальной нелинейной оптимизации параметров и оптимизации программ регулирования двигателя с моделированием полета самолета позволяет решить система АСТРА.

Общим недостатком представленных систем является отсутствие возможности адекватной оценки показателей шума двигателей на стадии концептуального проектирования. Разработка математической модели оценки шума двигателей применительно к этой стадии проектирования является актуальной и важной задачей, поскольку ограничения по шуму существенно влияют на выбор оптимальных параметров рабочего процесса ГТД. В настоящее время к разрабатываемым двигателям предъявляются всё более жёсткие требования по экологическим характеристикам. Использование математических моделей шума и эмиссии при оптимизации параметров двигателей позволят получать более адекватные результаты.

Важным направлением совершенствования моделей для концептуального проектирования ГТД является разработка многоуровневых одно-двух-трех мерных взаимосвязанных моделей для их применения на последовательно развивающихся стадиях оптимизации проекта.

Другим актуальным направлением совершенствования САЕ-систем ГТД является создание гибридных экспертных систем проектирования и анализа, которые будут включать в себя не только математические модели, но и логико-лингвистические модели представления накопленных знаний. Причем эти модели должны быть ориентированы на разработку перспективных двигателей следующих поколений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen, J., Masiulaniec, K.C., Afjeh, A.A. Turbojet engine simulation using dymola // Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/SAE/ASEE 42nd Joint Propulsion Conference. 2006. Vol. 6. P. 4760-4774.
2. Samson, E. T. Gas Turbine Plant Modeling for Dynamic Simulation: Master of Science Thesis. 29.03.12 / Samson Endale Turie. – Stockholm., 2011. 68 P.
3. Gomes, K.J., Masiulaniec, K.C., Afjeh, A.A. Performance, usage, and turbofan transient simulation comparisons between three commercial simulation tools // Journal of Aircraft. 2009. Vol. 46. I. 2. P. 699-704.
4. Kim, S., Pilidis, P., Yin, J. Gas Turbine Dynamic Simulation Using Simulink // SAE Technical Paper 2000-01-3647. 2000.
5. Tsoutsanis, E., Meskin, N., Benammar, M., Khorasani, K. Dynamic Performance Simulation of an Aeroderivative Gas Turbine Using the Matlab Simulink Environment // ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). 2013.
6. Kong, C., Roh, H., Lim, K. Steady-state and transient simulation of turboprop engine using SIMULINK model // ASME Turbo Expo. 2003. Vol. 3. P. 151-161.
7. Kong, C., Roh, H. Steady-state Performance Simulation of PT6A-62 Turboprop Engine Using SIMULINK // International Journal of Turbo and Jet Engines. 2003. Vol. 20. P. 183-194.
8. Traverso, A. TRANSEO code for the dynamic performance simulation of micro gas turbine cycles // ASME Turbo Expo. 2005. Vol. 5. P. 45-54.
9. Pilet, J., Lecordix, J.-L., Garcia-Rosa, N., Barènes, R., Lavergne, G. Towards a fully coupled component zooming approach in engine performance simulation // ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. 2011. Vol. 1. P. 287-299.
10. DCOGEN. URL: <http://www.gecos.polimi.it/software/dcogen.php> (дата обращения 10.09.2015).
11. Горюнов, И.М. Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT // Вестник Уфимского гос. авиац. техн. ун-та. – 2006. – Т. 7. – №1. – С. 61-70.
12. Горюнов, И.М., Курунов, Ю.С. Система моделирования тепловых схем энергетических установок // Докл. междунар. науч.-техн. конф., посв. памяти ген. констр. аэрокосмич. тех-ки Н.Д. Кузнецова. – Самара: СГАУ, 2001. – Ч. 3. – С. 27-31.
13. EngineSim Version 1.8a [Электронный ресурс] – URL: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/ngnsim.html> (дата обращения 11.09.2015).
14. Gao, J.-H., Huang, Y.-Y. Modeling and simulation of an aero turbojet engine with GasTurb // 2011 International Conference on Intelligence Science and Information Engineering. 2011. P. 295-298.
15. Brandstein, A., Nakash, Y., Efrati, Y., Perel, D. F100PW-229I thermodynamic model simulation with “gasTurb 9” // 45th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences. 2005.
16. DePlachett, C.P., Frederick, R.A., Jr., Application of the GECAT software for instruction in gas turbine propulsion analysis // 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2000.
17. Sankar, B., Subramanian, T., Shah, B., Vanam, V., Jana, S., Ramamurthy, S., Satpathy, R., Sahoo, B., Yadav, S. Aero-thermodynamic modelling and gas path simulation for a twin spool turbo jet engine // ASME Gas Turbine India Conference. 2013.
18. What Is Numerical Propulsion System Simulation (NPSS)? [Электронный ресурс] – URL: <http://www.swri.org/npss/pdfs/what-is-npss.pdf> (дата обращения 10.09.2015).
19. Ogaji, S.O.T., Pilidis, P., Hales, R. TERA - A Tool for Aero-engine Modelling and Management // 2nd World Congress on Engineering Asset Management and 4th International Conference on Condition Monitoring. 2007.
20. Лещенко, И.А., Марчуков, Е.Ю., Вовк, М.Ю., Инюкин, А.А. Опыт разработки и эксплуатации программного комплекса UNI\_MM для выполнения термодинамических расчетов турбореактивных двухконтурных двигателей // Сборник докладов научно-технической конференции «Климовские чтения-2015: перспективные направления развития авиадвигателестроения». – СПб: Скиф-принт, 2015. – С. 33-44.
21. Apostolidis, A., Sampath, S., Laskaridis, P., Singh, R.

- Webengine - A WEB-based gas turbine performance simulation tool // ASME Turbo Expo. 2013. Vol. 4.
22. Кузьмичев, В.С., Ткаченко, А.Ю., Рыбаков, В.Н., Крупенич, И.Н., Кулагин, В.В. Методы и средства концептуального проектирования авиационных ГТД в САЕ-системе «АСТРА» // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. – 2012. – №5(36). – Ч. 1. – С. 169-173.
23. Ткаченко, А.Ю., Рыбаков, В.Н. Моделирование неустановившихся режимов работы газотурбинного двигателя в САЕ-системе «АСТРА» // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 25-27 июня 2014г. – Самара: СГАУ, 2014. – Ч. 1. – С. 240.
24. Кузьмичев, В.С., Кулагин, В.В., Крупенич, И.Н., Ткаченко, А.Ю., Рыбаков, В.Н. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ системе «АСТРА» [Электронный ресурс] / В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, И.Н. Крупенич, А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – №67. – С. 15. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41518> (дата обращения 11.09.2015).
25. Carlos, S., Madhavan, K., Gupta, G., Keese, D., Maheshwaraa, U., Seepersad, C.C. Development and application of a flexibility-based method for multi-scale design // Collection of Technical Papers - 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2006. Vol. 3. P. 1855-1870.
26. Gas turbine performance... [www.gasturb.de](http://www.gasturb.de) (дата обращения 10.09.2015).
27. Кузьмичев, В.С., Ткаченко, А.Ю., Рыбаков, В.Н. Моделирование полета летательного аппарата в задачах оптимизации параметров рабочего процесса газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №1(2). – С. 491-494.
28. Остапюк, Я.А., Филинов, Е.П. Оптимизация параметров рабочего процесса ГТД на основе моделирования полетного цикла самолета // Сборник материалов науч.-техн. конф., посв. 100-летию со дня рождения глав. констр. П. А. Колесова. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – Т. 1. – С. 131-135.
29. Ткаченко, А.Ю., Кузьмичев, В.С. Использование метода динамического программирования для решения задач оптимизации управления ГТД по критериям эффективности летательного аппарата // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. – 2012. – №5(36). – Ч. 1. – С. 203-206.
30. Рыбаков, В.Н., Кузьмичев, В.С., Ткаченко, А.Ю. Методы оптимизации и выбора параметров рабочего процесса унифицированного газогенератора и семейства газотурбинных двигателей, создаваемых на его базе // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 25-27 июня 2014г. – Самара: СГАУ, 2014. – Ч. 1. – С. 238-239.
31. Ткаченко, А.Ю., Рыбаков, В.Н., Остапюк, Я.А., Филинов, Е.П. Имитационное моделирование рабочих процессов газотурбинных двигателей // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 25-27 июня 2014г. – Самара: СГАУ, 2014. – Ч. 1. – С. 232-234.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AUTOMATED DESIGN SYSTEMS OF THE GAS TURBINE ENGINES

© 2015 V.S. Kuzmichev, Ya.A. Ostapuk, A.Yu. Tkachenko, E.P. Filinov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev  
(National Research University)

The article provides an overview of the currently existing computer-aided systems of conceptual design and engineering analysis (CAE-systems) of aircraft gas turbine engines and power plants. Such systems as ASTRA, DVIGwT, EngineSim, GasTurb, GSP, Uni\_TTF were examined in detail and compared by different aspects: functionality and the level of mathematical models implemented, usability and automation level. Potential ways of development of the CAE-systems are described.

**Keywords:** system, design, mathematical model, computer model, functionality, gas turbine engine

---

Venedikt Kuzmichev, Doctor of Technics,  
Professor at Aircraft Engine Theory Department.

E-mail: [kuzm@ssau.ru](mailto:kuzm@ssau.ru)

Yaroslav Ostapuk, Postgraduate Student.

E-mail: [oya92@mail.ru](mailto:oya92@mail.ru)

Andrey Tkachenko, PhD in technical science,  
Associate Professor at Aircraft Engine Theory Department.

E-mail: [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru)

Evgeny Filinov, Postgraduate Student.

E-mail: [filinov.evg@gmail.com](mailto:filinov.evg@gmail.com)