

НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗЛОЖЕНИЮ ТЕОРИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2006 Б.Г. Мингазов, В.А. Костерин, Г.М. Шалаев, А.М. Турилов, В.Л. Варсегов

Казанский государственный технический университет

Приведен анализ нового подхода к изложению теории воздушно-реактивных двигателей, реализованного в учебнике, созданном авторским коллективом кафедры теории двигателей Самарского государственного аэрокосмического университета.

В рамках международной студенческой олимпиады по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки», посвященной 1000-летию г. Казани, кафедрой «Авиационных двигателей и энергетических установок» Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева 28.11.05 была организована учебно-методическая конференция по обсуждению учебника в 3-х книгах. «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок». Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2. Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики (автор В.В.Кулагин, 616 с.). Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / С.К.Бочкарев, В.С. Кузьмичев и др. под ред. В.В. Кулагина, 462 с. М.: Машиностроение, 2002, 2003, 2005.

Приняли участие около 30-ти высококвалифицированных преподавателей из восьми университетов России и Украины, из них более десяти профессоров и доцентов специалистов по теории двигателей и лопаточных машин.

Специалисты признали целесообразным методически новый подход к изложению материала в учебнике и отметили целый ряд особенностей.

1. Выделение ядра курса – «Основы теории ГТД» – и изложение его в двух книгах: «Основы рабочего процесса» (кн. 1) и «Совместная работа узлов и характеристики выполненного двигателя» (кн. 2).

2. Приняты другие критерии для формирования структуры первой и второй книг «Основ теории ГТД». В первой книге опи-

сан процесс преобразования тепла в работу передвижения летательного аппарата, проанализированы основные закономерности изменения удельных параметров ГТД: ТРД, ТРДД и ТВД – во второй части книги, а ТРДФ и ТРДДФсм – в третьей. Такое разделение двигателей на две группы диктуется методическими соображениями: сравнительный анализ изменения удельных параметров двигателей первой группы, работающих по циклу Брайтона, наиболее целесообразно выполнить "методом работы цикла", хорошо разработанным именно для этих двигателей в школе академика Б.С. Стечкина. А использование "метода работы цикла" для двигателей второй группы, работающих по циклу с двумя подводами теплоты или со смешением потоков, связано с анализом сложных формул и поэтому нецелесообразно. Параметры этих двигателей анализируются в последовательности, принятой для проектного термогазодинамического расчета, который используется как универсальный "метод термогазодинамического анализа". Цикл двигателя, таким образом, принят за критерий формирования структуры первой книги.

Во второй книге получены и проанализированы основные закономерности совместной работы узлов и характеристики для ТРД(Д) с одним управляющим фактором (часть IV) и для ГТД с несколькими управляющими факторами (часть V). Управляющий фактор, таким образом, принят за критерий формирования структуры второй книги.

3. Обобщенное на базе многовального ТРДД(Ф) изложение теории двигателей различных типов и схем: одноконтурные ТРД и турбовинтовые двигатели описаны как частные случаи двухконтурных, одновальные – как частные случаи двухвальных, а ТРДФ – как частный случай ТРДДФсм. Такой под-

ход позволяет провести четкий сравнительный анализ двигателей различных типов и схем, увидеть общие для них закономерности, выделить присущие им особенности.

Подчеркнем, что в учебниках [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 и 20], которые играют важную роль при подготовке квалифицированных кадров, работающих в области проектирования, доводки и эксплуатации авиационных ВРД, материал излагается по типам двигателей, а за основу принят ТРД. Такой подход сложился исторически и имеет определенные преимущества. Однако он не свободен и от недостатков таких, например, как неизбежные повторения, недостаточная полнота освещения теории двухконтурных турбореактивных двигателей, которые получили наиболее широкое распространение и определяют качественно новый этап развития авиационных силовых установок.

Целесообразность перехода от традиционного изложения теории ГТД к обобщенному была осознана специалистами давно – более трех десятилетий тому назад. Однако реализовать такой переход по разным причинам оказалось не просто. Одна из очевидных причин: критерии эффективности турбореактивных и турбовинтовых двигателей разные и поэтому, например, удельный расход топлива по скорости полета для ТРД ($C_{уд}$) и ТВД (C_e) изменяется качественно не одинаково: $C_{уд}$ – увеличивается; C_e – уменьшается. Такое изменение – следствие различия критериев, а не изменения эффективности двигателей. Двигатели «не обобщались» также вследствие того, что в ТРДД гидравлические потери в наружном контуре, как и во внутреннем, было принято относить к циклу и оценивать величиной эффективного КПД, а в ТВД гидравлические потери в движителе оцениваются величиной КПД винта.

Автором введено новое понятие: КПД движителя [10], которым учитываются и потери кинетической энергии и гидравлические потери в движителе. Это позволило получить простые формулы для описания рабочего процесса, одинаково справедливые для ТРД, ТВД и ТРДД, обобщить изложение и упростить его. При таком подходе очень легко показать (гл. 5), что три основных типа ГТД (ТРД, ТВД и ТРДД) как тепловые машины не отличаются друг от

друга. (Кстати понятие работы цикла как разности подведенного в цикле и отведенного тепла, а не приращения кинетической энергии рабочего тела во внутреннем и наружном контурах, представляется с термодинамической точки зрения более убедительным.) А оценка влияния степени двухконтурности на КПД движителя (гл. 6) представляет собой по существу сравнительный анализ удельных параметров двигателей различных типов. (Такому анализу уделяется обычно недостаточное внимание.)

4. Особое внимание в учебнике уделяется термогазодинамическому анализу зависимости от различных факторов удельных параметров проектируемого двигателя (в первой книге) и основных технических данных выполненного двигателя (во второй книге), поскольку такой анализ позволяет, в конечном счете, понять «поведение» двигателя в различных условиях эксплуатации. Освоение этих методов – ключ к пониманию и усвоению теории ГТД; поэтому разработаны как методы такого анализа, так и организация учебного процесса, способствующая их усвоению.

Закономерности изменения параметров в проточной части проектируемого двигателя анализируются, как отмечалось, двумя методами, в том числе в последовательности, принятой для проектного расчета. Автор ставит перед собой цель научить студента составлять алгоритм такого расчета (а следовательно, и анализа) двигателей различных типов и схем. С этой целью изменена форма изложения материала в гл. 8: выводятся основные уравнения, дается пример последовательности расчета простейшего одновального ТРД и некоторые особенности расчета двигателей различных типов и схем. Используя эти материалы, студент составляет в рамках курсовой работы (приложение 1) алгоритм проектного расчета «своего» двигателя (на базе иностранного прототипа).

Задача анализа характеристик выполненного двигателя намного сложнее: при изменении внешних условий или режима работы двигателя изменяются, как правило, все параметры двигателя, в том числе положение рабочих точек на характеристиках компрессоров. Эти изменения оказывают на выходные параметры двигателя в общем

случае влияние разного знака и не всегда есть уверенность в том, какой фактор оказывает преобладающее влияние. Поэтому разработан новый подход, позволяющий однозначно доказать как изменяются выходные параметры двигателя в различных условиях эксплуатации и при различных воздействиях на него.

Прежде всего, проделан общий анализ уравнений совместной работы узлов выполненного ТРДД, справедливый (с небольшим исключением) для двигателей различных типов и схем (гл. 10). От совместной работы узлов сделан переход к линиям совместной работы (для двигателей с одним управляющим фактором), от них к универсальным (обобщенным) характеристикам. Показано (гл. 11), что по обобщенным характеристикам легко получить основные закономерности изменения положения рабочих точек на характеристиках компрессоров и целый ряд приведенных параметров двигателя (разд. 11.3.1 и 11.3.3). Такой подход автор назвал А-методом анализа характеристик двигателя.

Анализ характеристик недостаточно выполнить одним методом, так как это обычно не позволяет получить однозначный вывод об изменении удельных параметров и основных данных двигателя. Кроме того, нужно стремиться подтвердить полученный вывод другим методом анализа, поскольку совпадение результатов, полученных различными методами, является критерием правильности проведенного анализа. Поэтому разработан второй метод анализа (Б-метод), в котором за основу принята методика расчета характеристик выполненного двигателя. С этой целью изложение методов расчета характеристик, как и проектного расчета двигателя, подчинено задаче освоения методов анализа его характеристик (разд. 12.2). Главная особенность разработанного метода заключается в том, что расчет начинается с турбины, поскольку степени понижения давления в турбинах (в отличие от степеней повышения давления в компрессоре) изменяются существенно меньше и их можно принять постоянными. Это достаточно строго на режимах сверхкритического истечения газа из сопла, а на режимах докритического истечения вели-

чины π_T^* (особенно $\pi_{ТНД}^*$), хотя и изменяются, но в абсолютном большинстве случаев не оказывают влияния на закономерности протекания параметров двигателя в зависимости от внешних условий и режимов работы двигателя. И в этом случае автор ставит своей целью научить студента составлять алгоритм расчета (а следовательно, и анализа) характеристик «своего» двигателя, что реализуется в рамках второй курсовой работы по теории двигателей (приложение 6).

5. На базе основ теории и как продолжение ее сформирована третья книга учебника. В ее пяти частях (VI...X), пятнадцати главах (16...30) излагаются некоторые проблемные вопросы теории, расчета и проектирования авиационных двигателей.

6. В шестой части затронуты основы теории выбора параметров рабочего процесса авиационных ГТД и проектирования проточной части. Приводятся результаты расчета влияния параметров рабочего процесса на удельные параметры ТРД (Д) в широком диапазоне их изменения, вплоть до термодинамического насыщения (с привлечением расчетов, выполненных в ЦИАМ), и показаны предельные возможности двигателя, работающего на керосине. Проанализированы закономерности оптимизации параметров ГТД по самолетным критериям эффективности. Изложены методология выбора параметров, некоторые проблемы разработки двигателя, а также методика вариантного проектирования проточной части. Там же приведена разработанная в СГАУ методика оценки технического совершенства двигателя. В учебнике она публикуется впервые и может представлять интерес для специалистов не только авиационного двигателестроения. Разработанные по этим методикам программы применяются в учебном процессе СГАУ.

7. Седьмая часть посвящена современным методам математического моделирования и современным программным комплексам «ГРАД», DVIGw и GasTurb для расчета высотно-скоростных характеристик двигателей различных типов и других термодинамических расчетов, разработанным соответственно в Казанском государственном

техническом университете, в Уфимском государственном авиационном техническом университете и MTU Aero Engines, Germany (Dr. Joachim Kurzke).

8. Большой интерес представляют три главы 23; 24 и 25 (ч.8), в которых освещены основные проблемы газодинамической доводки, приведена методология компьютеризированного термогазодинамического анализа результатов испытаний ГТД и сформулированы основные направления газодинамической доводки двигателя. Описаны методы экспериментального термогазодинамического моделирования на стенде эксплуатационных характеристик авиационных ГТД и рассмотрены примеры конкретного применения их при доводке двигателей. Описаны термогазодинамические методы контроля стабильности параметров серийных ГТД. Проблемы газодинамической доводки излагаются в учебной литературе впервые и представляют большой интерес не только для студентов и аспирантов, но и для специалистов, занимающихся доводкой газотурбинных двигателей.

9. В девятой части анализируются специальные характеристики ГТД. Авторам удалось в небольшом объеме изложить сложные вопросы совместной работы узлов на неустановившихся режимах, проблемы уменьшения времени приемистости, снижения шума и вредных выбросов. В учебнике затронуты также проблемы, связанные с конверсией авиационных двигателей (часть десятая). Анализируются способы повышения КПД таких двигателей в системе энергетических установок. Рассмотрены комбинированные и когенерационные газотурбинные установки. Сделана попытка классификации энергетических установок с приводным ГТД. Эта глава в учебнике также публикуется впервые и в современных условиях представляет особый интерес.

10. В заключение учебника (гл. 30) авторы позволили себе оглянуться назад и осветить некоторые страницы истории создания авиационных двигателей семи основных ОКБ (опытных конструкторских бюро) СССР. Приведены фотографии их создателей, параметры рабочего процесса и основные данные этих двигателей, которые в свое

время были на уровне лучших мировых образцов, а то и лучшими в мире.

11. Практически по каждой теме учебника разработаны контрольные вопросы и задачи, что позволяет организовать систематическое, в значительной мере самостоятельное (под контролем преподавателя) изучение курса, нацеленное на решение большого числа задач различной сложности, включая комплекс задач, связанных с этапами проектирования двигателя.

Проведенная учебно-методическая конференция позволяет сделать вывод, что внедрение обсуждаемого учебника способствует глубокому усвоению теории двигателей, развитию творческих способностей студентов, повышению качества знаний и эффективности учебного процесса.

Список литературы

1. Иноземцев Н.В. Авиационные газотурбинные двигатели: теория и рабочий процесс. М.: Оборонгиз, 1955. 352 с.
2. Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 512 с.
3. Кулагин И.И. Теория газотурбинных реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 512 с.
4. Масленников М.М., Шальман Ю.И. Авиационные газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. 576 с.
5. Нечаев Ю.Н. Законы управления и характеристики авиационных силовых установок. М.: Машиностроение, 1995. 400 с.
6. Теория реактивных двигателей (рабочий процесс и характеристики) / Б.С. Стечкин и др.; Под ред. Б.С. Стечкина. М.: Оборонгиз, 1958. 534 с.
7. Теория воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов и др.; Под ред. С.М. Шляхтенко. М.: Машиностроение, 1975. 568 с.
8. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов и др.; Под ред. С.М. Шляхтенко. М.: Машиностроение, 1987. 568 с.
9. Лукачев В.П., Кулагин В.В. Теория ВРД: основные закономерности рабочего процесса газотурбинных двигателей. – Куйбышев: КуАИ, 1987. – 226 с.

10. Кулагин В.В. Основные закономерности рабочего процесса авиационных ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1975. – 115 с.
11. Кулагин В.В. Совместная работа узлов и характеристики ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1975. – 136 с.
12. Совместная работа узлов многовальных ТРДД и ТРД. Их характеристики. – Куйбышев: КуАИ, 1977. – 96 с.
13. Кулагин В.В. Особенности совместной работы узлов ТРДД (ТРД) с регулируемыми площадями характерных сечений. Их характеристики. – Куйбышев: КуАИ, 1980. – 85 с.
14. Кулагин В.В. Особенности совместной работы узлов турбореактивных двигателей с форсажом. Их характеристики. – Куйбышев: КуАИ, 1980. – 87 с.
15. Кулагин В.В. Теория ВРД: совместная работа узлов и характеристики газотурбинных двигателей. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 240 с.
16. Кулагин В.В. Теория газотурбинных двигателей: Учебник. Кн. 1. Анализ рабочего процесса, выбор параметров и проектирование проточной части. М.: Изд-во МАИ, 1994. 264 с.
17. Кулагин В.В. Теория газотурбинных двигателей: Учебник. Кн. 2. Совместная работа узлов, характеристики и газодинамическая доводка выполненного ГТД. М.: Изд. МАИ, 1994. 304 с.
18. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник. Основы теории ГТД: Кн. 1. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. М.: Машиностроение, 1-е изд. – 2002, 2-е изд. – 2003. 616 с.
19. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / С.К.Бочкарев, И.М.Горюнов, В.С.Кузьмичев и др. Под общ. ред. В.В.Кулагина. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
20. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В.И. Бакулев и др.; Под ред. В.А. Сосунова и В.М. Чепкина. М.: Изд. МАИ, 2003. 688 с.

NEW APPROACH TO THE GTE THEORY EXPOUNDING

© 2006 B.G. Mingazov, V.A. Kosterin, G.M. Shalaev, A.M. Turilov, V.L. Varsegov

Features of GTE theory expounding in the new manual printed in the “Mashinostroenie” publishing house in 2002 and 2005 are stated.