

УДК 621.452.32

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Болдырев О.И.

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

На основе метода расчётов ракетных двигателей автором предложена математическая модель расчёта термодинамических параметров гомогенной смеси продуктов сгорания углеводородного топлива с учётом термической диссоциации и рекомбинации. Модель построена применительно к рабочим процессам высокотемпературных газотурбинных двигателей на основе констант химического равновесия рассматриваемых реакций. Дополнительно в модели учтён ряд факторов, необходимых для расчёта термодинамического цикла ГТД, а также фактор неравновесности состава смеси в зависимости от времени пребывания рабочего тела в объёме каждого узла двигателя. В таком виде модель применена для расчёта рабочих процессов сжатия, расширения и смещения рабочего тела в узлах двигателя, а также процессов сгорания топлива в основной и форсажной камере сгорания. Применение математической модели в составе системы моделирования рабочих процессов ГТД позволяет проводить термодинамический расчёт ГТД и его узлов с учётом термической диссоциации и рекомбинации.

Ключевые слова: термическая диссоциация, равновесное состояние, продукты сгорания, газотурбинные двигатели.

MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF THERMODYNAMIC PARAMETERS OF THE HOMOGENEOUS MIX OF HYDROCARBONIC FUEL COMBUSTION PRODUCTS IN THE THERMODYNAMIC CYCLE OF GAS-TURBINE ENGINES

Boldyrev O.I.

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

On the basis of a method of calculations of rocket engines the author offers mathematical model of calculation of thermodynamic parameters of a homogeneous mix of combustion products of hydrocarbonic fuel with the account of thermal dissociation and recombination. The model is constructed with reference to working processes of high-temperature gas-turbine engines on the basis of constants of chemical equilibrium of considered reactions. In addition in model a number of the factors necessary for calculation of a thermodynamic cycle of a gas-turbine engine, and also the non-equilibrium mix structure factor depending on propulsive mass residence time in volume of each node of the engine is considered. In such kind the model is applied to calculation of working compression processes, expansion and propulsive mass mixture in engine nodes, and also processes of combustion of fuel combustion chamber and the afterburner. Application of mathematical model as a part of system of modelling of working processes of a gas-turbine engine allows to conduct thermodynamic calculation of a gas-turbine engine and its nodes with the account of thermal dissociation and recombination.

Key words: thermal dissociation, equilibrium condition, combustion products, gas-turbine engines.

Качество математической модели во многом определяет успешность проекта, сроки и материальные затраты на его реализацию. Подходы к созданию математических моделей и принятые в них допущения подвержены изменениям в процессе развития газотурбинных двигателей (ГТД), как в связи с повышением уровня параметров, так и возможно-

стей вычислительных средств. Проектирование эксплуатируемых в настоящее время авиационных ГТД выполнялось с применением математических моделей, основанных на допущении отсутствия диссоциации. Однако, в связи с разработкой проектов перспективных двигателей со значительно увеличенной температурой продуктов сгорания, приближающихся к 2000 К в основной камере сгорания и более 2100 К в форсажной, возникла необходимость учёта факторов диссоциации, рекомбинации и неравновесности на параметры рабочего процесса двигателя.

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

Основные положения

Для расчёта свойств рабочего тела в настоящее время применяется методика ЦИАМ [3], основывающаяся на ряде основных допущений:

- не учитывается влияние термической диссоциации газов (далее – диссоциации);
- сгорание топлива – полное при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \geq 1,0$, продукты сгорания – нереагирующая смесь CO_2 , $\text{H}_2\text{O}(\text{г})$, O_2 и атмосферного азота, объёмный состав которых зависит только от величины α 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. [4] для расчётов ракетных двигателей. Теоретические основы методики базируются на более строгих, чем в [3], допущениях:

- наиболее вероятному, т.е. устойчивому равновесному состоянию изолированной термодинамической системы, соответствует состав, для которого при заданных исходных данных (суммарном давлении p , температуре T и полной энтальпии i) энтропия S 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. При этом условиями устойчивости будут условия $dS \leq 0, dp = 0$;
- продукты сгорания – смесь химически реагирующих газов, состав и объёмное содержание которых определяется с учётом диссоциации и рекомбинации 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 значительно, чем интенсивнее процесс диссоциации.

Для адаптации методики к расчёту рабочих процессов ГТД необходимо внести следующие дополнения:

- набор учитываемых химических элементов целесообразно расширить до следующего: учитываются шесть химических элементов С, Н, N, O, Ar, S с увеличением количества учитываемых индивидуальных веществ до двадцати: Н, H_2 , OH, H_2O , HO_2 , H_2O_2 , O, O_2 , C, CO, CO_2 , N, N_2 , NO, NO_2 , N_2O , Ar, S, SO, SO_2 , наиболее вероятно образующихся при сгорании углеводородного топлива в воздушной среде (вещества S, SO и SO_2 введены для возможности расчёта с топливом, содержащим серу). При этом не учитываются вещества групп $(\text{NH})_x$, $(\text{HNO})_x$, $(\text{CHO})_x$, обладающие незначительными объёмными долями (менее 1×10^{-7}) и образующиеся при $\alpha < 1$;

- в определение энтальпии топлива необходимо внести коэффициент, учитывающий потери располагаемого тепла топлива (степень неполноты сгорания топлива);
- для расчёта форсажной камеры сгорания необходимо внести учёт продуктов сгорания в окислителе;
- для реализации расчёта процессов сжатия, расширения и смешения рабочего тела методику необходимо дополнить алгоритмами нахождения термодинамических параметров смеси по температуре, энтальпии или энтропии смеси (при известном составе топлива, коэффициенте избытка воздуха α и давлении p).

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 [5]. 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 из перечисленных реакций. Кроме того, согласно закону Гесса, тепловой эффект реакции (в нашем случае – реакции горения) не зависит от промежуточных стадий и определяется лишь начальным и конечным состоянием системы. Т.е. если из заданных исходных продуктов можно различными путями получить заданные конечные продукты, то независимо от вида промежуточных реакций суммарный тепловой эффект будет одним и тем же (при условии протекания процесса при постоянном объёме или давлении).

Система уравнений для расчёта термодинамических параметров

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

1. Уравнения химического равновесия для наиболее вероятных при 1800...2600 К химических реакций сгорания углеводородного топлива в воздушной среде с учётом диссоциации и рекомбинации. 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 равновесия:

$$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2 \quad K_1(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{O}_2}^{0,5}}{P_{\text{CO}_2}}; \quad (1)$$

$$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \quad K_2(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0,5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}; \quad (2)$$

$$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{OH} + 0,5\text{H}_2 \quad K_3(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{OH}} P_{\text{H}_2}^{0,5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}; \quad (3)$$

$$0,5\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2 \quad K_4(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{HO}_2}}{P_{\text{H}_2}^{0,5} P_{\text{O}_2}}; \quad (4)$$

$$\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2 \quad K_5(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}_2}}{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}}; \quad (5)$$

$$0,5\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO}_2 \quad K_6(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{P_{\text{NO}_2}}{P_{\text{N}_2}^{0,5} P_{\text{O}_2}}; \quad (6)$$

$$\text{N}_2 + 0,5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} \quad K_7(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{N}_2\text{O}}}{p_{\text{O}_2}^{0,5} p_{\text{N}_2}}; \quad (7)$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO} \quad K_8(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{O}_2} p_{\text{N}_2}}; \quad (8)$$

$$\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{O} \quad K_9(T_{\text{ПС}}^*) = \frac{p_{\text{C}} p_{\text{O}}}{p_{\text{CO}}}; \quad (9)$$

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

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

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

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

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

где $K_i(T_{\text{ПС}}^*)$ – константы равновесия обратимых химических реакций, значения которых в различных формах представления приведены в [5].

В дальнейшем с целью сокращения записи уравнений заменим $K_i(T_{\text{ПС}}^*)$ на K_i .

2. Уравнения свойств смеси идеальных газов:

– уравнение состояния:

$$\sum_{i=1}^{20} \mu_i p_i = \frac{G_{\text{ОК}} + G_{\text{Т}}}{K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*, \quad (15)$$

где $K_{\text{ПС}}$ – количество молей продуктов сгорания;

$G_{\text{ОК}}$ – расход окислителя в кг/с на входе в камеру сгорания, для основной камеры сгорания он равен расходу воздуха, для форсажной – расходу газа;

$G_{\text{Т}}$ – расход топлива в кг/с,

p_i – парциальное давление i -го компонента, МПа;

p_{Σ}^* – суммарное давление смеси продуктов сгорания, МПа;

– уравнение Дальтона (как следствие закона сохранения импульса):

$$\sum_{i=1}^{20} p_i = p_{\Sigma}^*. \quad (16)$$

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

– баланс углерода

$$p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{C}} = \frac{G_{\text{ОК}}^{\text{C}} + \bar{C}G_{\text{Т}}}{m_{\text{C}} K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*; \quad (17)$$

– баланс кислорода

$$p_{\text{OH}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{HO}_2} + 2p_{\text{H}_2\text{O}_2} + p_{\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}} + 2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{NO}} + 2p_{\text{NO}_2} + p_{\text{N}_2\text{O}} + \\ + 2p_{\text{SO}_2} + p_{\text{SO}} = \frac{G_{\text{ОК}}^{\text{O}} + \bar{O}G_{\text{Т}}}{m_{\text{O}} K_{\text{ПС}}} p_{\Sigma}^*; \quad (18)$$

– баланс водорода

$$p_{\text{H}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}} + 2p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{HO}_2} + 2p_{\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{H}} + \bar{H}G_{\text{T}}}{m_{\text{H}}K_{\text{PC}}} p_{\Sigma}^*; \quad (19)$$

– баланс азота

$$p_{\text{N}} + 2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{NO}_2} + 2p_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{N}} + \bar{N}G_{\text{T}}}{m_{\text{N}}K_{\text{PC}}} p_{\Sigma}^*; \quad (20)$$

– баланс серы

$$p_{\text{S}} + p_{\text{SO}} + p_{\text{SO}_2} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{S}} + \bar{S}G_{\text{T}}}{m_{\text{S}}K_{\text{PC}}} p_{\Sigma}^*; \quad (21)$$

– баланс аргона

$$p_{\text{Ar}} = \frac{G_{\text{OK}}^{\text{Ar}}}{m_{\text{Ar}}K_{\text{PC}}} p_{\Sigma}^*; \quad (22)$$

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

$$G_{\text{OK}} = G_{\text{OK}}^{\text{C}} + G_{\text{OK}}^{\text{H}} + G_{\text{OK}}^{\text{O}} + G_{\text{OK}}^{\text{N}} + G_{\text{OK}}^{\text{S}} + G_{\text{OK}}^{\text{Ar}}$$

$\bar{C}, \bar{O}, \bar{H}, \bar{N}, \bar{S}$ – массовые доли углерода, кислорода, водорода, азота и серы в топливе,

$$\bar{C} + \bar{O} + \bar{H} + \bar{N} + \bar{S} = 1,0$$

$m_{\text{C}}, m_{\text{O}}, m_{\text{H}}, m_{\text{N}}, m_{\text{S}}, m_{\text{Ar}}$ – массовые числа углерода, кислорода, водорода, азота, серы и аргона.

Поскольку окислителем может быть как атмосферный воздух, так и смесь воздуха с продуктами сгорания, то последний вариант принимается как более общий, для формирования системы уравнений.

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

$$G_{\text{T}} \cdot i_{\text{T}}^0(T_{\text{T}}) + G_{\text{OK}} \cdot i_{\text{OK}}^0(T_{\text{OK}}^*) = (G_{\text{OK}} + G_{\text{T}}) \cdot i_{\text{PC}}^0(T_{\text{PC}}^*), \quad (23)$$

где

$$i_{\text{PC}}^0(T_{\text{PC}}^*) = \frac{\sum_{i=1}^{20} I_i^0(T_{\text{PC}}^*) \cdot p_i}{\sum_{i=1}^{20} \mu_i p_i}$$

В этом уравнении $I_i^0(T_{\text{PC}}^*)$ – полная энтальпия i -го компонента (с учётом энтальпии образования вещества), кДж/кмоль,

$i_{\text{T}}^0(T_{\text{T}}), i_{\text{OK}}^0(T_{\text{OK}}^*), i_{\text{PC}}^0(T_{\text{PC}}^*)$ – полные энтальпии топлива, окислителя и продуктов сгорания, взятые для соответствующих температур, кДж/кг.

При этом из физического смысла следуют ограничения на знак неизвестных величин – парциальных давлений и температуры:

$$p_i > 0 \text{ и } T_{\text{PC}}^* > 0$$

Задача определения равновесного состояния системы сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений (1) – (23), содержащих в качестве неизвестных значения парциальных давлений двадцати компонентов продуктов сгорания, полной температуры, энтальпии и кажущейся молекулярной массы смеси продуктов сгорания. Таким образом, число уравнений равно 23, число неизвестных равно 23, при задании условий на входе в камеру сгорания (температур топлива и окислителя и суммарного давления) и соответствующих граничных условий решение системы, если оно существует, является единственным.

Необходимая для расчёта полная энтальпия топлива при температуре топлива 298,15 К определена следующим образом.

При температуре стандартного состояния T_0 полная энтальпия топлива $i_T(T_0)$ равна теплоте его образования. Согласно закону Гесса, тепловой эффект реакции $H_U \eta_{KC}$ при неполном сгорании ($\eta_{KC} < 1,0$) и соответствующая ему полная энтальпия топлива вычисляется из уравнения

$$i_T^0(298,15) = H_U \eta_{KC} + \left(\frac{\bar{C}}{12,01} \Delta H_{CO_2}^0 + \frac{\bar{H}}{2,016} \Delta H_{H_2O}^0 + \frac{\bar{N}}{14,007} \Delta H_{NO_2}^0 + \frac{\bar{S}}{32,066} \Delta H_{SO_2}^0 \right),$$

где $\Delta H_{CO_2}^0 = -3935100$ кДж/кг, $\Delta H_{H_2O}^0 = -241814,0$ кДж/кг, $\Delta H_{NO_2}^0 = 341920$

кДж/кг, $\Delta H_{SO_2}^0 = -2968100$ кДж/кг – энтальпии образования CO_2 , $H_2O(g)$, NO_2 , SO_2 при $T_0 = 298,15$ К по данным [3] с учётом содержания в топливе азота и серы.

Для определения термодинамических параметров смеси добавим вычисление изобарной теплоёмкости, энтропии и газовой постоянной по известным формулам, что дополняет систему несколькими уравнениями и таким же количеством формальных переменных, что не усложняет систему в целом.

Таким образом, после решения системы уравнений мы получаем все термодинамические параметры рабочего тела, необходимые для дальнейшего термодинамического расчёта ГТД.

Необходимость учёта неравновесности состава в зависимости от времени пребывания рабочего тела в объёме узла

При расширении рабочего тела в турбине и реактивном сопле ГТД происходит снижение температуры потока. При этом, если в конечной точке расширения моделировать равновесное состояние для конечной температуры, то необходимо понимать, что для этой точки полностью завершены все рассматриваемые реакции диссоциации и рекомбинации. Принимая во внимание очень малое время пребывания рабочего тела в объёме узла, значительно меньшее, чем скорость протекания многих из рассматриваемых реакций (1-14), необходимо параметры турбины и сопла моделировать по «замороженному» состоянию на входе, т.к. на выходе узла равновесное состояние не успеет установиться, и его моделирование по конечной температуре расширения приведёт к значительным погрешностям. А для реакций с наибольшим временем протекания (1, 2, 3, 6) «замороженное» состояние необходимо принимать по параметрам на выходе из камеры сгорания.

Это означает, что расчёт равновесного состояния происходит для процессов сгорания топлива в основной и форсажной камерах сгорания, а далее для расчёта процессов, происходящих в турбине, смесителе и сопле, расчёт происходит по частично «замороженным» химическим реакциям.

Введение учёта кинетики химических реакций проведём следующим способом.

Пусть за камерой сгорания стоит узел ГТД с индексом У1. При известных размерах узла У1 и скорости потока в осевом направлении определяется время пребывания рабочего тела в пределах узла t_{y1} , следующего за камерой сгорания. Также при данной температуре известно время прохождения каждой из рассматриваемых реакций t_{pi} или скорости реакции $\frac{dr_i}{dt}$. Если выполняется условие

$$t_{y1} < t_{pi},$$

то реакция считается незавершённой и «замороженной» по условиям на входе в узел У1. Далее за узлом У1 следует узел У2. Для него также проверяется условие

$$(t_{y1} + t_{y2}) < t_{pi}$$

при температуре на выходе узла У1. Если условие выполняется, реакция продолжает считаться «замороженной», если же условие не выполняется, реакция считается завершённой и включается в число рассматриваемых в равновесном состоянии реакций. Общий

принцип проиллюстрирован на рисунке 1. Сведения по скоростям протекания реакций приведены в справочной литературе.

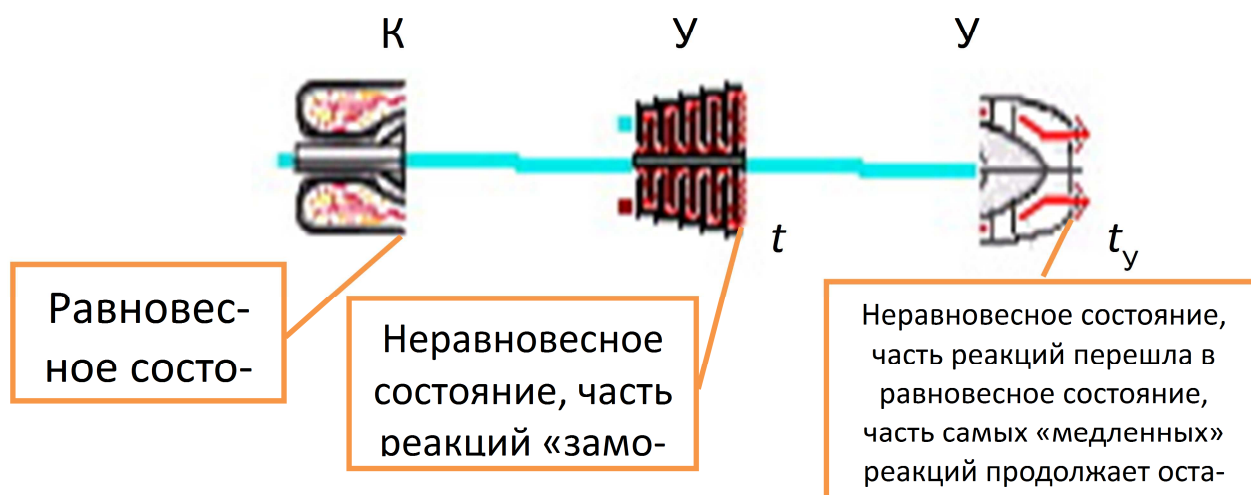


Рисунок 1. Принцип учёта неравновесности состава смеси в зависимости от скорости реакций и времени пребывания рабочего тела в объёме узла

После определения параметров равновесного состояния (1-23) происходит поправка термодинамических параметров с учётом неравновесности по указанным выше условиям.

Поскольку уравнения химических реакций, протекающих равновесно, учитывают как диссоциацию, так и рекомбинацию, то в результате расчёта равновесного состояния учитываются оба этих фактора, а фактор неравновесности состава учитывается «замораживанием» отдельных реакций. При этом степень влияния термической диссоциации и рекомбинации будет выше для двигателей большей размерности, для которого объём узлов сравнительно велик и реакции диссоциации и рекомбинации протекают более полно.

Верификация математической модели

Алгоритм решения предложенной системы уравнений реализован в виде отдельной программы Disso, позволяющей проводить тепловые расчёты основной и форсажной камер сгорания. Методика верифицирована по результатам расчёта процесса горения в камерах сгорания ракетных двигателей для сжигания керосина в воздушной среде [1] 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 [2] (рисунок 2). При этом общее время расчёта термодинамических параметров ГТД в целом увеличивается незначительно.

С целью обеспечения сравнения полученных результатов расчёта по рассматриваемой методике с опубликованными в справочной и научной литературе данными, термодинамические свойства индивидуальных веществ и сведения по константам равновесия для химических реакций приняты по [5]. Однако расчёт может быть выполнен с любыми более современными данными.

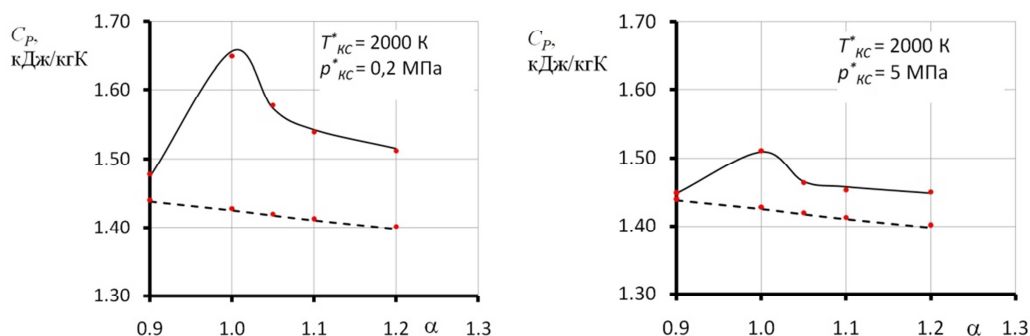


Рисунок 2. Сравнение значений истинной изобарной «замороженной» (пунктир) и равновесной (сплошная линия) теплоёмкости, рассчитанной по методике [3] (точки) и Dissso

Выводы

На основе проверенной методики В.Е. Алемасова создана адаптированная к расчётам рабочих процессов ГТД математическая модель расчёта термодинамических параметров рабочего тела с учётом фактора термической диссоциации и рекомбинации в гомогенной смеси продуктов сгорания углеводородного топлива.

Созданная математическая модель позволяет проводить расчёт процесса сгорания топлива с определением величин температуры, энтальпии, энтропии и теплоёмкости смеси с использованием констант химического равновесия. При реализации возможности расчёта термодинамических параметров смеси по заданной температуре, энтальпии или энтропии смеси обеспечивается реализация набора необходимых функций для расчёта термодинамических процессов сжатия, расширения и смешения рабочего тела в узлах ГТД.

При реализации математической модели учитывается фактор неравновесности, который заключается в возможности «замораживания» отдельных химических реакций для расчётов узлов ГТД с малым, по сравнению со скоростью протекания реакции, временем пребывания рабочего тела в объёме узла. Таким образом, степень влияния термической диссоциации и рекомбинации будет различной для двигателей разной размерности.

Применение математической модели в составе системы моделирования рабочих процессов ГТД позволяет проводить термодинамический расчёт ГТД и его узлов с учётом термической диссоциации и рекомбинации.

Список литературы

1. Алемасов В.Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: В 5 т. – М.: ВИНТИ, 1971–1974.
2. Болдырев О.И. Оценка влияния термической диссоциации на температуру продуктов сгорания углеводородного топлива в основной и форсажной камерах сгорания авиационных ГТД. Научно-технический отчёт о НИР ОАО «НПП «Мотор» № 199ДО-017. – Уфа, ОАО «НПП «Мотор», 2010.
3. 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.
4. Теория ракетных двигателей: Учебник для вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин; / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
5. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник: В 4 т. / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1979–1982.

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.