

Основные характеристики силовой установки

(«Практическая аэродинамика и динамика полета» П.Т. Бехтир, глава 2)

Тяга двигателя и удельный расход топлива

Величина тяги зависит от расхода воздуха и топлива через двигатель в единицу времени. Расход топлива за единицу времени составляет в среднем 1...1,5% от расхода воздуха. Следовательно, можно считать, что масса газов, выходящих из двигателя, практически равна массе воздуха, входящего в него.

Тяга турбореактивного двигателя будет:

$$P_R = \frac{m}{t}(C_5 - V) = m_{сек}(C_5 - V)$$

где $m/t = m_{сек}$ – секундная масса воздуха, проходящего через двигатель.

Из этой формулы видно, что чем больше секундный расход воздуха ($m_{сек}$) и больший прирост его скорости ($C_5 - V$) в двигателе, тем реактивная тяга больше.

Для оценки экономичности двигателя вводится понятие *удельной тяги* $p_{y\partial}$ и *удельного расхода воздуха* $C_{y\partial}$. Учитывая, что секундная масса воздуха, проходящего через двигатель $m_{сек} = G_{сек}/g$ (где $G_{сек}$ – секундный вес воздуха, проходящего через двигатель), то тягу двигателя можно выразить $P_R = G_{сек}(C_5 - V)/g$.

Выражение $(C_5 - V)/g$ и является удельной тягой $p_{y\partial}$. Как видно из формулы, удельная тяга $p_{y\partial} = (C_5 - V)/g$ численно равна тяге, получаемой при прохождении через двигатель 1 кг воздуха.

Удельный расход топлива $C_{y\partial} = S_{час}/P_R$ – часовой расход топлива в килограммах, необходимый для получения одного килограмма тяги двигателя. Если удельный расход топлива $C_{y\partial}$ меньше, а удельная тяга $p_{y\partial}$ больше, то двигатель более экономичен.

Дроссельная характеристика двигателя

Дроссельная характеристика выражает зависимость тяги P_R и удельного расхода топлива $C_{y\partial}$ от частоты вращения ротора двигателя (от оборотов двигателя).

Режим малого газа. На режиме малого газа двигатель должен работать устойчиво, тяга на этом режиме минимальна. Частота вращения и тяга зависят от внешних условий, а в полете и от высоты. На режиме малого газа почти вся тепловая энергия газов расходуется на вращение двигателя. Следовательно, скорость истечения газов из реактивного сопла и тяга двигателя небольшие. Часовые расходы топлива минимальны, а удельные – велики, так как тяга незначительная.

При увеличении расхода топлива (увеличении РУД) увеличивается температура газов перед турбиной, крутящий момент и частота вращения турбины двигателя, вследствие чего компрессор увеличивает подачу воздуха. Увеличение расхода и температуры газов вызывает увеличение тяги. На малых оборотах тяга увеличивается медленно, а с их ростом – быстрее. Быстрый рост тяги с

увеличением расхода топлива (частоты вращения) объясняется тем, что на вращение турбины (компрессора и др.) с несколько большей частотой вращения требуется небольшой дополнительный крутящий момент турбины.

Следовательно, дополнительный расход топлива и воздуха идет в основном на увеличение тяги. В этом случае увеличивается секундный расход воздуха в результате увеличения частоты вращения компрессора, увеличивается давление газов перед турбиной и скорость их истечения из реактивного сопла.

Удельный расход топлива резко падает, так как тяга возрастает в большей степени, чем часовые расходы топлива. Минимальные удельные расходы топлива будут при крейсерских режимах работы двигателя.

При выходе двигателя на взлетный режим часовые расходы топлива, температура газов и обороты турбины становятся максимальными. Компрессор обеспечивает максимальную подачу воздуха. Расход газов через двигатель и скорость их истечения достигают максимума, и тяга становится максимальной.

На номинальном режиме производится набор высоты. Горизонтальный полет при необходимости можно выполнять на номинальном режиме.

Взлетный режим характеризуется максимальной тягой. На этом режиме производится взлет самолета и уход на второй круг. Он может быть использован с ограничением по времени в крайне трудных условиях полета (полет и заход на посадку на одном двигателе).

Режим максимальной обратной тяги (реверса) имеют почти все двигатели. Устанавливается этот режим специальными рычагами при положении РУД на режиме малого газа после приземления самолета и при прерванном взлете. Величина отрицательной тяги на этом режиме зависит от скорости полета, причем, чем больше скорость полета, тем отрицательная тяга больше.

При эксплуатации двигателя необходимо учитывать, что величина тяги, частоты вращения и температуры газов на каждом режиме в значительной степени зависят от температуры воздуха и атмосферного давления. На рис.1 показана зависимость тяги на взлётном режиме от температуры воздуха при различном атмосферном давлении.

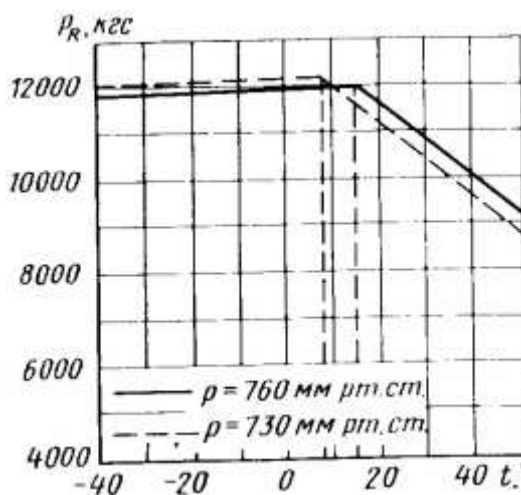


Рис.1. Зависимость тяги на взлётном режиме от температуры воздуха при различном атмосферном давлении.

Из графиков (рис. 1) видно, что при увеличении температуры воздуха до 15°C при постоянном атмосферном давлении 760 мм.рт.ст. тяга почти не изменяется (незначительно увеличивается). При дальнейшем увеличении температуры воздуха тяга резко уменьшается вследствие уменьшения расхода воздуха через двигатель, понижения степени повышения давления компрессора и уменьшения подачи топлива с целью сохранения постоянной (максимальной) частоты вращения двигателя и температуры газов перед турбиной.

Рассмотрим характер изменения тяги на малых и больших оборотах с позиции летной эксплуатации самолета. Согласно требованиям НЛГС приемистость двигателя характеризуется следующими данными. При переводе РУД на земле с режима малого газа до взлетного за 1-2 с, двигатель устанавливает взлетные обороты за 7...10 с, а в полете с режима малого полетного газа (0,42 номинала) за 4...7 с. Тяга двигателя до оборотов высокого давления ($\approx 79\%$) будет расти медленно (в среднем на 1% увеличения оборотов рост тяги составляет около 100 кгс). При увеличении оборотов с 79% до взлетных 97,5% тяга растет значительно быстрее. Эту особенность приемистости и изменения тяги следует учитывать на снижении при заходе на посадку и особенно при уходе на второй круг.

Зависимость тяги двигателя и удельного расхода топлива от скорости полета

Зависимость тяги и удельного расхода топлива от скорости полета на различных режимах работы двигателя показана на рис. 2. Рассмотрим зависимость тяги и удельного расхода топлива от скорости полета на взлетном режиме. Если скорость самолета равна нулю и двигатель работает на оборотах 97,5%, то тяга его максимальная и равна 12000 кгс. При увеличении скорости тяга сначала несколько уменьшается. Это объясняется тем, что на малых скоростях полета секундный расход воздуха ($m_{сек}$) и скорость истечения газов из двигателя C_5 практически не изменяется, а скорость полета V возрастает.

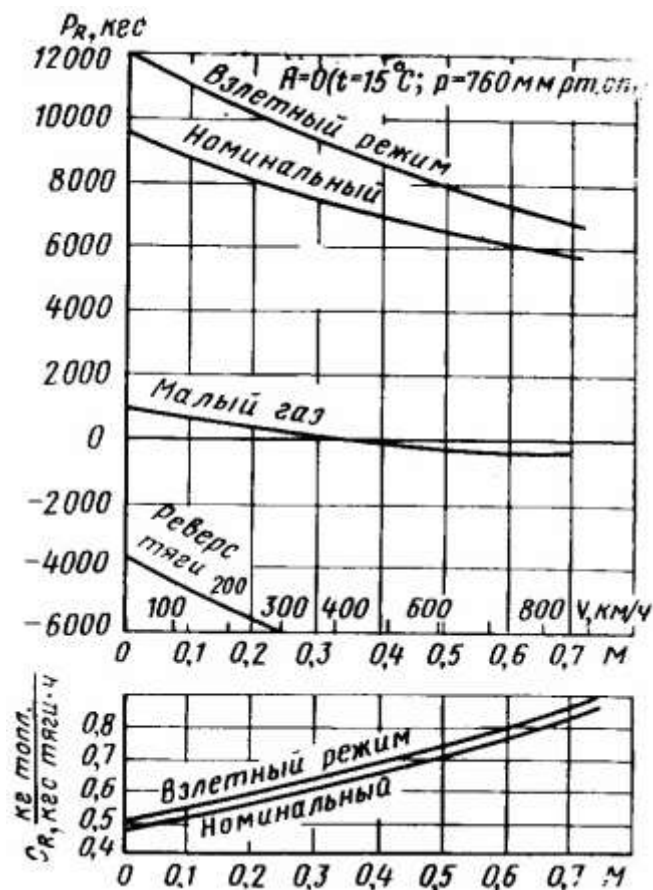


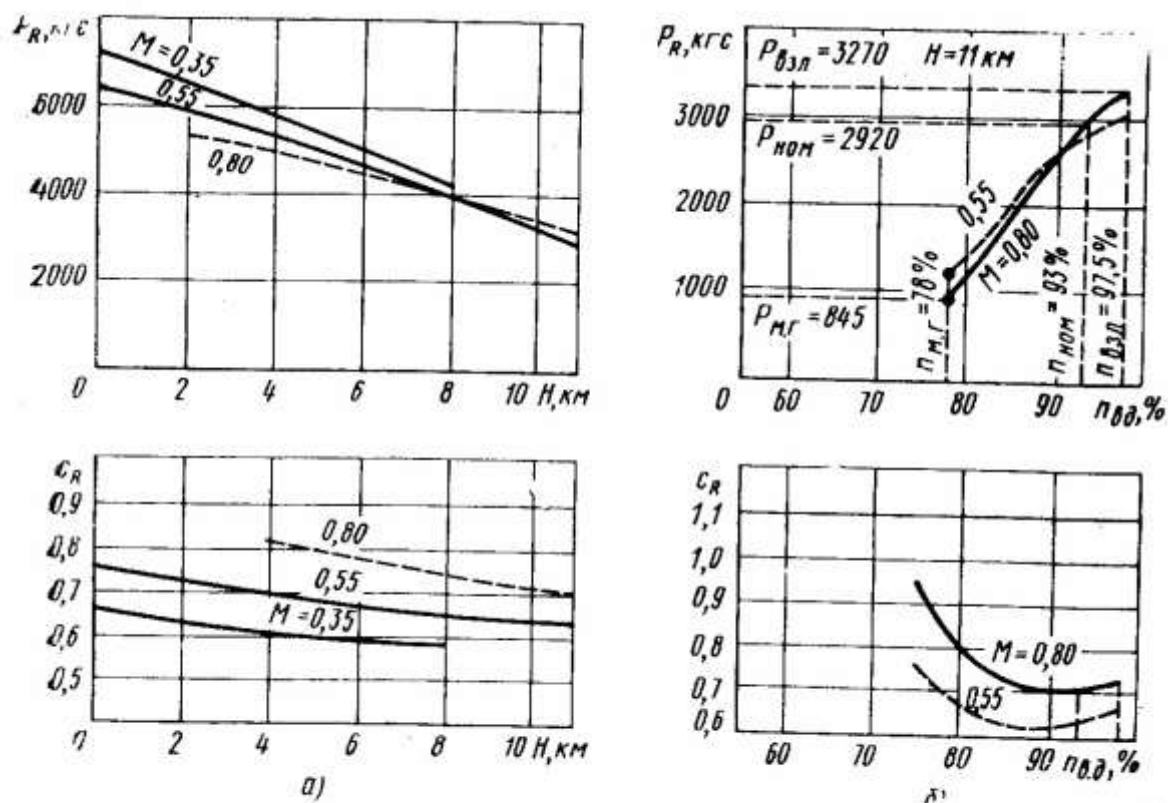
Рис.2.

При дальнейшем увеличении скорости скоростной напор (динамическое давление) воздуха перед двигателем увеличивается, вследствие чего увеличивается секундный расход и скорость истечения газов C_5 . Причём скорость C_5 возрастает дополнительно, так как при увеличении $m_{сек}$ автоматически увеличивается и расход топлива для поддержания постоянной температуры газов перед турбиной двигателя. Такое изменение $m_{сек}$ и V сначала замедляет падение тяги, а при больших скоростях особенно на больших высотах она начинает возрастать, так как скоростной напор воздуха растёт пропорционально квадрату скорости. Удельный расход топлива при этом непрерывно увеличивается, особенно на малых скоростях.

Такой характер изменения тяги и удельного расхода воздуха от скорости происходит и на всех режимах двигателя меньше взлетного.

Обратная (реверсивная) тяга при увеличении скорости полета увеличивается.

Зависимость тяги двигателя и удельного расхода топлива от высоты полета



Высотная характеристика двигателя (номинальный режим):

а—зависимость P_R и C_R от H при различных числах M ; б—зависимость P_R и C_R от $n_{в.д}$ на $H=11\ 000$ м при различных числах M

Рис.3.

На рис.3а показана зависимость тяги и удельного расхода топлива от высоты полета для различных чисел M , а на рис.3б — зависимость тяги и удельного расхода топлива от оборотов при различных числах M на высоте 11000 м.

Рассмотрим зависимость тяги и удельного расхода топлива с поднятием на высоту в тропосфере. Так как тяга двигателя при постоянной температуре уменьшается пропорционально падению давления, то с поднятием на высоту в тропосфере она уменьшилась бы так, как уменьшается давление. Но уменьшение температуры при увеличении высоты в тропосфере (до 11000 м) вызывает замедления падения плотности воздуха и увеличение степени сжатия компрессора двигателя, вследствие чего замедляется падение тяги. Кроме того, понижение температуры наружного воздуха замедляет уменьшение расхода топлива для поддержания постоянной температуры газов в камере сгорания, а это в свою очередь замедляет падение давления газов в камере сгорания по сравнению с падением давления в атмосфере, вследствие чего увеличивается скорость истечения газов C_5 . Поэтому тяга реактивного двигателя с поднятием на высоту в тропосфере уменьшается не только медленнее давления, но и медленнее плотности воздуха. Такой характер уменьшения расхода топлива в единицу времени и тяги двигателя приводит к уменьшению удельного расхода топлива.

Рассмотрим изменение тяги и удельного расхода топлива при постоянной температуре воздуха и скорости полета, но при уменьшении атмосферного давления (это имеет место на высотах более 11000 м). В этом случае

пропорционально падению давления будут уменьшаться плотность и секундный расход воздуха, проходящего через двигатель. Скорость истечения газов из двигателя и прирост скорости ($C_5 - V$) изменяться не будут. Это объясняется следующим. Пусть давление, а следовательно, плотность и секундный расход воздуха уменьшились в два раза. Во столько же раз уменьшится избыточное давление воздуха перед компрессором двигателя и за ним, так как они пропорциональны скоростному напору, а температура в атмосфере и температура газов в камере сгорания поддерживается постоянной. В нашем примере вдвое меньшее избыточное давление действует на вдвое меньшую массу газа, следовательно, эта масса приобретает такую же скорость истечения, какая была до понижения атмосферного давления.

Можно сделать вывод, что при постоянной скорости полета и скорости истечения газов из двигателя C_5 тяга уменьшается пропорционально C_5 , который при постоянной температуре воздуха уменьшается пропорционально падению давления. Тяга в этом случае уменьшается пропорционально падению давления.

Расход топлива в единицу времени автоматически уменьшается пропорционально уменьшению расхода воздуха, так как подогрев его осуществляется на одинаковое число градусов. Значит удельный расход топлива не изменяется (часовой расход топлива и тяга двигателя уменьшаются в одинаковой степени). При полете в стратосфере тяга с поднятием на высоту уменьшается пропорционально падению давления, а удельный расход топлива остается постоянным.