



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 4. Основные закономерности рабочего процесса ГТД

§ 4.9. Зависимости удельной тяги и удельного расхода топлива от скорости полета

Пусть скорость полета изменяется $V_{\Pi} = \text{var}$ при условии, что $T_{\Gamma}^* = \text{const}$, $m = \text{const}$, $x = \text{const}$, $T_{\text{H}} = \text{const}$, $\eta_{\text{СЖ}} = \text{const}$, $\eta_{\text{p}} = \text{const}$, $\eta_{\text{II}} = \text{const}$ и $\eta_{\Gamma} = \text{const}$.

С возрастанием скорости полета $V_{\Pi} \uparrow$ ($M_{\Pi} \uparrow$) суммарная степень повышения давления увеличивается $\pi_{\Sigma} \uparrow$, несмотря на уменьшение $\pi_{\text{K}}^* \downarrow$ при условии $L_{\text{K}} \approx \text{const}$, вследствие значительного увеличения $(\pi_{\text{V}} \sigma_{\text{ВХ}}) \uparrow \uparrow$.

Таблица - Зависимость $\pi_{\text{V}} \sigma_{\text{ВХ.СТ}}$ от числа M_{Π}

M_{Π}	0	1	2	3	3,5	4
π_{V}	1,0	1,9	7,8	37	76	152
$\sigma_{\text{ВХ.СТ}}$	0,90	0,97	0,86	0,66	0,54	0,40
$\pi_{\text{V}} \sigma_{\text{ВХ.СТ}}$	0,90	1,84	6,73	24,2	40,8	60,5

4.9.1. Зависимость удельной тяги от скорости полета

Преобразуем равенство

$$P_{\text{удGI}} = \left(\sqrt{\frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{1+m} + V_{\text{п}}^2} - V_{\text{п}} \right) (1+m),$$

умножив и разделив правую часть на выражение $\left(\sqrt{\frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{1+m} + V_{\text{п}}^2} + V_{\text{п}} \right)$:

$$P_{\text{удGI}} = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{1+m} + V_{\text{п}}^2 - V_{\text{п}}^2 \right) (1+m)}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{1+m} + V_{\text{п}}^2} + V_{\text{п}} \right)} ;$$

$$P_{\text{удGI}} = \frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{\sqrt{\frac{2 \cdot L_e \cdot \eta_{rII}}{1+m} + V_{\text{п}}^2} + V_{\text{п}}} .$$

Характер зависимости работы цикла L_e от скорости V_{Π} определяется в основном функцией $L_e = f(\pi_{\Sigma})$.

При увеличении $V_{\Pi} \uparrow$ работа цикла вначале изменяется незначительно, так как суммарная степень повышения давления обычно мало отличается от оптимальной, и поэтому в первом приближении можно принять $L_e = \text{const}$. Дальнейшее увеличение скорости $V_{\Pi} \uparrow$ (при $\pi_{\Sigma} > \pi_{\Sigma \text{opt}}$) приводит к уменьшению работы цикла $L_e \downarrow$, так как уменьшается количество подведенного к рабочему телу тепла $Q_1 \downarrow$.

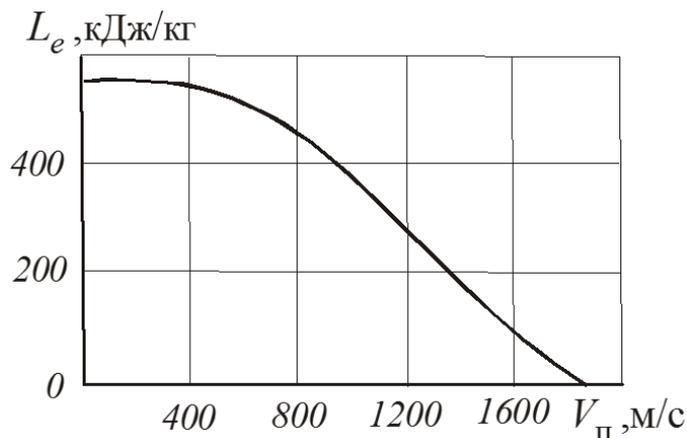


Рисунок — Пример зависимости работы цикла от скорости полета

Коэффициент гидравлических потерь наружного контура η_{rII} в формуле для $P_{удGI}$ изменяется в соответствии с формулой

$$\eta_{rII} = 1 - \frac{V_{п}^2/2}{L_e} (1 - \eta_{II}) \cdot m - x(1 - \eta_{II}) .$$

При увеличении $V_{п} \uparrow$ и соответствующем уменьшении $L_e \downarrow$ коэффициент η_{rII} однозначно уменьшается:

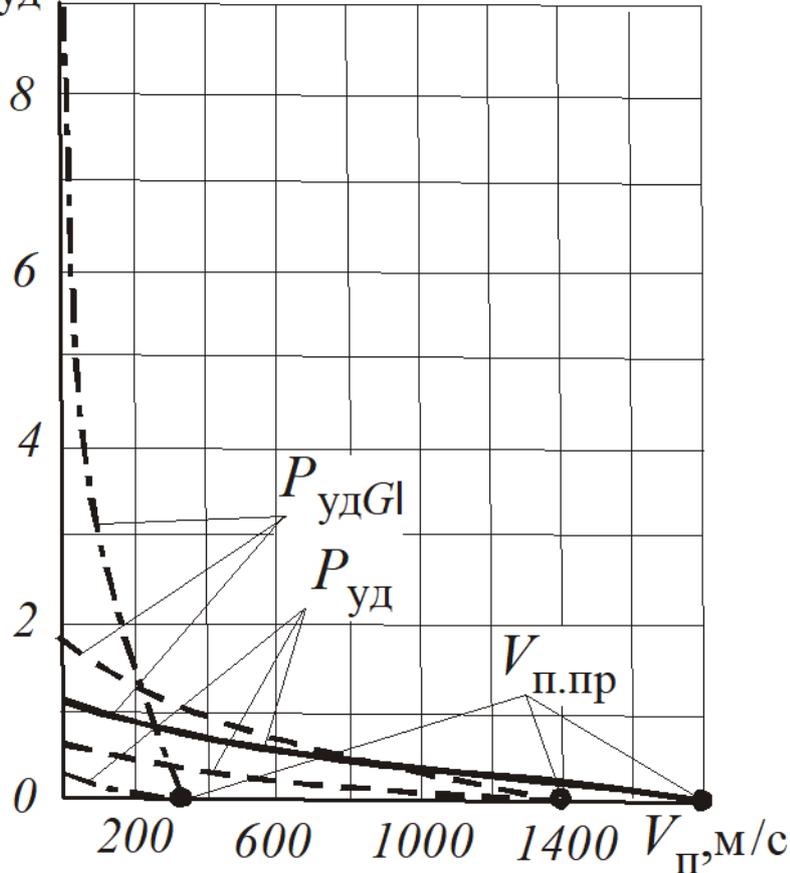
$$\eta_{rII} \downarrow = 1 - \frac{(V_{п} \uparrow)^2/2}{L_e \downarrow} (1 - \eta_{II}) \cdot m - x(1 - \eta_{II}) .$$

Причем, чем выше степень двухконтурности m , тем при меньшем значении $V_{п} = V_{п.пр}$ коэффициент η_{rII} и, соответственно, удельные тяги $P_{удGI}$ и $P_{уд}$ обращаются в ноль и всё подведенное тепло идет на преодоление потерь.

Вследствие того что $\pi_{\Sigma пр ТВД} < \pi_{\Sigma пр ТРДД} < \pi_{\Sigma пр ТРД} ,$

то $V_{п.пр ТВД} < V_{п.пр ТРДД} < V_{п.пр ТРД} .$

$P_{уд}, \text{кН}\cdot\text{с}/\text{кг}$



Зависимости удельных тяг $P_{удGI}$ и $P_{уд}$
от скорости полета $V_{п}$

(Сплошная линия соответствует ТРД,
пунктирная — ТРДД,
штрихпунктирная - ТВД)

4.9.2. Зависимость удельного расхода топлива от скорости полета

С увеличением скорости полета $V_{\Pi} \uparrow$ снижение удельной тяги $P_{уд} \downarrow$ приводит к увеличению полетного КПД $\eta_{\Pi} \uparrow$ всех типов ГТД:

$$\eta_{\Pi} \uparrow = \frac{2}{2 + P_{уд} \downarrow / V_{\Pi} \uparrow}.$$

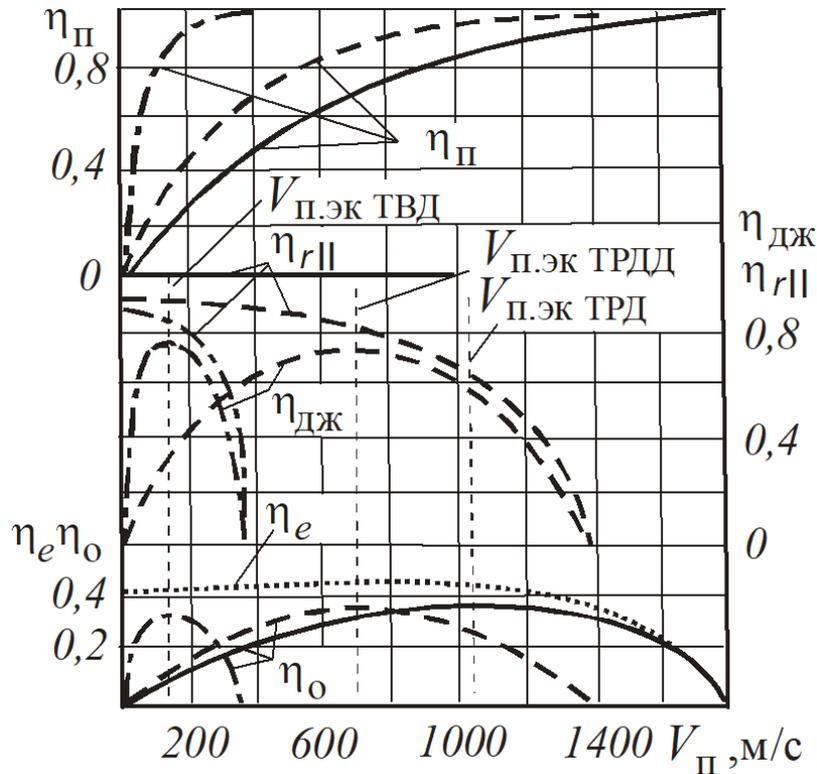
При возрастании скорости V_{Π} от 0 до $V_{\Pi.пр}$ КПД двигателя **ТРД** $\eta_{дж}$, равный полетному КПД η_{Π} , увеличивается от 0 до 1.

КПД двигателей $\eta_{дж}$ **ТРДД** и **ТВД** зависит как от η_{Π} , так и от $\eta_{гII}$: $\eta_{дж} = \eta_{гII} \cdot \eta_{\Pi}$.

Коэффициент $\eta_{гII}$ изменяется противоположно изменению полетного КПД η_{Π} , поэтому $\eta_{дж}$ **ТРДД** и **ТВД** по скорости полета имеет максимум: вначале (на небольших скоростях) на величину $\eta_{дж}$ преобладающее влияние оказывает полетный КПД η_{Π} , а затем (на больших скоростях) – коэффициент гидравлических потерь $\eta_{гII}$.

Общий КПД η_o с увеличением скорости полета V_{Π} вначале увеличивается, достигает максимума при некоторой экономической скорости $V_{\Pi} = V_{\Pi.ЭК}$, затем уменьшается до нуля.

Наличие максимума общего КПД η_o по V_{Π} объясняется влиянием двух факторов: уменьшением потерь кинетической энергии с выходной скоростью (ростом η_{Π}) и увеличением доли гидравлических потерь от тепла, внесенного в двигатель с топливом (снижением η_{rI} и η_{rII}).



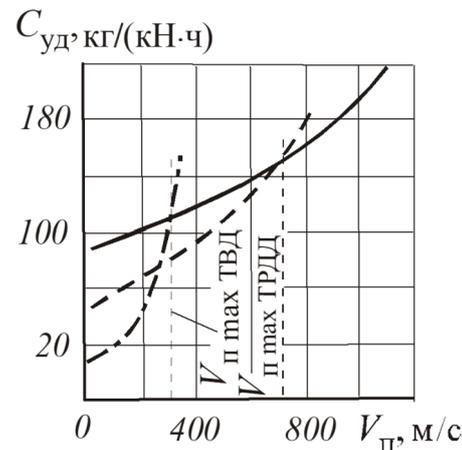
Зависимость общего КПД η_o от скорости полета V_{Π}
(Сплошная линия соответствует ТРД, пунктирная — ТРДД, штрихпунктирная - ТВД)

Экономическая скорость полета различных типов ГТД изменяется так же, как и экономическая суммарная степень повышения давления, т.е.

$$V_{п.экТВД} < V_{п.экТРДД} < V_{п.экТРД} .$$

На всех типах ГТД удельный расход топлива $C_{уд}$ увеличивается по скорости полета $V_{п}$, несмотря на повышение общего КПД η_o , так как увеличение скорости полета преобладает над ростом общего КПД:

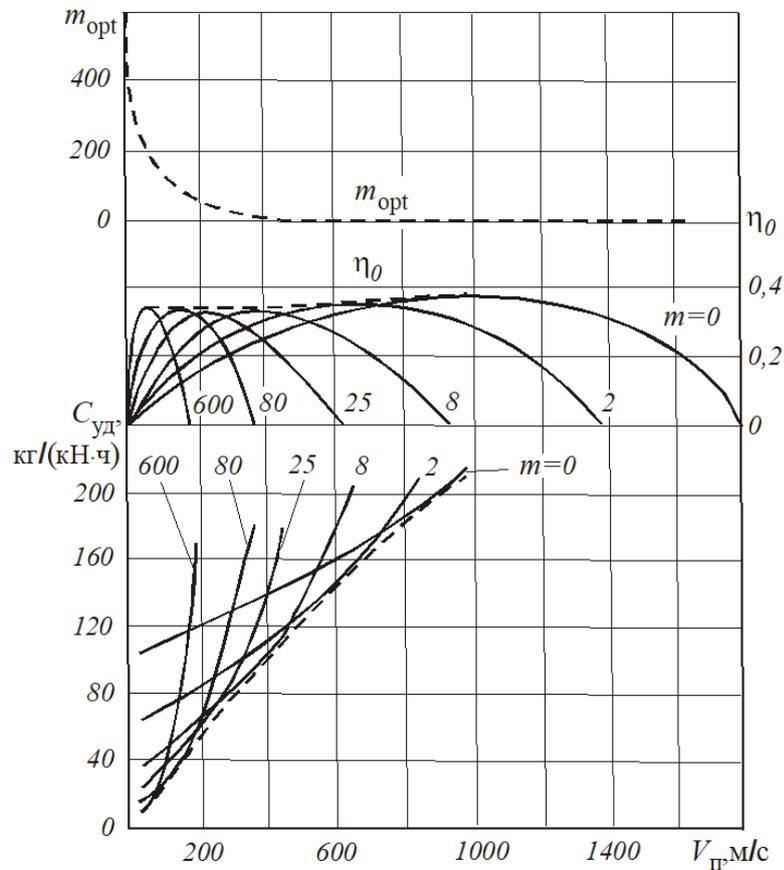
$$C_{уд} \uparrow = \frac{3600}{H_u} \cdot \frac{V_{п} \uparrow \uparrow}{\eta_o \uparrow \downarrow} .$$



Это объясняется тем, что величина $C_{уд}$ определяется как отношение расхода топлива к тяге (силе), а не к работе передвижения. Увеличение $C_{уд}$ с повышением $V_{п}$ не означает снижения эффективности ГТД, а подтверждает тот факт, что при изменении скорости полета величина $C_{уд}$ перестает быть критерием эффективности двигателя.

4.9.3. Оптимальный ГТД для различных скоростей полета

Для достижения максимальной удельной тяги и минимального удельного расхода топлива, параметры двигателя необходимо изменять по скорости полета: с увеличением $V_{\Pi} \uparrow$ уменьшаются оптимальные значения степени двухконтурности $m_{opt} \downarrow$ и коэффициента распределения энергии между контурами $x_{opt} \downarrow$.



Каждый ГТД с постоянным значением m является оптимальным только на одной (экономической) скорости полета. Применение этого ГТД на скоростях полета, отличающихся от экономической, приводит к снижению его эффективности по сравнению с эффективностью оптимального ГТД.

Поэтому для получения максимальной эффективности каждый тип ГТД (с данными значениями m и x) целесообразно применять в определенном диапазоне скоростей.

Экономическая скорость полета, а следовательно, и рекомендуемый диапазон условий эксплуатации данного типа ГТД зависит не только от степени двухконтурности, но и от параметров цикла, а также от потерь в узлах. Увеличение работы цикла или снижение потерь в двигателе приводит к увеличению характерных скоростей ($V_{п.эк}$, $V_{п.мах}$, $V_{п.пр}$) и расширению диапазона применения ГТД.