

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Горюнов И.М.¹, Болдырев О.И.²

¹ ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12) gorjunov@mail.ru

² ОАО «Научно-производственное предприятие «Мотор»
Уфа, Россия (450039, г. Уфа, ул. Сельская-Богородская, 2) boldyrevoi@rambler.ru

В статье проведён системный анализ возможностей наиболее распространённых математических моделей для термодинамических расчётов авиационных ГТД. Рассмотрены основные методические допущения и ограничения, присущие этим моделям. Сформированы основные требования и направления совершенствования универсальной базовой математической модели ГТД. Обоснована необходимость создания единой для всех предприятий авиадвигателестроительной отрасли математической модели рабочего процесса ГТД для проектировочных термодинамических расчётов. Единая для предприятий базовая математическая модель должна применяться для расчётов при совместном проектировании, выпуске технических предложений, эскизных и конкурсных проектов, что позволит устранить существующие, обусловленные методическими особенностями, различия в результатах расчётов и объективно оценивать варианты предлагаемых решений.

Ключевые слова: термодинамический расчёт, газотурбинные двигатели, энергетические установки, математическое моделирование.

DEVELOPMENT TRENDS OF MODERN MATHEMATICAL MODELS OF WORKING PROCESSES OF GAS-TURBINE ENGINES

Gorynov I.M.¹, Boldyrev O.I.²

¹ Ufa State Aviation Technical University
Ufa, Russia (450000, Ufa, K. Marxstr, 12) gorjunov@mail.ru

² Joint-stock company «Scientific-and-production enterprise "MOTOR"
Ufa, Russia (450039, Ufa, Selskaya-Bogorodskayastr, 2) boldyrevoi@rambler.ru

In the article the system analysis of capabilities of the most widespread mathematical models for thermodynamic calculations of air turbine engines is carried out. The main methodical assumptions and the limitations inherent in these models are considered. The main requirements and directions of perfection of universal base mathematical model of a turbine engine are generated. Necessity of creation unified for all enterprises aircraft engines building branches of mathematical model of working process of a turbine engine for designing thermodynamic calculations is proved. Unified for the enterprises the base mathematical model should be applied to calculations at joint designing, extension of technical proposals, initial and competitive projects that allows to eliminate existing, caused by methodical features, distinctions in results of calculations and objectively to estimate versions of offered solutions.

Keywords: thermodynamic calculation, gas-turbine engines, power installations, mathematical modelling.

В сложившейся практике проектировочных термодинамических расчётов газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного и наземного применения используется широкая гамма программных продуктов, разработанных отраслевыми конструкторскими бюро (КБ) и институтами. Все они обладают примерно одинаковыми функциональными возможностями, характеристиками и методической основой.

Определение математической модели как «совокупности констант и соотношений, т.е. формул, уравнений, неравенств и логических условий, которые однозначно связывают вектор параметров, включающий функцию цели и функциональные ограничения, с варьируемыми параметрами, внешними и начальными условиями» дано в [5]. Данное определение наиболее полно характеризует математическую модель ГТД.

Под универсальностью математической модели подразумевается её способность к описанию практически любых реальных схем ГТД и ГТУ. Универсальность математической модели достигается следующими методами. Первый метод заключается в применении принципа декомпозиции (модульности) схемы ГТД, состоящей из модулей узлов. Каждый модуль выполняет функции в соответствии с рабочими процессами, происходящими в соответствующем узле. Для унификации информационного обмена между модулями формируются чётко структурированные каналы передачи информации. Второй метод заключается в применении составных частей общей модели (подпрограмм), каждая из которых отвечает за расчёт одной определённой схемы ГТД.

Под комплексностью математической модели подразумевается её способность реализации широкого круга расчётных задач, полностью удовлетворяющего практическим потребностям современных КБ.

Результаты анализа существующих математических моделей

Большинство отечественных программ для термодинамических расчётов ГТД (такие, как программы ЦИАМ, ГРАД, АСТРА, ОГРА, DVIGwT и др.) основаны на ряде единых методических допущений, упрощающих моделирование реальных процессов, протекающих в ГТД:

- изобарная теплоёмкость рабочего тела зависит только от температуры, при этом термическая диссоциация и рекомбинация продуктов сгорания не учитывается;
- рабочие тела (окислитель, продукты сгорания) подчиняются уравнению состояния идеального газа;
- реальный пространственный поток в проточной части двигателя заменяется осреднённым одномерным потоком (используются среднемассовые параметры), неравномерность поля и пульсации потока не влияют на рабочий процесс;
- подобие режимов сохраняется при неизменных значениях чисел M (в окружном и осевом направлении) (или λ) и Re ; изменение основных параметров узлов при нарушении автомодельности по Re учитывается введением эмпирических поправок (последнее не всегда реализуется из-за отсутствия соответствующих данных);
- геометрическое подобие сохраняется во всех условиях эксплуатации;
- влияние двухконтурности на характеристики вентилятора, подпорных ступеней и компрессора не учитывается;
- модель камеры смешения – цилиндрическая, с полным смешением потоков на срезе смесителя;
- отборы (подводы) рабочего тела не оказывают влияния на характеристики компрессора и турбины;
- расчёт неустановившихся режимов осуществляется с учётом только инерционности роторов;
- не учитывается разность потенциальных энергий газа для любых произвольных сечений;
- различные виды потерь учитываются эмпирическими коэффициентами и зависимостями (характеристиками);
- при смешении охлаждающего воздуха с основным потоком газа учитывается только уравнение энергии;
- не учитывается нестационарность тепловых процессов; энергообмен с внешней средой через стенки корпуса двигателя отсутствует;
- при расчёте турбины учитывается работа части охлаждающего воздуха, поступающего на пленочное охлаждение первого соплового аппарата, с учётом снижения температуры и без потерь полного давления;
- тепловые потери полного давления в форсажной камере определяются в предположении о постоянном сечении камеры.

Этот основной набор допущений является общепринятым для отечественных программ. Направления совершенствования современной математической модели заключаются в приближении вышеперечисленных допущений к реальным процессам [2].

Обобщённый анализ возможностей современных математических моделей выполнен по критериям области применения и решаемых задач, формам представления исходных данных, функциональности, комплексности и другим ключевым критериям.

Результат итогового анализа наиболее распространённых и функциональных, с точки зрения проведения проектных термодинамических расчётов, современных математических моделей представлен в таблице 1.

Необходимо отметить, что особенности, указанные в таблице 1, частично учтены в программах, разработанных силами отраслевых КБ для использования в рамках задач этих КБ. Это программы, разработанные и применяемые, например, в ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Климов», ОАО «Кузнецов». Программы эти предназначены, как правило, для расчёта одной фиксированной схемы ГТД и наиболее полно учитывают особенности работы узлов в составе рассматриваемой схемы, методический и экспериментальный опыт КБ в данной области. В данной работе они не рассматривались ввиду отсутствия описаний и документации в открытом доступе.

Таблица 1. Сравнительный анализ возможностей современных математических моделей для термодинамических расчётов ГТД

Программа	Программный комплекс ЦИАМ	ГРАД версии 16.2001, КАИ	DVIGwT, УГАТУ	Uni_MM, САТУРН	GasTurbv.11, J. Kurzke	GSP, NLR
1	2	3	4	5	6	7
Принцип построения схемы	Набор готовых схем	Модульная декомпозиция	Модульная декомпозиция	Набор готовых схем	Набор готовых схем	Модульная декомпозиция
Область применения	Авиационные ГТД	Авиационные ГТД, наземные ГТУ	Авиационные ГТД, ГТУ сложных схем	Авиационные ГТД	Авиационные ГТД, ГТУ	Авиационные ГТД
Метод нахождения решения	Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона	Формирование системы уравнений невязок, совместное решение уравнений методом Ньютона – Рафсона	Формирование системы невязок, совместное решение уравнений методом Ньютона	Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона	Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона	Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона
Применяемые топлива	Керосин, метан	Углеводородные произвольного состава, водород	Углеводородные произвольного состава	Углеводородные произвольного состава	Керосин, дизельное, природный газ, водород	Углеводородные произвольного состава
Представление характеристик компрессора и турбины	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмеривания	Типовые и произвольные характеристики узла с возможностью переразмеривания	Типовые и произвольные характеристики узла

Расчёт характеристик ГТД	Дроссельные, высотно-скоростные с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования	Дроссельные, высотно-скоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования, визуальная идентификация	Дроссельные, высотно-скоростные, нагрузочные, климатические	Дроссельные, высотно-скоростные
Расчёт переходных режимов	Есть в квазистационарной постановке	Есть в квазистационарной постановке	Есть в квазистационарной постановке	Есть в квазистационарной постановке	Есть в квазистационарной постановке	Есть в квазистационарной постановке

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Визуальное формирование прочной части, оценка массы и габаритных размеров	Есть в виде отдельной программы	Оценка массы и габаритов	нет	нет	есть	нет
Оценка показателей напряжённости основных узлов и выработки ресурса	нет	нет	нет	нет	есть	нет
Учёт термической диссоциации	нет	нет	нет	Есть в виде добавочной методики	нет	нет
Учёт влияния неравномерности и нестационарности потока за вентилятором	нет	Есть в виде поправок к величинам температуры и давления	Есть в виде поправок к величинам температуры и давления	Есть в виде поправок к величинам температуры и давления	есть	есть
Возможность использования разных характеристик для внутреннего и наружного контуров	нет	Есть при условии разбивки вентилятора на два контура	Есть при условии разбивки вентилятора на два контура	есть		есть
Учёт влияния неравномерности и нестационарности потока по тракту двигателя	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Учёт влияния числа Re	Есть в виде эмпирических зависимостей	Есть в виде эмпирических зависимостей	Есть в виде эмпирических зависимостей	Есть в виде эмпирических зависимостей	есть	
Расчёт многоступенчатых охлаждаемых турбин с промежуточным охлаждением	нет	Возможен при поперечном описании ступеней турбины	Возможен при поперечном описании ступеней турбины	нет	нет	нет

ждением ступеней						
Расчёт компрессора с отбором охлаждения из промежуточных ступеней	нет	Возможен при повенцовом описании ступеней компрессора	Есть в виде учёта доли работы компрессора до каждого отбора	Есть в виде учёта доли работы компрессора до каждого отбора	есть	нет
Расчёт коротких нецилиндрических камер смешения	нет	Возможен при описании методики Заказчика	Возможен при описании методики Заказчика	Возможен при описании методики Заказчика	нет	нет
Расчёт характеристик в составе силовой установки ЛА	нет	По дополнительным зависимостям	По дополнительным зависимостям	По дополнительным зависимостям	есть	нет

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Вычисление дополнительных зависимостей, расширяющих функциональность модели	нет	Вычисление по дополнительным формулам с возможностью использования в программе регулирования	есть	есть	есть	нет
Возможность работы с базами данных проекта	нет	Возможность импорта в формате Excel	С помощью дополнительных программ	есть	нет	есть
Возможность создания пользовательских модулей, расширяющих возможности программы	нет	Есть в виде возможности создания оперативного модуля	Есть при условии обращения к разработчику	Есть при условии обращения к разработчику	нет	нет
Возможность работы в «пакетном» режиме	есть	есть	есть	есть	нет	нет
Возможность создания передаточных моделей	нет	нет	нет	есть	нет	нет
Возможность автоматизации типовых вычислительных операций	нет	нет	нет	есть	нет	нет
Операционная система	MS DOS	MS DOS, MS Windows	MS Windows	MS Windows	MS Windows	MS Windows

Современное состояние проблемы

Программы ЦИАМ [4] и КАИ [6] – наиболее известные и широко применяемые в практике работ КБ. 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 гг. Фактически эти программы являются определяющими в отечественной практике термодинамических расчётов. К настоя-

щему времени накоплен исчерпывающий опыт эксплуатации этих программ, выявлены их достоинства, особенности и недостатки.

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 тоже время на практике наряду с рассмотренными применяются математические модели, разработанные силами самих КБ и включающие в себя методические разработки, полученные в результате опыта расчётно-экспериментальной доводки, многие из которых являются уникальными. Такие методики необходимо объединить в рамках единой базовой математической модели.

Одним из негативных следствий использования различных расчётных систем является наблюдаемое разночтение в оценке основных параметров ГТД, необходимость выполнения поверочных расчётов и согласования математических моделей. Необходимо в принципе исключить подобные нестыковки, что качественно повысит эффективность процесса проектирования. Вышесказанное не исключает возможности дальнейших модификаций и развития такой математической модели, но для совместного проектирования двигателей она должна оставаться единой.

Выводы

В настоящее время не существует математической модели, используемой всеми КБ в качестве базовой. С другой стороны, очевидно, что для группы КБ, входящих в состав отрасли как составных частей единой структуры, такая базовая модель должна существовать. Это позволит исключить затраты на проведение сравнительных расчётов по различным математическим моделям, перевод исходных данных из одной программы в другую и разночтение оценок параметров ТРДД и ТРДДФ, что наблюдается в существующей практике.

Таким образом, вновь разработанная математическая модель, учитывающая вышесказанные особенности, будет своевременной и востребованной в практике термодинамических расчётов в отечественных КБ.

В перечень функций новой математической модели должны войти функции, корректирующие или выводящие на качественно новый уровень возможностей перечисленные методические и программные допущения и ограничения, а также сформированные в виде проекта технического задания требования к современной базовой универсальной математической модели [3].

Единая для предприятий базовая математическая модель должна применяться для расчётов при совместном проектировании, выпуске технических предложений, эскизных и конкурсных проектов, что позволит устранить существующие, обусловленные методическими особенностями различия в результатах расчётов и объективно оценивать варианты предлагаемых решений.

Программная реализация единой базовой математической модели должна иметь средства адаптации к задачам, возникающим в процессе рабочего проектирования и доводки.

Необходимо обеспечить пользователям возможность включения дополнительных алгоритмов, учитывающих особенности схемных решений, характеристик узлов, систем и агрегатов регулирования, опыта конкретного КБ и влияние на процесс дополнительных факторов, выявленных при доводке.

Список литературы

1. Ахмедзянов Д.А., Горюнов И.М., Кривошеев И.А. [и др.] Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw: Учеб.пособие. – Уфа: УГАТУ, 2003. – 162 с.
2. Болдырев О.И. Направления совершенствования и требования к современной математической модели для термодинамических расчётов ГТД [Текст] // Молодой учёный. – 2011. – № 11(34), Т. 1 – С. 31-35.
3. Болдырев О.И. Программное обеспечение для термогазодинамических расчётов ГТД. Научно-технический отчёт о НИР ОАО «НПП «Мотор» № 199ДО-018. – Уфа: ОАО «НПП «Мотор», 2010. – 50 с.
4. Дружинин Л.Н., Швец Л.И. Система программ для определения параметров и характеристик турбореактивных двигателей. Технический отчёт ЦИАМ № 8831. – М.: ЦИАМ, 1979. – 159 с.
5. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
6. Тунаков А.П., Кривошеев И.А., Ахмедзянов Д.А. САПР авиационных ГТД: Учеб.пособие. – Уфа: Изд. УГАТУ, 2005. – 270 с.

Рецензенты:

Гишваров А.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой авиационных двигателей ФБГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа.

Кривошеев И.А., д.т.н., профессор, декан факультета авиационных двигателей ФБГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа.