

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И РАСШИРЕНИЯ  
В КАМЕРАХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С ПОМОЩЬЮ СПРАВОЧНИКА  
„Термодинамические и теплофизические свойства  
продуктов сгорания“**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Составитель В. С. Кондрусев

УДК 629.7.036.5

*Определение термодинамических характеристик процессов горения и расширения в камерах ракетных двигателей с помощью справочника «Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания»: Метод. указания /Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. В. С. Кондрусев. Куйбышев, 1990. 24 с.*

В работе приводится методика определения характеристик рабочего процесса в камерах ракетных двигателей с помощью справочного издания АН СССР «Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания».

Методические указания предназначены для использования в учебном процессе и выполнения курсовых работ и дипломных проектов студентами авиационных специальностей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Рецензент: В. Д. Пак

## I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расчетное определение параметров рабочего тела и процессов, происходящих в камере сгорания и сопле ракетного двигателя, представляет собой сложную задачу. В первую очередь это связано с тем, что продукты сгорания высокоэнергетических топлив представляют собой высокотемпературные многокомпонентные химически реагирующие смеси. Очень высокие температуры, характерные для продуктов сгорания ракетных топлив, обусловлены применением активных окислителей. Следствием высокой температуры является возникновение реакций термической диссоциации и рекомбинации. Определение состава и свойств образовавшихся смесей, а также параметров процессов, осуществляемых с ними — одна из важнейших задач современной термодинамики и теплофизики. Причем расчетно-теоретический путь получения соответствующих данных является пока основным. Он осуществляется на ЭЕМ, обладающих большим объемом памяти и необходимым быстродействием. Существенно затрудняет расчет также и то обстоятельство, что при его проведении требуется использование большого объема термодинамических функций веществ, которые обычно содержатся в справочниках в табличной форме. Непосредственное использование табличных данных приводит к резкому увеличению необходимого объема памяти ЭЕМ и поэтому более удобным является получение необходимых значений термодинамических функций индивидуальных веществ вычислением по полиномам, аппроксимирующим таблицы.

Учитывая большую сложность подобных расчетов, требования предварительной аппроксимации термодинамических свойств индивидуальных веществ, необходимость обеспечения общего подхода при выполнении расчетов и принятии исходных данных, Академией наук СССР выпущено многотомное справочное издание "Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания", в котором содержатся обширные материалы с результатами расчетов большого количества топливных композиций. Назначение этого справочника — обеспечение научных организаций и промышленности точными данными, необходимыми для исследования высокотемпературных процессов и для проектирования установок и аппаратов, использующих в качестве рабочих тел сложные смеси продуктов сгорания.

Материалы, содержащиеся в указанном справочнике, рекомендуются для применения в качестве основных при проектных расчетах и экспериментальных исследованиях ракетных двигателей.

В справочнике принята международная система единиц СИ.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначения, применяемые в справочнике "Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания" не всегда соответствуют ГОСТ 17655-80, однако, во избежание ошибок при пользовании справочным материалом, в настоящих методических указаниях сохранены обозначения, используемые в справочнике:

- $a$  - скорость звука;
- $\alpha_{ox}$  - коэффициент избытка окислителя;
- $\alpha_p$  - изобарный коэффициент расширения;
- $\beta$  - расходный комплекс;
- $\beta_t$  - изотермический коэффициент сжатия;
- $c_p$  - удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении;
- $\epsilon = \frac{R_{ce}}{p}$  - степень расширения по давлению;
- $F$  - площадь;
- $\bar{F} = \frac{F}{F_n}$  - относительная площадь, геометрическая степень расширения сопла;
- $f = \frac{F}{m}$  - удельная площадь;
- $g$  - массовая доля;
- $J, I$  - удельная энтальпия: мольная и массовая соответственно;
- $J_3$  - удельный импульс;
- $K_1^0$  - массовый стехиометрический коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $K_1$  - массовый коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $K_2^0$  - объемный стехиометрический коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $K_2$  - объемный коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $\alpha_0$  - мольный стехиометрический коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $\alpha$  - мольный коэффициент соотношения компонентов топлива;
- $\chi = \frac{c_p}{c_v}$  - отношение удельных теплоемкостей;
- $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;
- $M$  - число Маха;
- $\dot{m}$  - секундный расход рабочего тела;
- $\mu$  - молекулярная масса;
- $n$  - показатель изэнтропии;

- $\eta$  - коэффициент динамической вязкости;
- $P$  - тяга;
- $p$  - давление;
- $R_0$  - универсальная газовая постоянная;
- $R$  - газовая постоянная;
- $\rho$  - плотность;
- $S, s$  - удельная энтропия: молярная и массовая соответственно;
- $T$  - температура;
- $v$  - удельный объем;
- $W$  - скорость потока;
- $Z$  - массовая доля вещества в конденсированном состоянии.

### И н д е к с ы

- $г$  - горючее;
- $ок$  - окислитель;
- $т$  - топливо;
- $п$  - параметры в пустоте (верхний индекс);
- $о$  - параметры торможения;
- $f$  - параметры нереагирующей смеси;
- $к$  - параметры на входе в камеру;
- $с$  - параметры на входе в сопло;
- $*$  - параметры в критическом сечении сопла;
- $а$  - параметры в выходном сечении сопла.

### 3. РАСПОЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА В СПРАВОЧНИКЕ

Справочник содержит 10 томов. В первом томе излагаются материалы, относящиеся к методам расчета термодинамических и теплофизических свойств продуктов сгорания, программам расчета на ЭВМ, оценке точности результатов, форме представления и способам использования справочных данных. Специальная глава справочника посвящена методике экстраполяции и интерполяции термодинамических параметров. Имеется также раздел, посвященный учету реальных свойств систем.

В последующих томах содержатся конкретные материалы по различным топливным композициям. При группировании справочника была положена в основу классификация по родственным окислителям, поскольку именно окислитель обычно является компонентом, определяющим особенности топливной композиции.

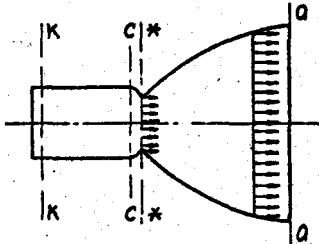
## Содержание томов справочника

- Том I - методы расчета .  
 Том II - топлива на основе кислорода .  
 Том III - топлива на основе кислорода или воздуха .  
 Том IV - топлива на основе четырехоксида азота .  
 Том V - топлива на основе азотной и хлорной кислот, а также растворов, содержащих в своем составе четырехокись азота .  
 Том VI - топлива на основе перекиси водорода .  
 Том VII - топлива на основе фтора .  
 Том VIII - топлива на основе фторных окислителей .  
 Том IX - топлива  $Al + H_2O$  ,  $Be + H_2O$  ,  $Li + H_2O$  и данные по разложению водорода и перекиси водорода .  
 Том X (книга I) - двухкомпонентные композиции, которые могут рассматриваться как возможные (перспективные) топлива .  
 Том X (книга 2) - многокомпонентные топливные композиции (суспензии, растворы и др.) на основе водорода и гидразина .

## 4. ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ТОПЛИВ В СПРАВОЧНИКЕ

Продукты сгорания в камере сгорания рассматриваются как равновесная смесь, полученная после завершения неравновесного и необратимого процесса горения. Полагается, что этот процесс проведен при постоянном давлении, адиабатно и при полном

(100% -ом) выделении тепла на участке камеры сгорания. По поперечному сечению камеры параметры однородны. Скорость рабочего тела в пределах камеры сгорания (участок К-С) пренебрежимо мала и принимается равной нулю. Это обуславливает возможность использования следующих соотношений :



Р и с I. Схема камеры двигателя

$$\left. \begin{aligned} \rho_K &= \rho_{K0} = \rho_C = \rho_{C0}, \\ T_C &= T_{C0}. \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

При этом уравнение сохранения энергии, записанное для единицы массы топлива, принимает частную форму

$$i_C - i_T = 0. \quad (2)$$

Расчет горения имеет конечной целью определение параметров продуктов сгорания на входе в сопло. Заданными являются энтальпия топлива, давление в камере сгорания, относительная площадь на входе в сопло  $\bar{F}_c$ . Конечные параметры процесса горения являются исходными для процесса расширения.

Расчет процесса расширения состоит в определении параметров, и в первую очередь температуры и состава рабочего тела в различных сечениях сопла. Процесс считается стационарным и адиабатным, принимается однородность состава и параметров смеси по сечению и одномерность течения. Предполагается отсутствие необратимых явлений. Вместе с адиабатностью последнее предположение обуславливает изэнтропность процесса расширения.

Представленные в справочнике материалы соответствуют полноту равновесному расширению, когда состав продуктов сгорания в каждом сечении сопла определяется уровнями давления и температуры в данном сечении. То есть процесс расширения рассматривается как непрерывная цепь равновесных состояний рабочего тела от начальных условий на входе в сопло до его выходного сечения.

Основным уравнением для идеальной модели процесса расширения является уравнение постоянства энтропии

$$s - s_c = 0, \quad (3)$$

где  $s_c$  и  $s$  — энтропия единицы массы продуктов сгорания на входе в сопло и в любом сечении сопла соответственно.

Кроме равновесного возможны и другие варианты расширения:

- химически замороженное расширение, которое рассматривается как расширение при неизменном составе рабочего тела;
- расширение с внезапным замораживанием, которое представляет собой равновесное расширение до некоторых условий (до заданной температуры или давления) и далее замороженное до выходного сечения сопла.

Параметры процесса в последних двух случаях могут быть определены пересчетом приведенных в справочнике данных по методике, изложенной в § 2 главы 10 первого тома справочника.

Как уже отмечалось, справочник позволяет определить идеальные термодинамические характеристики продуктов сгорания. Действительные процессы в двигателях происходят с заметным отклонением от идеализированных схем, отличаются от расчетных и свойства продуктов сгорания. В реальных условиях имеет место неполнота сгора-

ния, неоднородность параметров по поперечному сечению камеры, течение является неоднородным и неадиабатным, сопровождается различного рода потерями. Для оценки действительных характеристик производится коррекция идеальных величин с учетом конкретных особенностей того или иного двигателя или процесса. Методика перехода от идеальных к реальным характеристикам двигателя излагается в [2].

Основная форма представления справочных данных — табличная. Полная совокупность сведений о продуктах сгорания данной топливной композиции содержится в серии таблиц. Их вид показан на стр. 9 (топливо: кислород + керосин).

Таблицы получены непосредственно с алфавитно-цифрового печатающего устройства ЭВМ. Фотомеханическое воспроизведение таблиц, принятое в справочнике, исключает ошибки, неизбежно возникающие при наборе цифрового материала в типографии.

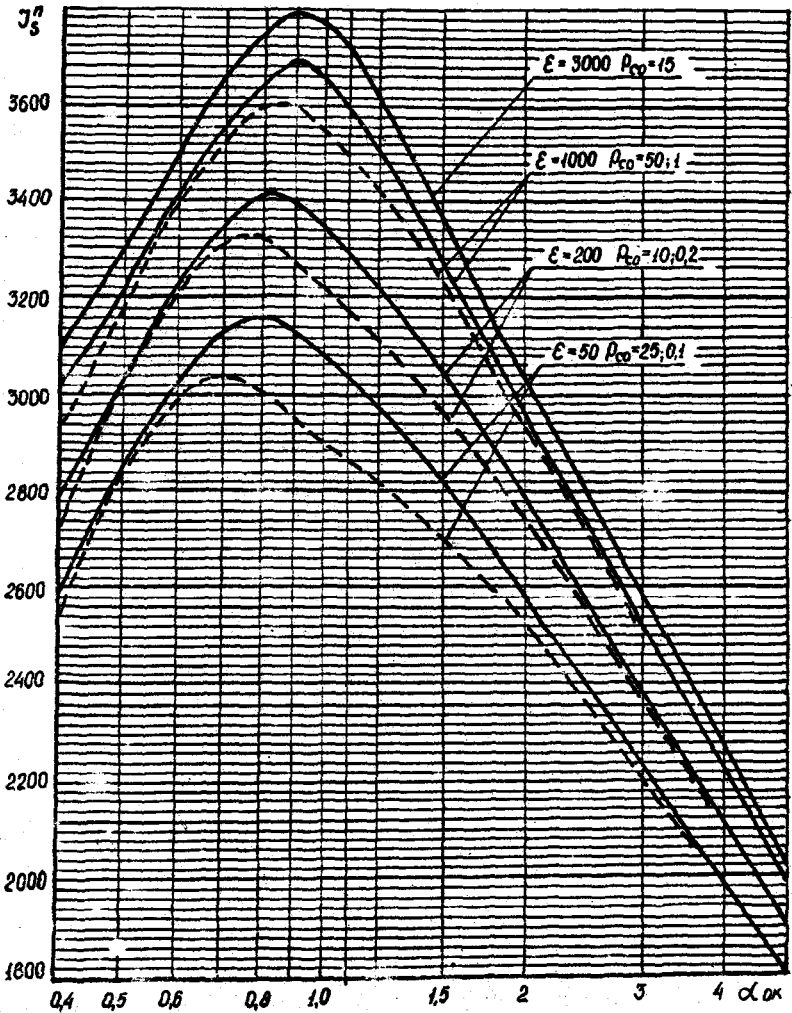
Полная совокупность сведений о продуктах сгорания данной топливной композиции приводится в серии таблиц. Каждая таблица содержит данные при фиксированных значениях коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  и давления на входе в сопло  $p_{со}$ . При давлении  $p_{со}$  охарактеризованы параметры процесса горения, а также процесса равновесного расширения для серии значений степени расширения рабочего тела  $\epsilon$ , среди которых обязательно присутствует критическая степень расширения  $\epsilon_*$  (для критического сечения сопла). Одна таблица содержит информацию для 7...9 сочетаний  $\alpha_{ок}$ ,  $p_{со}$ ,  $\epsilon$ , которые называются "опорными точками". Для определения термодинамических характеристик внутри или вне поля "опорных точек" применяются методы интерполяции или экстраполяции.

Дополнительной формой представления справочных данных является графическая. Она целесообразна как средство наиболее компактного и наглядного представления данных. Графические характеристики необходимы для обозрения всего поля характеристик, а также для экспрессных предварительных оценок при поисковых работах. Вид графической зависимости для топлива кислород + керосин показан на рис. 2 (стр. 10). Давление  $p_{со}$  на графиках указано в  $\text{МН/м}^2$ .

В справочнике для каждой топливной композиции приводятся графики следующих основных зависимостей:







- Рис. 2. Графическая зависимость  $J_s^n = f(\alpha_{ox})$   
для топлива керосин + кислород

удельного импульса в пустоте	$J_s^n = f(\alpha_{ок}, \rho_{со}, \epsilon)$ ;
расходного комплекса	$\beta = f(\alpha_{ок}, \rho_{со})$ ;
температуры в камере сгорания	$T_{со} = f(\alpha_{ок}, \rho_{со})$ ;
относительной площади сопла	$\bar{F} = f(\alpha_{ок}, \rho_{со}, \epsilon)$ .

Остановимся подробнее на структуре таблиц. Информацию, содержащуюся в таблице, можно разделить на три группы, каждая из которых занимает ряд строк таблицы и располагается в нескольких столбцах. Первый слева столбец таблицы содержит обозначения приводимых величин, последующие соответствуют характерным давлениям в тракте горения и расширения, а именно: второй - вход в сопло (давление торможения  $\rho_{со}$ ), третий - критическое сечение (давление  $\rho_* = \rho_{со} / \epsilon$ ), четвертый и последующие - давления, отвечающие текущим степеням расширения  $\rho = \rho_{со} / \epsilon$ .

В первой строке содержатся сведения о топливе:

$\alpha_{ок}$  - коэффициент избытка окислителя;

$K_1$  - массовый коэффициент соотношения компонентов топлива, кг окислителя ;  
кг горючего

$\rho_T \cdot 10^{-3}$  - средняя плотность топлива в  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , подсчитанная по формуле

$$\rho_T = \frac{1 + K_1}{\frac{1}{\rho_T} + \frac{K_1}{\rho_{ок}}} ; \quad (4)$$

$i_T$  - энтальпия топлива, кДж/кг;

$S$  - удельная массовая энтропия,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ .

Первая группа сведений содержится в разделе, названном "Основные величины". Сюда включены:

$\epsilon$  - степень расширения по давлению;

$\rho$  - давление, кН/м<sup>2</sup> ;

$T$  - температура, К;

$\mu$  - средняя молекулярная масса, кг/моль;

$a, M$  - скорость звука в смеси ( $a$ ), м/с, для условий на входе в сопло (второй столбец) и число Маха ( $M$ ) для значений  $\epsilon \geq \epsilon_*$  (третий и последующие столбцы);

$n$  - средний показатель изэнтропы расширения в интервале от  $\rho_{со}$  до  $\rho = \rho_{со} / \epsilon$  ;

- $W$  - скорость потока, м/с;  
 $\beta, J_s^n$  - расходный комплекс ( $\beta$ ), м/с, для значения  $\epsilon = \epsilon_*$  (третий столбец) и удельный импульс  $J_s^n$ , м/с, для значений  $\epsilon > \epsilon_*$  (четвертый и последующие столбцы);  
 $\bar{F}$  - относительная площадь (геометрическая степень расширения).

Перечисленные выше параметры непосредственно используются при проведении термодинамического расчета ракетного двигателя. Кроме того, в группу "основные величины" включены также следующие параметры, характеризующие термодинамические и теплофизические свойства рабочего тела:

- $C_{p2}$  - удельная теплоемкость не реагирующей смеси при постоянном давлении,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  ;  
 $C_p$  - удельная теплоемкость равновесно-реагирующей смеси при постоянном давлении,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  ;  
 $\eta \cdot 10^7$  - коэффициент динамической вязкости газовой смеси, Нс/м<sup>2</sup>;  
 $\lambda_1$  - коэффициент теплопроводности не реагирующей газовой смеси, Вт/м·град ;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности равновесно-реагирующей смеси, Вт/м·град ;  
 $\chi \cdot \frac{C_p}{C_v}$  - отношение равновесных удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме;  
 $\alpha_p \times T$  - произведение изобарного коэффициента расширения на температуру;  
 $\beta_T \times p$  - произведение изотермического коэффициента сжатия на давление;  
 $Z$  - суммарная массовая доля веществ в конденсированном состоянии.

В группе "коэффициенты экстраполяционных формул" приводятся численные значения частных производных, используемых для определения соответствующих параметров за пределами "опорных точек":

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \left( \frac{\partial \ln T_{co}}{\partial \ln \rho_{co}} \right)_{L_T} \cdot 10^3 \\ A_2 &= \left( \frac{\partial \ln T_{co}}{\partial i} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \cdot 10^3 \\ A_4 &= \left( \frac{\partial T_{co}}{\partial q_1} \right)_{\rho_{co}} \\ A_5 &= \left( \frac{\partial T_{co}}{\partial q_2} \right)_{\rho_{co}} \end{aligned} \right\}$$

— частные производные температуры на входе в сопло ;

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \left( \frac{\partial \ln B}{\partial \ln \rho_{co}} \right)_{L_T, \epsilon} \cdot 10^3 \\ B_2 &= \left( \frac{\partial \ln B}{\partial i} \right)_{\rho_{co}, \epsilon, x} \cdot 10^3 \\ B_4 &= \left( \frac{\partial B}{\partial q_1} \right)_{\rho_{co}} \\ B_5 &= \left( \frac{\partial B}{\partial q_2} \right)_{\rho_{co}} \end{aligned} \right\}$$

— частные производные расходного комплекса ;

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \left( \frac{\partial \ln J_s^n}{\partial \ln \rho_{co}} \right)_{L_T, \epsilon} \cdot 10^3 \\ C_2 &= \left( \frac{\partial \ln J_s^n}{\partial i} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \cdot 10^3 \\ C_3 &= \left( \frac{\partial \ln J_s^n}{\partial \ln \epsilon} \right)_{\rho_{co}, L_T} \cdot 10^3 \\ C_4 &= \left( \frac{\partial J_s^n}{\partial q_1} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \\ C_5 &= \left( \frac{\partial J_s^n}{\partial q_2} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \end{aligned} \right\}$$

— частные производные удельного импульса в пустоте ;

$$\left. \begin{aligned}
 D_1 &= \left( \frac{\partial \ln \bar{F}}{\partial \ln \rho_{co}} \right)_{i_T, \epsilon} \cdot 10^3 \\
 D_2 &= \left( \frac{\partial \ln \bar{F}}{\partial i} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \cdot 10^3 \\
 D_3 &= \left( \frac{\partial \ln \bar{F}}{\partial \ln \epsilon} \right)_{i_T, \rho_{co}} \cdot 10^3 \\
 D_4 &= \left( \frac{\partial \bar{F}}{\partial q_1} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \\
 D_5 &= \left( \frac{\partial \bar{F}}{\partial q_2} \right)_{\rho_{co}, \epsilon}
 \end{aligned} \right\} - \text{частные производные} \\
 \text{геометрической степени} \\
 \text{расширения ;}$$

$$\left. \begin{aligned}
 L_4 &= \left( \frac{\partial z}{\partial q_1} \right)_{\rho_{co}, \epsilon} \\
 L_5 &= \left( \frac{\partial z}{\partial q_2} \right)_{\rho_{co}, \epsilon}
 \end{aligned} \right\} - \text{частные производные} \\
 \text{суммарной доли веществ} \\
 \text{в конденсированном} \\
 \text{состоянии .}$$

В третьей части таблицы приводятся сведения по равновесному составу продуктов сгорания. Здесь для возможных газообразных составляющих продуктов сгорания приводятся их мольные доли.

## 5. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

При проведении расчета двигателя с использованием материалов справочника часто возникает необходимость определения параметров при значениях давления на входе в сопло  $\rho_{co}$ , степени расширения  $\epsilon$  или удельной энтальпии топлива  $i_T$ , которые отсутствуют в таблицах. Справочные данные соответствуют энтальпии топлива, определенной из условия, что последнее находится под давлением  $9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ , при этом высококипящие компоненты топлива имеют температуру 298 К, а низкокипящие — температуру кипения при указанном давлении. Изменением энтальпии можно оценить влияние изменения начальной температуры топлива и тепловых потерь в камере сгорания (охлаждение, недогорание). Для определения параметров двигателя при измененных начальных условиях подбирается таблица

а в этой таблице — столбец с наиболее близким значением  $\mathcal{E}$ . Данные его являются "опорными" для экстраполяции.

Экстраполяция проводится по приведенным ниже формулам. Верхним индексом "0" обозначены значения параметров в "опорной точке".

Температура на входе в сопло

$$\ln T_{co} = \ln T_{co}^{(0)} + A_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + A_2 \cdot 10^{-3} \Delta i_T. \quad (5)$$

Расходный комплекс

$$\ln \beta = \ln \beta^{(0)} + B_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + B_2 \cdot 10^{-3} \Delta i_T. \quad (6)$$

Удельный импульс в пустоте

$$\ln J_s^n = \ln J_s^{n(0)} + C_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + C_2 \cdot 10^{-3} \Delta i_T + C_3 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \mathcal{E}. \quad (7)$$

Геометрическая степень расширения сопла

$$\ln \bar{F} = \ln \bar{F}^{(0)} + D_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + D_2 \cdot 10^{-3} \Delta i_T + D_3 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \mathcal{E}. \quad (8)$$

Разница параметров  $\Delta$  в приведенных выше формулах является разницей между параметрами в искомой и "опорной точках". Если какой-либо из определяющих параметров остается неизменным, то приведенные формулы соответственно упрощаются.

Экстраполяционные коэффициенты, являющиеся первыми частными производными соответствующих величин, приведены в таблицах:

$A_1$  и  $A_2$  — во втором столбце;

$B_1$  и  $B_2$  — в третьем столбце;

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  — в четвертом и последующих столбцах.

При проведении термодинамических расчетов возможен случай, когда в составе топливных компонентов имеются примеси, которые, естественно, будут оказывать влияние на выходные характеристики двигателя. Справочник позволяет определить изменение характеристик при наличии в топливе не более — чем двух примесей (две примеси только в горючем или только в окислителе, одна примесь в горючем и одна примесь в окислителе). При этом экстраполяционные формулы имеют следующий вид.

Температура на входе в сопло

$$T_{co} = T_{co}^{(0)} + A_4 \cdot \Delta q_1 + A_5 \cdot \Delta q_2 . \quad (9)$$

Расходный комплекс

$$\beta = \beta^{(0)} + B_4 \cdot \Delta q_1 + B_5 \cdot \Delta q_2 . \quad (10)$$

Удельный импульс в пустоте

$$J_s^n = J_s^{n(0)} + C_4 \cdot \Delta q_1 + C_5 \cdot \Delta q_2 . \quad (11)$$

Геометрическая степень расширения сопла

$$\bar{F} = \bar{F}^{(0)} + D_4 \cdot \Delta q_1 + D_5 \cdot \Delta q_2 . \quad (12)$$

Суммарная массовая доля конденсированных продуктов

$$Z = Z^{(0)} + L_4 \cdot \Delta q_1 + L_5 \cdot \Delta q_2 . \quad (13)$$

В формулах (9) - (13)  $\Delta q_1$  и  $\Delta q_2$  - изменение массовых долей веществ (1) и (2) в компонентах топлива. В соответствующих томах справочника оговаривается, к каким веществам и какому компоненту (компонентам) топлива относятся величины производных  $C_4, C_5, D_4, D_5, L_4, L_5$ .

При одновременном изменении состава компонентов топлива и определяющих параметров  $i_T, \rho_{co}, \epsilon$  производится последовательная экстраполяция по формулам (5) - (8) и (9) - (13).

## 6. ПОЛУЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Содержащийся в справочнике материал может быть использован для получения дополнительных данных по свойствам рабочего тела, а также по геометрическим и газодинамическим характеристикам двигателя.

По табличным величинам удельной массовой энтальпии  $i_T$ , удельной массовой энтропии  $S$  и средней молекулярной массы  $M$  можно определить в "опорных точках" молярные величины энталь-



при  $J$  и энтропии  $S$

$$J = i \cdot \mu \quad (14)$$

$$S = s \cdot \mu \quad (15)$$

Газовая постоянная,  $\frac{A \cdot \text{эс}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ , продуктов сгорания может быть подсчитана по формуле

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8316.96}{\mu} \quad (16)$$

Удельная площадь критического сечения сопла,  $\frac{\text{м}^2 \text{с}}{\text{кг}}$ ,

$$f_* = \frac{\bar{F}_*}{\dot{m}} = \frac{B}{\rho_{c0}} \quad (17)$$

Удельная площадь выходного сечения сопла,  $\frac{\text{м}^2 \text{с}}{\text{кг}}$ ,

$$f_0 = \frac{F_0}{\dot{m}} = F \cdot f_* \quad (18)$$

Скорость газа в выходном сечении сопла,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,

$$W_0 = J_s^n - f_0 \cdot \rho_0 \quad (19)$$

Температура газа в выходном сечении сопла,  $\text{К}$ ,

$$T_0 = \frac{f_0 \cdot \rho_0 \cdot W_0}{\rho_0} \quad (20)$$

Удельный импульс на произвольной высоте  $H$  (атмосферное давление  $\rho_H$ ),  $\frac{\text{Нс}}{\text{кг}}$ ,

$$J_s = J_s^n - f_0 \rho_H \quad (21)$$

Удельный импульс у Земли (стандартное атмосферное давление  $\rho_0$ ),  $\frac{\text{Нс}}{\text{кг}}$ ,

$$J_s^{H=0} = J_s^n - f_0 \rho_0 \quad (22)$$

## 7. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Задано : топливо : жидкий кислород + керосин;  
 давление в конце камеры сгорания (на входе в сопло)  
 $7840 \text{ кН/м}^2$ ;  
 давление в выходном сечении сопла  $6,82 \text{ кН/м}^2$ .

Требуется: определить основные теоретические параметры двигателя, характеризующие его рабочий процесс и геометрические характеристики.

## I. Химические формулы топливных компонентов:

окислитель  $O_2$  ;  
 горючее  $C_{H_{1,956}}$  (условная формула, 85,9 % углерода  
 и 14,1 % водорода по массе).

## 2. Степень расширения

$$\varepsilon = \frac{p_{co}}{p_a} = \frac{7840}{6,87} = 1140 .$$

3. Оптимальный коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{ок}$  приближенно определяем по графику 5-13, стр.180 второго тома справочника (стр. 10 методических указаний) для  $\varepsilon = 1000$  и  $p_{co} = 50$ ; I. Принимаем в качестве оптимального, обеспечивающего максимум удельного импульса в пустоте  $\alpha_{ок} = 0,9$  (таблицы для  $\alpha_{ок} = 0,85$  в справочнике отсутствуют).

4. "Опорную точку" выбираем на стр.245 второго тома справочника (стр. 9 методических указаний) для  $p_{co} = 10000 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$  и  $\varepsilon = 1000$ . В качестве "опорных" можно было выбрать также данные на стр. 244 для  $p_{co} = 5000 \text{ кН/м}^2$  и  $\varepsilon = 1000$ .

5. Из первой строчки таблицы выписываем основные данные, характеризующие топливо: массовый коэффициент соотношения компонентов  $K_1 = 3,067$  ;  
 плотность  $\rho = 1,044 \text{ г/см}^3$  ;  
 удельная массовая энтальпия  $i_T = -773,6 \text{ кДж/кг}$  ;  
 удельная массовая энтропия  $s = 40,73 \text{ кДж/кг}$ .

6. Для условий "опорной точки" выписываем из таблицы для  $\rho_{co} = 10000 \text{ кН/м}^2$  (второй столбец) температуру на входе в сопло

$$T_{co} = 3754 \text{ К} .$$

Для определения температуры при заданном  $\rho_{co} = 7840 \text{ кН/м}^2$  проводим экстраполяцию по формуле

$$\ln T_{co} = \ln T_{co}^{(0)} + \left( \frac{\partial \ln T_{co}}{\partial \ln \rho_{co}} \right) \cdot \Delta \ln \rho_{co} = \ln T_{co}^{(0)} + A_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} .$$

Индексом (0) обозначаются параметры "опорной точки"

$$\ln T_{co} = 8,2305 + 41,59 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,243) = 8,2204 ,$$

$$T_{co} = 3716 \text{ К} .$$

7. Определяем величину расходного комплекса.

Расходный комплекс в "опорной точке" (критическое сечение сопла, третий столбец)

$$\beta^{(0)} = 1758 \frac{\text{Нс}}{\text{кг}} .$$

В результате экстраполяции получаем

$$\ln \beta = \ln \beta^{(0)} + B_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} ,$$

$$\ln \beta = 7,4719 + 11,93 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,243) = 7,4690 ,$$

$$\beta = 1753 \frac{\text{Нс}}{\text{кг}} .$$

8. Находим удельный импульс в пустоте .

В "опорной точке" для  $\epsilon = 1000$  (девятый столбец таблицы)

$$J_s^{n(0)} = 3654 \frac{\text{Нс}}{\text{кг}} .$$

Для заданных условий

$$\ln J_s^n = \ln J_s^{n(0)} + C_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + C_3 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \epsilon ,$$

$$\Delta \ln = \ln \epsilon - \ln \epsilon^{(0)} = 0,1314 ,$$

$$\ln J_s^n = \ln 3654 + 5,583 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,243) + 37,35 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1311 = 8,2071 ,$$

$$J_s^n = 3667 \frac{\text{Нс}}{\text{кг}} .$$

9. Определяем геометрическую степень расширения сопла. Находим значение геометрической степени расширения в "опорной точке" (девятый столбец таблицы)

$$F^{(0)} = 95,87$$

Для заданных условий

$$\ln \bar{F} = \ln F^{(0)} + D_1 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \rho_{co} + D_3 \cdot 10^{-3} \Delta \ln \epsilon,$$

$$\ln \bar{F} = \ln 95,87 + (-35,46) \cdot 10^{-3} \cdot (-0,243) + 809,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1311 = 4,6777,$$

$$\bar{F} = 107,5$$

10. Газовая постоянная продуктов сгорания на выходе из сопла

$$R_a = \frac{8316,96}{\mu_a}$$

Средняя молекулярная масса  $\mu$  берется для сечения выхода из сопла в "опорной точке". Интерполяцию не проводим, т.к.  $\mu$  меняется мало.

$$R_a = \frac{8316,96}{28,70} = 289,79 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

11. Удельная площадь критического сечения, т.е. площадь критического сечения, приходящаяся на расход рабочего тела, равный 1 кг/с,

$$f_* = \frac{F_*}{\dot{m}} = \frac{\beta}{\rho_{co}} = \frac{1753}{7840} = 0,224 \frac{\text{м}^2 \text{с}}{\text{кг}}$$

12. Удельная площадь выходного сечения сопла

$$f_a = \frac{F_a}{\dot{m}} = \bar{F} \cdot f_* = 107,5 \cdot 0,224 = 24,08 \frac{\text{м}^2 \text{с}}{\text{кг}}$$

13. Скорость газа в выходном сечении сопла

$$W_a = J_s^n - f_a \rho_a,$$

$$W_a = 3657 - 24,08 \cdot 8,87 = 3501,6 \text{ м/с}.$$

14. Температура газа в выходном сечении сопла

$$T_a = \frac{f_a \cdot \rho_a \cdot W_a}{R_a} = \frac{24,08 \cdot 8,87 \cdot 3501,6}{289,79} = 1998,9 \text{ К}$$

**Библиографический список**

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник: В 10 т. /Под ред. В.П.Глушко. М.:АН СССР, 1971.

2. Тепловой расчет и проектирование камер ИРД: Учеб.пособие /Ю.М.Дубинкин, В.С.Кондрусев, А.С.Фрейдли; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1985. 73 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Общие сведения .....	3
2. Основные принятые обозначения .....	4
3. Расположение материала в справочнике .....	5
4. Форма представления результатов термодинамических расчетов топлив в справочнике .....	6
5. Экстраполяция основных параметров .....	14
6. Получение дополнительных данных .....	16
7. Пример расчета .....	18
Библиографический список .....	21

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И РАСШИРЕНИЯ В КАМЕРАХ  
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ СПРАВОЧНИКА  
«ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ»**

**Составитель Кондрусев Виктор Семенович**

**Редактор Л. Я. Чегодаева  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Л. Я. Чегодаева**

**Подписано в печать 16.05.90 г. Формат 60×84 1/16.**

**Бумага оберточная. Печать офсетная. Усл.п.л. 1,4.**

**Усл.кр.-отг. 1,4. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 75 экз.**

**Заказ № 239. Бесплатно.**

**Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.**

---

**Участок оперативной полиграфии Куйбышевского авиационного института.  
443001 Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.**