



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Глава 1. Общие вопросы

§ 1.3. Основы термо- и газодинамики

Теория газотурбинных двигателей по своей сути является прикладными разделами термодинамики и механики жидкости и газа.

Рабочее тело — это материальное тело, термодинамические параметры которого изменяются под воздействием различных факторов.

Рабочим телом ГТД являются атмосферный воздух (от входа в двигатель до камеры сгорания) и продукты сгорания топлива (после камеры сгорания).

Поток рабочего тела характеризуется величиной секундного расхода G через выбранное поперечное сечение канала с площадью F :

G - расход рабочего тела, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

F - площадь поперечного сечения канала (потока), м^2 .

1.3.1. Параметры состояния рабочего тела (статические)

p - давление, Па .

T - температура, К .

ρ - плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

v - удельный объём (величина обратная плотности: $v = \frac{1}{\rho}$), $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

s - энтропия, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

1.3.2. Свойства рабочего тела

μ - молярная масса, $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

R - газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Газовая постоянная зависит от молярной массы, то есть состава рабочего тела, и определяется по формуле

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} ,$$

где $R_{\mu} = 8,3144598 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ - универсальная газовая постоянная.

c_p - изобарная теплоёмкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

c_v - изохорная теплоёмкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Изохорная и изобарная теплоёмкости связаны соотношением: $c_p - c_v = R$.

k - показатель изоэнтропы.

Показатель изоэнтропы равен отношению изобарной и изохорной теплоёмкостей:

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Как известно из курса термодинамики, изобарная теплоемкость c_p и, соответственно, показатель изоэнтропы k рабочего тела зависят от его температуры и состава.

В приближенных расчетах можно принимать следующие значения свойств рабочего тела:

$$R_v = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad c_{pv} = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad k_v = 1,4 \quad - \text{ для воздуха};$$

$$R_z = 287,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad c_{pz} = 1159 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad k_z = 1,33 \quad - \text{ для продуктов сгорания}$$

авиационного керосина.

1.3.3. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клайперона)

Уравнение состояния описывает взаимосвязь между параметрами состояния рабочего тела.

Рабочее тело ГТД можно считать идеальным газом, которое подчиняется следующему уравнению состояния:

$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

или

$$p \cdot v = R \cdot T .$$

1.3.4. Термодинамические потенциалы

u - внутренняя энергия, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Производная внутренней энергии по температуре равна изохорной теплоёмкости:

$$\frac{du}{dT} = c_v .$$

Абсолютное значение внутренней энергии определить очень сложно. Обычно определяют и используют в расчетах её величину относительно заданной температуры T_0 , тогда

$$u(T) = \int_{T_0}^T c_v(T) dT .$$

Если принять допущение, что изохорная теплоёмкость не зависит от температуры ($c_v = \text{const}$), и считать, что $T_0 = 0$, тогда значение внутренней энергии можно приближенно оценивать по формуле

$$u = c_v \cdot T .$$

$$i = u + p \cdot v - \text{энтальпия, } \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Для идеального газа справедлива формула

$$i(T) = \int_{T_0}^T c_p(T) dT$$

или, в случае приближенной оценки ($c_p = \text{const}$),

$$i = c_p \cdot T.$$

$$f = u - T \cdot s - \text{энергия Гельмгольца, } \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

$$g = u + p \cdot v - T \cdot s - \text{энергия Гиббса, } \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Учет изменения c_p в зависимости от температуры и состава рабочего тела обеспечивает более высокую точность термодинамических расчетов и осуществляется с использованием специальных $\pi-i-T$ функций.

Изложение теории ГТД «на языке $\pi-i-T$ функций» распространения не получило, так как эти функции не позволяют выразить основные соотношения через параметры рабочего процесса в явном виде, что затрудняет термодинамический анализ зависимостей параметров двигателя от различных факторов.

1.3.5. Типовые термодинамические процессы

Изобарный процесс: $p = \text{const}$.

Изотермический процесс: $T = \text{const}$.

Изохорный процесс: $v = \text{const}$.

Изоэнтропический процесс: $s = \text{const}$.

1.3.6. Полные параметры потока (параметры заторможенного потока)

p^* - полное давление, Па .

T^* - полная температура, К .

ρ^* - плотность заторможенного потока, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

i^* - полная энтальпия, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Физический смысл: полные параметры потока рабочего тела — статические параметры рабочего тела в конце изоэнтропического процесса торможения (изменения скорости потока до нуля).

1.3.7. Критические параметры потока

$p^\wedge$ -критическое давление, Па .

$T^\wedge$ -критическая температура, К .

$\rho^\wedge$ -критическая плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

$i^\wedge$ - критическая энтальпия, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Физический смысл: критические параметры потока рабочего тела — статические параметры рабочего тела в конце изоэнтропического процесса изменения скорости потока до местной скорости звука (см. далее).

1.3.8. Кинематические параметры потока рабочего тела

c - скорость потока, $\frac{м}{с}$.

M - число Маха скорости потока.

Число Маха — это критерий подобия режимов течения потока равный отношению скорости потока c к местной скорости звука a :

$$M = \frac{c}{a}.$$

Местная скорость звука определяется по формуле

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T}.$$

λ - приведенная скорость потока (число Лаваля скорости потока).

Приведенная скорость также является критерием подобия режимов течения потока и равна отношению скорости потока c к критической скорости звука $a^\wedge$:

$$\lambda = \frac{c}{a^\wedge}.$$

Критическая скорость звука — это местная скорость звука в потоке, движущемся со скоростью звука. То есть, если $c \rightarrow a$ при $T^* = const$, то $a \rightarrow a^\wedge$, $T \rightarrow T^\wedge$.

Критическая скорость звука определяется по формуле

$$a^\wedge = \sqrt{k \cdot R \cdot T^\wedge} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R \cdot T^*}.$$

Число Маха скорости потока и приведенная скорость потока связаны соотношением

$$M = \frac{\lambda \left(\frac{2}{k+1} \right)}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)}.$$

С помощью кинематических параметров потока описывается взаимосвязь между статической, полной и критической энтальпиями:

$$i^* = i + \frac{c^2}{2};$$

$$i^* = i^{\wedge} + \frac{(a^{\wedge})^2}{2}.$$

1.3.9. Динамические параметры потока рабочего тела

Φ - полный импульс потока, $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$.

Полный импульс потока определяется по формуле

$$\Phi = G \cdot c + p \cdot F.$$

Первое слагаемое в правой части формулы является динамической составляющей полного импульса (динамический импульс потока рабочего тела), а второе — статической.

1.3.10. Газодинамические функции

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right);$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}};$$

$$q(\lambda) = \frac{\rho \cdot c}{\rho^* \cdot a^*} = \frac{\lambda \cdot \varepsilon(\lambda)}{\varepsilon(1)} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} - \text{относительная плотность тока};$$

$$z(\lambda) = \frac{\Phi}{G \cdot a^*} = \lambda + \frac{1}{\lambda};$$

$$f(\lambda) = \frac{\Phi}{p^* \cdot F} = \lambda \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot z(\lambda) = (1 + \lambda^2) \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

1.3.11. Первое начало термодинамики

Если в установившемся процессе к потоку рабочего тела между сечениями «О» и «Х» подводится или отводится удельная энергия (в расчете на единицу массы) в форме работы L и теплоты Q , то

$$(i_X - i_O) + \left(\frac{c_X^2}{2} - \frac{c_O^2}{2} \right) = \pm L \pm Q_{\text{внешн}}.$$

Выражение в левой части уравнения представляет собой изменение полной энтальпии:

$$\Delta i^* = i_X^* - i_O^* = \pm L \pm Q_{\text{внешн}}.$$

Знак «+» перед работой L ставится в том случае, если работа подводится к рабочему телу, и «-» - в том случае, если рабочее тело само совершает работу.

Знак «+» перед теплотой $Q_{\text{внешн}}$ соответствует нагреву рабочего тела, а «-» - охлаждению.

1.3.12. Второе начало термодинамики

Для квазиравновесной термодинамической системы справедливо соотношение

$$ds = \frac{\delta(Q_{\text{внешн}} + Q_{\text{внутр}})}{T}.$$

1.3.13. Уравнение изоэнтропы

Уравнение изоэнтропы устанавливает связь между изменением температуры и изменением давления в изоэнтропическом процессе, которая для случая $c_p = \text{const}$ имеет следующий вид:

$$\left(\frac{T_X}{T_O}\right) = \left(\frac{p_X}{p_O}\right)^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}.$$

1.3.14. Уравнение неразрывности

При установившемся движении расход рабочего тела G через поперечное сечение канала с площадью F равен

$$G = c \cdot \rho \cdot F.$$

На практике удобно использовать формулу расчета расхода рабочего тела через полные параметры потока (p^* и T^*) и относительную плотность тока $q(\lambda)$:

$$G = \frac{m \cdot p^* \cdot F \cdot q(\lambda)}{\sqrt{T^*}},$$

где $m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ - размерный коэффициент в формуле расчета расхода воздуха.

В приближенных расчетах можно принимать следующие значения коэффициента m :

$$m_{\text{в}} = 0,0404 \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}}} \text{ - для воздуха; } m_{\text{п}} = 0,0397 \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}}} \text{ - для продуктов сгорания авиационного керосина.}$$

На установившемся режиме расходы рабочего тела через два произвольных сечения «О» и «Х» канала связаны соотношением

$$G_X = G_O + \Delta G_{O-X},$$

где $\Delta G_{(O-X)}$ - величина расхода подводимого или отводимого рабочего тела между соответствующими сечениями.

Обычно величину отвода или подвода рабочего тела определяют значением коэффициента относительного расхода рабочего тела $g_{(O-X)}$ равной отношению $\Delta G_{(O-X)}$ к расходу G_O :

$$G_X = G_O \cdot \left(1 + \frac{\Delta G_{O-X}}{G_O} \right) = G_O \cdot (1 + g_{(O-X)});$$

или используют коэффициент изменения массы рабочего тела $v_{(O-X)}$:

$$v_{(O-X)} = \frac{G_X}{G_O} = (1 + g_{(O-X)}).$$

1.3.15. Теорема импульсов потока рабочего тела

Изменение полного импульса потока рабочего тела, проходящего через канал, ограниченный сечениями «О» и «Х», равно равнодействующей всех внешних сил, приложенных к объему рабочего тела, заключенного в этом канале:

$$\Phi_X - \Phi_O = P_{\text{внешн}}.$$