

УДК 629.452.3

И. М. ГОРЮНОВ

## ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГТД И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ DVIGwT

Рассмотрены методы математического моделирования газотурбинных двигателей и энергетических установок с использованием разработанной системы DVIGwT. Проведена апробация разработанных методов и средств математического моделирования, которая позволяет судить об их эффективности и работоспособности. *Газотурбинные двигатели; энергетические установки; термогазодинамические расчеты; математическое моделирование*

Газотурбинные двигатели (ГТД) и энергетические установки (ЭУ) в своем развитии достигли высокой степени сложности, уровень параметров близок к предельно достижимому значению, а требования к эффективности процесса их работы все более ужесточаются. Широко стали использоваться установки сложных схем и термодинамических циклов (регенеративных, бинарных, газопаротурбинных с теплоутилизирующим контуром и др.).

Для обеспечения научно-технического задела при создании новых и модификации имеющихся конкурентоспособных ГТД и ЭУ необходимо проведение системных исследований рациональных схем и параметров перспективных установок с использованием современной методологии разработки установок, направленной на сокращение суммарных затрат и сроков их создания путем широкого применения методов математического моделирования и проектирования с использованием новых информационных технологий.

Математическое описание схем и особенностей рабочего процесса ГТД и ЭУ, оптимизация режимов работы и законов регулирования на этапах исследования, анализа и проектирования определяют необходимость разработки математических моделей и методов расчета, позволяющих достаточно точно и оперативно воспроизводить различные режимные режимы работы установок различных схем с учетом основных значимых факторов.

Совершенствование математического моделирования ГТД и ЭУ сложных схем и циклов на основе использования новых информационных технологий, разработка методов и средств их имитационного моделирования

для использования на этапах проектирования и доводки является актуальной задачей.

В связи с этим на основе системного подхода к созданию математических моделей ГТД и ЭУ, математических моделей расчета термодинамических свойств рабочих тел и процессов парогазовых смесей, учитывающих фазовые превращения в рабочем теле в процессах сжатия, расширения, подвода и отвода тепла, математических моделей функциональных элементов установок, с использованием программного комплекса САМСТО [1] разработана система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок DVIGwT [2, 3], областью применения которой являются термогазодинамические расчеты установок произвольных схем (авиационных газотурбинных двигателей, газотурбинных, паротурбинных, парогазовых установок, тепловых насосных установок и др.). Система DVIGwT позволяет также изучать и анализировать работу отдельных элементов установок (компрессора, камеры сгорания, турбины и т. д.).

### 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЭУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ DVIGwT

#### Методика формирования модели

Синтез модели начинается с конструирования новой модели выбранной схемы установки из набора функциональных элементов, создания информационных связей между элементами установки.

Командой «Новая модель» очищается рабочее поле экрана (если в тот момент на экране находилось изображение схемы) и открываются окна: «Модель» и «Доступные типы элементов» (рис. 1).

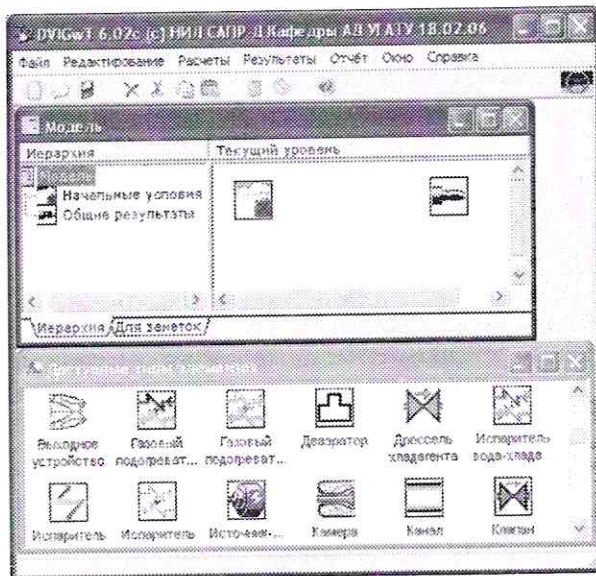


Рис. 1. Окно «Новая модель»

Компоновка модели осуществляется из набора функциональных элементов с визуализацией расчетной схемы. Выбирается элемент модели из окна «Доступные типы элементов», и иконка элемента перемещается в нужное место рабочего поля окна «Текущий уровень».

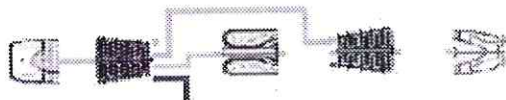


Рис. 2. Соединение элементов модели информационными связями



Рис. 3. Информационные потоки элемента

Элементы модели соединяются информационными связями, как показано на рис. 2. Входной информационный поток входит слева, а выходной информационный поток выходит справа от иконки элемента (рис. 3). Удаление прорисованной информационной связи происходит, если указатель курсора подвести к графическому обозначению входного

или выходного потока и нажать правую кнопку мыши.

В результате формируется математическая модель исследуемой схемы установки, например модель двухвального ТРДФ, приведенная на рис. 12.

### Методика моделирования рекурсивной информационной связи элементов модели

Расчетная система определяет порядок вычислений исходя из того, что до расчета любого элемента должен быть рассчитан предыдущий элемент, вычисляющий значения параметров входящей информационной взаимосвязи. Поэтому, если некоторый элемент В зависит от элемента А, сначала будет рассчитан элемент А. Если, в свою очередь, элемент А тоже зависит от элемента В, получается рекурсивная взаимосвязь, не позволяющая определить порядок расчета элементов.

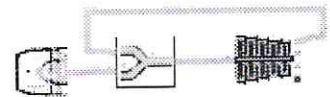


Рис. 4. Недопустимая рекурсивная взаимосвязь

На рис. 4 приведена рекурсивная взаимосвязь, заключающаяся в том, что четвертый выходной информационный поток из компрессора соединен с входным информационным потоком смесителя, который, в свою очередь, расположен перед компрессором.

Для моделирования рекурсивной связи, т. е. организации передачи значений параметров в предыдущий элемент, необходимо выполнить следующие действия:

1) Разорвать рекурсивную связь и добавить элементы «Вход газа» и «Выход газа», как показано на рис. 5.

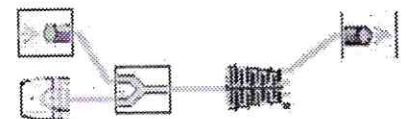


Рис. 5. Модель рекурсивной связи элементов

2) Задать в первом приближении значения входных параметров в элементе «Вход газа». Переименовать элемент «Вход газа», например, «Вход газ». Количество символов, включая пробелы, не должно превышать 8. Это наименование указать во входных параметрах элемента «Выход газа».

3) Выполнить «Простой расчет» и просмотреть выходные параметры элемента «Выход газа» (рис. 6). Здесь, например, «Отношение  $G_{\text{вых}}/G_{\text{вх}}$ » означает отношение расхода рабочего тела в элементе «Выход газа» к расходу рабочего тела в элементе «Вход газ». При больших отклонениях от единицы отношений параметров необходимо скорректировать значения соответствующих входных параметров элемента «Вход газ».

Выходные параметры (Выходные параметры)	Значение
Влажосодержание рабочего тела [кг воды/кг вл. воздуха]	0
Давление рабочего тела [кПа]	1069,8278
Коэффициент избытка воздуха [ε]	1000000
Отношение $G_{\text{вых}}/G_{\text{вх}}$	1
Отношение $\Delta\alpha_{\text{вых}}/\Delta\alpha_{\text{вх}}$	1
Отношение $V_{\text{вых}}/V_{\text{вх}}$	1
Отношение $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$	1,05699969
Отношение $T_{\text{вых}}/T_{\text{вх}}$	1,2648137
Расход рабочего тела [кг/с]	5
Температура рабочего тела [K]	665,40685

Рис. 6. Выходные параметры элемента «Выход газа»

4) В законе расчета указать тип задачи — «Параметрический синтез». Для выполнения условий:  $\left(\frac{G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}}\right)_{\text{зад}} - \left(\frac{G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}}\right)_{\text{расч}} = 0$ ,  $\left(\frac{P_{\text{вых}}^*}{P_{\text{вх}}^*}\right)_{\text{зад}} - \left(\frac{P_{\text{вых}}^*}{P_{\text{вх}}^*}\right)_{\text{расч}} = 0$  и  $\left(\frac{T_{\text{вых}}^*}{T_{\text{вх}}^*}\right)_{\text{зад}} - \left(\frac{T_{\text{вых}}^*}{T_{\text{вх}}^*}\right)_{\text{расч}} = 0$ , обеспечивающих уравнение неразрывности и уравнение сохранения энергии, в качестве поддерживаемых параметров задать выходные параметры: «Отношение  $G_{\text{вых}}/G_{\text{вх}}$ »; «Отношение  $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ »; «Отношение  $T_{\text{вых}}/T_{\text{вх}}$ » из элемента «Выход газа», со значениями, равными единице (рис. 7).

Поддерживаемые параметры
$G_{\text{вх}}/G_{\text{вх}}$ (Вход газа)
$P_{\text{вх}}^*/P_{\text{вх}}^*$ (Вход газа)
$T_{\text{вх}}^*/T_{\text{вх}}^*$ (Вход газа)

Рис. 7. Задание поддерживаемых параметров

В качестве варьируемых параметров задать соответственно входные параметры: «Расход рабочего тела»; «Давление рабочего тела»; «Температура рабочего тела» из элемента «Вход газ» (рис. 8).

Варируемые параметры	Значение
$G_{\text{вх}}$ (Вход газа)	0,73
$P_{\text{вх}}^*$ (Вход газа)	1182,2
$T_{\text{вх}}^*$ (Вход газа)	1173,2
Передел параметров	100,1

Рис. 8. Задание варьируемых параметров

Если изменяются коэффициент избытка воздуха или влажосодержание рабочего тела, то необходимо добавить соответствующие поддерживаемые и варьируемые параметры.

5) Выполнить расчет. Как видно из рис. 9 и 10, параметры в элементе «Вход газ» равны соответствующим выходным параметрам элемента «Выход газа», поддерживаемые отношения равны заданным значениям.

Входные параметры (Входные параметры)	Значение
Влажосодержание рабочего тела [кг воды/кг вл. воздуха]	0
Давление рабочего тела [кПа]	1075,8677
Коэффициент избытка воздуха [ε]	1000000
Расход рабочего тела [кг/с]	5
Температура рабочего тела [K]	665,82131

Рис. 9. Выходные параметры элемента «Вход газ» после выполнения расчета

Выходные параметры (Выходные параметры)	Значение
Влажосодержание рабочего тела [кг воды/кг вл. воздуха]	0
Давление рабочего тела [кПа]	1075,8675
Коэффициент избытка воздуха [ε]	1000000
Отношение $G_{\text{вых}}/G_{\text{вх}}$	1
Отношение $\Delta\alpha_{\text{вых}}/\Delta\alpha_{\text{вх}}$	1
Отношение $V_{\text{вых}}/V_{\text{вх}}$	1
Отношение $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$	0,95999969
Отношение $T_{\text{вых}}/T_{\text{вх}}$	1,0300204
Расход рабочего тела [кг/с]	5
Температура рабочего тела [K]	665,63485

Рис. 10. Выходные параметры элемента «Выход газа» после выполнения расчета

### Моделирование двухвального ТРДФ. Методика определения термогазодинамического облика двигателя

Рассмотрим задачу термогазодинамического расчета двухвального ТРДФ, схема которого приведена на рис. 11, с параметрами:

$$\pi_{\text{кнд}}^* = 3,3658; \quad \pi_{\text{квд}}^* = 2,6759;$$

$$T_{\text{квд}}^* = 1182,07 \text{ K}; \quad G_{\text{в}} = 67,43 \text{ кг/с.}$$

Задача решается в следующей последовательности:

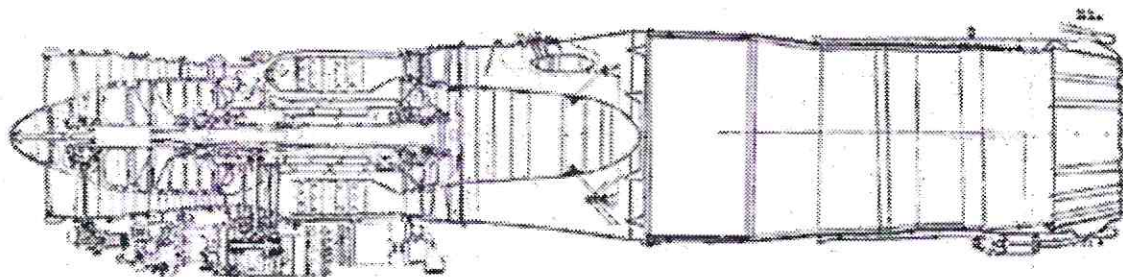


Рис. 11. Схема двухвального ТРДФ

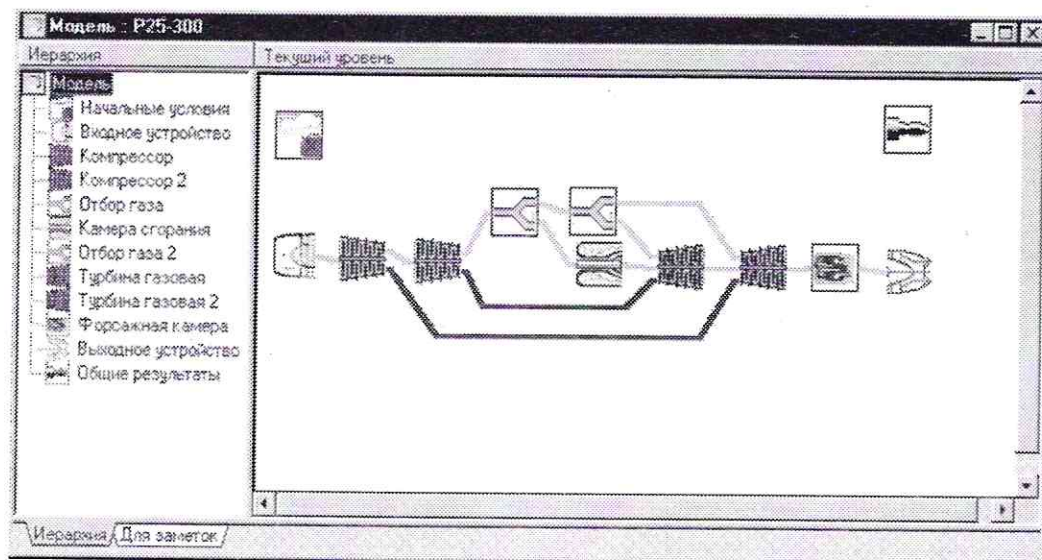


Рис. 12. Модель двухвального ТРДФ

1) Формируется математическая модель двухвального ТРДФ (рис. 12) с использованием функциональных элементов.

2) Задаются входные параметры элементов модели и их характеристики. Вместо универсальных характеристик узлов при необходимости можно использовать конкретные характеристики, подготовленные в программе CharEdit.

3) Далее создается закон расчета. В окне закона расчета (рис. 8) указывается его наименование, например, «Расчетная точка». В строке «Режим» задается значение 0 или 1000. Для отображения расчетной точки на характеристиках указывается номер режима 1000 (предварительно исходным данным компрессора присваиваем значение признака рисования характеристики 1). После этого выполняется расчет.

При нормальном окончании расчета и включенной опции «Выдавать сообщения об окончании расчета» появится сообщение — «Расчет окончен».

4) Выполняется анализ результатов расчета в закладках «Выходные параметры» по

всем элементам модели. Если значения выходных параметров не удовлетворяют соответствующим требованиям, необходимо выполнить расчет с подбором параметров. Допустим, требуется получить тягу и удельный расход топлива за счет уточнения мало достоверной информации о двигателе, например, подбором адиабатического КПД компрессора низкого и высокого давления.

Для этого в окне «Закон расчета» выбирается тип задачи «Параметрический синтез». Для выполнения условий  $P_{зад} - P_{расч} = 0$  и  $C_{удзад} - C_{удрасч} = 0$  в качестве поддерживаемых параметров из выходных параметров элемента «Общие результаты» задаются тяга и удельный расход топлива с требуемыми значениями и точностью их вычислений. В качестве варьируемых параметров указываются из входных параметров адиабатический КПД компрессора низкого и высокого давления.

5) После формирования закона расчета выполняется расчет по модели.

С помощью предоставляемых сервисных средств, при необходимости, можно напечатать входные или выходные параметры по

конкретному элементу модели или записать в файл отчета входные и выходные параметры всех элементов модели, а также сохранить изображения модели в файле с расширением bmp.

### Методика расчета высотно-скоростных характеристик

Типовой задачей расчета двигателя является расчет его характеристик (высотно-скоростных, дроссельных, климатических и пр.) на установившихся режимах работы. На базе уже созданной модели двухвального ГРДФ и данных термогазодинамического расчета на расчетном режиме рассмотрим последовательность действий при расчете высотно-скоростных характеристик с программой регулирования:  $n_{\text{КНД}} = \text{const}$ ,  $F_{\text{СКР}} = \text{const}$ .

1) В соответствии с поставленной задачей поддерживаемыми параметрами являются:

$A_{\text{ТВД}}$  — пропускная способность турбины ВД (расчетная), при расчете без характеристики турбины или  $\bar{A}_{\text{ТВД}}$  — относительная пропускная способность турбины, равная единице, при использовании характеристики турбины.  $\bar{A}_{\text{ТВД}}$  — это отношение пропускной способности турбины, снятой с характеристики, к пропускной способности турбины (расчетной), определенной по параметрам на входе в турбину.

$A_{\text{ТНД}}$  — пропускная способность ТНД;

$F_{\text{СКР}}$  — площадь критического сечения сопла;

$n_{\text{КНД}}$  — частота вращения ротора НД.

Значения поддерживаемых параметров соответствуют термогазодинамическому расчету.

Варьируемые параметры определяются из числа входных параметров:

$T_{\text{КС}}^*$  — температура газа на выходе из камеры сгорания;

$G_{\text{ВВР}}$  — приведенный расход воздуха на входе ВУ;

$\pi_{\text{КВД}}^*$  — степень повышения давления в расчетной точке КВД;

$\pi_{\text{КНД}}^*$  — степень повышения давления в рабочей точке КНД.

Их варьирование обеспечивает согласование работы всех элементов двигателя при заданных поддерживаемых параметрах.

Значения начальных приближений соответствуют расчетному режиму.

2) В окне «Закон расчета» вписывается наименование закона расчета, «Скоростная характеристика». Режиму 1001 соответствует

расчет с рисованием ЛРР на характеристике компрессора, в исходных данных которого задан признак рисования. Активизируется тип задачи «Параметрический синтез», присваивается название задачи «Согласование элементов». В закладке «Поддерживаются» (рис. 13) задаются поддерживаемые параметры из выходных параметров соответствующих элементов, их значения и точность определения (относительная или абсолютная).

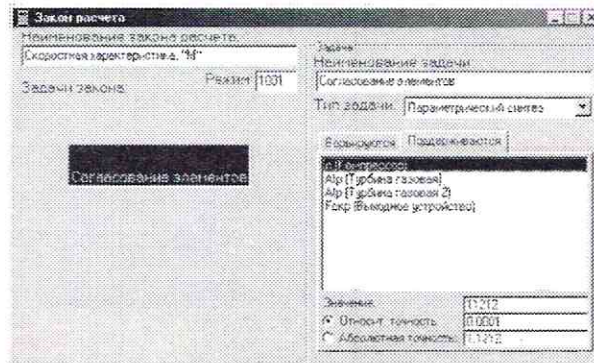


Рис. 13. Синтез задачи закона расчета, задание поддерживаемых параметров

В закладке «Варьируются» (рис. 14) задаются варьируемые параметры из входных параметров соответствующих элементов. Автоматически заполняются величины «Левая граница», «Правая граница», «Шаг дифференцирования» и активизируется опция «Обновлять первое приближение».

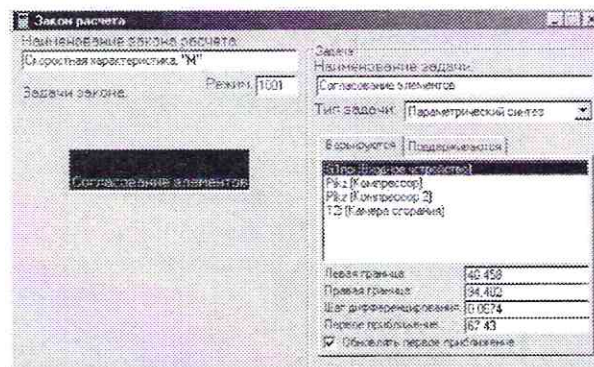


Рис. 14. Задание варьируемых параметров

4) Добавляется новая расчетная задача «Табулирование  $M$ ,  $H$ ». В качестве первого табулируемого параметра указывается число  $M$ , второго — высота  $H$ , задаются начальное, конечное значения из диапазона высот и скоростей полета самолета и шаг табуляции (рис. 15). Для просмотра результатов расчета в виде графиков или таблиц в закладке «Выводятся» задаются необходимые выводимые параметры и имя файла результатов (рис. 16).

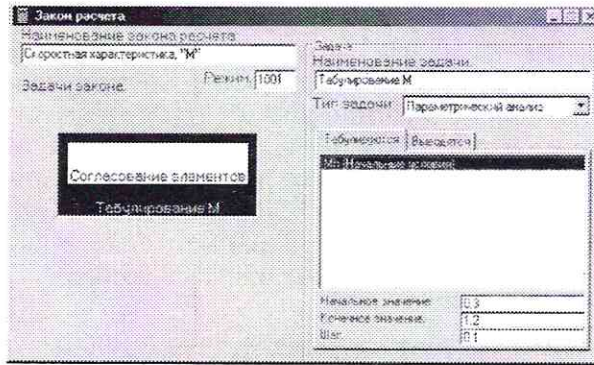


Рис. 15. Задание табулируемых параметров

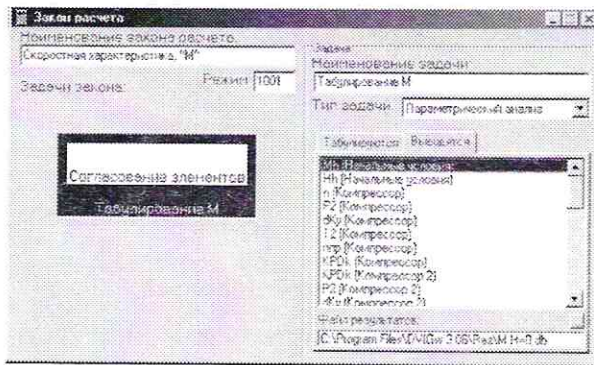


Рис. 16. Задание выводимых параметров и имени файла результатов

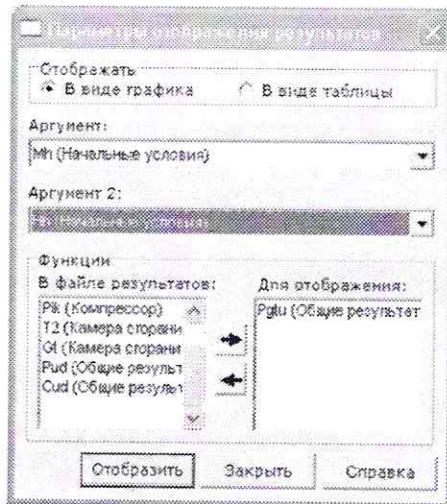


Рис. 17. Параметры отображения результатов

5) Выполняется расчет характеристик, в процессе которого открывается графическое окно просмотра характеристики компрессора с построением в процессе расчета линии рабочих режимов.

6) Результаты расчета ВСХ выводятся в виде графиков или таблицы с помощью команды «Просмотреть файл результатов...» из пункта меню «Результаты». Для примера в

качестве функции для отображения выбран тяга двигателя, а аргументами являются число  $M$  и  $H$  полета (рис. 17). Сервисные средства системы позволяют редактировать, сохранять в файл и выводить на печать полученные графики и таблицы (рис. 18 и 19).

Вышеприведенные методы являются типичными для моделирования ГТД произвольных схем. Моделирование парогазовых установок, состоящих из ГТУ, котла-утилизатора и паровой турбины, рекомендуется проводить поэтапно. При термогазодинамическом расчете формируется и рассчитывается модель ГТУ, затем добавляются элементы модели котла-утилизатора с рекурсивными связями по газовому или пароводяному потокам и выполняется совместный расчет, далее присоединяется модель паровой турбины с системой регенерации и выполняется окончательный расчет. При расчете нагрузочных и климатических характеристик составляется закон расчета, описывающий совместную работу всех элементов ПГУ.

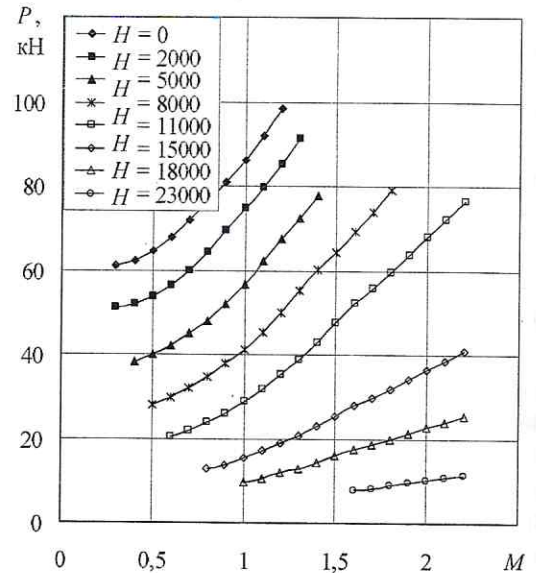


Рис. 18. Высотно-скоростная характеристика

### Методика моделирования ГТД и ЭУ в системах верхнего уровня

В системах верхнего уровня по отношению к системам математического моделирования ГТД и ЭУ, таких, как оптимизация, идентификация, интеграция самолета и двигателя и др., данная система представляется одной из подсистем [5]. Например, в системе интеграции самолета и двигателя решаются оптимизационные задачи согласования характеристик планера и силовой установки. многократно происходит завязка двигателя

Mh (Нач)	Hh (Нач)	n (Компрессор)	P2 (Компрессор)	dK <sub>y</sub> (Компрессор)	T2 (Компрессор)	hпр (Компрессор 2)
0.3	0	11212.8	360.315	14.3995	447.838	8050.74
0.4	0	11212	375.821	14.6518	452.118	8024.23
0.5	0	11212	396.472	14.9674	457.655	8990.9
0.6	0	11212	422.786	15.3377	464.443	8950.49
0.7	0	11212	455.43	15.7479	472.494	8902.63
0.8	0	11212	493.596	16.2431	481.483	8849.1
0.9	0	11212	534.814	16.9383	490.764	8794.51
1	0	11212	583.276	17.7192	501.049	8734.9
1.1	0	11212	639.801	18.6403	512.301	8671.8
1.2	0	11212.2	703.823	19.6442	525.155	8602.01

Рис. 19. Таблица результатов расчета

и расчет высотно-скоростных и дроссельных характеристик.

Включение системы DVIGwT в качестве составляющей подсистемы можно организовать в виде вызова из вышестоящей системы (приложения) командной строкой:

```
dvigwt.exe [model_file_name.mds [/calculate
/save [/exit]]],
```

где `dvigwt.exe` — имя выполняемого файла расчётной подсистемы;

`model_file_name.mds` — имя файла модели, который необходимо раскрыть;

`/calculate` — параметр выполнения расчёта модели;

`/save` — параметр сохранения модели с исходными данными и результатами расчета;

`/exit` — параметр выхода из DVIGwT после выполнения расчёта.

В соответствии со стандартом STEP обмен данными между подсистемами в системе можно реализовать через обменные файлы и программный интерфейс SDAI для доступа к базам данных.

Рассмотрим метод реализации через обменные файлы, которыми в нашем случае являются файл описания модели с расширением `*.mds` и файл результатов расчета характеристик с расширением `*.db` (файл БД Paradox).

Спецификации языка MDS разработаны Д. Г. Кожинным (последняя версия описания языка MDS находится в Internet по адресу [http://www.ad.ugatu.ac.ru/camcto/mds\\_r.htm](http://www.ad.ugatu.ac.ru/camcto/mds_r.htm)).

MDS предполагает хранение моделей в текстовых файлах (`*.mds`). Описание модели состоит из разделов, расположенных в произвольном порядке и, возможно, вложенных друг в друга. Начало и конец каждого раздела

обозначаются с помощью специальных меток, начинающихся с первой позиции и заключенных в треугольные скобки (знаки «меньше» и «больше»). Метка начала раздела представляет собой ключевое слово; метка конца раздела — то же ключевое слово, предваренное символом «косая черта» (слэш) — по аналогии с языком HTML. Регистр символов в ключевых словах значения не имеет.

Все разделы вложены в главный раздел, представляющий собой описание модели в целом. Для его обозначения служит ключевое слово `MODEL`. Каждый раздел состоит из расположенных в произвольном порядке описателей или дескрипторов, каждый из которых имеет вид

Ключевое\_слово=Значение,

где ключевое слово определяет вид информации о модели, а значение — строка, несущая информацию заданного вида.

Для каждого раздела определены свои дескрипторы (описатели). Любые разделы и описатели являются необязательными, кроме главного раздела.

Для нахождения в файле модели значений интересующих параметров по элементу необходимо в файле найти строку `InstanceName`, которая задаст имя данного элемента модели. Например, `InstanceName=Компрессор`. Затем, ниже этой строки находим строку, открывающую раздел описания параметров элемента `<Parameters>`. Между этой строкой и строкой `</Parameters>`, закрывающей раздел описания параметров элемента, находим требуемое обозначение переменной и ее значение. Например, для однофазного ТРД степень повышения давления в рабочей точке из входных параметров `Pikz=10`.

Выходной параметр элемента «Общие результаты» «Тяга двигателя, [кН]» имеет вид  $P_{gtu}=36,5308$ .

Идентификаторы и наименования входных и выходных параметров элементов приведены в алгоритмах функциональных элементов системы DVIGwT [3, 4].

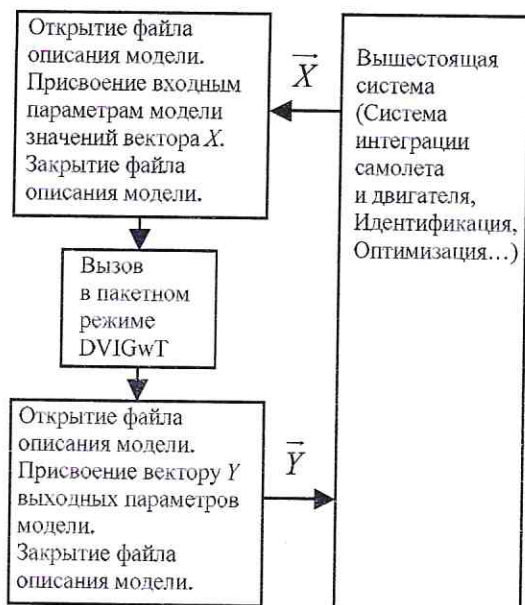


Рис. 20. Структурная схема включения системы DVIGwT в качестве составляющей подсистемы вышестоящей системы

На рис. 20 приведена структурная схема включения системы DVIGwT в качестве составляющей подсистемы вышестоящей системы.

## 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанные методы и система моделирования DVIGwT апробированы при выполнении расчетных исследований авиационных ГТД, ГТУ регенеративного цикла, котлов-утилизаторов, паротурбинных установок, контактных парогазовых установок различных схем, тепловых насосных установок воздушно-компрессорных и пароконпресссионного цикла, преобразователя низкопотенциальной энергии, а также возможности повышения эффективности ГТЭ-10/95 путем впрыска воды и водяного пара в проточную часть ГТУ.

Рассмотрим в качестве примера термодинамический анализ парогазовой установки типа «МЭС-60», разработанной в ММПП «Салют».

### Парогазовая установка типа «МЭС-60»

Характерной особенностью ПГУ «МЭС-60» [6], в отличие от классической схемы STIG, является наличие паровой турбины и КУИ двух давлений.

Для апробации разработанной системы DVIGwT составлена расчетная модель данной ПГУ, представленная на рис. 21, и выполнены расчеты выходных параметров ПГУ по исходным данным, приведенным в работе [6].

Результаты расчетов характеристик ПГУ в виде зависимостей КПД, мощности от степени повышения полного давления в компрессоре и температуры газа перед турбиной в сравнении с данными ММПП «Салют», представлены на рис. 22 и 23.

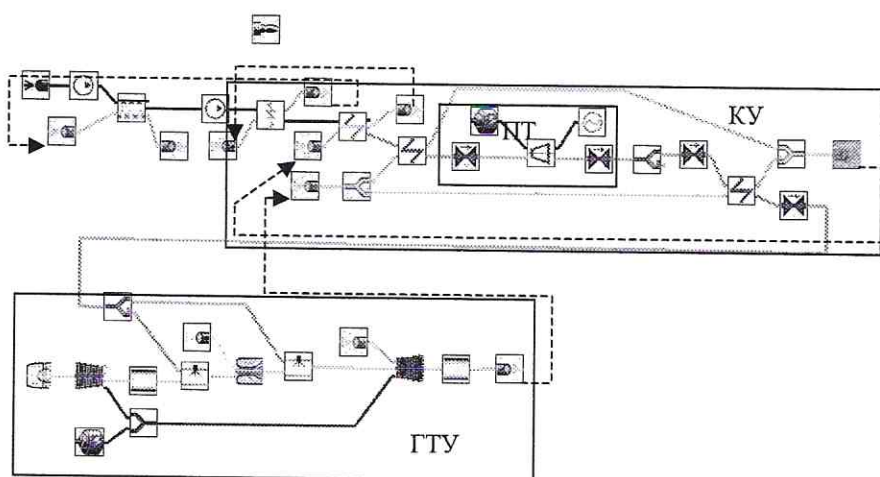


Рис. 21. Расчетная модель ПГУ типа «МЭС-60»



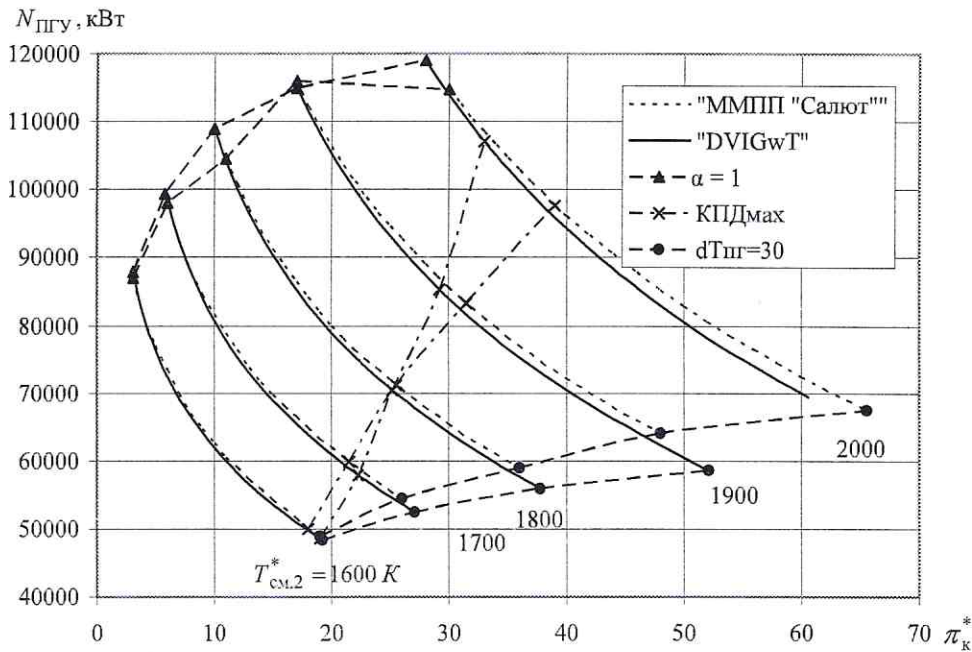


Рис. 22. Зависимость КПД ПГУ от степени повышения полного давления в компрессоре

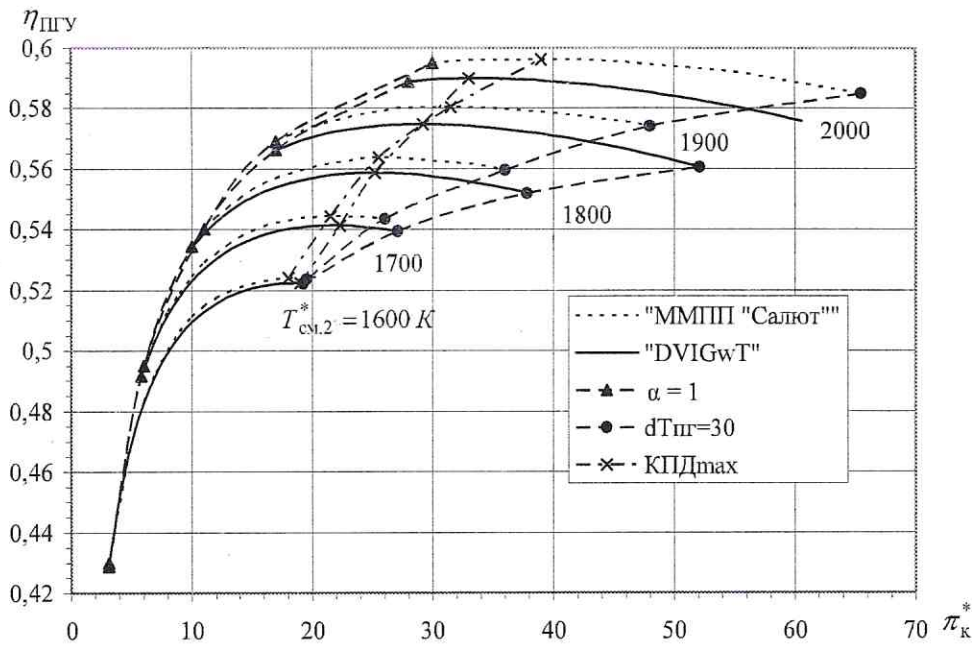


Рис. 23. Зависимость мощности ПГУ от степени повышения полного давления в компрессоре и температуры парогазовой смеси перед турбиной

Там же пунктиром нанесены линии, ограничивающие как справа представленные характеристики, когда заданная температура пара становится меньше заданной:  $T_{\text{П}}^* < T_{\text{ВЫХ.СТ}}^* - \Delta T_{\text{Г.П}}$ , так и слева  $\alpha = 1$ . Кроме того, на представленных графиках нанесена линия максимума КПД ПГУ.

Результаты расчета показывают, что имеется достаточно хорошая сходимость результатов расчета характеристик ПГУ с данны-

ми ММПП «Салют». В области реально достижимых температур  $\approx 1800 \text{ K}$  и степени повышения полного давления в компрессоре  $\approx 40$ , максимальная погрешность составляет  $\delta\eta_{\text{ПГУ}} \approx 1\%$ ,  $\delta N_{\text{ПГУ}} \approx 2,2\%$ ,  $\delta\bar{G}_{\text{П.КУП}} \approx 1,5\%$ . Для температуры парогазовой смеси перед турбиной  $2000 \text{ K}$  и степени повышения полного давления в компрессоре до 40 максимальная погрешность составляет  $\delta\eta_{\text{ПГУ}} \approx 1,2\%$ ,  $\delta N_{\text{ПГУ}} \approx 2,0\%$ ,  $\delta\bar{G}_{\text{П.КУП}} \approx 0,6\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология имитационного моделирования с использованием системы DVIGwT позволяет моделировать ГТД и ЭУ произвольных схем и сложных циклов, обеспечивает выполнение структурной оптимизации схемы установки из условия обеспечения ее максимальной эффективности; определение характеристик установки, удовлетворяющих требованиям проектировщика; нахождение оптимальных законов регулирования.

Апробация и практическое применение предложенной методологии и системы DVIGwT позволяют судить об эффективности и работоспособности разработанных математических моделей, методов и средств математического моделирования.

Полученные результаты расчетных исследований различных схем установок свидетельствуют о достаточной для инженерных расчетов точности моделирования ГТД и ЭУ в системе DVIGwT.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов, А. М. Система конструирования среды для математического моделирования сложных технических систем / А. М. Ахмедзянов, Д. Г. Кожин // Изв. вузов. Сер. «Авиационная техника». 1994. № 1. С. 54–58.
2. Горюнов, И. М. Система моделирования тепловых схем энергетических установок / И. М. Горюнов, Ю. С. Курунов // Докл.

междунар. науч.-техн. конф., посв. памяти ген. констр. аэрокосмич. тех-ки Н. Д. Кузнецова. Ч. 3. Самара: СГАУ, 2001. С. 27–31.

3. Горюнов, И. М. Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIGwT) / И. М. Горюнов: Свид. об офиц. рег. № 2004610623. М.: Роспатент, 2004.
4. Ахмедзянов, Д. А. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw: учебное пособие / Д. А. Ахмедзянов, И. М. Горюнов, И. А. Кривошеев и др.; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2003. 162 с.
5. Югов, О. К. Основы интеграции самолета и двигателя / О. К. Югов, О. Д. Селиванов. Под общ. ред. О. К. Югова. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
6. Беляев, В. Е. Влияние расхода охлаждающего пара на характеристики парогазовых установок контактного типа / В. Е. Беляев, Д. В. Листопадов, А. С. Косой и др. // Теплоэнергетика. 2002. № 9. С. 47–51.

## ОБ АВТОРЕ



**Горюнов Иван Михайлович**, доцент каф. авиац. двигателей, зав. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1974). Канд. техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УАИ, 1984). Иссл. в обл. автоматизации проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.