

**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 авіаційного транспорту)

**за розділом №3 – «Теорія поршневих двигунів»**

**за темою №5 – «Будова і ідеальний цикл ПД»**

**Лекція 23. «Особливості робочого циклу ПД»**

**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 3 Теорія поршневих двигунів**

#### **Тема 5. Будова і ідеальний цикл ПД**

##### Лекція 23. Особливості робочого циклу ПД

- 1. Особливості процесу впуску, графічне зображення*
- 2. Ваговий заряд і коефіцієнт наповнення*
- 3. Параметри процесу стискання, графічне зображення процесу*
- 4. Параметри процесу згорання, його параметри*
- 5. Передчасний спалах і детонація*
- 6. Процес розширення – параметри і графічне зображення процесу*
- 7. Процес випуску – параметри і графічне зображення процесу*

#### Рекомендована література

##### Основна

##### Допоміжна

1. Рыбальчик В.С., Поляков С.В., Герасименко В.Ф. Теория поршневых авиационных двигателей. - М., Воениздат МО СССР, 1955
2. Крученюк И.Л., Кеба И.В. Авиационный двигатель М-14В26. - М., Транспорт, 1974.
3. Лабазин П.С. Авиационный двигатель АШ-62ИР. - М. Транспорт, 1974.
4. Лапшин А.М., Анохин П.И. Авиационный двигатель М-14П - М., Транспорт 1976 р.

#### Інформаційні ресурси в Інтернеті

## 1. Особливості процесу впуску, графічне зображення

Процес впускання, тобто заповнення робочого об'єму двигуна паливно-повітряною сумішшю може здійснюється з поданням повітря безпосередньо з атмосфери, або підвищеним тиском за допомогою нагнітача.

В двигунах з карбюратором створення суміші починається в карбюраторі, продовжується у всмоктуючих трубопроводах і закінчується в робочому циліндрі.

В двигунах з безпосереднім уприскуванням палива створення суміші здійснюється в циліндрі, куди подається повітря. Кількість повітря регулюється за допомогою дросельної заслінки.

Регулювання якості паливно-повітряної суміші, тобто співвідношення палива і повітря здійснюється за допомогою карбюратору або паливної апаратури для безпосереднього уприскування.

Клапан впуску відкривається з випередженням, в кінці такту випуску. Це пояснюється:

- по-перше, з метою збільшення заряду свіжою сумішшю за рахунок більшого відкриття клапану до начала такту впуску;
- по-друге, у двигунів з наддуванням свіжа суміш, яка має більший тиск, ніж продукти згорання, витісняє ці продукти з циліндру.

Свіжа суміш, або повітря, поступає в циліндр під дією зниження тиску, який створюється за рахунок руху поршня від ВМТ до НМТ. Тиск суміші  $p_a$  в кінці такту при повністю відкритій дросельній заслінці дорівнює:

$$p_a = (0,8 \div 0,9) p \quad (1)$$

де  $p = p_0$  ( $p_0$  – атмосферний тиск), або  $p = p_h$  (тиск наддування для двигунів з нагнітачем).

Суміш у двигуна з нагнітачем починає надходити до циліндру відразу після відкриття клапану, так як тиск суміші більший, ніж тиск продуктів згорання. При поданні повітря за рахунок тертя у трубопроводі і дросельної заслінки виникає гідравлічні втрати.

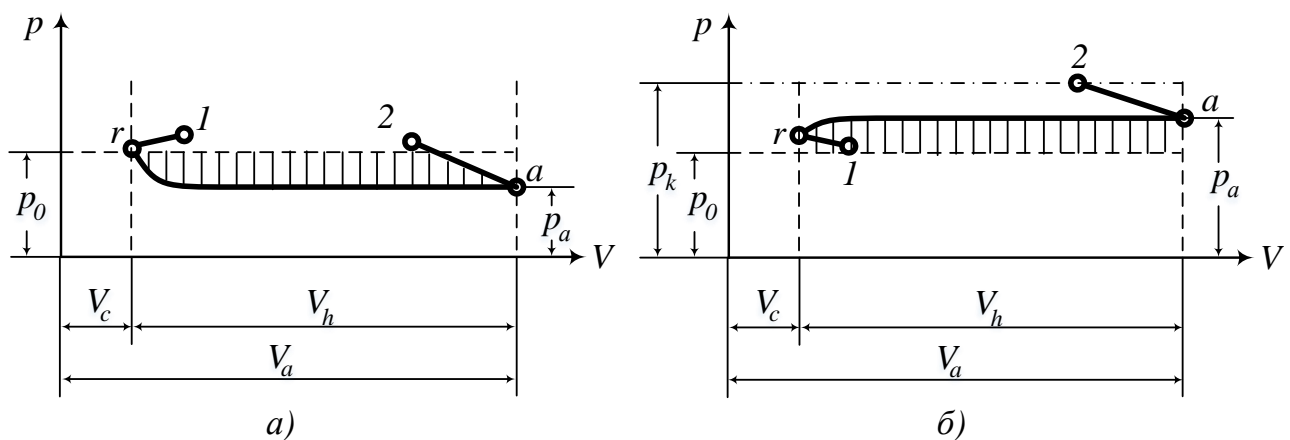


Рисунок 1. Графічне зображення процесу впуску: а) – двигун без нагнітача;

б) – двигун з нагнітачем

На рис.1 показано зображення процесу впуску для двигунів без нагнітача (а) і з нагнітачем (б).

Точка 1 відповідає моменту відкриття, а точка 2 – моменту закриття впускного клапану. Лінія 1-г-а-2 показує зміну тиску суміші в циліндрі в процесі впуску. Для двигуна без нагнітача лінія впуску розташована нижче лінії атмосферного тиску  $p_0$ , а для двигуна з нагнітачем – вище неї, внаслідок наддування.

Розглянемо роботу, яку здійснює поршень за період такту впуску.

У двигуна без нагнітача при руху поршня от ВМТ до НМТ на нього діє сила, що спрямована к ВМТ по осі циліндра із-за різниці тиску:

$$P = (p_0 - p_a) F_{\text{ц}} \quad (2)$$

Робота, що здійснюється поршнем, при руху від ВМТ до НМТ:

$$L_{\text{ен}} = PS = (p_0 - p_a) F_{\text{ц}} S = (p_0 - p_a) V_{\text{ц}} \quad (3)$$

Цієї роботі відповідає заштрихована площа, на рис.1а.

В двигуні з нагнітачем тиск в циліндрі під час впуску більше, ніж тиск в картері. Тому на поршень буде діяти сила, яка спрямована до НМТ:

$$P = (p_a - p_0) F_{\text{ц}} \quad (4)$$

Цієї роботі відповідає на рис.1.б заштрихована площа:

$$L_{\text{ен}} = PS = (p_a - p_0) F_{\text{ц}} S = (p_a - p_0) V_{\text{ц}} \quad (5)$$

Таким чином, в двигуні з впуском з атмосфери від колінчатого валу віднімається робота, яка іде на здійснювання процесу впуску, а в двигуні з нагнітачем колінчатому валу додається додаткова робота за рахунок надлишкового тиску.

## 2. Ваговий заряд і коефіцієнт наповнення

Ваговим зарядом циліндра називають вагова кількість повітря (суміші), яка поступає і циліндр за час такту впуску і що залишився в циліндр до моменту закриття клапанів впуску. Розрізняють теоретичний і дійсний ваговий заряд суміші.

*Теоретичний ваговий заряд суміші ( $q_T$ ) – це заряд, який може уміститься в робочому об'ємі циліндра при тиску і температурі, що дорівнює тиску і температурі на впусканні в циліндр двигуна:*

$$q_T = \gamma_k V_h \quad (6)$$

*Дійсний ваговий заряд ( $q_D$ ) – це заряд, який в дійсності надійшов в циліндр і залишився в ньому.*

*Відношення дійсного вагового заряду суміші до теоретичного називається коефіцієнтом наповнення:*

$$\eta_v = \frac{q_D}{q_T} \quad (7)$$

Для двигунів зі впуском з атмосфери  $\eta_v = 0,85 \div 0,9$ , а для двигуна з нагнітачем  $\eta_v = 1,10 \div 1,12$ .

Дійсний ваговий заряд дорівнює:  $q_D = \eta_v q_T = \eta_v \gamma_k V_h$ .

Коефіцієнт наповнення можливо збільшити вибором фаз газорозподілу і зменшенням гідравлічних витрат.

### 3. Параметри процесу стискання, графічне зображення процесу

Основне призначення процесу стискання – це створення можливо найкращого використання тепла і отримання більшої роботи газів під час процесу розширення.

Процес стискання починається в НМТ, а закінчується у ВМТ. У дійсному процесі стискання збільшення тиску здійснюється як за рахунок зменшення об'єму циліндра при русі поршня до ВМТ, так і за рахунок збільшення температури суміші. Температура при стисканні зростає приблизно в 1,7...1,9 разів. Тому тиск газу в кінці такту стискання зростає пропорційно добутку степені стискання на підвищення температури, тобто у 8,5 разу при  $\varepsilon = 5$  і в 13 разів при  $\varepsilon = 7$ .

Якщо двигун дроселюється, то тиск  $p_c$  знизиться із-за зменшення тиску  $p_a$  в кінці впуску.

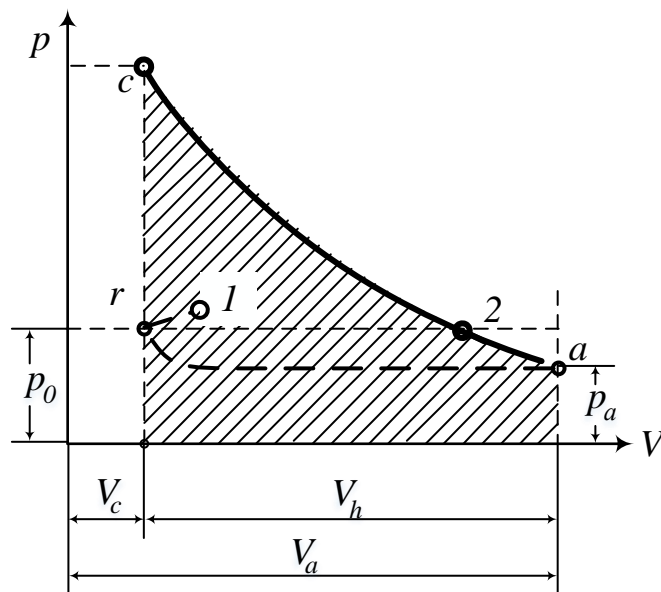


Рисунок 2. Графічне зображення процесу стискання

На рис.2 показано зміна тиску і об'єму суміші під час процесу стискання для двигуна з впуском з атмосфери. Стискання починається в точці  $a$  і закінчується в точці  $c$ , яка характеризує зміну тиску і об'єму суміші в кінці такту стискання. Лінія  $a-2-c$  показує зміну тиску і об'єму суміші в такті стискання. Величина роботи, що витрачена на стискання, показана заштрихованою площею.

### 4. Параметри процесу згорання, його параметри, випередження згорання

Згорання паливно-повітряної суміші – це хімічна реакція з'єднання елементів, що входять до складу палива, з киснем повітря. При цьому хімічних елементів палива переходять в тепло.

До складу рідкого палива входять такі елементи: вуглець (C), водень (H) і кисень (O). Ваговий склад елементів, що входять до складу палива, яке виражено у вагових долях або відсотках, називається *елементарним складом палива*.

Повне згорання палива може бути повним і неповним.

Повне згорання палива характеризується тим, що весь вуглець з'єднується з

киснем, утворюючи вуглекислий газ, а весь водень з'єднується з киснем, утворюючи воду.

Неповне згорання палива характеризується тим, що частина вуглецю і водню палива окислюються неповністю, в результаті чого крім вуглекислого газу і води, утворюється окис вуглецю і де яка кількість вільного водню.

Найменша кількість повітря, яке необхідно для повного згорання 1 кг палива, називається теоретично необхідної кількістю повітря ( $L_0$ ). Теплотворна здатність палива ( $H_u$ ) змінюється майже прямо пропорційно теоретично необхідної кількості палива. Тобто їх відношення приблизно постійно:

$$\left( \frac{H_u}{L_0} \right) \approx 700 \div 710 \text{ ккал/кг повітря}.$$

Кількість повітря, що дійсно надходять для спалювання 1 кг палива, називається дійсною кількістю повітря ( $L_d$ ).

Відношення дійсної кількості повітря до теоретично необхідної кількості повітря називається *коефіцієнтом збитку повітря*:

$$\alpha = \frac{L_d}{L_0} \quad (8)$$

Коефіцієнт збитку повітря характеризує склад паливо-повітряної суміші може дорівнювати одиниці ( $\alpha = 1$ ), бути менше одиниці ( $\alpha < 1$ ), або більш одиниці ( $\alpha > 1$ ).

Якщо  $L_d = L_0 \Rightarrow \alpha = 1$ , то така суміш називається теоретичною.

Якщо  $L_d < L_0 \Rightarrow \alpha < 1$ , суміш називається багатою, а при  $L_d > L_0 \Rightarrow \alpha > 1$  - бідною.

Потужність двигуна і його економічність залежить від швидкості і повноти згорання палива.

Процес згорання поділяється на дві стадії: стадія створення фронту полум'я і стадія розповсюдження фронту полум'я.

Тривалість згорання залежить від температури суміші, ступеню стискання, наявності остаточних газів в циліндрі, наявності вихрових рухів суміші, числа обертів колінчатого валу, форми камери згорання і складу суміші.

У нормально працюючого двигуна величина швидкості згорання коливається в межах 20...30 м/сек.

## 5. Передчасний спалах і детонація

Передчасний спалах відбувається із-за мимовільного, занадто раннього займання суміші від стороннього джерела, а не от електричної іскри. Передчасні спалахи виникають частіше всього при ненормальному температурному режиму двигуна, наприклад, при перегріві головок циліндрів із-за недостатнього охолодження.

На рис.3 показано протікання тиску в циліндрі при нормальному

випередженню запалювання (рис.3а) і при передчасному спалаху (рис.3б).

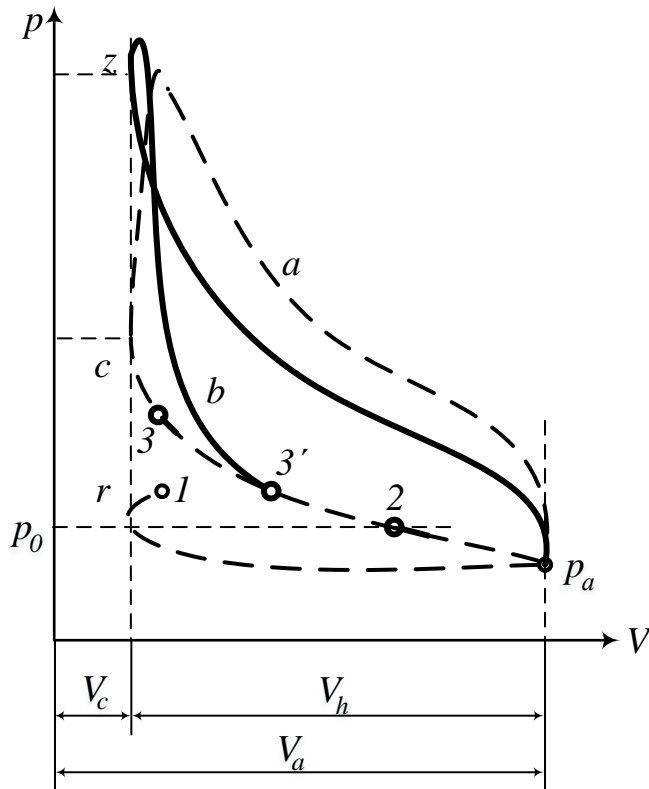


Рисунок 3. Графічне зображення процесу згорання: а – нормальний запал; б – передчасний запал

При нормальному випередженню запалювання, запалювання суміші відбувається в точці 3. При передчасному спалаху суміш запалюється в точці 3' і згорає до приходу поршня у ВМТ. При цьому відбувається значне збільшення тиску, із-за чого збільшується робота, що витрачається на стискання, і «жорстку» роботу двигуна. Робота розширення при цьому зменшується із-за великих втрат тепла в стінки.

Детонацією називається таке згорання суміші, яке відбувається з дуже великою швидкістю (1500...2000 м/сек) що відповідає швидкості згорання вибухових речовин.

Причиною детонацією є виникнення нестійких хімічних з'єднань вуглеводнів, так званих перекисів при високих температурах і тисків в камері згорання.

На виникнення детонації впливають такі фактори:

- збільшення тиску і температури суміші в кінці такту стискання;
- склад суміші;
- сорт бензину, що використовується.

Для підвищення детонаційною стійкістю бензину до нього додають спеціальні присадки (наприклад, тетраетил свинцю з додаванням з'єднань хлору і броду). На форсованих режимах для усунення детонації додатково використовують упорскування води або водно-спиртової суміші.

Тривала робота двигуна з детонацією визиває пошкодження деталей, що веде до аварії двигуна.



## 6. Процес розширення – графічне зображення процесу

Під час такту розширення газу здійснюють позитивну роботу, переміщаючи поршень в напрямку дії сили тиску газів.

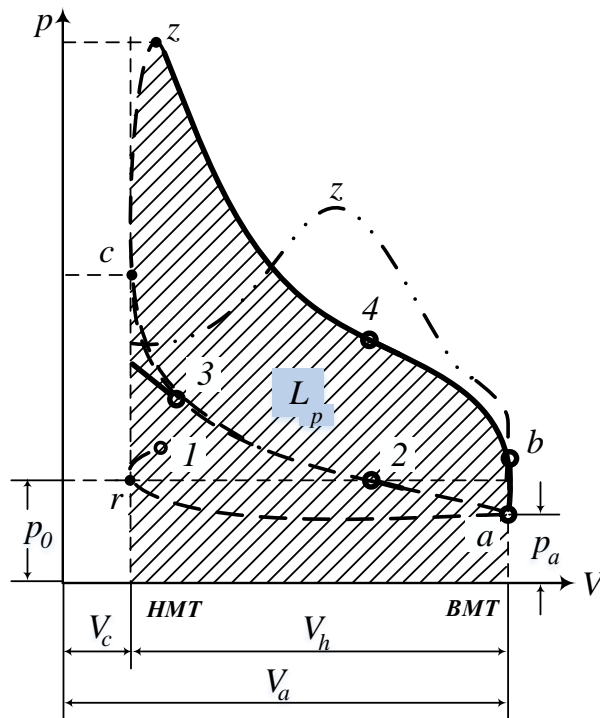


Рисунок 4. Графічне зображення процесу розширення

Графік зміни тиску і об'єму процесу розширення показана на рис.4. Точка **z** характеризує кінець видимого процесу згорання і початок розширення; точка **b** – кінець процесу розширення; 4 – момент відкриття випускного клапану.

Робота розширення показана заштрихованою площею ( $L_p$ ).

Точка **z** відповідає максимальному тиску, приймається за кінець згорання суміші. В дійсності після точки **z** продовжуються хімічні процеси, що пов'язані з виділенням тепла. Цей процес носить назву *додогорання*. Це пояснюється по-перше тим, що при високих температурах продовжуються процеси окислення вуглецю і водню, по-другому тим, що є нерівномірність співвідношення між паливом і повітрям по об'єму суміші, в результаті чого продовжується процес згорання.

Характер протікання процесу згорання при пізньому запалюванні показано штрих-пунктирною лінією – процес згорання зміщується на такт розширення, що веде до збільшенню температури газів в кінці розширення і в началі випуску, перегріву двигуна і зменшенню потужності.

## 7. Процес випуску – параметри і графічне зображення процесу

Процес випуску полягає в тому, щоб очистити циліндр від продуктів згорання і підготувати його для чергового впуску суміші. Чим менше продуктів згорання залишиться в циліндрі після процесу випуску, тим більше буде дійсний ваговий заряд циліндру, а значить, потужність двигуна. Процес випуску починається з

моменту відкриття клапану випуску і закінчується в момент його закриття.

Найбільш ефективно очищення циліндру від продуктів згорання відбувається при відкритті в той момент, коли поршень в такті розширення не доходить до НМТ на  $40...60^\circ$  по куту повороту колінчатого валу. В цьому випадку до моменту приходу поршня в НМТ значна частина продуктів згорання буде видалена із циліндру через клапан під дією надлишкового тиску всередині циліндра.

Схематичне зображення процесу випуску показано на рис.5. Процес випуску показано лінією **4-b-1-r-5**.

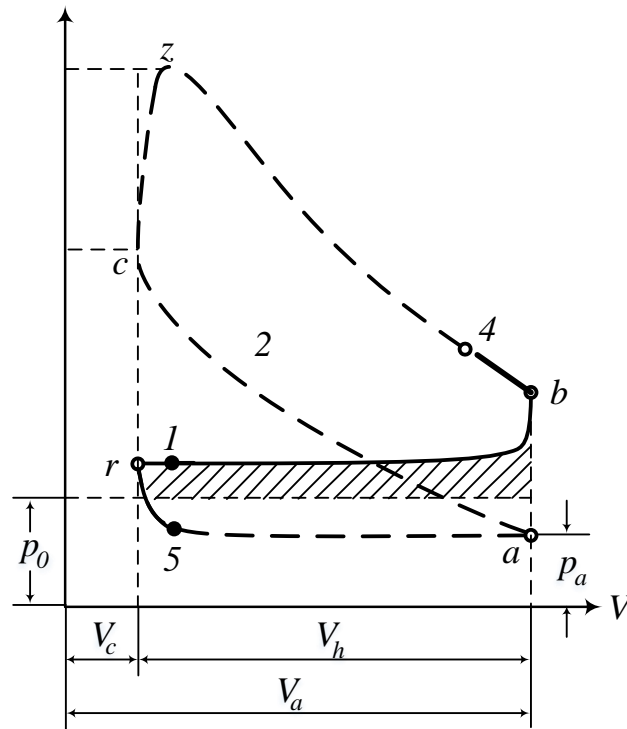


Рисунок 5. Графічне зображення процесу випуску

Точка 4 відповідає началу процесу випуску, а точка 5 – його кінцю. Робота, що витрачена на виштовхування продуктів згорання в такті випуску, дорівнює заштрихованій площі.