

**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 5 – «Осьові компресори»

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 5. Осьові компресори

- 1. Схеми і принцип дії осьових компресорів*
- 2. Надзвукова ступінь: будова і робота*
- 3. Профілювання лопаток по висоті*
- 4. Багатоступінчасті компресори: схема і ступінь підвищення тиску*
- 5.Робота багатоступінчастого компресора, к.к.д. і потужність багатоступінчастого компресора*

Рекомендована література

Основна

Допоміжна

1. Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. – М. Машиностроение, 1969
2. 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. Схеми і принцип дії осьових компресорів*

У сучасних ТРД використовуються дві схеми компресорів:

- компресор з закручуванням повітря в бік обертання робочого колеса;
- компресор з осевим входом повітря.

Схеми обох видів компресорів наведено на рисунку 1.

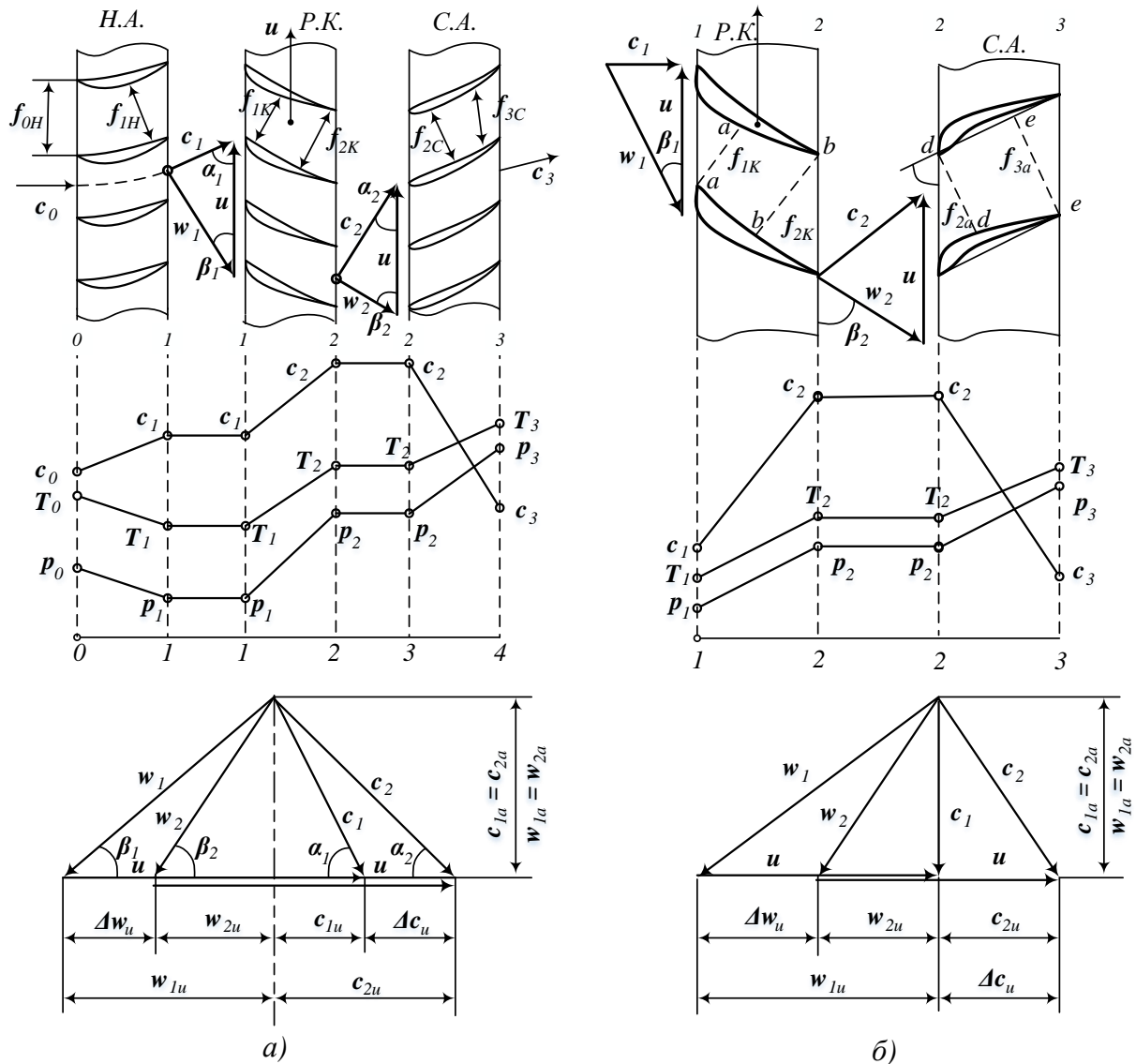


Рисунок 1. Схеми ступенів осевих компресорів і плани їх швидкостей:

- а) із закручуванням повітря в бік обертання робочого колеса; б) із осевим входом повітря в робоче колесо.

В компресорі з закручуванням повітря вхідна ступінь складається з направляючого апарата (НА), робочого колеса (РК) і випрямляючого апарата (СА). У направляючому апараті повітря має попередню закручування в бік обертання робочого колеса. В компресорі з осевим входом повітря вхідна ступінь складається з робочого колеса (РК) і випрямляючого апарата (СА).

При заданому значенні відносної швидкості w_1 збільшення швидкості закручування в бік РК c_{1u} дозволяє збільшити окружну швидкість u . Це призводить до збільшення ефективної роботи ступеня ($L_{e.cm}$).

2. Надзвукова ступінь: будова і робота

Одним з важливих вимог, що пред'являються до компресорів, являються їх малі розміри. Для забезпечення малого діаметру компресора при заданій секундній витраті повітря необхідно збільшити осьову швидкість на вході в робоче колесо. Для зменшення довжини компресора необхідно збільшити напорність ступенів (π_{cm}), яка визначається величиною ефективної роботи ступеня ($L_{e.cm}$). Ефективна робота залежить від окружної швидкості робочого колеса. Збільшення попереднього закручування повітря в бік обертання колеса c_{1u} дозволяє збільшити окружну швидкість u при допустимих значеннях числа M_{w_1} на вході в робоче колесо.

Для набуття високих значень мір підвищення тиску в ступенях шляхом збільшення окружних швидкостей при одночасному забезпеченні великих секундних витрат повітря зі збереженням високих к.к.д. застосовуються надзвукові ступені. Надзвукові ступені можуть бути виконані по одному з трьох варіантів :

- надзвукове РК і дозвуковий випрямляючий апарат;
- дозвукове РК і надзвуковий випрямляючий апарат;
- надзвукове РК і надзвуковий випрямляючий апарат.

Найчастіше використовується перший варіант.

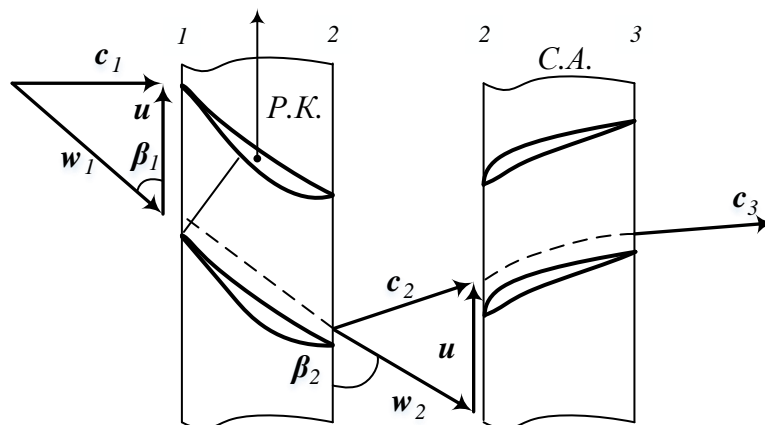


Рисунок 2. Схема надзвукового ступеня осьового компресора

Надзвуковий потік в каналах робочого колеса перетворюється на дозвуковий, пройшовши через прямий стрибок ущільнення або через систему стрибків ущільнення.

Міра підвищення тиску повітря в скачці ущільнення ($\pi_{ск}$) визначається відношенням тиску повітря після стрибка p_2 до тиску до стрибка p_1 : $\pi_{ск} = \frac{p_2}{p_1}$.

При збільшенні числа $M_{w_1} = \frac{w_1}{a_1}$ зростає міра підвищення тиску в скачці, але

одночасно з цим зменшується коефіцієнт $\sigma_{ск} = \frac{p_2^*}{p_1^*}$ і к.п.д. скачка $\eta_{ск} = \frac{L_{ад.ск}}{w_1^2 - w_2^2} \cdot 2g$.

Із-за додаткових втрат загальний к.п.д. надзвукового ступеня менше к.п.д. дозвуковому ступеню, але постановка надзвукового ступеня дозволяє:

- збільшити осьову швидкість на вході компресор до 220-230 м/с;
- при окружних швидкостях 400 м/с можна отримати $\pi_{cm} = 2$
- при постановці першого надзвукового ступеня що працює з великою окружною швидкістю, з'являється можливість створити дозвукові ступні, що слідує за неї, з великою напорністю.

3. Профілювання лопаток по висоті

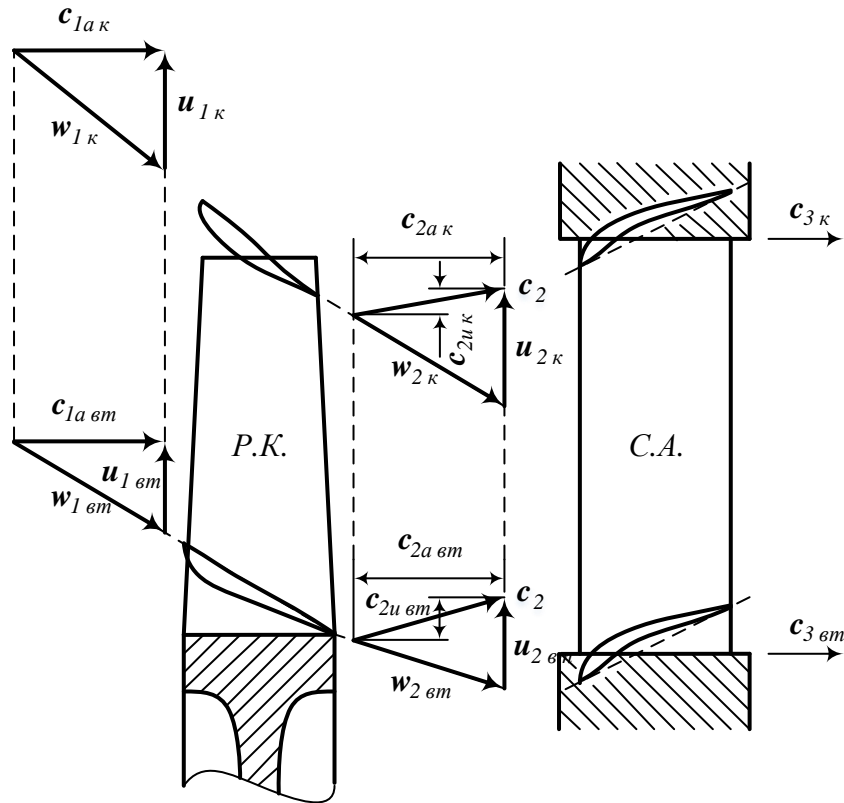


Рисунок 3. Трикутники швидкостей і профілі лопаток на різних радіусах ступеня осевого компресора

Для ефективної роботи компресора необхідно, щоб при достатній напористості мають бути малими втрати в ступені. Це досягають спеціальним профілюванням лопаток компресора по висоті. Нині використовуються два основні способи профілізації лопаток, які забезпечують радіальну рівновагу потоку шляхом зменшення абсолютної швидкості по радіусу при $L_{e,cm} = const$.

Найменші гідравлічні втрати мають ступені, лопатки яких спрофільовані за законом постійної циркуляції по радіусу коли течія повітря є безвихоровою. З умови безвихрової течії повітря осьова швидкість c_a (рис.3) по радіусу не змінюється. При цьому законі профілювання зменшення абсолютних швидкостей c_1 і c_2 забезпечується зменшенням їх окружних складових c_{1u} і c_{2u} .

Другим способом профілювання лопаток є профілювання по закону постійної міри реактивності $\rho = const$ по радіусу. При цьому законі профілювання швидкості c_{1u} і c_{2u} по радіусу збільшуються.

Ступені, які спрофільовані по закону $\rho = const$ можуть створювати більшу

напорність, тобто більшу $L_{e.cm}$, чим лопатки, що спрофільовані по закону постійної циркуляції.

4. Багатоступінчасті компресори: схема і ступінь підвищення тиску

Одна дозвукова ступінь осьового компресора дає невелику міру стиску повітря $\pi_{cm} = 1,2 \div 1,4$. Для отримання необхідної міри збільшення стиску компресори виконуються багатоступінчастими (рис.4).

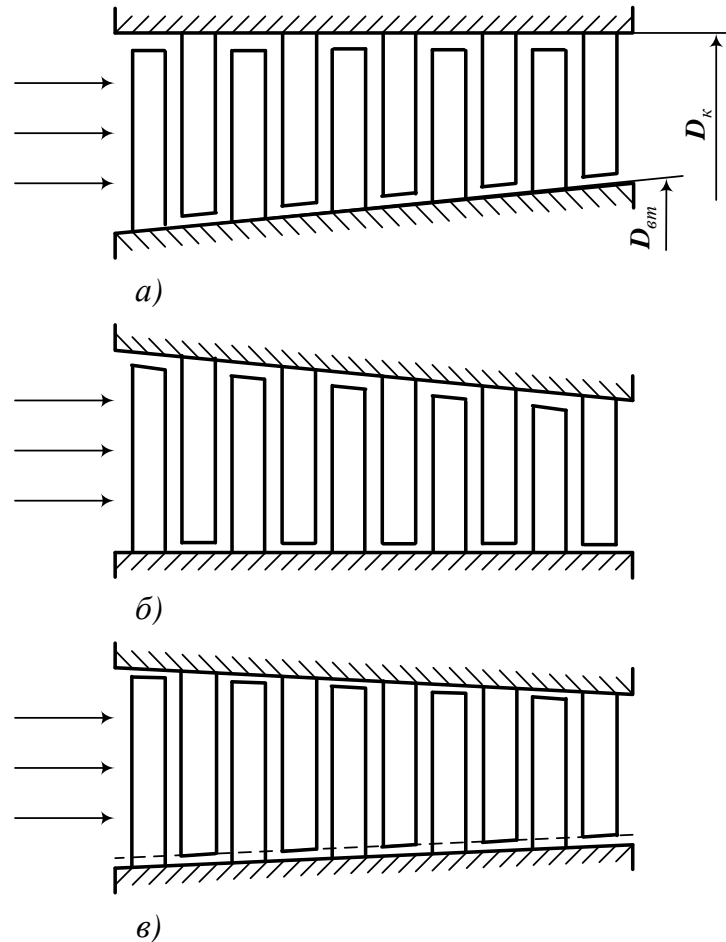


Рисунок 4. Різні форми проточної частини багатоступінчастого осьового компресора

Щоб по довжині компресора осьова складова швидкості не зменшувалася, довжина лопаток по проточній частині повинна зменшуватися. Це дозволяє отримати високу міру напорності.

Зменшення поперечного перерізу проточної частини компресора може здійснюватися:

- при постійному зовнішньому діаметрі колеса і діаметрі втулок, що збільшується (рис.4а);
- при постійному діаметрі втулок і кінцевому діаметрі колеса, що зменшується (рис.4б);
- при діаметрі втулок, що збільшується, і зовнішньому діаметрі колеса, що зменшується (рис.4в).

Схема 4а, отримала більше поширення, оскільки вона забезпечує більш високі значення π_{cm} усіх ступінів.

В багатоступінчастому компресорі повітря послідовно стискається в кожній ступені. Тиск перед компресором p_1 , а за кожної ступеню – $p_a, p_b, \dots, p_{i-1}, p_i, p_2$.

Мірі підвищення тиску для ступінів:

$$\pi_{cm(a)} = \frac{p_a}{p_1}; \pi_{cm(b)} = \frac{p_b}{p_a}; \dots; \pi_{cm(i-1)} = \frac{p_{i-1}}{p_i}; \pi_{cm(i)} = \frac{p_i}{p_2}$$

Сумарна міра підвищення тиску компресора:

$$\pi_{\kappa} = \pi_{cm(a)} \cdot \pi_{cm(b)} \cdot \dots \cdot \pi_{cm(i-1)} \cdot \pi_{cm(i)} = \frac{p_a}{p_1} \cdot \frac{p_b}{p_a} \cdot \dots \cdot \frac{p_i}{p_{i-1}} \cdot \frac{p_2}{p_i} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

5. Робота багатоступінчастого компресора

На рисунку 5 наведено графічне зображення процесу стискання повітря в багатоступінчастому компресорі.

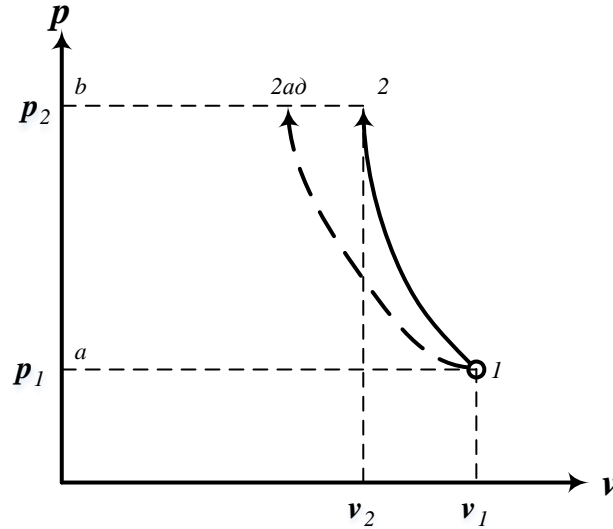


Рисунок 5. Діаграма стиску повітря в багатоступінчастому осьовому компресорі

Лінія 1-2ad являє собою адіабатичний процес стискання повітря в компресорі, а лінія 1-2 – політропічний процес, тому площа 1-2ad-b-a-1 являє собою адіабатичну роботу стискання, а площа 1-2-b-a-1 – політропічну роботу.

Адіабатична $L_{ad,\kappa}$ и політропічна $L_{n,\kappa}$ робота стискання 1 кг повітря в компресорі визначається по формулам:

$$L_{ad,\kappa} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[\frac{\kappa \Gamma M}{\kappa \Gamma} \right] \quad (2)$$

$$L_{n,\kappa} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \left[\frac{\kappa \Gamma M}{\kappa \Gamma} \right]$$

Використання ефективної роботи, що підведена до 1 кг повітря в компресорі,

визначається рівнянням Бернуллі:

$$L_{e.к.} = L_{n.к.} + L_{г.к.} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \quad (3)$$

Тобто, ефективна робота $L_{e.к.}$, що підведена до повітря в компресорі, витрачається на здійснення політропічної роботи стискання $L_{n.к.}$, подолання гідравлічних витрат $L_{г.к.}$ і на зміну кінетичної енергії потоку $\frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$.

6. К.к.д. і потужність багаступінчастого компресора

Ефективним к.к.д. компресора $\eta_{e.к.}$ зоветься відношення адіабатичної роботи стискання до ефективної роботи:

$$\eta_{e.к.} = \frac{L_{ад.к.}}{L_{e.к.}} \quad (4)$$

Ефективний к.к.д. показує, яка доля ефективної роботи перетворює в корисну роботу стискання (без урахування механічних витрат у підшипниках).

Адіабатичним к.к.д. компресора $\eta_{ад.к.}$ зоветься відношення адіабатичної (корисної) роботи стискання к сумі політропічної роботі стискання і роботи, що витрачається на подолання гідравлічних опорів:

$$\eta_{ад.к.} = \frac{L_{ад.к.}}{L_{n.к.} + L_{г.к.}} = \frac{L_{ад.к.}}{L_{e.к.} - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}} \quad (5)$$

Адіабатичний к.к.д. показує, яку частину роботи от витраченої на стиск повітря и подолання гідравлічних опорів складає корисна робота.

Потужність, яка споживається компресором:

$$N_{к.} = \frac{G_{г.} \cdot L_{e.к.}}{75} = \frac{G_{г.}}{75\eta_{к.}^*} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot RT_1^* \left(\pi_{к.}^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (6)$$