

**А.Б. АГУЛЬНИК, И.В. КРАВЧЕНКО, А.А. ГОРБУНОВ, А.П. СКЛЯРОВА,
А.А. НОВОСЕЛОВА**
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНЫХ СХЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация

Определён программный комплекс для проведения расчётно-теоретического исследования газотурбинных двигателей в учебном процессе Московского авиационного института.

Анализ существующих программ термогазодинамического расчёта газотурбинных двигателей (ГТД) показал, что в настоящее время основными используемыми программными комплексами (ПК) являются:

- 1) ГРАД (Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева (КАИ))
- 2) DWIGw (Уфимский государственный авиационный технический университет)
- 3) GasTurb (Технический университет Мюнхена (Германия))
- 4) ThermoGTE (д.т.н. Лещенко И.А.)
- 5) ETA (ЦИАМ)

Представленные программные комплексы являются известными и широко применяются в практике работ конструкторских бюро (КБ) [1]. Реализованные в них математические модели рабочих процессов ГТД авиационного применения основаны на единых теоретических положениях и допущениях, которые были сформулированы ещё в конце 1960-х годов. Фактически эти программы являются определяющими в отечественной практике термогазодинамических расчётов. К настоящему времени накоплен исчерпывающий опыт эксплуатации этих программ, выявлены их достоинства, особенности и недостатки.

Все рассмотренные программные комплексы имеют примерно одинаковые функциональные возможности и применяются различными категориями пользователей для решения широкого круга задач, как при концептуальном проектировании ГТД, так и в процессе подготовки специалистов [2].

В современных условиях новые проекты ГТД разрабатываются при значительно более высоких уровнях температур и давлений, расширилась номенклатура схемных решений в связи с разработкой на базе ГТД энергетических и других установок. Также опубликованы обновлённые сведения по термодинамическим свойствам горючих и окислителей различных составов и индивидуальных веществ.

В этом заключаются основные причины, определяющие необходимость уточнения ранее принятых теоретических положений и допущений как основы для создания современной базовой математической модели рабочего процесса ГТД.

В качестве базовой программы для проведения расчётно-теоретических исследований ГТД в учебном процессе Московского авиационного института выбрана программа ThermoGTE, которая разработана д.т.н. Лещенко И.А. Программный комплекс предназначен для решения широкого круга задач при термогазодинамическом исследовании двигателя. Он позволяет построить достаточно точную математическую модель двигателя. При этом можно использовать как существующие схемы двигателя, так и исследовать принципиально новые схемы, например двигатели с изменяемым рабочим процессом [4]. Так же особенностью данного ПК является расчет термодинамических процессов по единой методике на установившихся и неуставившихся режимах работы двигателя. Программный комплекс реализован как оконное приложение и имеет развитый графический интерфейс [3]. При обучении работе с ThermoGTE доступны видео-уроки. В процессе работы с программой можно обратиться к вкладке «Справка», так же программа показывает поясняющие сообщения в процессе работы. Это все позволяет освоить основные возможности ПК в максимально сжатые сроки. Интуитивно понятный интерфейс программы и достаточно полные справочные материалы позволяют использовать Thermo GTE в учебном процессе.

При использовании программы ThermoGTE в учебном процессе для простоты предлагается вводить характеристики основных узлов в обобщенном виде.

Особое внимание уделено характеристикам компрессоров. При проведении параметрического анализа ГТД предлагается использовать обобщенные характеристики компрессоров [5]. Для проведения расчетов по методике Р.М. Фёдорова, был составлен программный комплекс основанный на алгоритме расчетов из работы [6]. Программа даёт возможность при задании значений степени повышения давления, коэффициента полезного действия (КПД) и других необходимых параметров на расчетном режиме (рисунок 1) получать характеристику конкретного компрессора в виде массива. Данные после расчета в программе без изменения импортируются в ThermoGTE, что позволяет оперативно вносить изменения в исходные данные.

100.	! расчетный расход воздуха на входе, кг/с
0.50	! площадь входа в компрессор, м ²
2.	! отношение площадей входа к выходу, ед
3.2	! расчетн степень сжатия Пи, ед
0.86	! расчетн КПД, ед
0.90	! максималн.приведенная плотность на выходе, ед
0.4	! средн.коэфф. нагрузки ступени компрессора, ед
450.	! приведенная окружная скорость, м/с
0.0	! коэфф. поправки к работе компрессора, ед
101325.	! давление торможения на входе расчетное, Па
288.	! температура торможения на входе расчетная, К
15.	! расчетный запас устойчивости компрессора, %
0.	! вариант регулирования ВНА = 0, 1, 2

Рисунок 1- Формат ввода исходных данных для расчета характеристик компрессоров

Формирование математических моделей включает в себя подготовку характеристик элементов и ввод в программу этих характеристик и других необходимых исходных данных.

Для большинства элементов, вместо характеристик, можно использовать расчетную точку, однако для компрессора требуется задавать характеристику в виде табличной зависимости, которая охватывает весь спектр напорных веток для разных приведенных частот вращения и для каждой ветки имеется набор точек связывающих между собой приведенный расход воздуха степень повышения давления и КПД компрессора.

Характеристики входного устройства могут быть представлены в виде зависимости коэффициента восстановления полного давления от числа М полета $\sigma_{вх}=f(Mп)$.

Для основной и форсажной камер сгорания программа предлагает настройку полноты сгорания, потери полного давления и опции привода топливного насоса, основные параметры вводятся в виде констант либо зависимостей.

Интерфейс программы предлагает достаточно большой набор вариантов задания характеристик турбины в системе двигателя. ПК позволяет вводить характеристики турбин в виде различных зависимостей, полученных в ходе расчета или по результатам экспериментальных данных, а также в упрощенном варианте в виде постоянных величин (КПД, параметр расхода). Кроме того, параметр расхода может быть задан приближенно, а в дальнейшем, в процессе увязки, скорректирован по балансу расходов в турбине.

Характеристики сопла могут задаваться в виде табличных зависимостей, а при отсутствии достоверных характеристик есть возможность ограничиться постоянными обобщенными величинами коэффициентов расхода, тяги сопла, гидравлического сопротивления.

В процессе работы программа позволяет оценить корректность ввода исходных данных, увидеть ошибки ввода и тем самым повысить качество математической модели.

При расчёте ГТД возможно проводить расчёты характеристик ГТД при одно-, двух-, трёх- параметрических законах управления работы двигателей.

В качестве примера на рисунке 2 представлена формируемая пользователем расчётная схема ТРДДФсм. На этой схеме показываются места отбора воздуха, а их значения закладываются далее в программе.

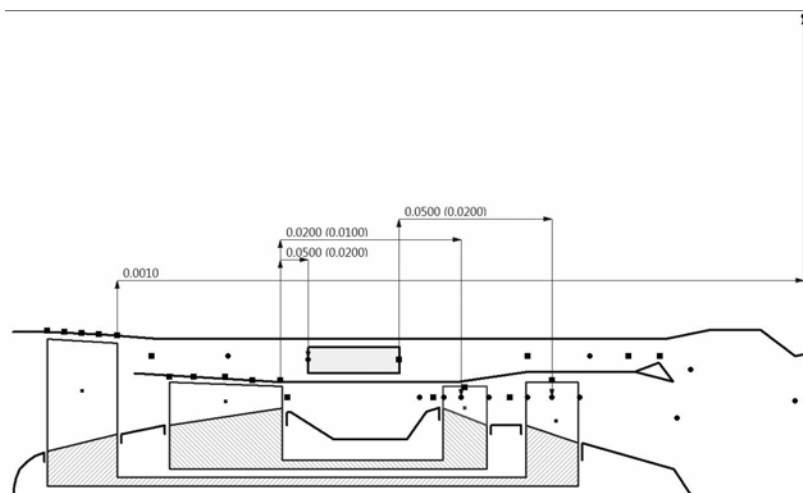


Рисунок 2- Расчетная схема ТРДДФсм с отбором воздуха

Ввод исходных данных для расчёта проводится в соответствующих «диалоговых окнах», в качестве примера на рисунке 3 представлено «окно» ввода свойств турбины низкого давления (ТНД).

Полное и сокращенное название турбины, комментарии <input type="button" value="Настроить >>"/>		Масшт. коэффициенты По G <input type="text" value="1.000000"/> По Пи <input type="text" value="1.000000"/> По КПД <input type="text" value="1.000000"/> По n пр <input type="text" value="1.000000"/>	
Ротор турбины: <input type="text" value="Ротор низкого давления"/>		Экстраполяция характеристик: <input checked="" type="checkbox"/> Разрешить экстрапол. по n пр <input checked="" type="checkbox"/> Разрешить экстрапол. по Пи	
100% физической частоты вращения соответствуют <input type="text" value="10200.00"/> об/мин		Площади для расчета стат. P: F вх (до СА), м ² <input type="text" value="1.000000"/> F вых (за РК), м ² <input type="text" value="1.000000"/>	
- Параметр, используемый в качестве Пи <input checked="" type="radio"/> Отношение полных давлений p _{в.т} / p _г <input type="radio"/> Отношение полного p _{в.т} к статическому p _т		Радиус для расчета Лямбда U Радиус, м <input type="text" value="0.000000E+00"/>	
- КПД турбины с учетом охлаждения <input checked="" type="radio"/> Первичный (по горлу) <input type="radio"/> По зазору перед РК (ни перв., ни эфф.) <input type="radio"/> Эффективный (весь расход)		Дополнительные опции <input type="checkbox"/> Расчет альтерн. КПД (горнозит)	
- Влияние режима охлаждения <input checked="" type="radio"/> Не учитывается <input type="radio"/> Учитывается		Работа прокачки охлаждения <input checked="" type="radio"/> Не учитываем <input type="radio"/> Константа <input type="radio"/> Синт. параметр	
- Расчет приведенной ЧВ <input checked="" type="radio"/> Как n / Sq(T _г), [об/мин] / [K ^{0.5}] <input type="radio"/> Как Лямбда U на радиусе		Сигма СА (от входа до горла) <input type="button" value="Настроить >>"/>	
- КПД <input type="button" value="Настроить >>"/> <input type="button" value="Сведения >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
Параметр расхода <input type="button" value="Настроить >>"/> <input type="button" value="Сведения >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
Частоту вращения приводим по температуре в: <input type="radio"/> осевом зазоре перед рабочим колесом <input checked="" type="radio"/> горле соплового аппарата <input type="radio"/> сечении перед сопловым аппаратом		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
- Доп. потери r [*] из-за закрутки <input type="button" value="Настроить >>"/> <input type="button" value="Сведения >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
Угол закрутки на выходе (0-осевой) <input type="button" value="Настроить >>"/> <input type="button" value="Сведения >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
Лямбда на выходе <input type="button" value="Настроить >>"/> <input type="button" value="Сведения >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
- Учитывать влияние чисел Рейнольдса на характеристики <input type="radio"/> Нет <input checked="" type="radio"/> Отдельно для КПД и G <input type="button" value="Настроить >>"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
- Учитывать изменение КПД и Gz турбины при изменении полной температуры в горле СА Учитывать влияние температуры на: <input type="checkbox"/> КПД <input type="checkbox"/> Gz		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>		<input type="text" value="0.000000E+00"/>	

Рисунок 3- Окно ввода данных свойств ТНД

Программа позволяет рассчитывать как дроссельные, так и высотно-скоростные характеристики.

На рисунке 4 в качестве примера представлены результаты расчёта высотно-скоростных характеристик ТРДДФсм в виде зависимости тяги по внутренним параметрам от числа M полета.

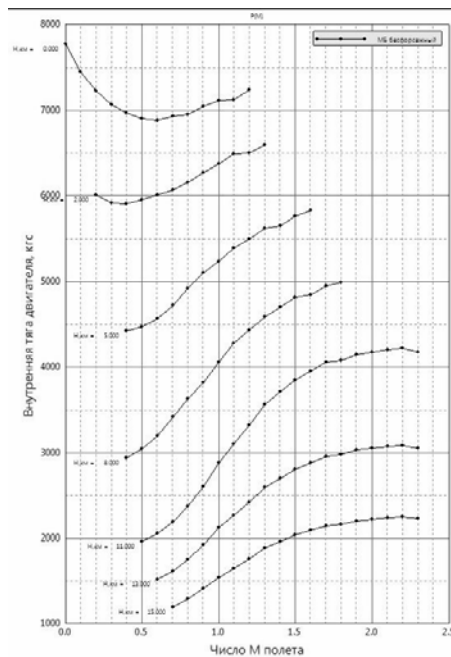


Рисунок 4- Результат расчета ВСХ

ВЫВОДЫ

- В качестве базы программного комплекса для проведения расчётов параметров рабочего процесса и характеристик ГТД в учебном процессе Московского авиационного института выбран программный комплекс ThermoGTE.
- При проведении параметрического анализа схем ГТД в данном ПК могут быть использованы как обобщённые характеристики основных узлов авиационных двигателей, так и их экспериментальные характеристики.
- Программа ThermoGTE имеет простой интерфейс, позволяющий провести расчёт параметров ГТД на расчётном режиме и исследовать характеристики двигателей пользователями с различным уровнем теоретических знаний.
- Полученные значения выходных параметров по желанию пользователя могут быть представлены в виде различных графических зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Горюнов, И.М. Направления развития современных математических моделей рабочих процессов газотурбинных двигателей / И.М. Горюнов, О.И. Болдырев // Современные проблемы науки и образования, 2011. № 6.
- 2 Кузьмичёв, В.С. Сравнительный анализ автоматизированных систем проектирования газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 17. № 6 (3), 2015. – С 644-656.
- 3 Лещенко, И.А. Новаторские решения в подготовке математических моделей авиационных ГТД на основе программного комплекса UNI_MM / И.А. Лещенко, М.Ю. Вовк // Материалы секции 15. Симпозиум, посвященный памяти академика Б.А. Стечкина, 2015. – С. 463-465.
- 4 Нечаев, Ю.Н. Авиационные турбореактивные двигатели с изменяемым рабочим процессом для многорежимных самолетов / Нечаев Ю.Н., Кобельков В.Н., Полев А.С. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.
- 5 Ржавин Ю.А., Емин О.Н., Карасев В.Н. Лопаточные машины двигателей летательных аппаратов. Теория и расчет: Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008.- 700 с.: илл.
- 6 Федоров Р.М. Характеристики осевых компрессоров. – Воронеж: Изд. центр «Научная книга», 2015. - 220 с.: илл.