

**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 №1 – «Робочі процеси, діючі в основних вузлах ГТД»**

**Лекція 10. «Вихідні пристрої. Показники 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 1. Робочі процеси, діючі в основних вузлах ГТД**

#### **Лекція 10. Вихідні пристрої. Показники ТРД**

- 1. Вихідний пристрій: призначення, вимоги, типи, параметри*
- 2. Зміна параметрів стану газу у вихідному пристрої ТРД з нерегульованим соплом*
- 3. Ефективні показники ТРД*
- 4. Коефіцієнт корисної дії ТРД*
- 5. Залежність питомих показників ТРД від основних параметрів робочого процесу*

#### **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. 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. Вихідний пристрій: типи, параметри

Призначення сопла – створення сили тяги. Найбільш поширеними типами сопел є:

- нерегульовані сопла;
- регульовані сопла;
- сопла з форсажною камерою згорання;
- сопла зі зміною напрямку вектору тяги.

Також в залежності від швидкості витікання газу сопла діляться на дозвукові та надзвукові (сопла Лавалю).

Тип сопла визначається розташованим перепадом тиску у сопле.

*Розташований (наявний) перепад тиску – це відношення повного тиску перед соплом до атмосферного тиску:*

$$\pi'_c = \frac{p_4''}{p_H} \quad (1)$$

При цьому, в випадку дозвукового (звужувального) сопла критичний перепад тиску дорівнює  $\pi_{c.kp} = \left( \frac{k_r + 1}{2} \right)^{\frac{k_r}{k_r - 1}} \approx 1.86$ .

Якщо  $\pi'_c > \pi_{c.kp}$ , то для повного розширення газу необхідно використовувати сопло Лавалю. Однак, при  $\pi'_c \approx 5$  для зниження гідравлічних і хвильових втрат вигідніше використовувати звужувальні сопла.

Основні параметри вихідних сопел:

1. *Коефіцієнт швидкості* – відношення дійсної швидкості витікання газу з сопла до ідеальної швидкості витікання:

$$\varphi_0 = \frac{c_5}{c_{5id}} = \frac{c_5}{\sqrt{2g \frac{k_r}{k_r - 1} R T_{4''} \left( 1 - \frac{1}{\pi_{c.p}^{\frac{k_r}{k_r - 1}}} \right)}} \quad (2)$$

2. *Коефіцієнт збереження повного тиску в соплі:*

$$\sigma_c = \frac{p_5^*}{p_4^*} \quad (3)$$

3. *Розрахункова степінь розширення газу в сопле  $\pi_{c.p}$ , або відповідно відношення для сопла Лавалю -  $f_5/f_{kp}$ .*

Основні вимоги, що пред'являється до вихідних сопел:

1. Малі гідравлічні втрати (великі значення  $\varphi_0$  и  $\sigma_c$ ).
2. Забезпечення можливості регулювання сопел.
3. Простота виготовлення і надійність в експлуатації.

## 2. Зміна параметрів стану газу у вихідному пристрої ТРД з нерегульованим соплом

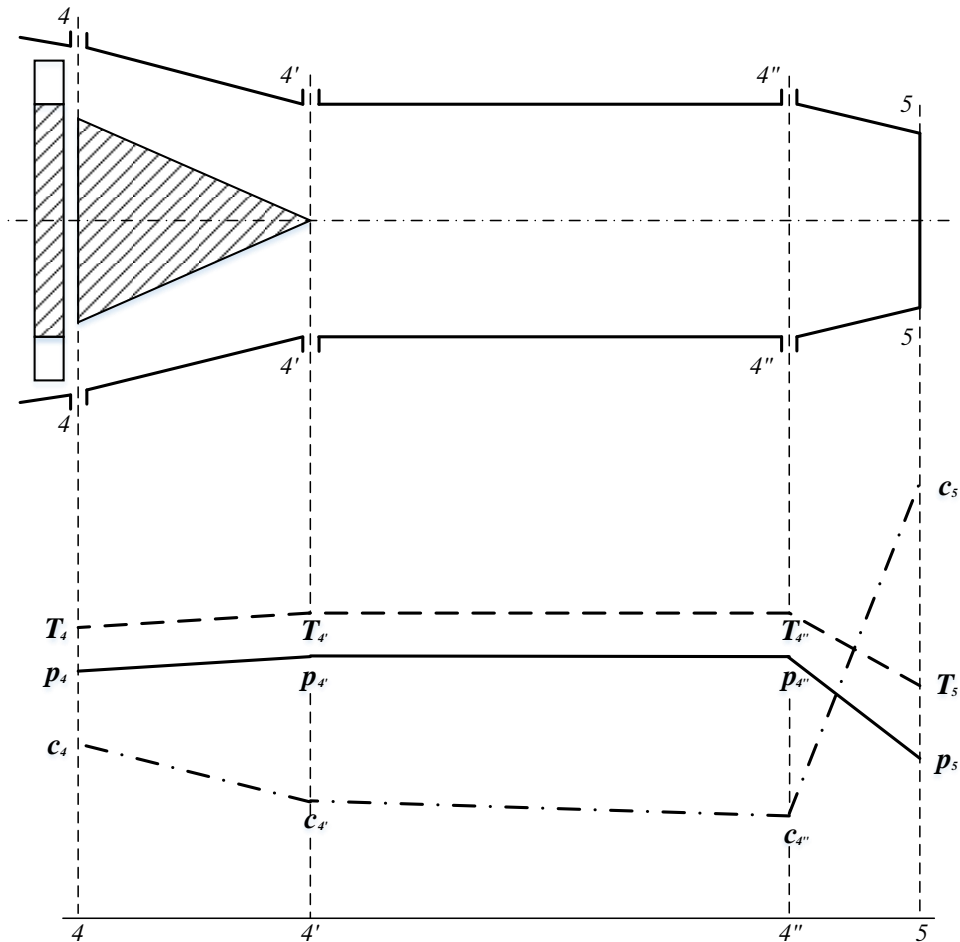


Рисунок 1. Зміна параметрів у вихідній будові с нерегульованому соплі

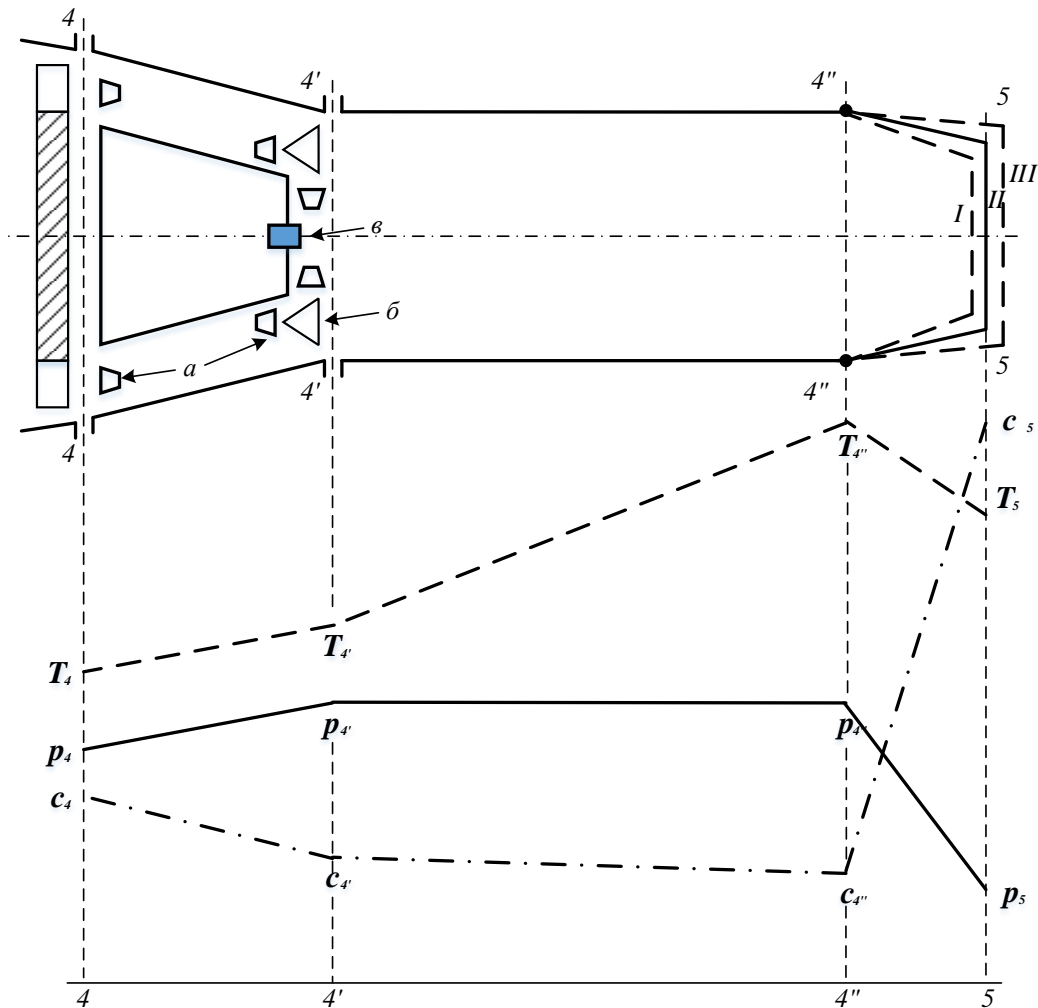
У вихідному пристрої (рис.1) безпосередньо за турбіною встановлено дифузор (4-4'), призначенням якого є перетворення кільцевого потоку в циліндричний для зниження гідравлічних втрат. В дифузорі значно знижується швидкість потоку, трохи зростає тиск і температура. За дифузором де яких випадках встановлюється подовжувальна труба (4'-4''). Параметри потоку в неї майже не змінюються.

У вихідному соплі (4''-5) відбувається подальше розширення газу до тиску  $p_5$ , яке може бути більше, дорівнюватися або менше атмосферного тиску в залежності від режиму роботи сопла. Сопло є одним з основних двигуна, який визначає зміну параметрів газу вздовж двигуна і створює силу тяги.

На деяких двигунах встановлюються форсажні камери, призначенням якої є короточасне збільшення тяги двигуна. В форсажну камеру підводиться через паливні форсунки додаткове паливо, згорання якого забезпечується за рахунок надлишку кисню в газі за турбіною. При цьому в форсажній камері збільшується температура і тиск, а швидкість зменшується. Факел полум'я подовжується за межі форсажної камери, завдяки чому росте температура, тиск не змінюється, трохи зменшується швидкість.

Для отримання кращих параметрів двигуна використовують регульоване

сопло. У дозвукових соплах регулюють площу вихідного перерізу (рис. 2).



*a* – паливні форсунки

*б* – стабілізатор полум'я

*в* – запалювальний пристрій

Рисунок 2. Зміна параметрів у вихідній будові з форсажною камерою і регульованим соплом

В якості надзвукових сопел використовують сопло Лавалю. Регулювання параметрів в такому випадку проводиться в критичному перерізі сопла за допомогою газодинамічного регулювання.

### 3. Ефективні показники ТРД

Цикл ТРД (рис.3) складається з таких термодинамічних процесів:

- політропічного процесу  $H-1$  стискання за рахунок швидкісного напору;
- політропічного процесу  $1-2$  стискання повітря в компресорі;
- процесу згорання  $2-3$ ;
- політропічного розширення газу в турбіні  $3-4$ ;
- політропічного розширення газу в вихідному пристрої  $4-5$ ;
- ізобарного процесу з відведенням тепла  $5-H$ , що тече поза двигуном.

Площа  $H-1-2-e-a-H$  являє собою політропічну роботу стискання, вона рівна сумі

політропічних робіт стискання повітря в вхідному пристрої і компресорі.

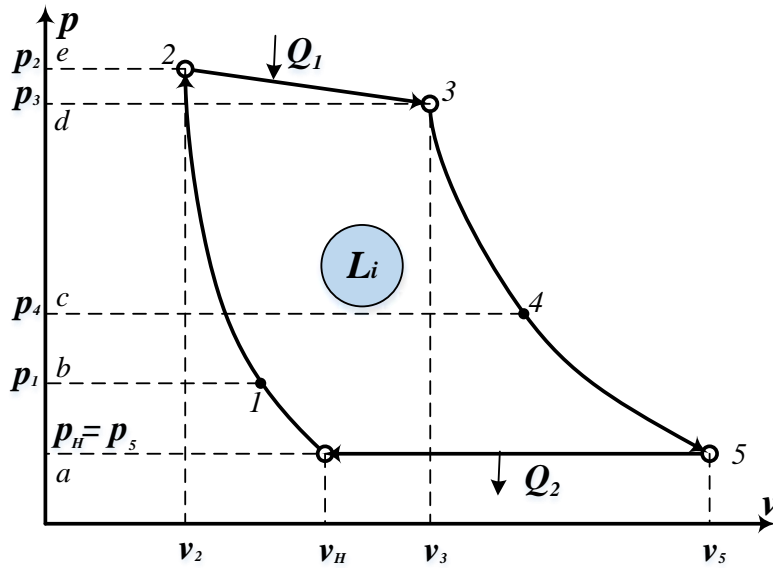


Рисунок 3. Робочий цикл ТРД

Корисна робота циклу ( $L_u$ ) являє собою різницю між індикаторною роботою  $L_i$  і суми робіт, що витрачені на подолання гідравлічних опорів:

$$L_u = \frac{c_5^2 - V^2}{2g} \quad (4)$$

Коефіцієнтом корисної дії процесу стискання буде відношення адіабатичної роботи стискання до суми політропічної роботи і роботи, що витрачена на подолання гідравлічних опорів:

$$\eta_c = \frac{L_{ad.c.}}{L_{n.c.} + L_{r.c.}} \quad (5)$$

Степінь підвищення тиску в двигуні є відношення повного тиску повітря за компресором к тиску атмосферного тиску:

$$\pi = \frac{p_2^*}{p_H} \quad (6)$$

Коефіцієнтом корисної дії процесу розширення є відношення різниці політропічної роботи розширення і роботи, яка витрачена на подолання сил тертя до адіабатичної роботи процесу подолання:

$$\eta_p = \frac{L_{n.p} - L_{r.p}}{L_{ad.p}} \quad (7)$$

Більш зручною для аналізу формулою роботою циклу буде:

$$L_u = \frac{k}{k-1} RT_H \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}}}{\eta_c} \left( \frac{m \Delta \eta_c \eta_p}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) \quad (8)$$

Степінь підвищення тиску, при якій робота циклу буде максимальною, називається оптимальною:

$$\pi_{opt} = \left( m \Delta \eta_c \eta_p \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad (9)$$

$$\pi_{opt} = 7 \div 9$$

$m = 1,02 \div 1,03$  – коефіцієнт, що враховує різницю в показниках адіабати і газових сталих повітря і продуктів згорання;

$\Delta = \frac{T_3^*}{T_H}$  – степінь підігріву повітря в двигуні.

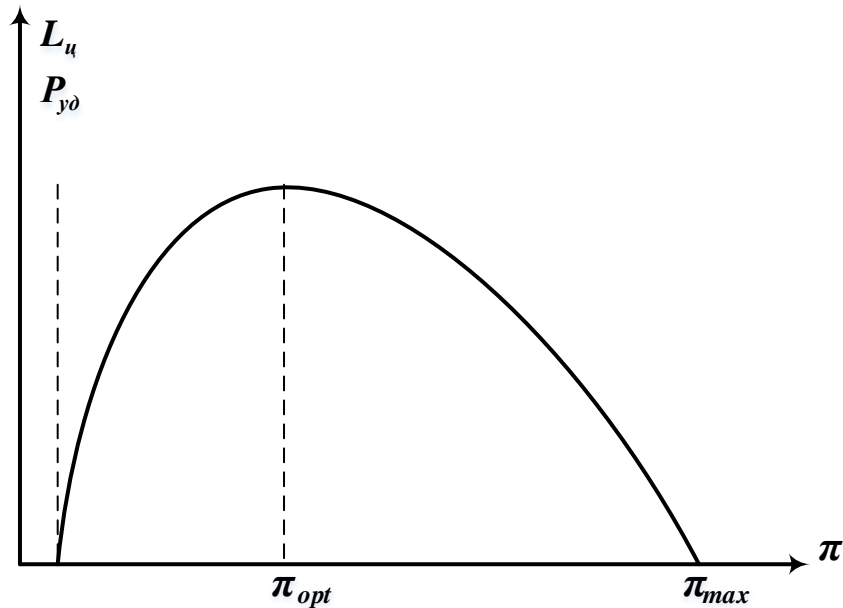


Рисунок 4. Залежність корисної роботи циклу ТРД від степені підвищення тиску повітря

Питома тяга ТРД:

$$P_{yd} = \frac{c_5 - V}{g} = \frac{\sqrt{2g L_u + V^2} - V}{g} \quad (10)$$

#### 4. Коефіцієнт корисної дії ТРД

Внутрішнім к.к.д. двигуна називається відношення корисної роботи циклу  $L_u$  к теплу, що внесено з паливом в двигун на 1 кг повітря:

$$\eta_{вн} = \frac{A L_u}{Q_0} = \frac{A \frac{c_5^2 - V^2}{2g}}{Q_0} \quad (11)$$

Тяговим к.к.д. ТРД називається відношення корисної тягової роботи к корисній роботі циклу:

$$L_{тяг} = P_{yd} V \quad (12)$$



$$\eta_p = \frac{P_{y\partial} V}{L_u} = \frac{2}{1 + \frac{c_5}{V}} \quad (13)$$

Повним к.к.д. двигуна називається відношення корисної тягової роботи до тепла, що внесено з паливом в двигун на 1 кг повітря:

$$\eta_{\Pi} = \frac{AL_{\text{тяги}}}{Q_0} = \frac{AP_{y\partial} V}{Q_0} = \eta_{\text{вн}} \eta_p \quad (14)$$

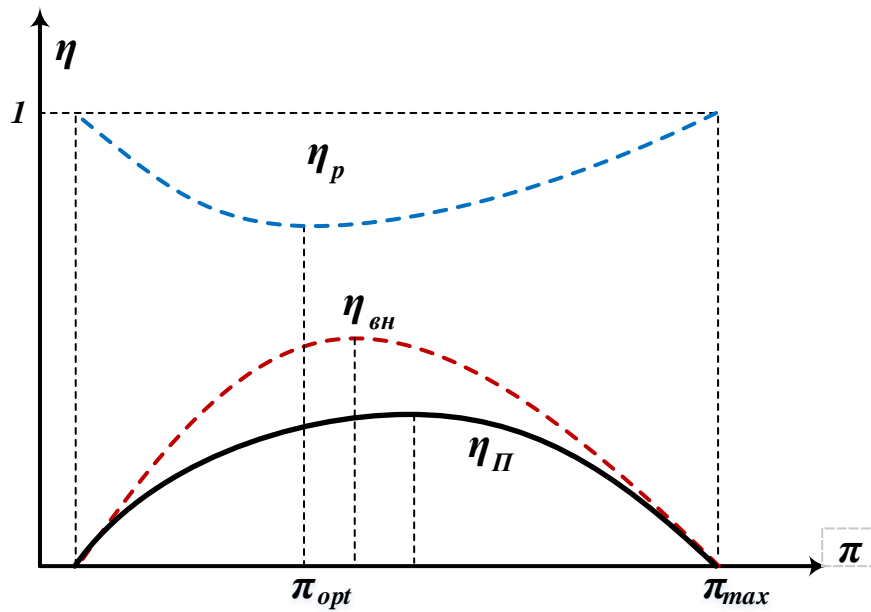


Рисунок 5. Залежність внутрішнього, тягового і повного к.к.д. ТРД від степені підвищення тиску в двигуні