

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

ТЕОРИЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
Москва 1969

Глава 1. Принцип действия, устройство и классификация ВРД

1.1. ПОНЯТИЕ О РЕАКТИВНОЙ СИЛЕ И РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Из физики известно, что при действии одного тела на другое с некоторой силой второе тело действует на первое с равной и противоположно направленной силой. Указанное взаимодействие тел выражает собой закон равенства действия и противодействия Ньютона.

Если назвать действие первого тела на второе *активной силой*, то действие второго тела на первое будет называться *реактивной силой*. Суждение же о том, какая именно сила является активной, а какая реактивной, является условным.

Силы взаимодействия приложены к разным телам. В тех случаях, когда они не уравниваются, каждая из этих сил может стать причиной движения.

Приведем несколько примеров действия активной и реактивной сил (рис. 1.1).

При выстреле из орудия пороховые газы, расширяясь под действием высокого давления, выталкивают с большой силой снаряд из канала ствола; возникающая при этом сила отдачи газов является реактивной силой. Действительно, при движении снаряда в канале ствола происходит взаимодействие двух тел — ствола и вытекающих газов. Торцевая часть канала ствола «выталкивает» газы с определенной силой (активная сила). В свою очередь, газы с такой же силой действуют на торцевую часть канала ствола; сила, действующая на торцевую часть канала, и будет реактивной силой, или силой отдачи (см. рис. 1.1, а).

В основе полета самолета, снабженного двигателем с винтом, тоже лежит реактивный принцип. Винт, вращаясь, воздействует своими рабочими поверхностями на воздух с силой P и отбрасывает с определенной скоростью большую массу воздуха. В свою очередь, струя воздуха действует с равной и противоположной силой $R = P$ на винт и создает тягу, которая перемещает самолет в сторону, противоположную движению струи (см. рис.

1.1, б). Таким образом, тяга винта есть результат реактивного действия отброшенных масс воздуха на винт.

Наконец, этот же принцип положен в основу движения обычной пороховой ракеты. Пороховые газы, вытекая под действием большого давления с огромной скоростью назад, отталкиваются от стенок сопла; возникающая при этом реакция перемещает ракету вперед (см. рис. 1.1, в).

Что же в таком случае мы будем называть реактивным двигателем, если во всяком двигателе используется реактивный принцип?

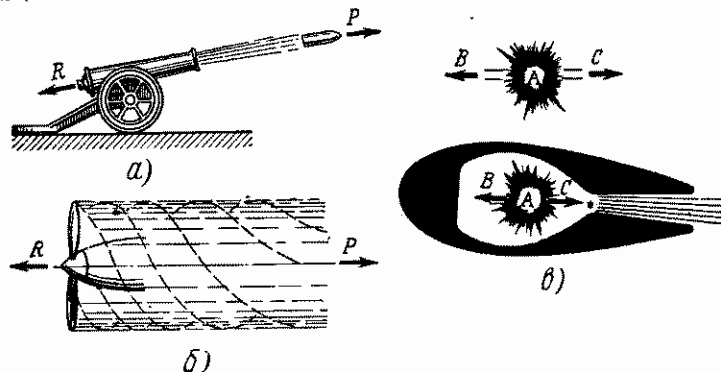


Рис. 1.1. Примеры действия активной и реактивной сил:
а—сила отдачи орудия; б—реактивная тяга винта; в—принцип действия пороховой ракеты

Реактивным двигателем называют такой тепловой двигатель, у которого тепловая энергия, выделившаяся при сгорании топлива, непосредственно превращается в кинетическую энергию потока газа, а возникающая при этом реакция используется как движущая сила, или тяга. Такой двигатель называется двигателем прямой реакции, в противоположность двигателям непрямой реакции, к которым относится, например, поршневая винтомоторная установка; в этой последней тепловая энергия превращается предварительно с помощью кривошипно-шатунного механизма в механическую энергию вращения вала винта (собственно *двигатель*), а затем уже механическая энергия вращения винта превращается в работу тяги в результате отбрасывания масс воздуха (*движитель*).

Реактивный двигатель не имеет промежуточных звеньев для преобразования энергии (кривошипно-шатунный механизм, редуктор и т. д.); он не имеет также и отдельного движителя, создающего движущую силу (тягу), каковым являются, например, колеса у автомобиля, гусеницы у трактора, гребной винт у парохода, воздушный винт у самолета, глиссера, аэросаней.

Реактивный двигатель объединяет в себе функции двигателя и движителя, и в этом смысле его нужно сравнивать не просто с поршневым двигателем, а с винтомоторной установкой, являющейся сочетанием двигателя с движителем.

Глава 3. Тяга воздушно-реактивного двигателя. Основные параметры ВРД

3.1. ТЕОРЕМА ТЯГИ ВРД

Тягой называют движущую силу, развиваемую двигателем. Тяга является главным параметром воздушно-реактивного двигателя, полезным эффектом его работы. Поэтому точное определение ее весьма важно.

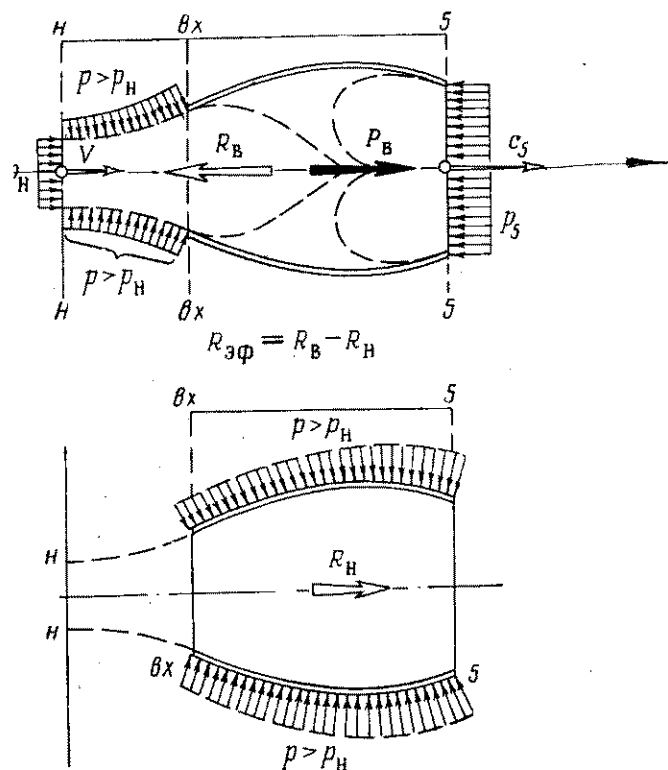


Рис. 3.1. К определению тяги ВРД

По своему физическому смыслу тяга представляет собой равнодействующую осевых усилий, приложенных ко всем элементам двигателя. Однако «почленное» нахождение ее составляющих весьма сложно и неудобно.

Тягу воздушно-реактивного двигателя определяют с помощью теоремы Эйлера об изменении количества движения движущейся массы газа, рассматривая двигатель в целом.

Теорема тяги для воздушно-реактивного двигателя в общем виде была доказана академиком Б. С. Стечкиным в 1929 г. При-

ведем доказательство этой теоремы в несколько измененном виде.

Выделим контрольную поверхность, ограниченную наружной поверхностью струи, проходящей через двигатель, и двумя сечениями ($n-n$ и $5-5$), проведенными перпендикулярно к линии осевой симметрии двигателя (рис. 3.1).

Сечение $n-n$ выбрано в невозмущенном участке потока; сечение $5-5$ проведено на срезе реактивного сопла.

Условимся считать, что двигатель неподвижен и что воздух движется относительно него со скоростью полета V .

Введем понятие *эффективной тяги* ВРД, понимая под этим термином равнодействующую осевых сил *внутреннего* и *наружного* давлений, т. е.

$$R_{эф} = R_B - R_H, \quad (3.1)$$

где R_B — равнодействующая сил внутреннего давления;
 R_H — равнодействующая сил наружного давления.

Для определения равнодействующей сил внутреннего давления применим к массе газа, ограниченной контрольной поверхностью, теорему Эйлера в следующей формулировке:

«Изменение количества движения секундной массы газа в данном направлении равно сумме проекций всех внешних сил, приложенных к выделенной массе, на это направление».

Таким направлением изберем направление полета. Тогда получим

$$\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_a}{g} V = P_n + (p_n f_n - p_5 f_5) + \int_{f_n}^{f_{вх}} p df, \quad (3.2)$$

где $\frac{G_r}{g} c_5$ — секундное количество движения массы газа, вытекающего через сечение f_5 ;

$\frac{G_a}{g} V$ — секундное количество движения массы воздуха, втекающего через сечение f_n ;

$(p_n f_n - p_5 f_5)$ — равнодействующая сил давления газа, приложенных к торцовым плоскостям контрольной поверхности;

$\int_{f_n}^{f_{вх}} p df$ — равнодействующая сил давления, приложенных к боковой поверхности «свободного» участка струи;

$df = ds \cos \alpha$ — проекция элементарной боковой поверхности двигателя ds на плоскость, перпендикулярную к направлению полета;

P_n — сила, эквивалентная действию стенок двигателя на массу газа (действует в направлении, противоположном направлению полета).

Напишем с помощью формулы (3.2) выражение для P_v :

$$P_v = \left(\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_v}{g} V \right) + (p_5 f_5 - p_n f_n) - \int_{f_n}^{f_{вх}} p df = -R_v. \quad (3.3)$$

Так как согласно третьему закону Ньютона сила действия стенок двигателя P_v на поток будет равна и противоположна силе действия потока на стенки двигателя, т. е. равнодействующей сил внутреннего давления R_v , то абсолютная величина R_v определится выражением, идентичным выражению (3.3).

Найдем теперь R_n .

Имеем

$$R_n = X_{тр} + \int_{f_{вх}}^{f_5} p df, \quad (3.4)$$

где $X_{тр}$ — сила трения наружного потока о поверхность двигателя;

$\int_{f_{вх}}^{f_5} p df$ — равнодействующая сил наружного давления, приложенных к поверхности двигателя.

Сила R_n действует в направлении, противоположном направлению полета.

Подставим выражения R_v из (3.3) и R_n из (3.4) в уравнение (3.1).

Тогда получим

$$R_{эф} = \left(\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_v}{g} V \right) + (p_5 f_5 - p_n f_n) - \int_{f_n}^{f_{вх}} p df - X_{тр} - \int_{f_{вх}}^{f_5} p df. \quad (3.5)$$

Заметим что, $\int_{f_n}^{f_5} p_n df = (f_5 - f_n) p_n$.

Тогда выражение (3.5) можно привести к виду

$$R_{эф} = \left(\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_v}{g} V \right) + (p_5 f_5 - p_n f_n) - (f_5 - f_n) p_n - X_{тр} - \int_{f_n}^{f_5} p df + \int_{f_n}^{f_5} p_n df,$$

или

$$R_{эф} = \underbrace{\left(\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_v}{g} V \right)}_1 + \underbrace{f_5(p_5 - p_n)}_2 - \underbrace{\left[X_{тр} + \int_{f_n}^{f_5} (p - p_n) df \right]}_3. \quad (3.6)$$

Здесь

- (1) $\frac{G_r}{g} c_5 - \frac{G_v}{g} V$ — изменение количества движения секундной массы газа, протекающего через двигатель; оно носит название динамической составляющей тяги, так как обусловлено изменением скорости газа;
- (2) $f_5(p_5 - p_n)$ — статическая составляющая тяги; она обусловлена наличием избыточного давления на срезе сопла (случай неполного расширения газа в реактивном сопле двигателя);
- (3) $X_{тр} + \int_{f_n}^{f_5} (p - p_n) df = X_{г.д.}$ — сила лобового сопротивления gondoly двигателя; действует в направлении, обратном направлению полета. Обусловлена отклонением давления на боковой поверхности s от атмосферного, а также наличием трения.

Сумма динамической и статической составляющих тяги носит название внутренней тяги ВРД R .

Тогда $R_{эф} = R - X_{г.д.} \quad (3.7)$

Таким образом, эффективная тяга ВРД равна внутренней тяге двигателя за вычетом силы суммарного лобового сопротивления gondoly двигателя.

Можно записать следующее уравнение:

$$\int_{f_n}^{f_5} (p - p_n) df = \int_{f_n}^{f_{вх}} (p - p_n) df + \int_{f_{вх}}^{f_5} (p - p_n) df = X_{доп} + X_p, \quad (3.8)$$

где $X_{доп}$ — дополнительное сопротивление, обусловленное деформацией «свободной» втекающей струи вне двигателя (сюда относится волновое сопротивление диффузора на сверхзвуковых скоростях полета);

X_p — сопротивление давления gondoly двигателя.

В общем случае сила лобового сопротивления gondoly двигателя равна

$$X_{г.д.} = X_{доп} + X_p + X_{тр} + X_{дон}, \quad (3.9)$$

где $X_{тр}$ — сопротивление поверхности трения;

$X_{дон}$ — «донный» (кормовой) эффект, обусловленный разрежением, возникающим в кормовой части двигателя.

3.1.1. Формула внутренней тяги

Напишем рабочую формулу внутренней тяги ВРД, заметив, что

$$G_r = G_b + G_t = G_b(1 + m_t).$$

Тогда в общем случае

$$R = \frac{G_b}{g} [(1 + m_t) c_5 - V] + f_5(p_5 - p_n), \quad (3.10)$$

где $m_t = \frac{G_t}{G_b}$ — относительный расход топлива, т. е. расход топлива на 1 кг воздуха; в среднем $m_t = 0,015 + 0,020$.

3.1.1.1. Частные случаи формулы внутренней тяги (для $m_t \approx 0$)

а) Случай полного расширения газа в реактивном сопле

Имеем

$$\text{Тогда} \quad R = \frac{G_b}{g} (c_5 - V), \quad (3.11)$$

б) Случай неполного расширения газа в реактивном сопле

Имеем

$$\text{Тогда} \quad R = \frac{G_b}{g} (c_5 - V) + f_5(p_5 - p_n). \quad (3.12)$$

в) Случай работы двигателя на стенде
Имеем $V = 0$.

$$\text{Тогда} \quad R = \frac{G_r}{g} c_5 + f_5(p_5 - p_n); \quad (3.13)$$

при $p_5 = p_n$

$$R = \frac{G_r}{g} c_5. \quad (3.14)$$

3.2. РЕВЕРСИРОВАНИЕ И ОТКЛОНЕНИЕ ТЯГИ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При посадке современного транспортного самолета (пробеге его по аэродрому до остановки) широко применяется реверсирование тяги, т. е. изменение ее направления на обратное. При этом тяга становится «отрицательной» — из силы, ускоряющей движение самолета, она превращается в силу, тормозящую его движение.

3.2.1. Формула реверсированной тяги (рис. 3.2)

Обозначим

$G_b = G_r = G$ — расход газа через реактивное сопло при выключенном реверсоре;

$R_{p.y}$ — реверсированная тяга;

$G_{p.y}$ — расход газа через реверсор;

V — скорость полета;

c_5 — скорость истечения газа из реактивного сопла;

$c_{p.y}$ — скорость истечения газа из реверсора;

β — угол отклонения потока при реверсировании тяги $[(90^\circ < \beta < 180^\circ); 180^\circ - \beta^\circ = \alpha^\circ]$.

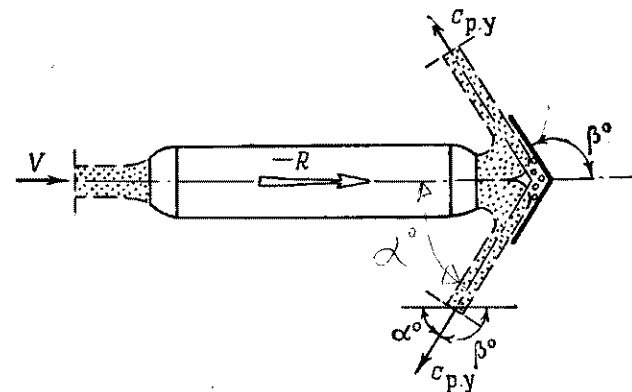


Рис. 3.2. К выводу формулы реверсированной тяги

Тогда

$$\begin{aligned} R_{p.y} &= \frac{(G - G_p)}{g} c_5 - \frac{G}{g} V + \frac{G_p}{g} c_{p.y} \cos \beta^\circ = \\ &= \frac{G}{g} (c_5 - V) - \frac{G_p}{g} (c_5 + c_{p.y} \cos \alpha^\circ). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Назовем степень реверсирования тяги отношение реверсированной тяги к исходной тяге ТРД (с выключенным реверсором), т. е.

$$\bar{R}_{p.y} = \frac{R_{p.y}}{R} = \frac{\frac{G}{g} (c_5 - V) - \frac{G_{p.y}}{g} (c_5 + c_{p.y} \cos \alpha^\circ)}{\frac{G}{g} (c_5 - V)},$$

или

$$\bar{R}_{p.y} = 1 - \frac{G_{p.y}}{G} \frac{(c_5 + c_{p.y} \cos \alpha)}{(c_5 - V)} \quad (3.16)$$

Пусть $c_{p.y} = \varphi_{p.y} c_5$, тогда окончательно получим

$$\bar{R}_{p.y} = 1 - \frac{G_{p.y}}{G} \frac{(1 + \varphi \cos \alpha)}{\left(1 - \frac{V}{c_5}\right)} \quad (3.17)$$

Условием получения отрицательной тяги, т. е. обеспечения условия $\bar{R}_{p.y} < 0$, является

$$\frac{G_{p.y}}{G} \cdot \frac{(1 + \varphi \cos \alpha)}{\left(1 - \frac{V}{c_5}\right)} \geq 1. \quad (3.18)$$

Следовательно, степень реверсирования тяги тем больше, чем:

- 1) больше доля реверсированной массы газа ($\frac{G_p}{G} \leq 1,0$);
- 2) больше угол отклонения струи газа β (т. е. чем меньше α);
- 3) больше скорость полета;
- 4) меньше потери скорости при реверсировании струи.

Выбор угла α определяется необходимостью предотвратить попадание потока горячих отходящих газов на вход в двигатель. Последнее может привести к помпажу и самопроизвольному выключению двигателя. Обычно ($\alpha = 30^\circ \div 60^\circ$)

$$\text{Пусть } \frac{G_{p.y}}{G} = 1,0; \varphi = 0,90; V = 0; \alpha = 60^\circ.$$

Тогда

$$\bar{R}_{p.y} = -\varphi \cos \alpha = -0,45.$$

У лучших реверсоров тяга

$$\bar{R}_{p.y} = 0,4 \div 0,5.$$

3.2.2. Отклонение вектора тяги у подъемных турбореактивных двигателей

Маршевые двигатели, устанавливаемые на самолетах вертикального взлета и посадки, часто снабжают специальными отклонителями тяги — для создания дополнительной вертикальной составляющей тяги (рис. 3.3).

В этих случаях (т. е. при отклонении реактивной струи на 90°) на узлы подвески двигателя будут передаваться:

отрицательная горизонтальная тяга, равная

$$R_r = -\frac{G}{g} V,$$

а также вертикальная тяга, равная

$$R_n = \frac{G}{g} c_{o.y} = \frac{G}{g} \varphi_{o.y} c_5,$$

где $\varphi_{o.y}$ — коэффициент скорости в отклоняющем устройстве.

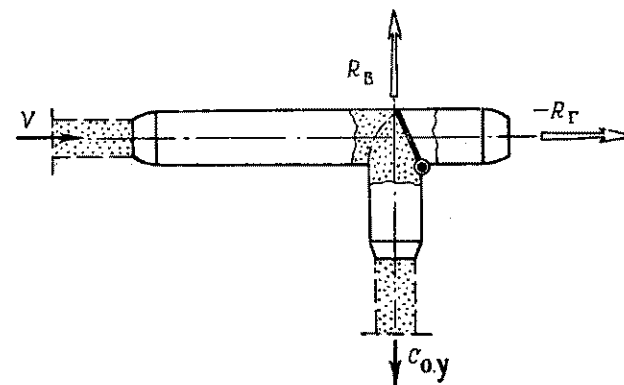


Рис. 3.3. К определению составляющих тяги ТРД, снабженного отклонителем тяги

В ряде случаев вертикально установленные на СВВП подъемные двигатели имеют поворотные устройства, которые путем отклонения оси двигателя от вертикали (на $15^\circ \div 30^\circ$), дают воз-

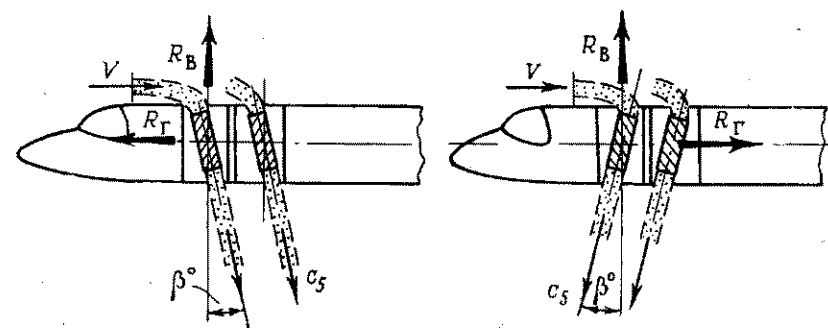


Рис. 3.4. К определению составляющих тяги подъемного ТРД с поворотным механизмом

можность при взлете создавать дополнительную горизонтальную тягу, а при посадке — дополнительную тормозящую силу (рис. 3.4).

Имеем:

$$\begin{array}{l|l} \text{а) при взлете} & \text{б) при посадке} \\ R_r = \frac{G}{g} (c_5 \varphi_{0,y} \sin \beta - V); & R_r = -\frac{G}{g} (c_5 \varphi_{0,y} \sin \beta - V); \\ R_b = \frac{G}{g} c_5 \varphi_{0,y} \cos \beta. & R_b = \frac{G}{g} c_5 \varphi_{0,y} \cos \beta. \end{array}$$

3.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРД (ВРД)

Ниже приведены определения и формулы основных параметров ВРД, даны их обозначения и размерности.

Секундный расход воздуха (газа)

Весовым расходом воздуха называют количество кг воздуха (газа), проходящего через двигатель в одну секунду, т. е.

$$G_b = m \frac{p_i^*}{V T_i^*} f_l q (\lambda_l) \frac{\text{кг}}{\text{сек}}. \quad (3.19)$$

Тяга ТРД

При полном расширении газа

$$R = \frac{G_b}{g} [c_5 (1 + m_r) - V] \text{ кг}. \quad (3.20)$$

Приближенно

$$R \approx \frac{G_b}{g} (c_5 - V).$$

Удельная тяга

Удельной тягой называют тягу, приходящуюся на расход воздуха в 1 кг в секунду:

$$R_{yl} = \frac{R}{G_b} = \frac{c_5 (1 + m_r) - V}{g} \frac{\text{кг}}{\text{кг/сек}}. \quad (3.21)$$

Приближенно

$$R_{yl} \approx \frac{c_5 - V}{g}. \quad (3.22)$$

Секундный расход топлива

Секундным расходом топлива называют количество топлива, расходуемое двигателем за 1 секунду:

$$q_r \frac{\text{кг}}{\text{сек}}.$$

Часовой расход топлива

$$G_r = 3600 q_r \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Удельный расход топлива

Удельным расходом топлива называют часовой расход топлива, отнесенный к 1 кг тяги в час, т. е.

$$C_{yl} = \frac{3600 q_r}{R} = \frac{3600 m_r}{R_{yl}} \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{час}}. \quad (3.23)$$

Относительный расход топлива

Относительным расходом топлива называют секундный расход топлива, отнесенный к расходу воздуха в 1 кг/сек, т. е.

$$m_r = \frac{G_r}{G_b} = \frac{1}{\alpha l_0} = \frac{q_{вн}}{H_u}. \quad (3.24)$$

Коэффициент избытка воздуха

Коэффициентом избытка воздуха называют отношение действительно поступившего количества воздуха к теоретически необходимому для полного сгорания 1 кг топлива, т. е.

$$\alpha = \frac{l}{l_0} = \frac{G_b}{G_r l_0}. \quad (3.25)$$

Эффективная работа

Эффективной работой называют полезную работу цикла ВРД, равную разности работы расширения и работы сжатия, т. е.

$$L_e = L_p - L_c \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг}}. \quad (3.26)$$

Эффективный к. п. д.

Эффективным к. п. д. ТРД называют отношение тепла, эквивалентного эффективной работе двигателя, ко всему теплу, внесенному с топливом, т. е.

$$\eta_e = \frac{A L_e}{q_{вн}}. \quad (3.27)$$

Тяговый к. п. д.

Тяговым к. п. д. ТРД называют отношение работы реактивной тяги к эффективной работе двигателя, т. е.

$$\eta_R = \frac{L_R}{L_e} = \frac{R_{yl} V}{L_e}. \quad (3.28)$$

Общий к. п. д.

Общим к. п. д. ТРД называют отношение тепла, эквивалентного работе реактивной тяги, ко всему теплу, внесенному с топливом, т. е.

$$\eta_0 = A \frac{R_{уд} V}{q_{вг}}. \quad (3.29)$$

Лобовая тяга

Лобовой тягой ТРД называют отношение тяги ТРД к миделю * двигателя, т. е.

$$R_{лб} = \frac{R}{F_m} \frac{\kappa \Gamma}{\mathcal{M}^2}. \quad (3.30)$$

Удельный вес

Удельным весом называют отношение веса двигателя к развиваемой им тяге, т. е.

$$\gamma_{дв} = \frac{G_{дв}}{R} \frac{\kappa \mathcal{G}}{\kappa \Gamma}. \quad (3.31)$$

Ресурс двигателя

Ресурсом называют срок службы (суммарную продолжительность работы) двигателя, т. е.

τ , час.

* Максимальному поперечному сечению двигателя.