

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ

Циклова комісія експлуатації та ремонту авіаційного транспорту

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Теорія теплових двигунів»

обов'язкових компонент

освітньої програми першого (бакалавр) рівня вищої освіти

272 Авіаційний транспорт (Експлуатація та ремонт повітряних суден)

за розділом №1 – «Теорія газотурбінних двигунів»

за темою №2 – «Закони керування, характеристики і режими роботи ТРД»

Лекція 14. «Швидкісні та висотні характеристики ТРД»

Харків 2021

СХВАЛЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 22.09.2021 № 2

СХВАЛЕНО

Секцією Науково-методичної
ради ХНУВС зі спеціальних
дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації
Протокол від 30.08.2021 № 1

.

Розробник: викладач циклової комісії аеронавігації Ємець В.В.

Рецензенти:

1. Викладач циклової комісії аеронавігації, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, викладач-методист Тягній В.Г.

2. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.

Розділ 1 Теорія газотурбінних двигунів

Тема 2. Закони керування, характеристики і режими роботи ТРД

Лекція 14. Швидкісні та висотні характеристики ТРД

- 1. Швидкісні характеристики одновального ТРД*
- 2. Висотні характеристики одновального ТРД*
- 3. Особливості характеристик двохвального ТРД*

Рекомендована література

Основна

1. Терещенко Ю.М., Бойко Л.Г. Мамлюк О.В. Газотурбінні двигуни літальних апаратів. – Київ, «Вища школа», 2000

Допоміжна

2. Теорія теплових двигунів. Термогазодинамічний розрахунок газотурбінних двигунів. за ред. проф.Ю.М. Терещенка. – Київ, Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ-друк», 2009
3. Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. – М. Машиностроение, 1969
4. Клячкин А.Л. Эксплуатационные характеристики авиационных газотурбинных двигателей. – М., Транспорт, 1967
5. Вагин А.Н., Неспела А.Н., Семенюта В.А., Цыбалов И.Г. Теория авиационных двигателей. Ч.2. Основы теории реактивных двигателей. – М., Воениздат МО СССР, 1968

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Швидкісні характеристики одновального ТРД

Швидкісними характеристиками називають залежності тяги і питомої витрати палива ТРД від швидкості польоту при постійній висоті і заданій програмі регулювання

1.1 Зміна тяги в залежності від швидкості польоту

Тяга ТРД дорівнює твору секундної витрати повітря на питому тягу:

$$P = G_{\Pi} \cdot P_{y0} \quad (1)$$

отже, необхідно визначити, як залежать витрата палива і питома тяга від швидкості польоту.

Зі збільшенням швидкості польоту зростає степінь підвищення тиску в дифузорі від швидкісного напору $\pi_{СК}^*$, а степінь підвищення тиску в компресорі π_K^* зменшується із-за росту температури повітря перед компресором. Загальна степінь підвищення тиску в двигуні $\pi_{СК}^* \cdot \pi_K^*$ росте. Щільність повітря перед турбіною при $T_3^* = \text{const}$ зростає. Таким чином, витрата газу, а отже, секундна витрата повітря через двигун зростає зі збільшенням швидкості.

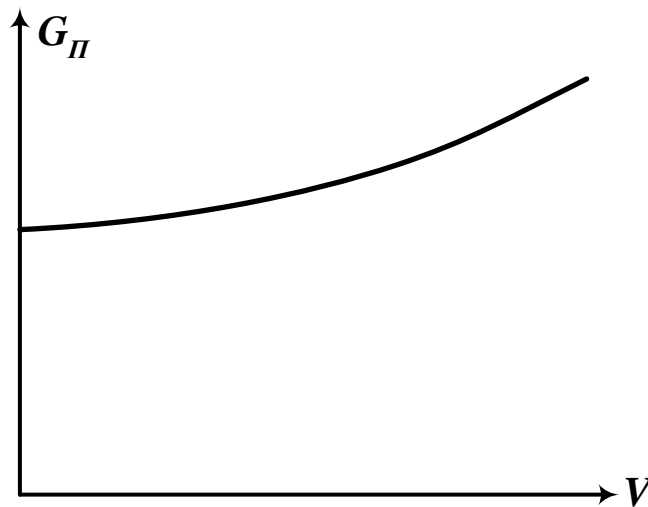


Рисунок 1. Залежність секундної витрати повітря ТРД від швидкості польоту

Зі зростанням швидкості польоту степінь підвищення тиску в двигуні зростає, а степінь підвищення тиску в турбіні π_T^* незмінна, то наявний перепад тисків у вихідному соплі зростає, а температура газу перед соплом залишається незмінною.

При повному розширенні газів у вихідному соплі швидкість витікання c_5 зростає, проте вона росте повільніше, ніж V за рахунок того, що при $T_3^* = \text{const}$ величина тепла, що внесено в двигун (Q_0), зменшується. Величина $c_5 - V$ зменшується, тому зменшується питома тяга. На деякій швидкості V_{max} (M_{Hmax}) $c_5 = V$, тому $P_{y0} = 0$ (рис.2).

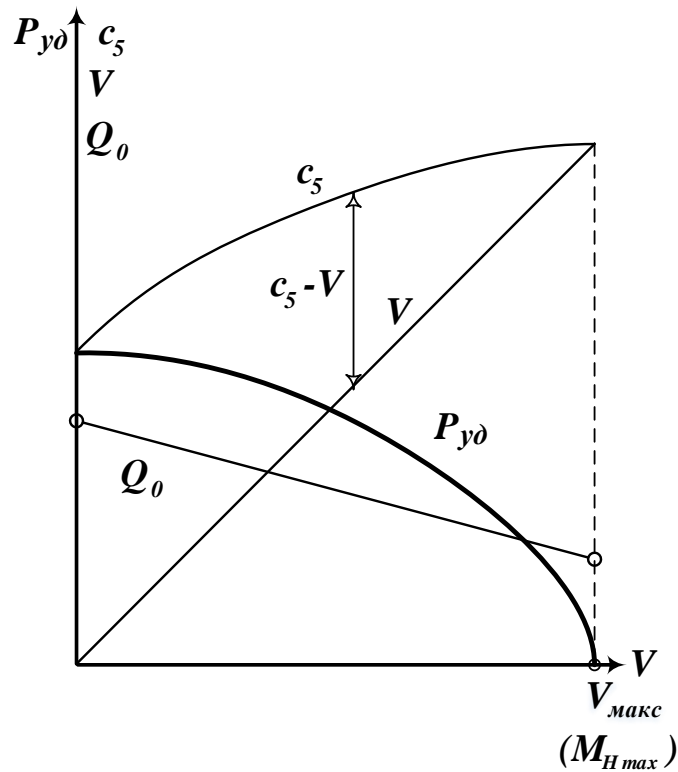


Рисунок 2. Залежності c_5 , Q_0 і $P_{y\partial}$ від швидкості польоту
На рисунку 3 показано зміна тяги від швидкості польоту.

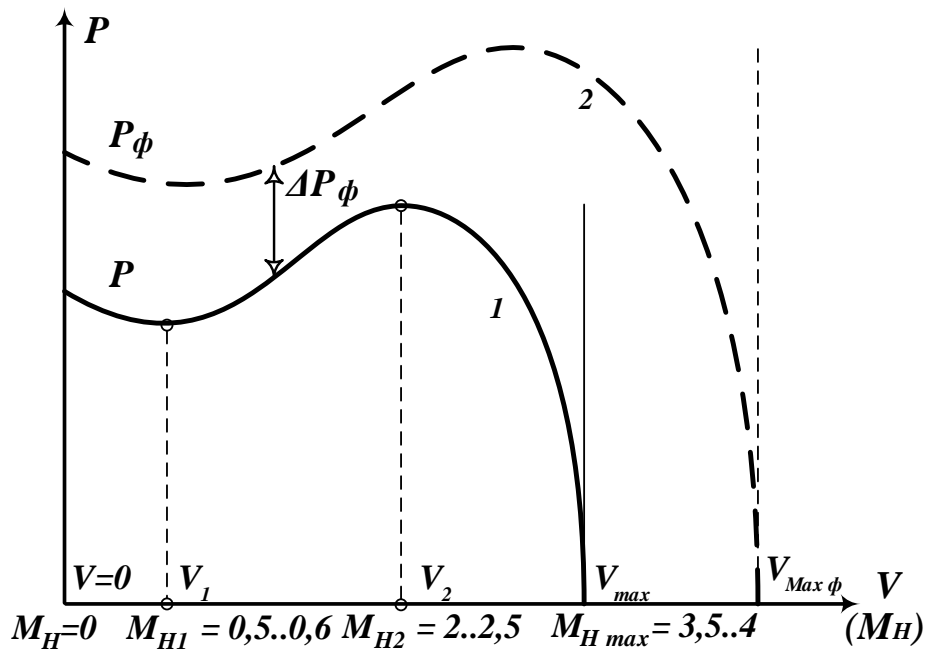


Рисунок 3. Залежність тяги ТРД без форсажу (1) і з форсажем (2) від швидкості польоту і чисел Маха

На малих швидкостях зі збільшенням швидкості витрата повітря незначно зростає, а питома тяга знижується інтенсивно, тяга ТРД знижується, і на швидкості, яка відповідає $M_H \approx 0,5 \div 0,6$, досягає мінімуму ($P \approx 0,8 \div 0,85 P_0$). Далі витрата повітря інтенсивно збільшується і тяга зростає, на швидкості, яка відповідає $M_H \approx 2 \div 2,5$, вона досягає максимуму і далі, за рахунок різкого падіння питомої

тяги зменшується до нуля ($M_H \approx 3,5 \div 4$).

1.2 Зміна питомої витрати палива від швидкості польоту

Питома витрата палива змінюється прямо пропорційно кількості тепла, що підведено до газу і зворотно пропорційно питомої тяги. Степінь використання тепла в двигуні визначається повним к.к.д.: $\eta_{\Pi} = \eta_{\text{вн}} \eta_p$.

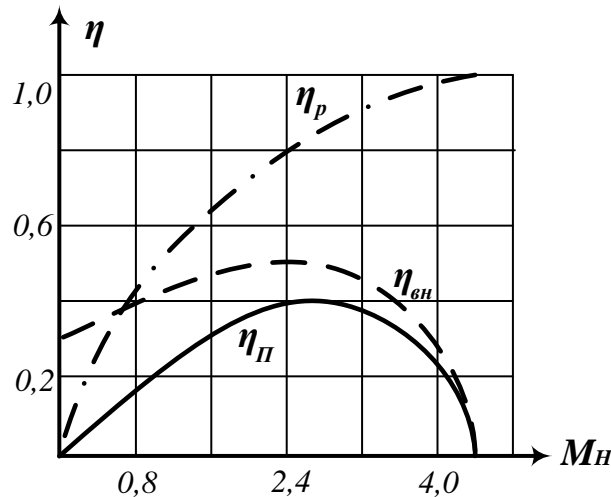


Рисунок 4. Залежність внутрішнього ($\eta_{\text{вн}}$), тягового (η_p) и повного (η_{Π}) к.к.д. від швидкості польоту ($H = \text{const}$).

До $M_H \approx 2 \div 2,5$ внутрішній к.к.д. збільшується, а далі – зменшується із-за зростання гідравлічного опору в двигуні. Тяговий к.к.д. зростає по мірі росту швидкості. Повний к.к.д. росте до $M_H \approx 2,5 \div 3$, а далі різко падає. Питома тяга падає з ростом швидкості.

Залежність питомої витрати палива від швидкості приведено на рисунку 5.

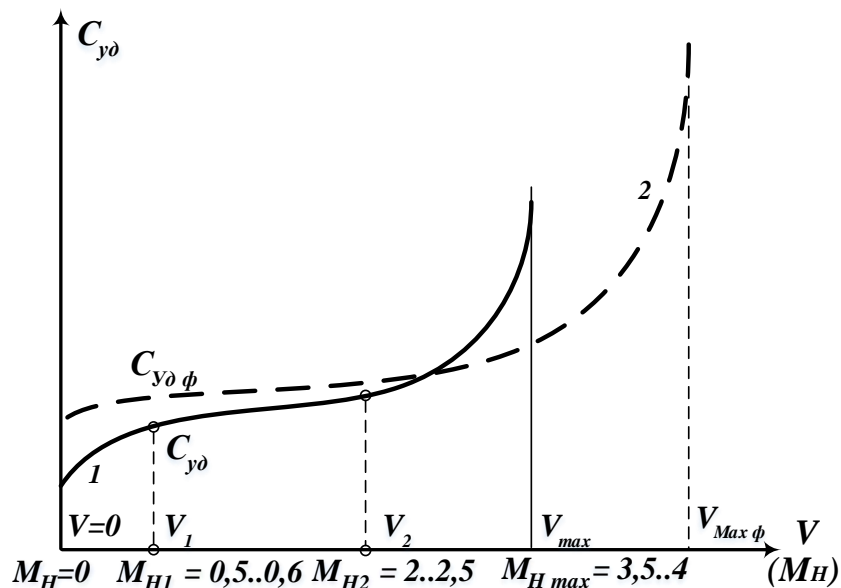


Рисунок 5. Залежність питомої витрати палива ТРД без форсажу (1) і з форсажем (2) від швидкості польоту і чисел Маха

2. Висотні характеристики одновального ТРД

Висотними характеристиками ТРД називають залежності тяги і питомої витрати палива від висоти польоту при постійній швидкості і заданій програмі регулювання.

При регулюванні ТРД по програмі $n = \text{const}$; $f_{кр.с} = \text{const}$ температура газу T_3^* при зміні висоти польоту практично не змінюється, тому висотні характеристики ТРД при програмах регулювання $n = \text{const}$; $f_{кр.с} = \text{const}$ і $n = \text{const}$; $T_3^* = \text{const}$ є ідентичними.

2.1 Зміна тяги в залежності від висоти польоту

Температура атмосферного повітря до висоти $H=11$ км знижується. Це веде к збільшенню степені підвищення тиску в двигуні, в результаті чого тиск перед турбіною і за турбіною падає повільніше в порівнянні з навколишнім середовищем.

Перепад тиску в вихідному соплі збільшується, а температура газу за турбіною остається незміною і швидкість витікання газів з сопла до $H=11$ км зростає.

На $H > 11$ км температура повітря остається постійною, тому степінь підвищення тиску, швидкість витікання і питома тяга остаються постійними.

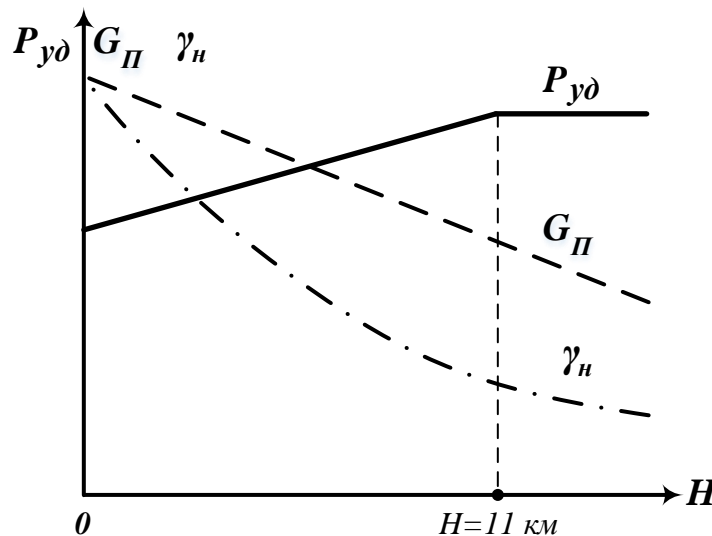


Рисунок 6. Залежності G_P , γ_n і $P_{уд}$ від висоти польоту

Витрата повітря зменшується пропорційно падінню тиску газу перед турбіною. Тиск газу перед турбіною до $H=11$ км в зв'язку з зростанням π_K^* зменшується повільніше, чим атмосферний тиск. Вище $H=11$ км $\pi_K^* = \text{const}$ і витрата газу змінюється пропорційно атмосферному тиску.

Так як $P = G_P \cdot P_{уд}$, то до $H=11$ км ($P_{уд} \uparrow, G_P \downarrow$) тяга двигуна зменшується повільніше ($P_{уд} \uparrow, G_P \downarrow$), ніж на $H > 11$ км ($P_{уд} \downarrow, G_P \downarrow$). Такому характеру зміни тяги також сприяє характер зміни щільності повітря.

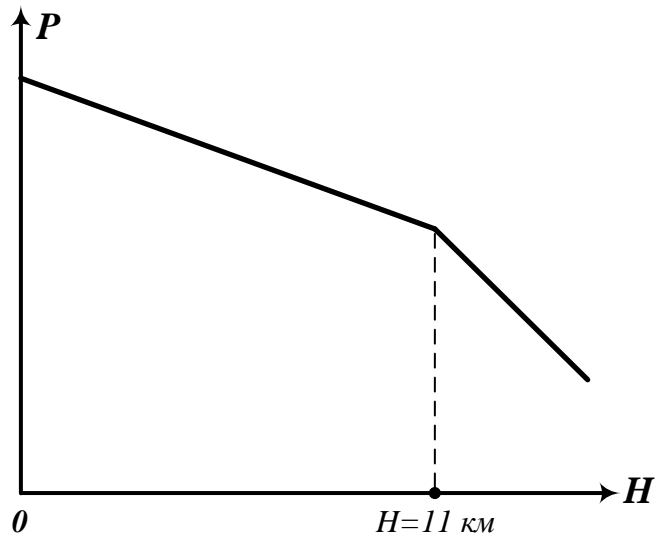


Рисунок 7. Залежність тяги ТРД від висоти

2.2 Зміна питомої витрати палива от висоти польоту

При незмінній швидкості польоту питома витрата палива залежить від повного к.к.д. двигуна. Зі зміною висоти польоту к.к.д. ТРД змінюються:

- до $H=11$ км $\eta_{\text{вн}} \uparrow$ із-за степені підвищення тиску, при $H > 11$ км $\eta_{\text{вн}} = \text{const}$;
- до $H=11$ км $\eta_p \downarrow$ із-за $c_5 \uparrow$, а $V = \text{const}$.

Внутрішній к.к.д. росте більш інтенсивно, ніж зменшується тяговий к.к.д. Тому повний к.к.д. з ростом висоти до $H=11$ км зростає.

Тому до $H=11$ км питома витрата палива зменшується, а при $H > 11$ км остається сталим.

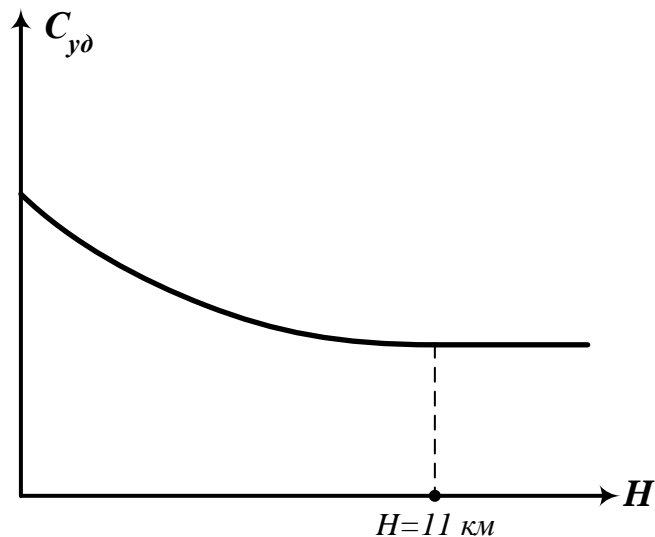


Рисунок 8. Залежність питомої витрати палива ТРД від висоти

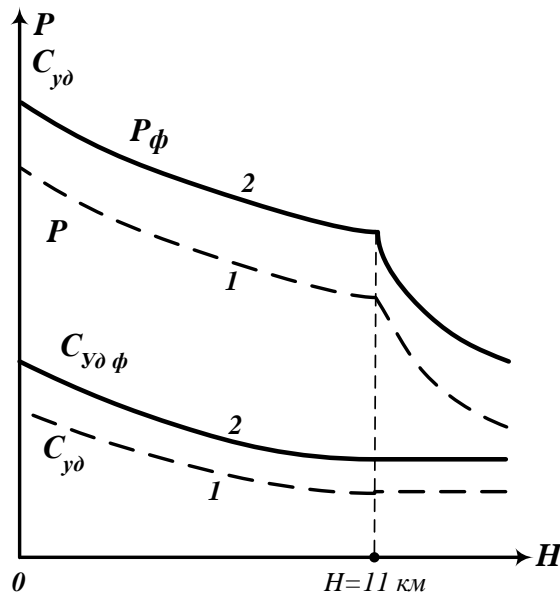


Рисунок 9. Висотні характеристики ТРД без форсажу (1) і с форсажем (2)

3. Особливості характеристик двохвального ТРД

Характеристики двохвальних ТРД якісно аналогічні характеристикам одновальних ТРД. Кількісна відмінність обумовлена більш високими значеннями к.к.д. компресора і різноманітністю можливих програм регулювання.

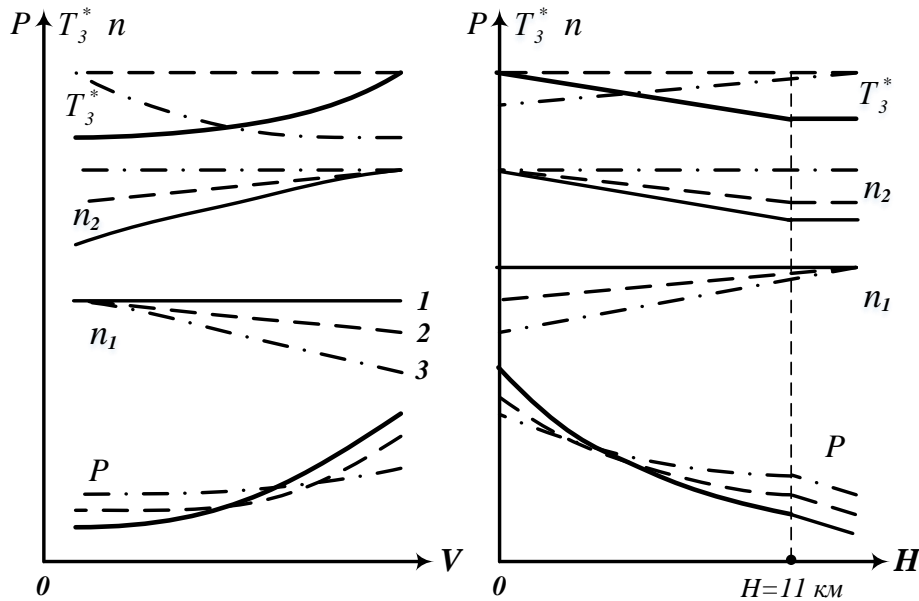


Рисунок 10. Швидкісні і висотні характеристики двохвальних ТРД при різних програмах регулювання: 1 - $n_1 = \text{const}$; $f_{кр.с} = \text{const}$; 2 - $T_3^* = \text{const}$; $f_{кр.с} = \text{const}$; 3 - $n_2 = \text{const}$; $f_{кр.с} = \text{const}$

Особливості протікання швидкісних і висотних характеристик двохвальних ТРД з нерегульованим соплом ($f_{кр.с} = \text{const}$) визначаються вибраною програмою регулювання двигуна. (рис 10).