

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПА ГТД В САЕ-СИСТЕМЕ «АСТРА» НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2012 А. Ю. Ткаченко, И. Н. Крупенич

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

В статье описана система автоматизированного расчёта и анализа «АСТРА». Приведены её функциональные возможности и технология формирования математических моделей газотурбинных двигателей для решения различных задач концептуального проектирования.

Система автоматизированная, расчет термогазодинамический, анализ, двигатель газотурбинный.

Введение

Высокая эффективность эксплуатации летательного аппарата закладывается при проектировании его силовой установки. Проектирование нового двигателя начинается с выбора параметров рабочего процесса: температуры газа перед турбиной; суммарной степени повышения давления в компрессоре; степени двухконтурности двигателя; степени повышения давления в вентиляторе (в случае ТРДД). Выбору этих параметров предшествует определение их оптимальных значений. С позиций системного подхода в качестве критериев оптимизации не могут быть приняты критерии эффективности двигателя, такие как общий КПД, удельный расход топлива или удельная масса, поскольку двигатель является составной частью системы более высокого иерархического уровня (самолёта) и оценить оптимальность его параметров можно только по критериям эффективности системы этого уровня, т.е. по самолётным критериям.

Задача оптимизации и выбора наиболее рациональных параметров рабочего процесса двигателя с учётом назначения и характеристик летательного аппарата является одной из важнейших и сложных. Без использования виртуальной модели рабочего процесса ГТД решение указанной задачи представляется практически невозможным. Такая модель сформирована на основе разработанной на кафедре теории двигателей летательных аппаратов САЕ-системы «АСТРА» [1].

Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей и энергетиче-

ских установок представляет собой интегрированную среду для совместного решения задач начального этапа проектирования ГТД любых типов и схем.

Назначение и концепция построения автоматизированной системы «АСТРА»

Формирование виртуальной модели исследуемого двигателя и решаемой задачи проектирования в автоматизированной системе «АСТРА» осуществляется по универсальным принципам. В соответствии с теорией системного анализа модель представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов. Элементы могут описывать процессы в основных узлах двигателя и условия внешней среды, выполнять вспомогательные функции, например, расчёт основных данных двигателя. Каждый из элементов содержит перечень параметров, а также ссылку на функцию, которая реализует алгоритм расчёта значений выходных параметров в зависимости от значений входных параметров. Связи между элементами позволяют использовать значения параметров, рассчитанных в одном из элементов, в качестве входных данных для расчёта другого элемента.

В свою очередь, создание элементов и добавление их в модель осуществляется с помощью библиотеки функциональных модулей. Модули являются прототипами для однотипных элементов, и именно в них заложена информация о перечне параметров элемента, а также в виде функции реализуется алгоритм расчёта.

Для построения виртуальной модели ГТД автоматизированная система «АСТРА» содержит модули, моделирующие внешние

условия; входное устройство; компрессор; вентилятор; камеру сгорания; форсажную камеру; газовую турбину; дозвуковое выходное устройство; сверхзвуковое сопло; переходный канал; камеру смешения; отборы; винт; сумматор мощности; теплообменник; паровую турбину; парогенератор; водяной насос; водяной конденсатор.

Для каждого из основных узлов ГТД в зависимости от специфики задач термодинамического проектирования могут использоваться различные варианты модулей. Например, вариант для использования в моделях проектного расчёта и вариант для использования в моделях выполненного двигателя. Кроме того, модули могут иметь варианты в зависимости от типа элемента ГТД, например, варианты для неохлаждаемой и охлаждаемой турбины. Имеются модули, которые позволяют моделировать вспомогательные элементы либо рассчитывать параметры двигателя в целом. Таким образом, в системе «АСТРА» можно сформировать виртуальную модель различных существующих и перспективных ГТД.

В реализации алгоритмов расчёта основных узлов, заложенных в соответствующих модулях, широко используют вспомогательные процедуры для расчёта газодинамических и термодинамических функций, элементарных термодинамических процессов, параметров газового потока в проточной части с использованием математических моделей рабочего тела и топлива.

Математическая модель рабочего тела описывает зависимость теплофизических свойств от температуры и состава газа. При этом состав газа характеризуется массовым соотношением основных компонентов: азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара и аргона. Аналогичным образом состав топлива задаётся относительным массовым содержанием атомов углерода, водорода и кислорода в его химическом составе.

Модель двигателя, составленная из элементов, позволяет выполнять только прямой последовательный расчёт, поскольку с математической точки зрения представляет собой набор формул. Для настройки модели двигателя на решение конкретных задач проектирования используются специальные модули – модули операций.

Модуль «Согласование» предназначен для организации решения системы нелинейных уравнений в случае, когда не все входные параметры элементов изначально известны или заданы, а на выходные параметры, соответственно, наложены ограничения в виде равенства конкретным числовым значениям или значениям других параметров. Решение системы уравнений осуществляется с помощью модифицированного метода Ньютона. Необходимо подчеркнуть, что преимущество системы «АСТРА» заключается в том, что пользователю при формировании модели ГТД не нужно в явном виде описывать систему невязок и указывать варьируемые переменные. Достаточно указать способ определения параметров элементов (рассчитывается, задаётся пользователем, связан с другим параметром). Если указывается, что входной параметр определяется путём расчёта, он автоматически становится варьируемым параметром. Если выходному параметру задано конкретное числовое значение или он связан с другим параметром – автоматически формируется невязка.

Модуль «Оптимизация» позволяет находить оптимальное сочетание проектных переменных (оптимизируемых параметров) из условия минимума или максимума параметра, выбранного в качестве целевой функции. Поиск решения осуществляется методом Нелдера-Мида (деформируемого многогранника). Для выполнения условной оптимизации на все числовые параметры модели могут быть наложены ограничения.

Модуль «Табуляция» реализует исследование модели объекта путём выполнения серии расчётов при различных значениях исходных данных. В этом случае для выбранных параметров указывается, что они являются табулируемыми и для них задается таблица значений.

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.

Все операции по формированию виртуальной модели двигателя и решаемой задачи (добавление элементов и операций, задание связей между параметрами элементов, редактирование значений исходных данных и т.д.) осуществляются в интерактивном режиме с помощью встроенных средств, реализованных в виде библиотеки «CARCAS».

Функциональные возможности автоматизированной системы «АСТРА»

Автоматизированная система «АСТРА» обладает следующими возможностями: формирование моделей газотурбинных двигателей и энергетических установок произвольных схем, в том числе со сложными и комбинированными циклами; использование характеристик узлов; расчёт двигателей с одновременным подводом различных топлив; выполнение проектного расчёта; расчёт эксплуатационных характеристик оптимизации проектных параметров двигателя, в том числе по критериям оценки эффективности системы летательный аппарат-двигатель; оптимизация эксплуатационных характеристик; моделирование полётного цикла и др.

Таким образом, система «АСТРА» является комплексной, универсальной автоматизированной системой, охватывающей весь цикл термогазодинамического проектирования газотурбинного двигателя, а также его термогазодинамической доводки.

Технология формирования виртуальных моделей рабочего процесса ГТД различных типов и схем.

Процесс формирования виртуальной модели рабочего процесса ГТД в автоматизированной системе термогазодинамического расчёта и анализа «АСТРА» включает в себя несколько этапов.

1. Формулировка задачи для формирования модели двигателя.

В зависимости от постановки задачи формируется перечень исходных данных, а также принимается решение об использовании в модели соответствующих типов элементов.

Для удобства в системе «АСТРА» элементы разбиты на четыре основные группы (рис. 1): элементы проектного расчёта при постоянной теплоёмкости (упрощённый проектный расчёт); элементы проектного расчёта (инженерный проектный расчёт при переменной теплоёмкости рабочего тела); элементы «завязки» выполненного двигателя (проектный расчёт с образмериванием характеристик узлов, заданных в относительном виде, и расчётом площадей характерных сечений); элементы расчёта характеристик.

2. Запуск программного комплекса.

В папке программного комплекса запускается файл *astra.jar*. Исполнение программы осуществляется в виртуальной машине Java, поэтому необходимо наличие установленной на компьютере среды исполнения Java (JRE).

В операционной системе Windows запуск программного комплекса осуществляется так же, как и запуск обычного исполняемого файла. В операционной системе Linux запуск осуществляется из окна терминала командой «*java -jar astra.jar*».

После запуска программного комплекса появляется начальное окно, внешний вид которого представлен на рис. 2.

На левой панели отображается перечень доступных готовых моделей ГТД различных типов и схем, сформированных для решения типовых задач.

На верхней панели находятся кнопки создания новой модели и загрузки ранее сформированной модели из файла.

3. Создание новой модели.

При нажатии кнопки «Создать новую модель» открывается окно редактирования модели (рис. 3).

На верхней панели находятся кнопки для сохранения информации о текущей модели в файл, а также кнопки, позволяющие переключать режимы программы: формирование модели, запуск расчёта и просмотр результатов.

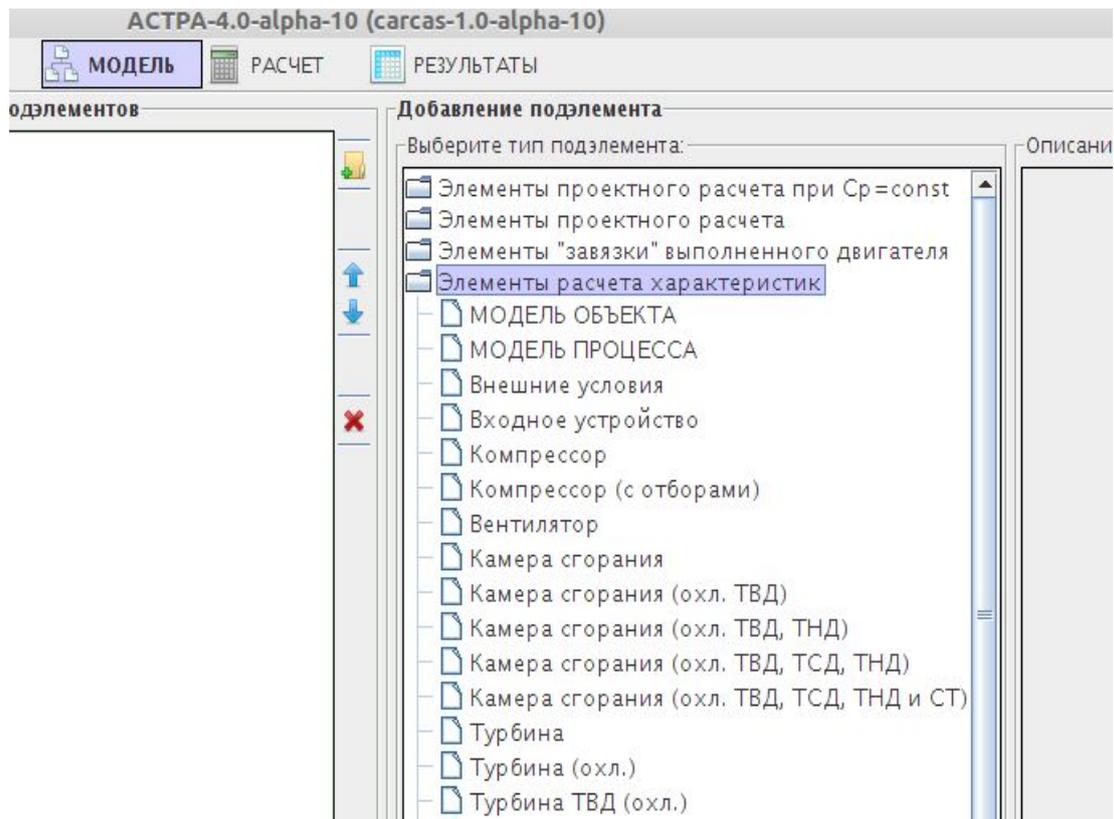


Рис.1. Группы элементов для формирования модели ГТД



Рис.2. Вид начального окна программного комплекса

На левой панели отображается дерево структуры модели. При выборе того или иного пункта структуры на правой панели отображается окно его редактирования.

Например, при выборе пункта «Элементы» отображается панель добавления/удаления элементов в модель (рис. 4).

4. Добавление элементов в модель.

В панели добавления элементов модели выбирается тип элемента, указывается его

название и нажимается кнопка «+». Новый элемент отображается в дереве модели и в списке элементов, где можно изменить порядок расположения элементов, удалить выбранный элемент или загрузить отдельный элемент из файла.

Таким образом формируется элементный состав будущей модели двигателя (рис. 5).

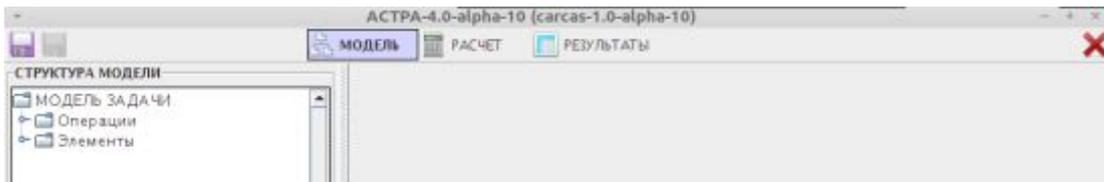


Рис.3. Вид окна программы с новой моделью

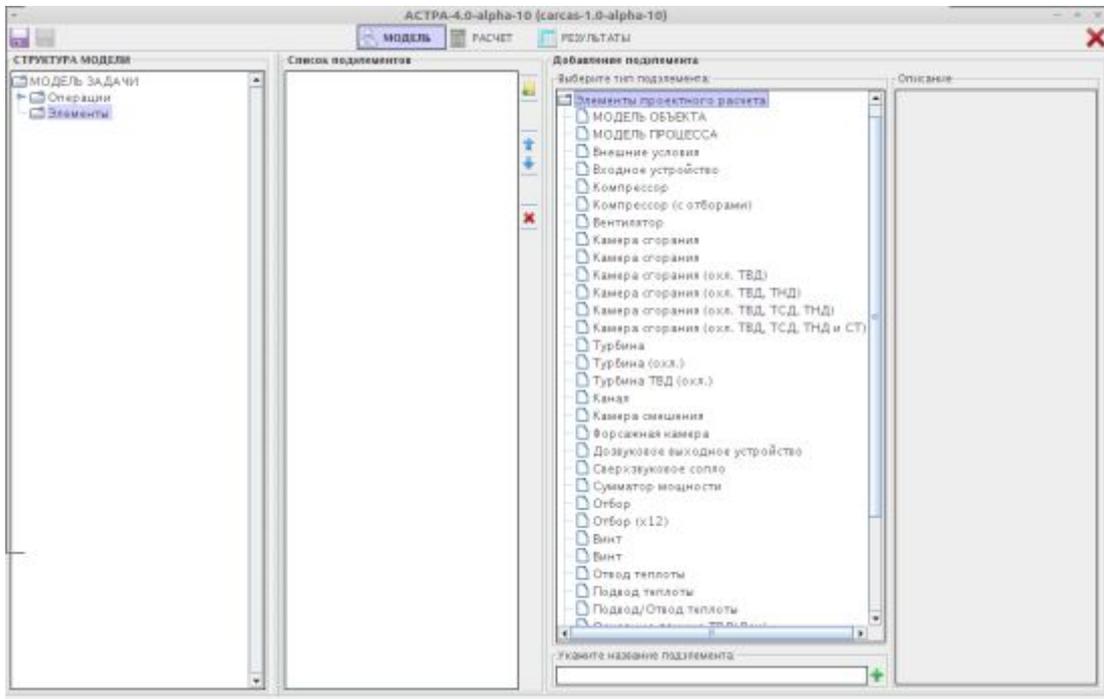


Рис.4. Перечень типов элементов

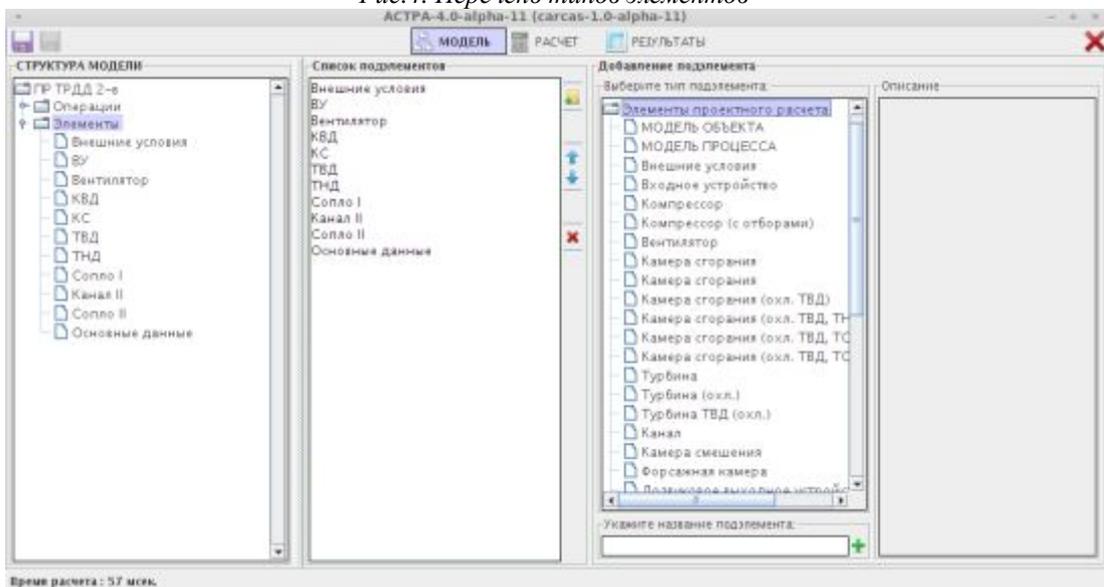


Рис.5. Формирование списка элементов модели

5. Формирование связей элементов.

При выборе элемента в дереве модели на правой панели отображается перечень всех его параметров. У каждого параметра

можно отредактировать название, отметить – будет ли он выводиться в таблице результатов, указать способ, каким образом будет определяться его значение, а также в случае,

если значение параметра является исходным данным для решения задачи, указать это значение. Кроме того, при выборе параметра на нижней панели отображается его описание (рис. 6).

Если параметр должен получать значение, рассчитанное в другом элементе, то не-

обходимо двойным «щелчком» на ячейке в столбце «Определение» вызвать меню с возможными вариантами способа определения значения параметра, выбрать пункт «Связь», а в подпунктах указать название элемента и параметра, от которого будет приниматься значение (рис. 7).

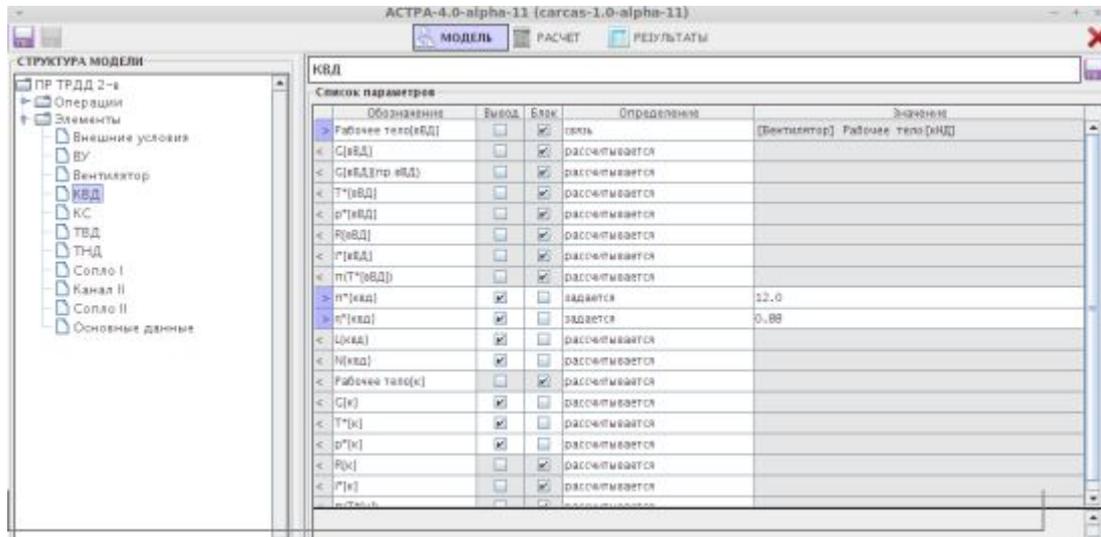


Рис.6. Окно редактирования свойств параметров элемента

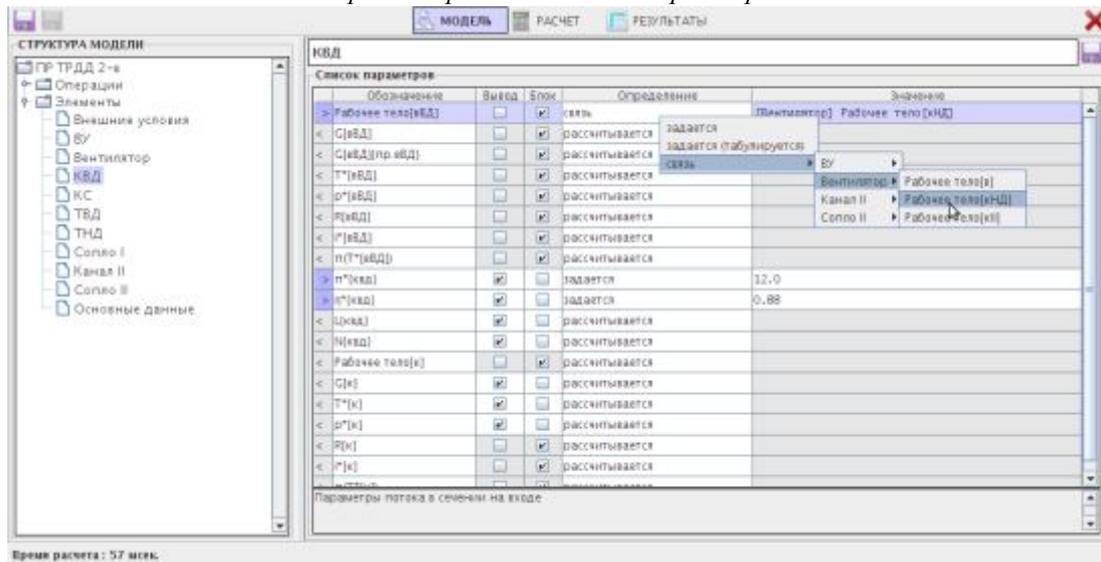


Рис.7. Формирование связи параметров

6. *Определение задаваемых и рассчитываемых параметров.*

Аналогично заданию связей параметров для всех параметров, значения которых являются исходными данными, в столбце «Определение» указывается пункт «задается» или «задается (табулируется)», после чего в столбце «Значение» указывает-

ся конкретное значение или таблица значений (рис. 8).

Затем для всех параметров, значения которых неизвестны и определяются в результате расчёта, даже если параметр является входным для данного элемента, в столбце «Определение» указывается пункт «рассчитывается» (рис. 9).

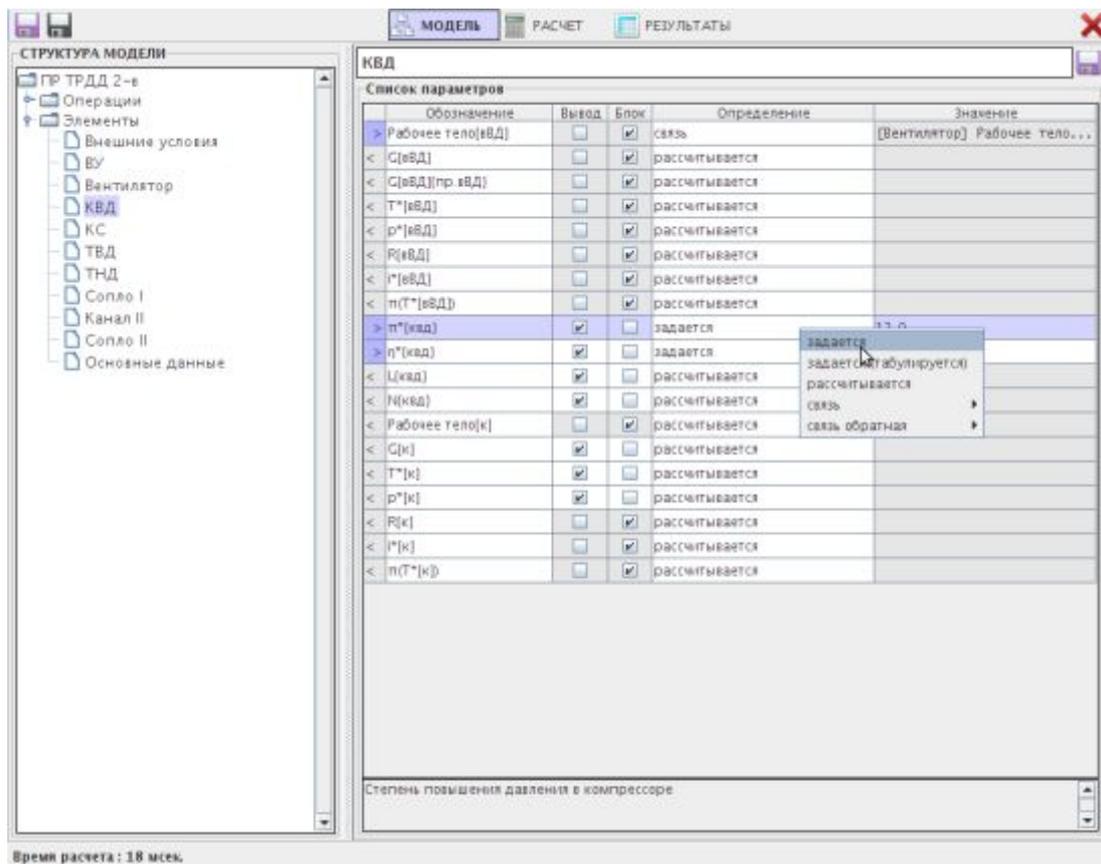


Рис.8. Задание исходных данных

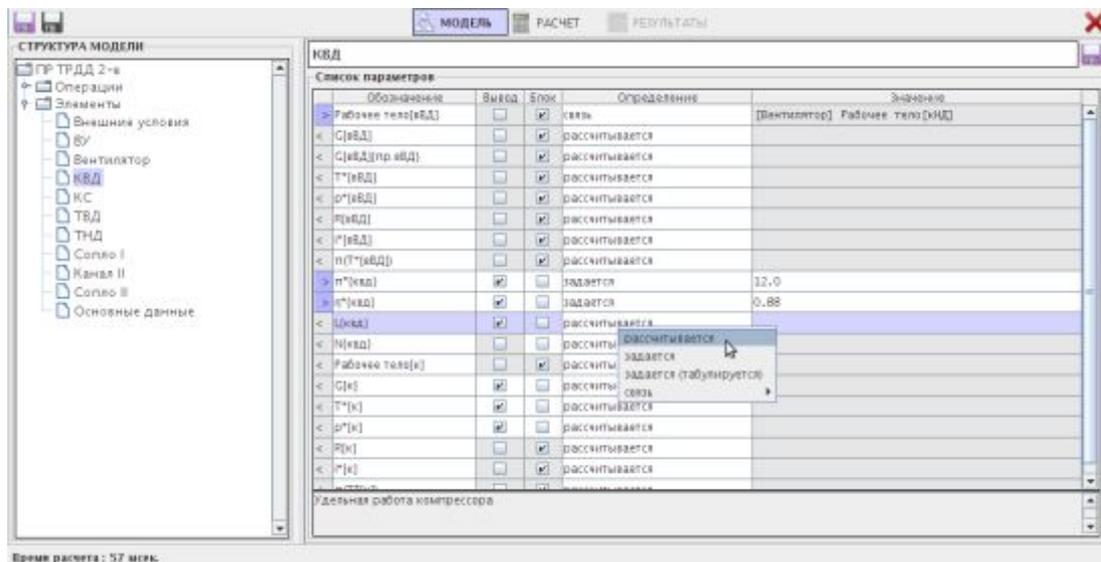


Рис.9. Выбор рассчитываемых параметров

7. Настройка модели на решение различных задач проектирования.

Виртуальная модель двигателя, сформированная в системе «АСТРА», как правило, соответствует решению конкретной задачи термогазодинамического проектирования. Однако при изменении постановки задачи модель может быть легко перенастроена.

Например, при перенастройке модели для «завязки» выполненного двигателя на расчёт его характеристик система невязок остаётся прежней, меняется только перечень исходных данных, поэтому потребуются лишь изменить способ определения значений некоторых параметров.

Чтобы подключить операцию оптимизации, необходимо выбрать в свойствах оптимизируемых параметров в столбце «Определение» пункт «оптимизируется», в настройках операции «Оптимизации» из выпадающего меню выбрать параметр, являющийся целевой функцией, и указать тип оп-

тимизации (минимизация или максимизация) (рис. 10).

Для исследования влияния различных факторов на параметры двигателя задаётся табулирование параметров, характеризующих данные факторы, и в таблице значений указывается диапазон их изменения (рис. 10).

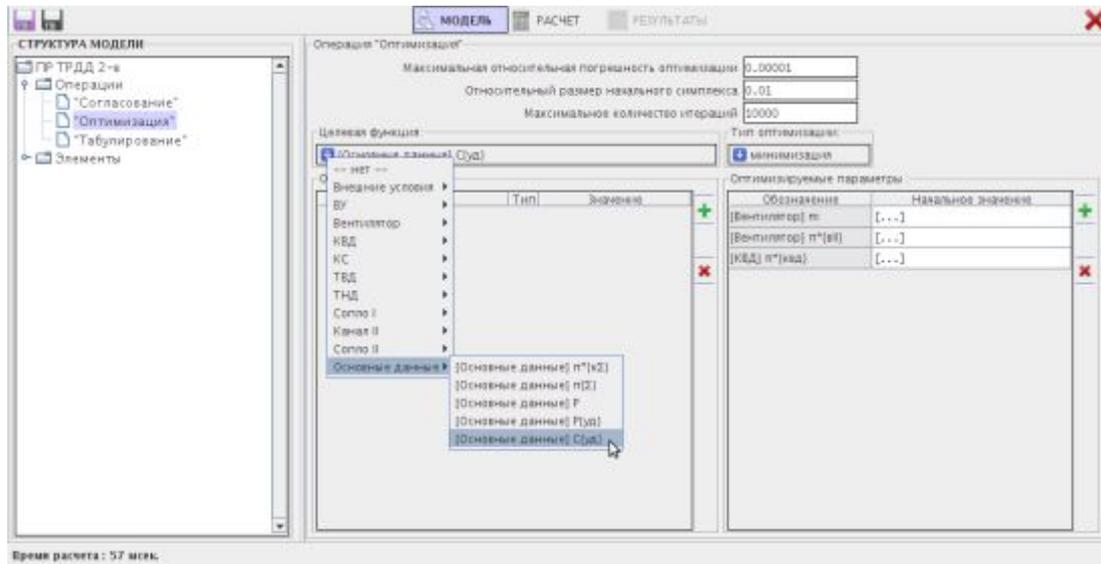


Рис.10. Панель редактирования свойств операции «Оптимизация»

8. Сохранение модели, выполнение расчёта, просмотр результатов и завершение работы.

Информацию о сформированной модели можно сохранить в файл, а затем загрузить вновь при следующей работе с системой «АСТРА». Для выполнения этой функции на верхней панели находятся кнопки «Сохранить» (для сохранения в текущий файл) и «Сохранить как» (для сохранения в новый файл). Название текущего файла отображается в правой части верхней панели. Рядом с ней расположена кнопка для закрытия модели (завершения работы с моделью) и возврата к начальному окну системы (рис. 11).

Выполнение расчёта запускается кноп-

кой «Расчёт» на верхней панели (рис. 12).

По завершении расчёта автоматически отображается панель с таблицей результатов (рис. 13).

Таблицу можно сохранить в файл в формате гипертекстового документа, а затем открыть в текстовом редакторе или редакторе электронных таблиц.

Возврат к редактированию модели осуществляется нажатием кнопки «Модель».

Текущие результаты сохраняются до тех пор, пока не изменятся значения исходных данных или настройки операций, и к ним можно вернуться, нажав кнопку «Результаты» (рис. 13).



Рис.11. Верхняя панель системы в режиме формирования модели



Рис.12. Кнопка запуска расчёта

АСТРА-4.0-alpha-11 (carcas-1.0-alpha-11)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица

c[c]	[м/с]	441,2	478,36	512,8	521,45	529,92	538,21	546,35	554,33	562,17
Канал II										
σ[II]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
G[II]	[кг/с]	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33
T*[II]	[К]	327,89	327,89	327,89	327,89	327,89	327,89	327,89	327,89	327,89
p*[II]	[кПа]	151,988	151,988	151,988	151,988	151,988	151,988	151,988	151,988	151,988
Сопло II										
π(c pI)		1,5	1,5001	1,5	1,5	1,5	1,5001	1,4999	1,5	1,5
π(cI)		1,5	1,5001	1,5	1,5	1,5	1,5001	1,4999	1,5	1,5
φ(cII)		0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
c[cI]	[м/с]	265,79	265,8	265,8	265,79	265,79	265,81	265,77	265,79	265,78
Основные данные										
π*(к2)		20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
π[2]		20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
F	[кН]	29,62	30,26	30,85	31,41	31,94	32,45	32,93	33,38	33,82
F(уд)	[кН*с/кг]	0,2962	0,3026	0,3085	0,3141	0,3194	0,3245	0,3293	0,3338	0,3382
C(уд)	[кг/(кН*ч)]	32,85	33,7	34,58	35,46	36,37	37,28	38,21	39,15	40,1

Время расчета: 18 мсек.

Рис.13. Таблица результатов расчёта

Завершение работы с системой «АСТРА» осуществляется простым закрытием программы. Если текущая модель не была сохранена со времени последнего изменения, то появится окно с предложением сохранить информацию о модели в файл.

Системные требования

Автоматизированная система «АСТРА» реализована в виде программного комплекса, написанного на языке объектно-ориентированного программирования Java. Программный комплекс работает на персональных компьютерах под управлением операционных сред Windows, Linux и MacOS.

Аппаратные требования: процессор с тактовой частотой не менее 1500 МГц; объём оперативной памяти не менее 256 Мб; монитор и видеокарта, поддерживающие режим отображения с разрешением не менее 1280x800 точек и разрядностью цветопере-

дачи 16 бит; объём свободного пространства на жёстком диске не менее 100 Мб.

Для запуска программного комплекса на компьютере должна быть установлена среда исполнения Java (JRE) версии не ниже 6u20.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Автоматизированная система термодинамического расчета и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок [Текст] / А.Ю. Ткаченко, В.С.Кузьмичев, В.В.Кулагин [и др.] // Проблемы и перспективы развития двиглестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 28-30 июня 2011г. – Самара: СГАУ, 2009. – Ч.2 – С. 80-82.

**DEVELOPMENT OF A VIRTUAL PROTOTYPE OF GASTURBINE ENGINE
AT THE STAGE OF CONCEPTUAL THERMOGASDYNAMIC DESIGN USING THE
CAE-SYSTEM «ASTRA»**

© 2012 A. Yu. Tkachenko, I. N. Krupenich

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

Computer-aided system of gas turbine engine calculation and analysis (ASTRA) developed at the Aircraft Engine Theory department of Samara State Aerospace University is described. Its functional capabilities and development of gas turbine engine simulators for various initial-stage design tasks are described.

Computer-aided system; thermogasdynamic calculations; analysis; gas turbine engine.

Информация об авторах

Ткаченко Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tau@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, управление газотурбинными двигателями, методы расчета эксплуатационных характеристик, численные методы оптимизации.

Крупенич Илья Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kru@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, проектирование турбокомпрессора ГТД, численные методы оптимизации.

Tkachenko Andrey Yurievich, Candidate of Science, Associate professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: tau@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine controlling, design methods of field-performance data, numerical method of optimization.

Krupenich Iliya Nikolaevich, Candidate of Science, Associate professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kru@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine's turbocompressor design, numbering method of optimization.