

О. И. Болдырев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Рассмотрено применение методики расчета температуры и термодинамических свойств гомогенной смеси продуктов сгорания углеводородного топлива в основной и форсажной камерах сгорания с оценкой влияния на основные параметры авиационного ГТД. *Равновесное состояние; термическая диссоциация; основные параметры ГТД*

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

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

Для расчета 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 – нереагирующая смесь CO_2 , H_2O (водяного пара), O_2 и атмосферного азота, объемный состав которых зависит только от величины α

и состава топлива. При этом критерий Дамкелера 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 учета фактора диссоциации была создана в 1970-х гг. [3] для расчетов ракетных двигателей. Для термодинамических расчетов авиационных ГТД данная методика не применялась по той причине, что уровень достигнутых и прогнозируемых параметров рабочего цикла ГТД были невысокими, что позволяло пренебрегать учетом влияния диссоциации, а также отказаться от ряда трудоемких 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 учета фактора диссоциации в термодинамических расчетах 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 расчета равновесных состояний гомогенной смеси в процессе сгорания углеводородного то-

плива 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 вероятному, т. е. устойчивому состоянию термодинамической системы соответствует состав, для которого при заданных исходных данных энтропия будет максимальной. Такому состоянию отвечает соотношение парциальных давлений газообразных компонентов, задаваемое значениями констант равновесия обратимых химических реакций, идущих равновесно между всеми входящими в продукты сгорания индивидуальными веществами;

- учитываются следующие химические элементы: С, Н, N, О, Ar, S и индивидуальные вещества: Н, Н₂, ОН, Н₂О, НО₂, Н₂О₂, О, О₂, С, СО, СО₂, N, N₂, NO, NO₂, N₂O, Ar, S, SO, SO₂, наиболее вероятно образующиеся при сгорании углеводородного топлива в воздушной среде. При этом не учитываются вещества групп (NH)_x, (HNO)_x, (CHO)_x, обладающие незначительными объемными долями (менее 1×10⁻⁷) и образующиеся при α_Σ<1;

- продукты сгорания – смесь химически реагирующих газов, состав и объемное содержание которых определяется с учетом диссоциации при постоянном давлении по уравнениям химического равновесия и баланса масс хи-

мических элементов (при этом значение *Da* стремится к бесконечности);

- компоненты продуктов сгорания обладают свойствами идеального газа, их изобарная теплоемкость зависит только от температуры, однако изобарная теплоемкость 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:

1. 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). Приняты следующие уравнения реакций с учетом констант равновесия:

$$\text{CO}_2 = \text{CO} + 0,5\text{O}_2 \quad K_1(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{0,5}}{p_{\text{CO}_2}}$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \quad K_2(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0,5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{OH} + 0,5\text{H}_2 \quad K_3(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{OH}} p_{\text{H}_2}^{0,5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$0,5\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{HO}_2 \quad K_4(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{HO}_2}}{p_{\text{H}_2}^{0,5} p_{\text{O}_2}}$$

$$\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 \quad K_5(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}_2}}{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}}$$

$$0,5\text{N}_2 + \text{O}_2 = \text{NO}_2 \quad K_6(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{NO}_2}}{p_{\text{N}_2}^{0,5} p_{\text{O}_2}}$$

$$\text{N}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{N}_2\text{O} \quad K_7(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{N}_2\text{O}}}{p_{\text{O}_2}^{0,5} p_{\text{N}_2}}$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{NO} \quad K_8(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{O}_2} p_{\text{N}_2}}$$

$$\text{CO}_2 = \text{C} + 2\text{O} \quad K_9(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{C}} p_{\text{O}}^2}{p_{\text{CO}_2}}$$

$$\text{SO} = \text{S} + \text{O} \quad K_{10}(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{S}} p_{\text{O}}}{p_{\text{SO}}}$$

$$\text{SO}_2 = \text{S} + \text{O}_2 \quad K_{11}(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{S}} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{SO}_2}}$$

$$\text{H}_2=2\text{H} \quad K_{12}(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{H}}^2}{p_{\text{H}_2}};$$

$$\text{O}_2=2\text{O} \quad K_{13}(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{O}}^2}{p_{\text{O}_2}};$$

$$\text{N}_2=2\text{N} \quad K_{14}(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{N}}^2}{p_{\text{N}_2}},$$

где $K_i(T_{\text{ПС}}^*)$ – константы равновесия химических реакций, $T_{\text{ПС}}^*$ – температура смеси продуктов сгорания, К.

2. Уравнения свойств смеси идеальных газов. Уравнение состояния:

$$\sum_{i=1}^{20} \mu_i p_i = \frac{G_{\text{OK}} + G_{\text{T}}}{K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*,$$

где μ_i – молекулярные массы компонент продуктов сгорания, $K_{\text{ПС}}$ – количество молей продуктов сгорания; G_{OK} – расход окислителя в кг/с на входе в камеру сгорания, для основной камеры сгорания он равен расходу воздуха, для форсажной – расходу газа; G_{T} – расход топлива в кг/с, p_i – парциальное давление i -го компонента, МПа; p_{Σ}^* – суммарное давление смеси продуктов сгорания, МПа.

Уравнение Дальтона:

$$\sum_{i=1}^{20} p_i = p_{\Sigma}^*.$$

3. Уравнения материального баланса химических элементов (шесть уравнений по количеству входящих в систему химических элементов):

- баланс углерода

$$p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{C}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{C}} + \overline{\text{C}}G_{\text{T}}}{m_{\text{C}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*;$$

- баланс кислорода

$$p_{\text{OH}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{HO}_2} + 2p_{\text{H}_2\text{O}_2} + p_{\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}} + 2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{NO}} + 2p_{\text{NO}_2} + p_{\text{N}_2\text{O}} + 2p_{\text{SO}_2} + p_{\text{SO}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{O}} + \overline{\text{O}}G_{\text{T}}}{m_{\text{O}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*;$$

- баланс водорода

$$p_{\text{H}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}} + 2p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{HO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{H}} + \overline{\text{H}}G_{\text{T}}}{m_{\text{H}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*;$$

- баланс азота

$$p_{\text{N}} + 2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{NO}_2} + 2p_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{N}} + \overline{\text{N}}G_{\text{T}}}{m_{\text{N}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*;$$

- баланс серы

$$p_{\text{S}} + p_{\text{SO}} + p_{\text{SO}_2} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{S}} + \overline{\text{S}}G_{\text{T}}}{m_{\text{S}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*;$$

- баланс аргона

$$p_{\text{Ar}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{Ar}}}{m_{\text{Ar}}K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*,$$

где G_{OK}^{C} , G_{OK}^{H} , G_{OK}^{O} , G_{OK}^{N} , G_{OK}^{S} , $G_{\text{OK}}^{\text{Ar}}$ – массы углерода, водорода, кислорода, азота, серы и аргона в составе окислителя, кг/с, $\overline{\text{C}}$, $\overline{\text{O}}$, $\overline{\text{H}}$, $\overline{\text{N}}$, $\overline{\text{S}}$ – массовые доли углерода, кислорода, водорода, азота и серы в топливе, m_{C} , m_{O} , m_{H} , m_{N} , m_{S} , m_{Ar} – массовые числа углерода, кислорода, водорода, азота, серы и аргона.

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

$$G_{\text{T}} \cdot i_{\text{T}}^0(T_{\text{T}}) + G_{\text{OK}} \cdot i_{\text{OK}}^0(T_{\text{OK}}^*) = (G_{\text{OK}} + G_{\text{T}}) \cdot i_{\text{ПС}}^0(T_{\text{ПС}}^*),$$

$$i_{\text{ПС}}^0(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{\sum_{i=1}^{10} I_i^0(T_{\text{ПС}}^*) \cdot p_i}{\sum_{i=1}^{10} \mu_i p_i}.$$

В этом уравнении $I_i^0(T_{\text{ПС}}^*)$ – полная энтальпия i -го компонента (с учетом энтальпии образования вещества), кДж/кмоль, $i_{\text{T}}^0(T_{\text{T}})$, $i_{\text{OK}}^0(T_{\text{OK}}^*)$, $i_{\text{ПС}}^0(T_{\text{ПС}}^*)$ – полные энтальпии топлива, окислителя и продуктов сгорания, взятые для соответствующих температур, кДж/кг.

Задача определения равновесного состояния системы сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, 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 теплоемкости, энтропии и газовой постоянной, что дополняет систему еще тремя уравнениями

и тремя же формальными переменными, что не усложняет систему в целом.

С целью обеспечения сравнения результатов расчета по рассматриваемой методике с опубликованными результатами, 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 разветвленных реакций. Каждой выбранной реакции соответствует константа равновесия с известной зависимостью от температуры [4]. Причем предполагается, что зависимости сохраняются и в случаях, когда реакция идет 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 из 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 расчетов ГТД. Поскольку в результате расчета определяется количество веществ, составляющих смесь продуктов сгорания, в том числе веществ группы $(NO)_x$ для простых углеводородных и азотосодержащих топлив, то данная методика применима для количественных оценок уровня вредных выбросов в различных условиях сгорания при проведении проектных расчетов.

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 расчетам процесса горения

в камерах сгорания ракетных двигателей для сжигания керосина в воздушной среде [5] и показала хорошую сходимость результатов по определению объемных долей и энтальпии смеси с погрешностью, не превышающей 0,3 % в диапазоне температур от 1800 до 2800 К [6]. При этом общее время расчета двигателя в целом увеличивается незначительно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

Для основной камеры сгорания выполнены параметрические расчеты 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 α (рис. 1).

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

Аналогичная серия расчетов проведена для форсажной камеры (ФК) высокотемпературного ТРДДФ. При этом дополнительно учитывалось влияние полетных условий, соответствующих высоте $H = 23$ км и числу Маха $M = 2,0$, так как в высотных условиях, обуславливающих значительное снижение давления в форсажной камере $p^*_ф$, происходит активизация процесса диссоциации. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Выполнена оценка влияния термической диссоциации на основные параметры высокотемпературного ТРДДФ (табл. 1). При этом расчет равновесного состояния рабочего тела выполнен для основной и форсажной камер сгорания. Для более корректного учета влияния фактора диссоциации расчет 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.

Рассмотренные примеры рабочих режимов ТРДДФ позволяют сделать следующие предварительные выводы.

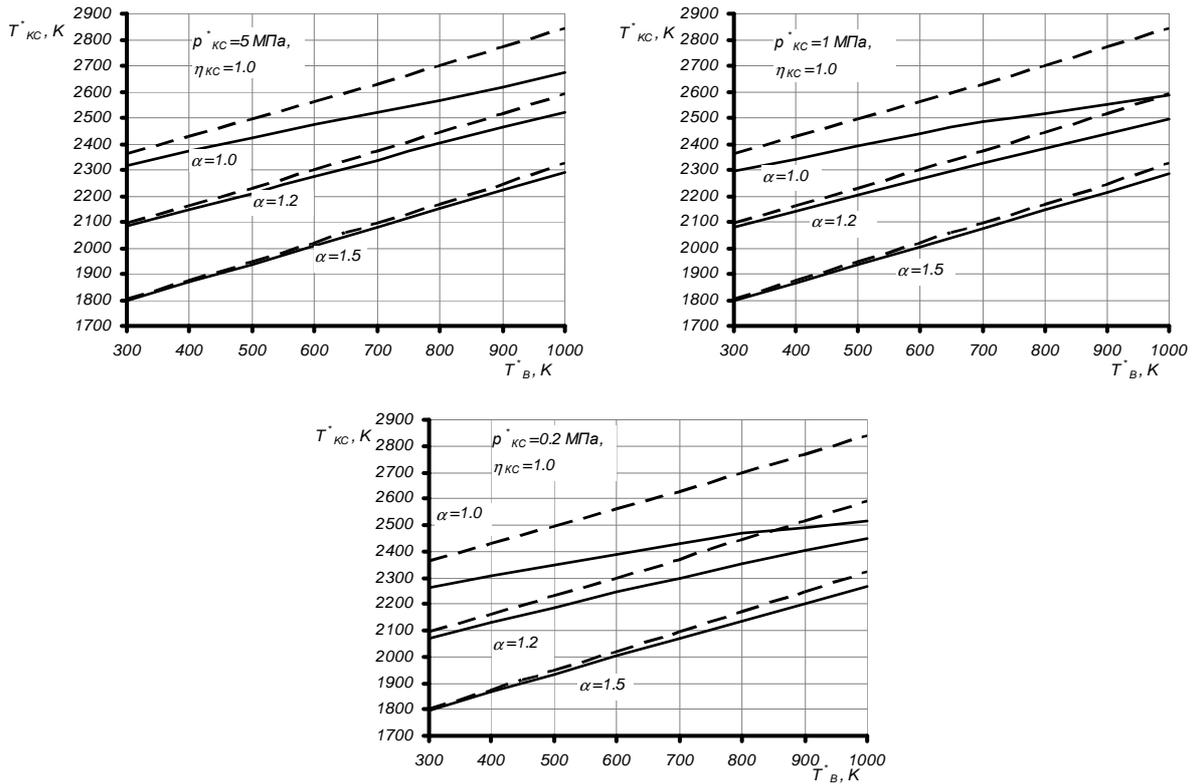


Рис. 1. Зависимости расчетной температуры в камере сгорания для различных температур $T^*_{В}$ и давлений $p^*_{КС}$ поступающего в камеру сгорания воздуха и α с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктир) диссоциации

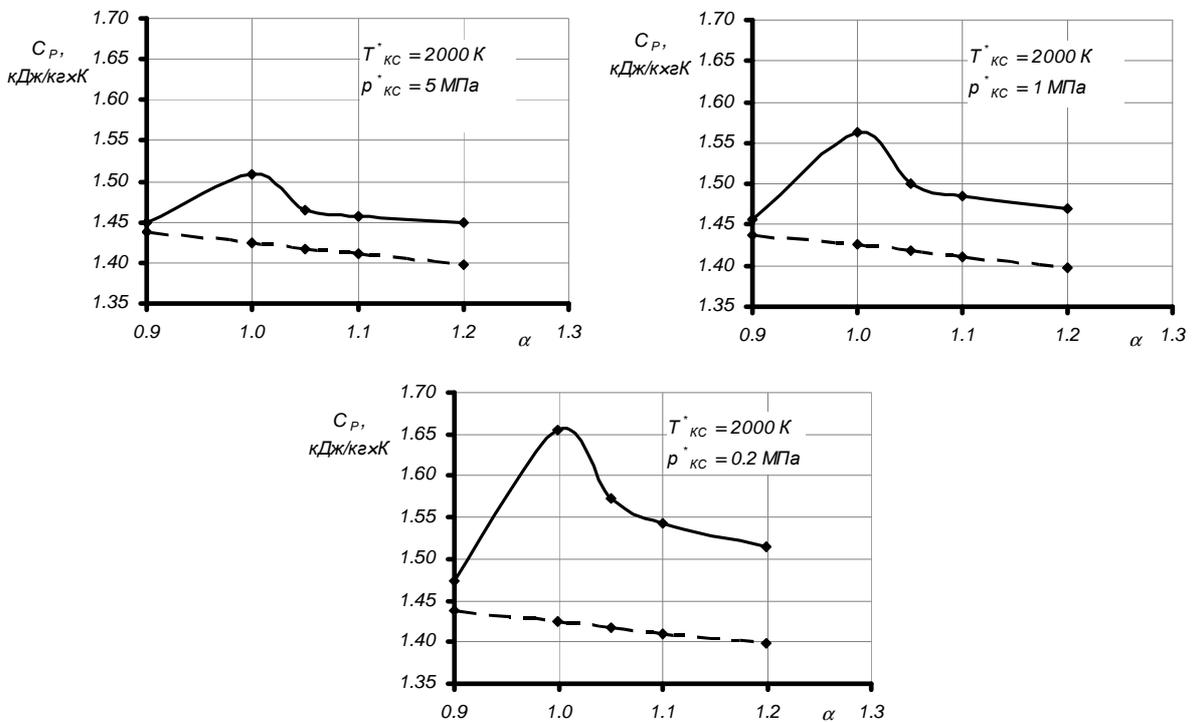


Рис. 2. Зависимости расчетной теплоемкости продуктов сгорания равновесной (сплошная линия) и «замороженной» (пунктир) для различных α и $p^*_{КС}$ поступающего в камеру сгорания воздуха $\eta_{КС} = 1$

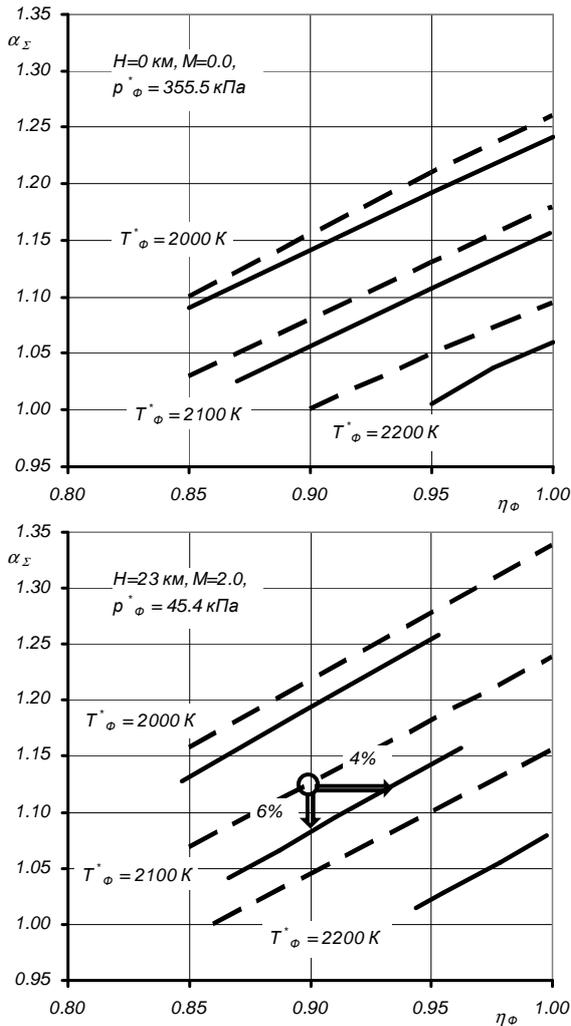


Рис. 3. Зависимость расчетной величины α_z в форсажной камере высокотемпературного ТРДДФ от температуры газа T^*_ϕ с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктир) диссоциации в полетных условиях для различных коэффициентов полноты сгорания топлива η_ϕ

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 α_z 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 α_z 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.

Таблица 1

Условия полета	$H = 0,$ $M = 0$	$H = 11,$ $M = 2$	$H = 23,$ $M = 2$
p^*_ϕ , кПа	355,0	402,0	45,0
α_z	1,08	1,08	1,08
η_ϕ	0,90	0,90	0,90
T^*_ϕ , К без учета диссоциации	2165	2143	2116
T^*_ϕ , К с учетом диссоциации	2132	2114	2071
δT^*_ϕ , %	-1,5	-1,4	-2,1
$\delta C_{уд}$ (удельный расход топлива), %	1,9	2,2	2,5
δP (тяги), %	-1,2	-1,5	-2,3

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

ВЫВОДЫ

Не учет фактора диссоциации при термодинамических расчетах высокотемпературных ТРДДФ ведет к завышению расчетных 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 теплонапряженных деталей (в пределах 5 % от величины заявленного ресурса). Кроме того, изменение расчетной 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 учета термической диссоциации в математической модели авиационных ГТД в алгоритмах расчета температуры газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев Я. Т. Термодинамический расчет воздушно-реактивных двигателей. Технический отчет ЦИАМ № 6186. М.: ЦИАМ, 1969. 126 с.

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

3. **Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П.** Теория ракетных двигателей: Учеб. для вузов / Под ред. В. П. Глушко. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.

4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4 т. / Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1979.

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

6. **Болдырев О. И.** Оценка влияния термической диссоциации на температуру продуктов сгорания углеводородного топлива в основной и форсажной камерах сгорания авиационных ГТД. Научно-технический отчет о НИР ОАО «НПП «Мотор» № 199ДО-017. Уфа, ОАО «НПП «Мотор», 2010.

ОБ АВТОРЕ

Болдырев Олег Игоревич, вед. конструктор ОАО «НПП «Мотор». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. термодинамических расчетов ГТД, матем. моделирования рабочих процессов ГТД.