

УДК 629.7.03633(075.8)

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НОВОГО УЧЕБНИКА ПО ТЕОРИИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2009 Б. Г. Мингазов, В. А. Костерин, В. Л. Варсегов

Казанский государственный технический университет

Описаны некоторые особенности учебника профессора В.В. Кулагина, которые характеризуют новую методологию изложения курса.

*Учебник, газотурбинный двигатель, термогазодинамический анализ, совместная работа узлов, характеристики, метод работы цикла, газодинамическая доводка, проектирование проточной части*

Вышла из печати третья книга учебника «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн.3. Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД» / С.К. Бочкарев, И.М. Горюнов, В.А. Григорьев, А.М. Идельсон, Ю.А. Кныш, М.Л. Кузменко, В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, Б.А. Пономарев, А.П. Тунаков, Е.В. Шахматов, J. Kurzke. Под общ. ред. В.В. Кулагина – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с. Первые две книги этого учебника с тем же названием, но с подзаголовком «Основы теории ГТД. Кн.1. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики» (автор В.В.Кулагин) изданы «Машиностроением» в одном томе (616 с.) в 2002 г. и переизданы в 2003 г. Таким образом, можно говорить об учебнике в целом.

Учебник отличается прежде всего методически новым подходом к изложению материала.

1. Автору удалось выделить «Основы теории ГТД» из общей теории авиационных двигателей. Необходимость выделения ядра курса назрела давно и ее следует признать целесообразной.

В свою очередь, основы теории ГТД излагаются, как следует из названия, в двух книгах. Выделение основ теории выполненного двигателя в отдельную (вторую) книгу целесообразно с методической точки зрения, так как анализ характеристик такого двигателя существенно сложнее и принципиально отличается от анализа закономерностей изменения удельных параметров проектируемого двигателя. Это объясняется различным изменением

параметров рабочего процесса и КПД узлов, которые в случае проектируемого двигателя являются независимыми переменными, а в случае выполненного двигателя они – зависимые переменные и определяются из условия совместной работы его узлов. Анализ характеристик двигателя поэтому основан на анализе совместной работы его узлов, который представляет собой совершенно другую задачу, требующую отдельного рассмотрения.

2. Приняты разные критерии для формирования структуры первой и второй книг «Основ теории ГТД». В первой книге описан 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 дви-

гателя, таким образом, принят за критерий формирования структуры первой книги.

Во второй книге проделан общий анализ уравнений совместной работы узлов выполненного двигателя, справедливый (с небольшим исключением) для двигателей различных типов и схем, получены 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. Материал в большинстве глав первой и второй книг изложен обобщенно (и это может быть главное), а за основу принят ТРДД как наиболее общий тип двигателя; одноконтурные ТРД и турбовинтовые двигатели описаны как частные случаи двухконтурных, одновальные – как частные случаи двухвальных, а ТРДФ – как частный случай ТРДДФсм. Такой подход позволяет провести четкий сравнительный анализ двигателей различных типов и схем, увидеть общие для них закономерности, выделить присущие им особенности.

Подчеркнем, что в учебниках [1 - 8], 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 непросто. 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:  $C_{уд}$  – уве-

личивается;  $C_e$  – 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 его эксплуатации. По мнению автора, освоение этих методов – ключ к пониманию и усвоению теории ГТД. И это, по-видимому, самое главное; 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 расче-

та («универсальным методом термогазодинамического анализа»). 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).

Отмечалось также, что задача анализа характеристик выполненного двигателя намного сложнее. Подчеркнем, что 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 зачастую в учебниках можно читать, что, например, по скорости полета удельная тяга снижается  $P_{уд} \approx (c_c - V_{п})$ , поскольку, как показывают расчеты, скорость истечения увеличивается меньше, чем скорость полета. (Остается неясным, почему же снижается удельная тяга двигателя?) 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 (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 величины  $\pi_t^*$  (особенно  $\pi_{тнд}^*$ ), хотя и изменяются, но не оказывают влияния на закономерности 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. Обращает на себя внимание сравнительно небольшое число формул в «Основах теории ГТД». Это следствие обобщенного изложения материала, а также нежелание автора переписывать формулы в каждой теме заново. Например, из формул, полученных для описания работы узлов, формируется по существу алгоритм проектного расчета. Те же формулы используются для описания методики расчета характеристик. В результате методика такого расчета излагается практически без формул (разд. 12.2.2). В десятой главе второй книги

получены 12 уравнений и используются далее для анализа совместной работы узлов двигателей различных типов и схем. В результате в главах 11...15 этой книги почти нет формул (не считая формул приведения).

6. Полезны, с нашей точки зрения, выводы (резюме) по каждой главе. Они помогают студенту сопоставить свою точку зрения о главном содержании темы, которая сложилась у него после ее изучения, с авторской точкой зрения, а также помогают быстрому повторению материала. Выводы – это кирпичики, из которых складывается курс.

7. Практически по каждой теме учебника разработаны контрольные вопросы и задачи, что позволяет организовать систематическое, в значительной мере самостоятельное (под контролем) изучение курса, нацеленное на решение большого числа задач разной сложности, включая комплекс задач, связанных с этапами проектирования двигателя. Такая организация учебного процесса способствует глубокому усвоению теории двигателей, развитию творческих способностей студентов, повышению качества знаний и эффективности учебного процесса.

8. На базе основ теории и как продолжение ее сформирована третья книга учебника. Она представляет интерес не столько в методическом отношении, сколько по существу излагаемого материала. В ней излагаются пять основных проблем теории, расчета и проектирования авиационных двигателей, которые излагаются в пяти (VI...X) частях, пятнадцати (16...30) главах.

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, нацеленная на развитие творческих способностей студентов. Там же приведена раз-

работанная 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.

9. 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 термогазодинамических расчетов, разработанным соответственно в Казанском государственном техническом университете, в Уфимском государственном авиационном техническом университете и MTU Aero Engines, Germany (Dr. Joachim Kurzke). Важно подчеркнуть, что упомянутые программные комплексы изучаются в СГАУ не только теоретически, но и применяются в практике выполнения курсовых работ. Выпускники университета, следовательно, приходят на предприятия, имея опыт работы с современными программными комплексами такого типа и с собственным мнением об их преимуществах и недостатках.

10. Большой интерес представляют три главы 23; 24 и 25 (часть восьмая), посвященные газодинамической доводке двигателя, в том числе в условиях серийного производства. Доводка является наиболее трудоемким и продолжительным этапом создания двигателя. Кроме стендовых, она включает испытания в термобарокамере, летные испытания на летающей лаборатории и на самолете. В указанных главах освещены основные проблемы газодинамической доводки, приведена методология компьютеризированного термогазодинамического анализа результатов испытаний ГТД и сформированы 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 газодинамиче-

ской доводки излагаются в учебной литературе впервые и представляют большой интерес не только для студентов и аспирантов, но и для специалистов, занимающихся доводкой газотурбинных двигателей.

11. В девятой части анализируются специальные характеристики ГТД. Автором удалось в небольшом объеме изложить сложные вопросы совместной работы узлов на неустановившихся режимах, проблемы уменьшения времени приемистости, снижения шума и вредных выбросов.

12. 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.

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 генеральных конструкторов и их двигателей, параметры рабочего процесса и основные данные этих двигателей, которые в свое время были на уровне лучших мировых образцов, а то и лучшими в мире.

В целом выход в свет нового учебника по основам теории и основным проблемам проектирования авиационных газотурбинных двигателей – это большой успех всего коллектива авторов и, прежде всего, основного автора – профессора Самарского государственного аэрокосмического университета Кулагина Виктора Владимировича. Изданный учебник является результатом обобщения его многолетнего опыта и научных поисков, направленных на совершенствование методов изложения и изучения теории авиационных двигателей. Автору удалось, по нашему мнению, не только существенно усовершенствовать методику изложения теории авиационных газотурбинных двигателей и установок, но и получить новые научные результаты, позволяющие обобщить различные схемы двигателей с использованием коэффициента полезного дейст-

вия двигателя, впервые введенного им в теорию газотурбинных двигателей, учитывающего одновременно гидравлические потери при передаче энергии к двигателю и потери кинетической энергии с выходной скоростью относительно Земли.

### Библиографический список

1. Иноземцев, Н.В. Авиационные газотурбинные двигатели: теория и рабочий процесс / Н.В. Иноземцев. -М.: Оборонгиз, 1955. -352 с.
2. Клячкин, А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей / А.Л. Клячкин. -М.: Машиностроение, 1969. -512 с.
3. Кулагин, И.И. Теория газотурбинных реактивных двигателей / И.И. Кулагин. -М.: Машиностроение, 1969. -512 с.
4. Масленников, М.М. Авиационные газотурбинные двигатели / М.М. Масленников, Ю.И. Шальман. -М.: Машиностроение, 1975. -576 с.
5. Нечаев, Ю.Н. Законы управления и характеристики авиационных силовых установок / Ю.Н. Нечаев. - М.: Машиностроение, 1995. -400 с.
6. Стечкин, Б.С. Теория реактивных двигателей (рабочий процесс и характеристики) / Б.С. Стечкин [и др.]; под ред. Б.С. Стечкина. -М.: Оборонгиз, 1958. - 534 с.
7. Акимов, В.М. Теория воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов [и др.]; под ред. С.М. Шляхтенко. - М.: Машиностроение, 1975. -568 с.
8. Акимов, В.М. 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. Теория ВРД: основные закономерности рабочего процесса газотурбинных двигателей / В.П. Лукачев, В.В. Кулагин. – Куйбышев: КуАИ, 1987. – 226 с.
10. Кулагин, В.В. Основные закономерности рабочего процесса авиационных ГТД / В.В. Кулагин. – Куйбышев: КуАИ, 1975. – 115 с.
11. Кулагин, В.В. Совместная работа узлов и характеристики ГТД / В.В. Кулагин. – 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 / В.В. Кулагин. – Куйбышев: КуАИ, 1980. – 85 с.
14. Кулагин, В.В. Особенности совместной работы узлов турбореактивных двигателей с форсажом. Их характеристики / В.В. Кулагин. – Куйбышев: КуАИ, 1980. – 87 с.
15. Кулагин, В.В. Теория ВРД: совместная работа узлов и характеристики газотурбинных двигателей / В.В. Кулагин. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 240 с.
16. Кулагин, В.В. Теория газотурбинных двигателей: учебник. Кн. 1. Анализ рабочего процесса, выбор параметров и проектирование проточной части / В.В. Кулагин. - 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 / В.В. Кулагин. - М.: Изд-во МАИ, 1994. -304 с.
18. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Основы теории ГТД: учебник. В 2 кн./ В.В. Кулагин. - М.: Машиностроение, 2002. -616 с.
19. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок Основы теории ГТД: учебник. 2-е изд. В 2 кн. / В.В. Кулагин - М.: Машиностроение, 2003. -616 с.
20. Кулагин, В.В. 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 / В.В. Кулагин [и др.]. Под общ. ред. В.В.Кулагина. - М.: Машиностроение, 2005. - 464 с.
3. Kulagin I.I. Теория газотурбинных реактивных двигателей. М.: Mashinostroenie, 1969. 512 p.
4. Maslennikov M.M., Shalman Y.I. Aviation gas turbine engines. М.: Mashinostroenie, 1975. 576 p.
5. Nechaev Y.N. Aviation power-plant control programs and characteristics. М.: Mashinostroenie, 1995. 400 p.
6. Jet engines theory (working process and characteristics) / B.S. Stechkin and others; edited by B.S. Stechkin. М.: Oborongiz, 1958. 534 p.
7. Aerojets theory / V.M. Akimov and others; edited by S.M.Shlyakhtenko. М.: Mashinostroenie, 1975. 568 p.
8. Aerojets theory and calculations/ V.M. Akimov and others; edited by S.M.Shlyakhtenko. М.: Mashinostroenie, 1987. 568 p.
9. Lukechev V.P., Kulagin V.V. Aerojets theory: main principles of working process. – Kuibyshev: KuAI, 1987. – 226 p.
10. Kulagin V.V. Main principles of working process of aviation gas turbine engines. – Kuibyshev: KuAI, 1975. – 115 p.
11. Kulagin V.V. Gas turbine engines joint action and characteristics. – Kuibyshev: KuAI, 1975. – 136 p.
12. Joint action of multi-shaft turbojet and bypass engine units. Characteristics. – Kuibyshev: KuAI, 1977. – 96 p.
13. Kulagin V.V. Joint action features of turbojet and bypass engine units with variable-area characteristic sections. Characteristics. – Kuibyshev: KuAI, 1980. – 85 p.
14. Kulagin V.V. Joint action features of turbojet engines with afterburning units. Characteristics. – Kuibyshev: KuAI, 1980. – 87 p.
15. Kulagin V.V. Aerojets theory: units joint action and characteristics of gas turbine engines. – Kuibyshev: KuAI, 1988. – 240 p.
16. Kulagin V.V. Gas turbine engines theory: Manual. Volume 1. Working process analysis, parameters selection and flow-path designing. М.: MAI publishing, 1994. 264 p.
17. Kulagin V.V. Gas turbine engines theory: Manual. Volume 2. Units joint action, characteristics and gas dynamic development. М.: MAI publishing, 1994. 304 p.
18. Kulagin V.V. Aviation engines and power-plants theory, calculations and design.

### References

1. Inozemtsev N.V. Aviation gas turbine engines: theory and working process. М.: Oborongiz, 1955. 352 p.
2. Klyachkin A.L. Aerojets theory. М.: Mashinostroenie, 1969. 512 p.

Manual. Gas turbine engines theory fundamentals. Volume 1. Working process and thermodynamic analysis. Volume 2. Units joint action and characteristics. M.: Mashinostroenie, 2002. 616 p.

19. Kulagin V.V. Aviation engines and power-plants theory, calculations and design. Manual. 2<sup>nd</sup> edition. Gas turbine engines theory fundamentals. Volume 1. Working process and thermodynamic analysis. Volume 2. Units joint action and characteristics. M.: Mashinostroenie, 2003. 616 p.

20. Aviation engines and power-plants theory, calculations and design. Manual. Volume 3. Primary problems. First level of designing, gas dynamic development, special characteristics and aviation engines conversion. / Kulagin V.V., Bochkaryov S.K., Goryunov I.M., Kuzmichev V.S. and others. Edited by Kulagin V.V. M.: Mashinostroenie, 2005. 464 p.

## FEATURES OF THE NEW GAS TURBINE AVIATION ENGINES THEORY COURSE

© 2009 B. G. Mingazov, V. A. Kosterin, V. L. Varsegov

Kazan State Technical University

Some features of the new gas turbine aviation engines theory course published by professor Kulagin V.V. are described.

*Aviation engines, theory course, theory, calculations, design*

### Информация об авторах:

**Мингазов Биал Галавтдинович**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей и энергетических установок Казанского технического университета. Тел. (843) 238-44-20. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Область научных интересов: проблемы сгорания топлива в потоке и моделирование процессов в камере сгорания.

**Костерин Валентин Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей и энергетических установок Казанского технического университета. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Область научных интересов: проблемы сгорания топлива в потоке.

**Варсегов Владислав Львович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей и энергетических установок Казанского технического университета. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Область научных интересов: моделирование процессов в камере сгорания.

**Mingazov Bilal Galavtdinovich**, Doctor of Technical Science, professor of Kazan State Technical University chair of engines and power-plants theory. Phone: (843) 238-44-20. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Area of research: in-flow fuel combustion problems, combustion chamber working process simulation.

**Kosterin Valentin Aleksandrovich**, Doctor of Technical Science, professor of Kazan State Technical University chair of engines and power-plants theory. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Area of research: in-flow fuel combustion problems.

**Varsegov Vladislav Lvovich**, Candadat of Technical Science, associate professor of Kazan State Technical University chair of engines and power-plants theory. E-mail: [ming@adeu.kstu-kai.ru](mailto:ming@adeu.kstu-kai.ru). Area of research: combustion chamber working process simulation.