

## ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

© 2011 О.И. Болдырев<sup>1</sup>, И.М. Горюнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «МОТОР», г. Уфа  
<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет

Представлена методика расчёта равновесного состояния гомогенной смеси продуктов сгорания углеводородного топлива. Проведён анализ влияния фактора термической диссоциации компонентов продуктов сгорания на основные параметры авиационного высокотемпературного ГТД.

*Основные параметры ГТД, термическая диссоциация, равновесное состояние, гомогенная смесь.*

### Введение

Одним из направлений совершенствования современных математических моделей ГТД, используемых при проектировочных термодинамических расчётах, является введение расчёта температуры, а также термодинамических свойств гомогенной смеси продуктов сгорания с учётом химически равновесного состояния и термической диссоциации компонентов.

По сравнению с авиационными ГТД четвёртого поколения на двигателях нового поколения температура газа в основной камере сгорания (КС) возросла до 1900...2100 К; при этом температуры 2000...2200 К были достигнуты в форсажных камерах (ФК) предельного форсирования двигателей Р13Ф-300, Р25-300, Д30-Ф6. В проектных расчётах характеристики двигателя (в т.ч. конструктивная прочность горячих узлов) определяются для максимальных значений параметров термодинамического цикла, и точность расчёта температуры газа в определяющих точках цикла должна соответствовать его новому уровню. Одним из основных факторов, уточняющих расчёт процессов в КС и ФК, является учёт диссоциации компонентов продуктов сгорания при температурах 1800...2500 К.

Для расчёта свойств рабочего тела в настоящее время применяется методика ЦИАМ [1, 2], сформированная в 1960-х гг. и основывающаяся на ряде основных допущений:

– не учитывается влияние термической диссоциации газов (далее – диссоциации);

– сгорание топлива – полное при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_{\Sigma} \geq 1,0$ , продукты сгорания – не реагирующая смесь  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (водяного пара),  $\text{O}_2$  и атмосферного азота, объёмный состав которых зависит только от величины  $\alpha$  и состава топлива. При этом критерий Дамкёлера  $Da$ , представляющий собой отношение характерного времени физического процесса к характерному времени химической реакции, равен нулю;

– рабочие тела (воздух и продукты сгорания) представляют собой смесь компонентов, обладающую свойствами идеального газа, с неизменными термодинамическими свойствами, зависящими только от температуры.

Методика учёта фактора диссоциации была создана в 1970-х гг. [3] для расчётов ракетных двигателей. Для термодинамических расчётов авиационных ГТД данная методика не применялась по той причине, что уровень достигнутых и прогнозируемых параметров рабочего цикла ГТД были невысокими, что позволяло пренебрегать учётом влияния диссоциации и отказаться от ряда трудоёмких вычислительных операций, что было существенным для уровня развития вычислительной техники того периода.

Таким образом, можно обоснованно утверждать, что в настоящее время появились предпосылки для использования методики учёта фактора диссоциации в термоди-

намических расчётах ГТД, обусловленные высокими параметрами рабочего цикла проектируемых перспективных двигателей, уточнением сведений по свойствам индивидуальных веществ, содержащихся в современных базах данных, и повышенными требованиями к параметрам современных ГТД.

#### Основные положения методики

В настоящей работе предлагается методика расчёта равновесных состояний гомогенной смеси в процессе сгорания углеводородного топлива произвольного состава в атмосферном воздухе с использованием констант равновесия химических реакций компонентов смеси.

Основа методики заключается в формировании и решении системы уравнений, состоящей из химических уравнений равновесных реакций, уравнений состояния идеального газа, уравнений материального баланса индивидуальных веществ и уравнения закона сохранения энергии.

Число уравнений для констант равновесия будет равно числу проходящих в смеси обратимых химических реакций. В общем случае число независимых уравнений констант равновесия равно разности числа рассматриваемых химических соединений и числа химических элементов, входящих в состав топлива.

Согласно теореме Дюгема равновесное состояние термодинамической системы, исходные массы которой известны, определяется двумя параметрами. Для камеры сгорания такими параметрами являются давление и энтальпия системы. В качестве исходных данных при этом используются элементарный химический состав топлива, воздуха и условия на входе в камеру сгорания.

Методика базируется на следующих, более строгих, чем в [1, 2], допущениях:

- наиболее вероятно, т.е. устойчивому состоянию термодинамической системы соответствует состав, для которого при заданных исходных данных энтропия будет максимальной. Такому состоянию отвечает соотношение парциальных давлений газобразных компонентов, задаваемое значениями констант равновесия обратимых химических реакций, идущих равновесно ме-

жду всеми входящими в продукты сгорания индивидуальными веществами;

- учитываются следующие химические элементы: С, Н, N, O, Ar, S и индивидуальные вещества: Н, Н<sub>2</sub>, ОН, Н<sub>2</sub>О, НО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>, О, О<sub>2</sub>, С, СО, СО<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, Ar, S, SO, SO<sub>2</sub>, наиболее вероятно образующиеся при сгорании углеводородного топлива в воздушной среде. При этом не учитываются вещества групп (NH)<sub>x</sub>, (HNO)<sub>x</sub>, обладающие незначительными объёмными долями (менее  $1 \times 10^{-7}$ ) и (CHO)<sub>x</sub>, образующиеся при  $\alpha_{\Sigma} < 1$ ;

- продукты сгорания – смесь химически реагирующих газов, состав и объёмное содержание которых определяются с учётом диссоциации при постоянном давлении по уравнениям химического равновесия и баланса масс химических элементов (при этом значение *Da* стремится к бесконечности);

- компоненты продуктов сгорания обладают свойствами идеального газа, их изобарная теплоёмкость зависит только от температуры, однако изобарная теплоёмкость смеси в целом зависит также и от уровня давления и тем значительнее, чем интенсивнее процесс диссоциации.

Система уравнений, описывающая термодинамическое состояние продуктов сгорания, состоит из следующих групп:

- уравнения химического равновесия для наиболее вероятных при 1800...2600 К химических реакций. При этом для получения величин парциальных давлений веществ используются константы химического равновесия (четырнадцать уравнений по количеству входящих в систему химических элементов и индивидуальных веществ);

- уравнения свойств смеси идеальных газов (уравнение состояния и уравнение Дальтона);

- уравнения материального баланса химических элементов (шесть уравнений по количеству входящих в систему химических элементов);

- уравнение первого закона термодинамики, выраженное через полные энтальпии топлива, окислителя и продуктов сгорания (уравнение сохранения энергии).

Задача определения равновесного состояния системы сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравне-

ний, содержащих в качестве неизвестных значения парциальных давлений компонентов продуктов сгорания, полной температуры, энтальпии и кажущейся молекулярной массы смеси продуктов сгорания. Таким образом, число уравнений – 23, число неизвестных – 23, при задании условий на входе в камеру сгорания (температур топлива и окислителя и суммарного давления) решение системы, если оно существует, является единственным. Дополнительно введено вычисление термодинамических параметров смеси: изобарной теплоёмкости, энтропии и газовой постоянной, что дополняет систему ещё тремя уравнениями и тремя же формальными переменными, что не усложняет процесс решения системы в целом.

С целью обеспечения верифицируемости результатов расчёта по рассматриваемой методике с ранее опубликованными, термодинамические свойства индивидуальных веществ и сведения по константам равновесия для химических реакций приняты по [4], однако доступны и более современные данные.

Необходимо указать, что для предлагаемой методики выбор химических реакций является условным и произвольным в том смысле, что компоненты продуктов сгорания могут получаться в результате различных химических реакций, в том числе и той, которая выбрана в качестве единственной, тогда как в камере сгорания значительная часть химических превращений происходит в виде многостадийных разветвлённых реакций. Каждой выбранной реакции соответствует константа равновесия с известной зависимостью от температуры [4]. Причём предполагается, что зависимости сохраняются и в случаях, когда реакция идёт в присутствии реагентов, участвующих в других реакциях.

Это предположение соответствует правдоподобной гипотезе о том, что динамическое равновесие смеси всех газов достигается при установлении динамического химического равновесия для каждой их перечисленных реакций.

В предлагаемой методике, в отличие от применявшихся ранее [3], учитывается неравенство температур топлива и окислителя, а также коэффициент полноты сгорания топлива, отличный от единицы. Все перечисленные особенности обуславливают применимость методики для термодинамических расчётов ГТД. Поскольку в результате расчёта определяется количество веществ, составляющих смесь продуктов сгорания, в том числе веществ группы  $(NO)_x$ , как для простых углеводородных, так и для азотосодержащих топлив, то данная методика применима для количественных оценок уровня вредных выбросов в различных условиях сгорания при проведении проектных расчётов.

#### **Реализация методики**

Для предложенной системы уравнений реализован алгоритм решения в виде отдельной программы *Disso* и в качестве элемента математической модели узлов основной и форсажной камер сгорания системы *DVIGwT*. Методика верифицирована по расчётам процесса горения в камерах сгорания ракетных двигателей для сжигания керосина в воздушной среде [5] и показала хорошую сходимость результатов по определению объёмных долей и энтальпии смеси с погрешностью, не превышающей 0,3 % в диапазоне температур от 1800 до 2800 К [6]. При этом общее время расчёта двигателя в целом увеличивается незначительно.

#### **Основные результаты**

Проведён анализ влияния фактора диссоциации на параметры основной и форсажной камер сгорания и на основные параметры высокотемпературного ТРДДФ.

Для основной камеры сгорания выполнены параметрические расчёты с оценкой влияния процесса диссоциации на уровень температуры газа в камере сгорания при изменении температуры воздуха на входе в камеру сгорания  $T^*_в$ , давления в камере сгорания  $p^*_{КС}$  и состава смеси  $\alpha$  (рис. 1).

Также выполнена оценка величин равновесной и «замороженной» (без учёта изменения состава смеси) изобарной теплоёмкости смеси продуктов сгорания (рис. 2).

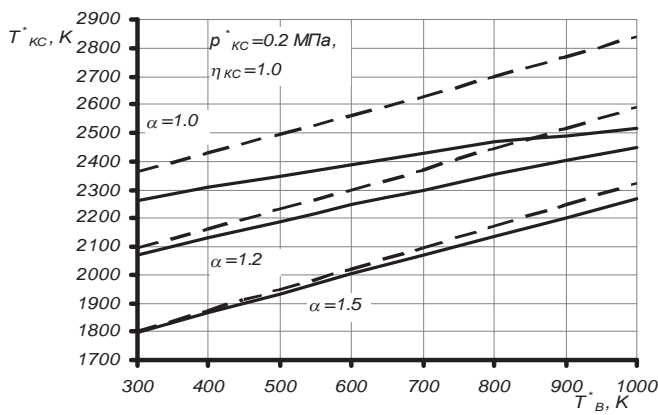
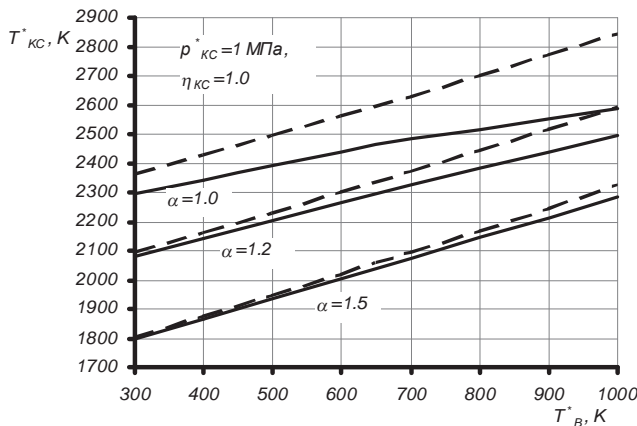
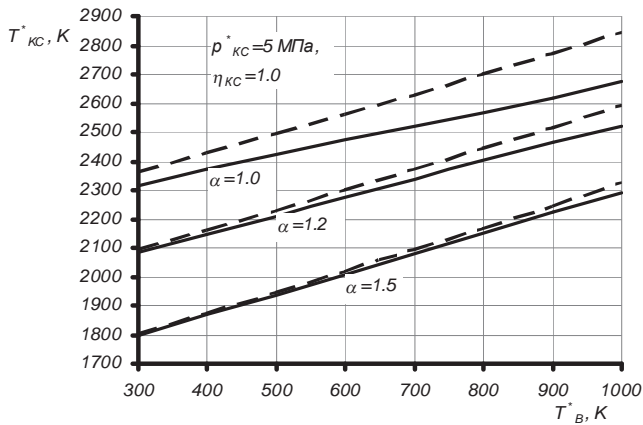


Рис. 1. Зависимости расчётной температуры в камере сгорания для различных температур  $T^*_В$  и давлений  $p^*_{КС}$  поступающего в камеру сгорания воздуха и  $\alpha$  с учётом (сплошная линия) и без учёта (пунктир) диссоциации

Аналогичная серия расчётов проведена для форсажной камеры (ФК) высокотемпературного ТРДДФ. При этом дополнительно учитывалось влияние полётных условий, соответствующих высоте  $H=23$  км и числу Маха  $M=2,0$ , так как в высотных условиях, обуславливающих значительное снижение давления в форсажной камере  $p^*_Ф$ , происхо-

дит активизация процесса диссоциации. Результаты расчётов приведены на рис. 3.

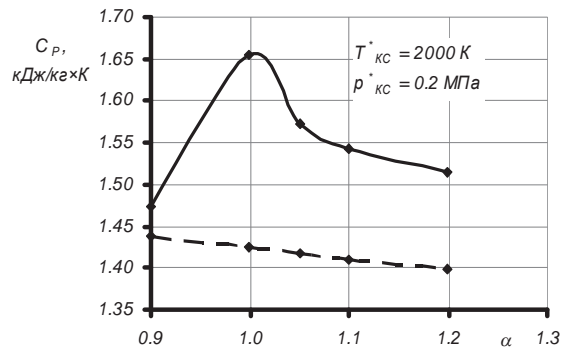
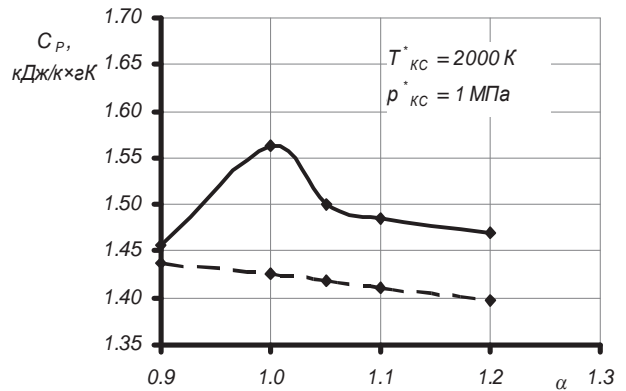
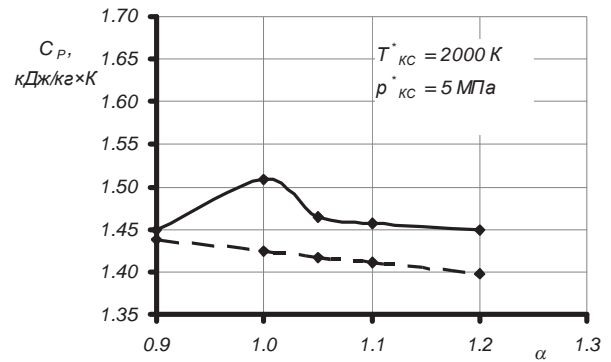


Рис. 2. Зависимости расчётной теплоёмкости продуктов сгорания равновесной (сплошная линия) и «замороженной» (пунктир) для различных  $\alpha$  и  $p^*_{КС}$  поступающего в камеру сгорания воздуха.  $\eta_{КС} = 1$

Выполнена оценка влияния термической диссоциации на основные параметры высокотемпературного ТРДДФ (табл. 1). При этом расчёт равновесного состояния рабочего тела выполнен для основной и форсажной камер сгорания. Для более корректного учёта влияния фактора диссоциации расчёт равновесного состояния предполагается ввести для узлов компрессора, турбины и реактивного сопла. Таким образом, во всех узлах двигателя будут учтены процессы как диссоциации, так и рекомбинации продуктов сгорания.

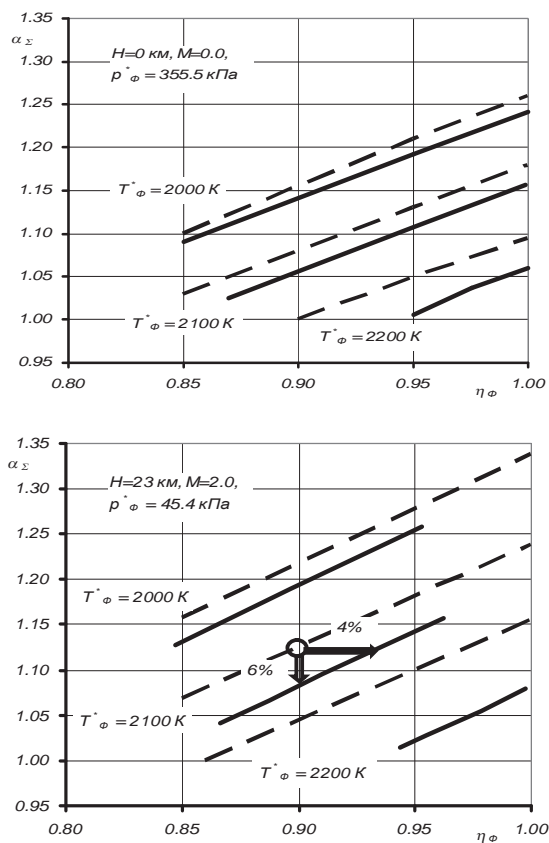


Рис. 3. Зависимость расчётной величины  $\alpha_{\Sigma}$  в форсажной камере высокотемпературного ТРДДФ от температуры газа  $T^*_{\phi}$  с учётом (сплошная линия) и без учёта (пунктир) диссоциации в полётных условиях для различных коэффициентов полноты сгорания топлива  $\eta_{\phi}$

Таблица 1. Основные параметры высокотемпературного ТРДДФ

Условия полёта	$H=0,$ $M=0$	$H=11,$ $M=2$	$H=23,$ $M=2$
$p^*_{\phi}$ , кПа	355,0	402,0	45,0
$\alpha_{\Sigma}$	1,12	1,10	1,12
$\eta_{\phi}$	0,90	0,90	0,90
$T^*_{\phi}$ , К без учёта диссоциации	2040	2143	2106
$T^*_{\phi}$ , К с учётом диссоциации	2025	2114	2068
$\Delta T^*_{\phi}$ , %	0,7	1,4	1,8
$\Delta G_T$ (расход топлива), %	2,4	3,7	4,5
$\Delta P$ (тяги), %	0,7	1,0	1,3

Рассмотренные примеры рабочих режимов ТРДДФ позволяют сделать следующие предварительные выводы.

Если в условиях  $H=0$  км,  $M=0$ , при давлении в форсажной камере  $p^*_{\phi}=355$  кПа для достижения температуры  $T^*_{\phi}=2100$  К при диссоциации необходимо изменить суммарный коэффициент избытка воздуха в форсажной камере  $\alpha_{\Sigma}$  с 1,07 до 1,05 увеличением расхода топлива на 2,1 %, то в условиях  $H=23$  км,  $M=2,0$ ,  $p^*_{\phi}=45$  кПа потребуется изменение  $\alpha_{\Sigma}$  с 1,12 до 1,08 увеличением расхода топлива на 4 % при постоянном коэффициенте полноты сгорания топлива (рис. 3). При таких величинах погрешностей в оценке температуры, суммарного коэффициента избытка воздуха и расхода топлива неизбежно потребуется коррекция программы регулирования как форсажной камеры, так и двигателя в целом.

Дополнительно из анализа результатов расчёта следует, что учёт фактора термической диссоциации требует внесения корректив в оценку полноты сгорания топлива в форсажной камере.

### Выводы

Неучёт фактора диссоциации при термодинамических расчётах высокотемпературных ТРДДФ ведёт к завышению расчётных величин температур газа, что влияет на оценку основных параметров двигателя (погрешность в определении форсажной тяги может достигать 1,3 %, расхода топлива 4,5 %) и температурного состояния теплонапряжённых деталей (в пределах 5 % от величины заявленного ресурса). Кроме того, изменение расчётной величины температуры рабочего тела потребует корректировки программы регулирования ГТД и его характеристик, а также уточнения оценки коэффициента полноты сгорания топлива в форсажной камере.

Полученные результаты подтверждают необходимость учёта термической диссоциации в математической модели авиационных ГТД в алгоритмах расчёта температуры газа.

### Библиографический список

1. Термодинамический расчёт воздушно-реактивных двигателей [Текст] : технический отчёт ЦИАМ № 6186; исполн.: Я.Т. Ильичёв – М.: ЦИАМ, 1969 – 126 с.

2. Руководящий технический материал авиационной техники РТМ 1677-83: Двигатели авиационные газотурбинные: Методы и подпрограммы расчёта термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив. – М.: ЦИАМ, 1983. – 92 с.

3. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст]: справочник. В 4

т. / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1979 – 1982.

5. Алемасов В.Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст]/ В.Е. Алемасов [и др.] В 5 т. – М.: ВИНТИ, 1971 – 1974.

6. Оценка влияния термической диссоциации на температуру продуктов сгорания углеводородного топлива в основной и форсажной камерах сгорания авиационных ГТД [Текст] научно-технический отчёт о НИР ОАО «НПП «Мотор» № 199ДО-017; исполн.: О.И. Болдырев – Уфа, ОАО «НПП «Мотор», 2010.

## ESTIMATE OF KEY PARAMETERS OF A GAS TURBINE ENGINES WITH APPLICATION OF THE MODELLING PROCEDURE OF THE EQUILIBRIUM STATE OF HOMOGENEOUS MIXTURE OF HYDROCARBON FUEL COMBUSTION PRODUCTS

© 2011 O. I. Boldyrev<sup>1</sup>, I. M. Gorynov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock company «Scientific-and-production enterprise" MOTOR", Ufa

<sup>2</sup>Ufa State Aviation Technical University

The paper describes the modelling procedure of an equilibrium state of homogeneous mixture of hydrocarbon fuel combustion products. The analysis of influence of the factor of thermal dissociation of builders of products of combustion on key parameters of an air high-temperature turbine engine is carried out.

*Gas turbine engine key parameters, thermal dissociation, equilibrium state, homogeneous mixture.*

### Информация об авторах

**Болдырев Олег Игоревич**, ведущий конструктор, начальник отдела перспективных разработок ОАО «НПП «Мотор». E mail: [boldyrevoi@rambler.ru](mailto:boldyrevoi@rambler.ru). Область научных интересов: термодинамические расчёты, математическое моделирование рабочих процессов ГТД.

**Горюнов Иван Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета, заведующий НИЛ САПР-Д. Область научных интересов: автоматизация проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.

**Boldyrev Oleg Igoryevitch**, leading designer, head of perspective developments department JSC “SPE “Motor”. E mail: [boldyrevoi@rambler.ru](mailto:boldyrevoi@rambler.ru). Area of research: Thermodynamic calculations, mathematical modelling of working processes of GTE.

**Gorynov Ivan Mikchailovitch**, doctor of technical science, professor of Ufa State Aviation Technical University. Area of research: automation of design, finishings, manufacture and maintenance of a gas turbine engines and power plants.