

**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»

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 22. Робота і основні параметри РРД

- 1. Класифікація поршневих двигунів*
- 2. Схема і призначення основних елементів ПД*
- 3. Ідеальний цикл ПД*
- 4. Процеси і такти, складові дійсного циклу ПД*

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. Класифікація поршневих двигунів

Поршневі двигуни поділяються на дві групи: 1) двигуни, що працюють на рідкому паливі; 2) двигуни, що працюють на газоподібному паливі.

У двигунах, що працюють на рідкому паливі, згорання палива забезпечується або за рахунок примусового запалювання (звичайно, від електричної іскри), або за рахунок запалювання пального при уприскуванні його в циліндр двигуна, в повітря, що нагріте до високої температури за рахунок стиснення.

Робочий цикл у першому випадку – це цикл Отто (з ізохоричним підведенням тепла), у другому випадку – цикл Дізеля (з ізобаричним підведенням тепла). Також існує цикл зі змішаним ізохорично-ізобарним підведенням теплоти (цикл Трінклера).

Двигуни на газоподібному паливі мають примусове запалювання.

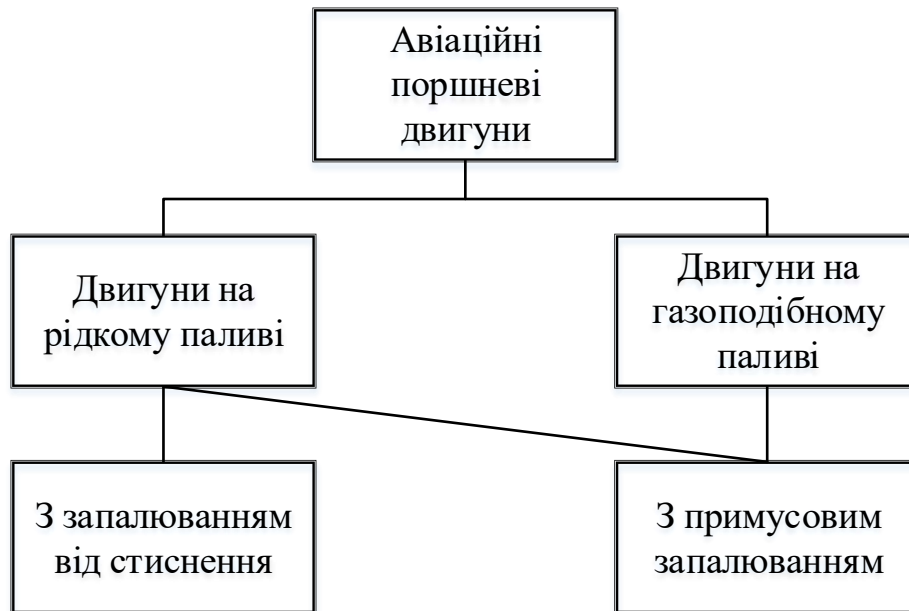


Рисунок 1. Класифікація ПД

За способом сумішоутворення ПД розрізняють на зовнішнє сумішоутворення (карбюраторні) і внутрішнє сумішоутворення – з безпосереднім уприскуванням.

В залежності від числа тактів – двотактні і чотиритактні.

В залежності від способу охолодження – на двигуни рідинного і повітряного охолодження.

В залежності від кількості циліндрів (чотирьох-, п'яти-, дванадцяти-) і їх розташування – рядні і зіркоподібні.

Зіркоподібні двигуни діляться на одно-, двох- і багаторядні (рис.2б).

Рядні двигуни, в свою чергу, діляться на однорядні, дворядні V-подібні, трьохрядні W-подібні, чотирьохрядні H- або X-подібні (рис.2а).

Можлива класифікація і по іншим ознакам.

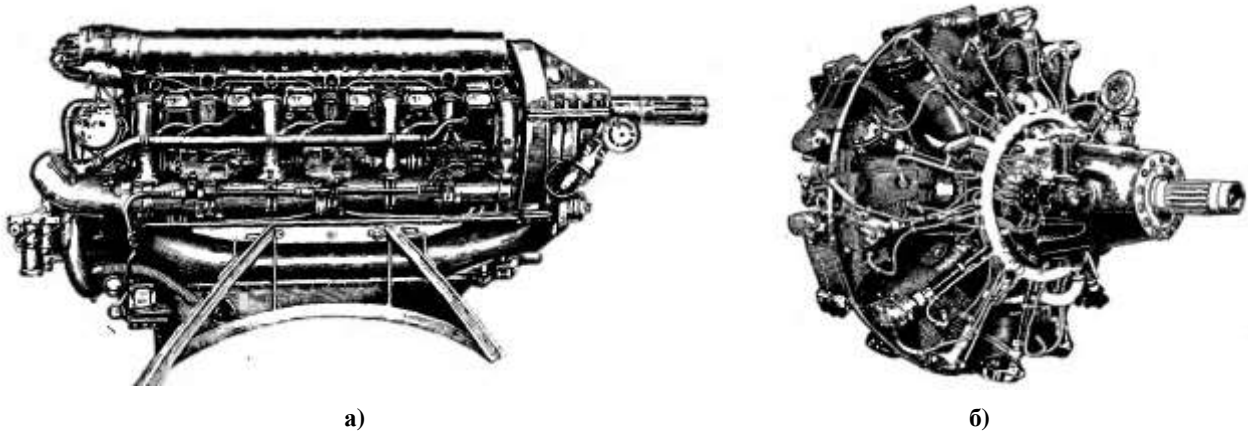


Рисунок 2. а) – дворядний V-подібний дванадцятициліндровий двигун з рідинним охолодженням; б) – дворядний зіркоподібний чотирнадцятициліндровий двигун повітряним охолодженням

2. Схема і призначення основних елементів ПД

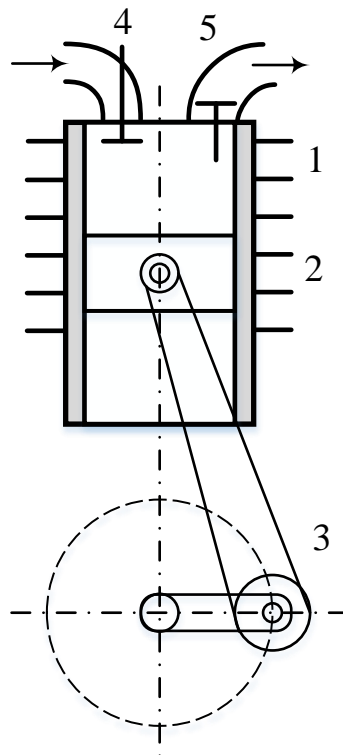


Рисунок 3. Принципіальна схема поршневого двигуна

1 – циліндр; 2 – поршень; 3 - кривошипно-шатунний механізм; 4 – клапан впуску;
5 – клапан випуску

Принципіальна схема ПД приведена на рис.3.

Призначення основних елементів:

1 – циліндр – призначений для здійснення основних процесів: стискання паливно-повітряної суміші, її згорання і розширення, випуску продуктів згорання;
2 – поршень – переміщується в циліндрі, з його допомогою змінюється робочий об'єм в циліндрі. Верхнє положення циліндру називається *верхньою мертвої*

точкою (ВМТ), нижнє положення циліндру – відповідно, нижньої мертвої точкою (НМТ). Положення ВМТ і НМТ визначаються довжиною шатуна і радіусом кривошипу. Відстань, яку проходить поршень між ВМТ і НМТ називається *робочим ходом* (S). Об'єм циліндру, що відповідає робочому ходу, називається *робочим об'ємом*:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S \quad (1)$$

Сумарний об'єм усіх циліндрів називається *літражем двигуна*.

Об'єм циліндру, що обмежується поршнем при його положенні в НМТ, зоветься повним об'ємом циліндру (V_a). Він складається з робочого об'єму і об'єму камери згорання:

$$V_a = V_h + V_c \quad (2)$$

Відношення повного об'єму до об'єму камери згорання називається *ступенем стискання*:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (3)$$

Степінь стискання у авіаційних ПД дорівнює 5 – 8.

3 – кривошипно-шатунний механізм призначений для перетворення поступального руху поршня в обертальний рух валу;

4 – клапан впуску – призначений для впуску паливно-повітряної суміші;

5 – клапан випуску – призначений для випуску продуктів згорання.

Керування клапанами здійснюється за допомогою кулачкового механізму, дія якого синхронізована з обертанням валу двигуна.

3. Ідеальні цикли ПД

3.1 Цикл Отто

Цикл Отто – це термодинамічний цикл теплового двигуна з ізохоричним підведенням теплоти. Ідеальну індикаторну діаграму ПД показано на рис.4.

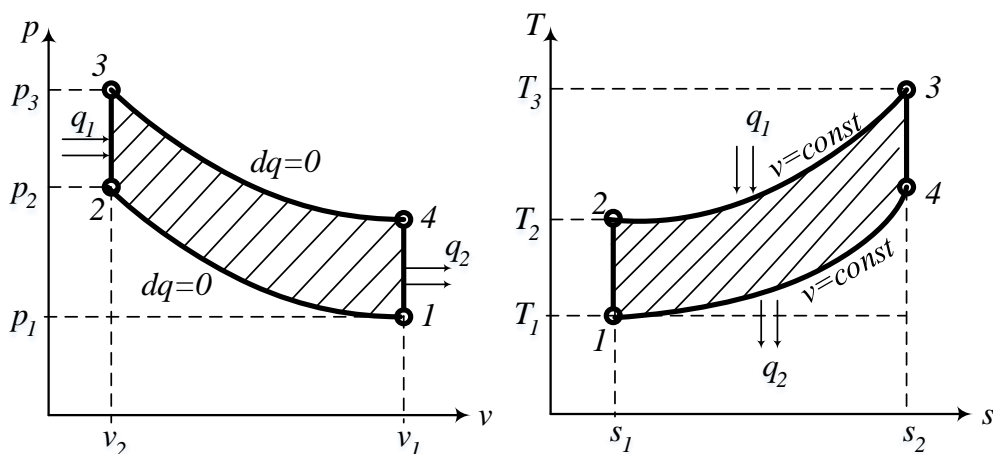


Рисунок 4. Ідеальна індикаторна діаграма ПД при ізохоричному підводі тепла в p - v і T - s координатах

- 1-2 – процес стиснення робочої суміші за адіабатою;
 2-3 – процес підведення теплоти q_1 в ізохоричному процесі;
 3-4 – процес розширення (робочий хід) в адіабатичному процесі;
 4-1 – відведення теплоти q_2 в ізохоричному процесі.

Визначимо термічний к.к.д. циклу Отто:

$$\eta_T = \frac{l_u}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (4)$$

Кількість теплоти, що підведена в ізохоричному процесі, дорівнює:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) \quad (5)$$

c_v – масова теплоємність робочої суміші при постійному об'ємі.

За аналогією:

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) \quad (6)$$

Тоді:

$$\eta_T = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (7)$$

З рівняння адіабати:

$$T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (8)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon - \text{ступінь стиснення, тобто: } T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} \quad (9)$$

Для ізохоричного процесу 2-3:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda - \text{ступінь ізохоричного підвищення тиску}$$

Тоді:

$$T_3 = T_2 \lambda = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda \quad (10)$$

За аналогією:

$$T_3 v_3^{k-1} = T_4 v_4^{k-1} \Rightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_3 \varepsilon^{k-1}, \quad \text{підставляючи } T_3 \text{ з } (10),$$

дістанемо:

$$T_4 = T_1 \lambda \varepsilon^{k-1} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \lambda \quad (11)$$

Тоді:

$$\eta_T = 1 - \frac{T_1 \lambda - T_1}{T_1 \lambda \varepsilon^{k-1} - T_1 \varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{T_1 (\lambda - 1)}{T_1 (\lambda - 1) \varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (12)$$

3.2 Цикл Трінклера

Цикл Трінклера – це термодинамічний цикл теплового двигуна зі змішаним ізохорично-ізобаричним підведенням теплоти. Його схему показано на рис. 5, а ідеальну індикаторну діаграму такого ПД показано на рис.6.

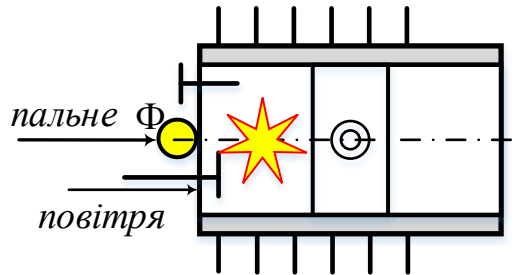


Рисунок 5. Схема ПД, що працює за циклом Трінклера

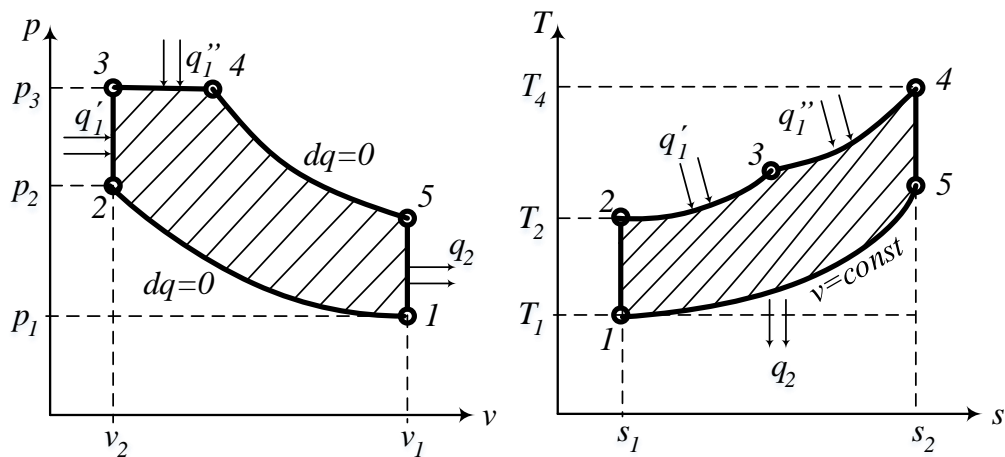


Рисунок 6. Ідеальна індикаторна діаграма ПД при ізохорично-ізобаричному підводі тепла в $p-v$ і $T-s$ координатах

У двигунах, які побудовані на підставі циклу Дизеля, паливо подається у циліндр спеціальним компресором, коли поршень перебуває поблизу ВМТ. Подання палива здійснюється таким чином, що процес згорання відбувається при постійному тиску, а займання палива – від високої температури стиснутого повітря. Наявність спеціального компресора ускладнює влаштування двигуна.

У 1904 р. російським інженером Г.Трінклером було запропоновано безкомпресорний дизель, в якому низькосортне паливо за допомогою насоса подається під високим тиском у форсунку форкамери (Ф, рис.5). Паливний насос більш економічний і надійний у роботі. Процес згорання у безкомпресорних двигунах відбувається при $v = \text{const}$ і $p = \text{const}$.

Ідеальна індикаторна діаграма ПД при ізохорично-ізобаричному підводі тепла показано на рис.6:

1-2 – процес адіабатичного стиснення повітря (температура його на 200-300 °С перевищує температуру samozаймання палива);

2-3 – процес ізохоричного згорання частини палива у форкамері (поршень у цей

момент знаходиться поблизу ВМТ);

3-4 – ізобаричний процес продовження згорання палива, начало робочого ходу;

4-5 – подальше адіабатичне розширення робочої суміші, забезпечення робочого ходу поршня;

5-1 – поршень досягає НМТ, відкривається вихлопний клапан, тиск різко падає, відпрацьовані гази викидаються у навколишнє середовище.

Термічний к.к.д. циклу Трінклера залежить від ступенів стиснення ε , ізохоричного підвищення тиску λ , ступені попереднього ізобаричного розширення робочої суміші $\rho = \frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3}$ і фізичних властивостей робочої суміші:

$$\eta_T = \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)]} \quad (13)$$

4. Робочий процес і такти дійсного циклу ПД

Робочий процес будь-якого двигуна зручно розглядати за допомогою індикаторної діаграми. На рис.7 показана індикаторна діаграма чотиритактного карбюраторного двигуна в координатах $p-v$.

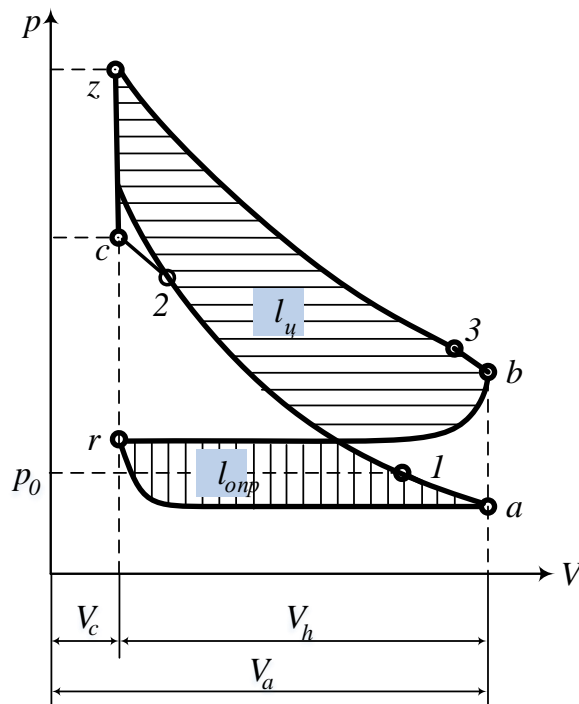


Рисунок 7. Індикаторна діаграма чотиритактного карбюраторного двигуна
 p_0 – атмосферний тиск

1-й такт – впускання паливної суміші (лінія ra). Починається з руху поршня від ВМТ до НМТ при відкритому впускному клапані. З початку такту об'єм камери стискання V_c заповнений залишковими газами (точка r) з тиском 0,105-0,125 МПа. По мірі переміщення поршню тиск в циліндрі знижується і спочатку стає рівним

атмосферному, а далі – нижче його. Із-за розрідження атмосферне повітря поступає в карбюратор для виготовлення паливно-повітряної суміші, яка заповнює простір над поршнем. В кінці впуску (точка *a*) тиск робочої суміші 0,07-0,095 МПа, а температура 70...100 °С. Процес впуску показано на рис.8.



Рисунок 8. Процес впуску: 1 – момент відкриття впускного клапану; 2 – момент закриття впускного клапану

Для отримання найбільшої роботи, а отже збільшення потужності і числа оборотів необхідно заповнення циліндра максимально можливою кількістю суміші. У сучасних авіаційних двигунах це досягається за допомогою нагнітача.

Харчування двигуна паливо-повітряною сумішшю (карбюраторні двигуни) або повітрям (двигуни з безпосереднім уприскуванням), попередньо стиснутим у нагнітачі до тиску, який більше атмосферного, називається *наддуванням*.

Початок впуску паливно-повітряної суміші обумовлено початком відкриття клапана впуску, який відкривається з випередженням (т.1, рис.8), тобто в кінці такту випуску, до приходу поршня у ВМТ. Кут, на який повертається колінчастий вал за час від моменту відкриття впускного клапана до моменту приходу поршня в ВМТ називається *кутом випередження відкриття впускного клапану* (звичайно 15...50°).

Кут, на який повертається колінчастий вал, починаючи від моменту приходу поршня в НМТ до моменту закриття впускного клапана, називається *кутом запізнювання закриття впускного клапану* (40...65°).

2-й такт – стискання робочої суміші (рис.9). Поршень рухається від НМТ до ВМТ (лінія *a-c*). На початку стискання тиск в циліндрі до точки 1 менш атмосферного, тому на цій ділянці при відкритому впускному клапані продовжується заповнення циліндра робочої сумішшю. Після закриття клапану починається процес стискання робочої суміші. Тиск в кінці стискання (т.с) в залежності від степеню стискання складає 0,6..1,0 МПа, температура 350...450 °С. Степінь стискання ϵ вибирається такою, щоб температура суміші у кінці

стискання була менш температури samozapalювання парів суміші і забезпечувалося бездетонаційне згорання палива.

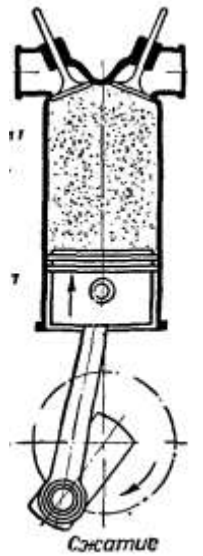


Рисунок 9. Процес стискання

В кінці такту стискання коли поршень доходить до ВМТ (т.2) спрацьовує прибор запалювання і здійснюється запалювання робочої суміші.

3-й такт – згорання робочої суміші і розширення продуктів згорання (рис.10). Обидва клапана закрити (лінія *c-z*). Згорання палива супроводжується виділенням більшої кількості тепла, що веде до підвищення температури до 1800...2300 °C і тиску до 2...4 МПа.

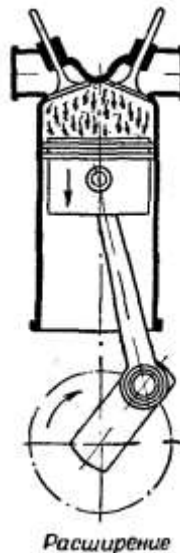


Рисунок 10. Процес згорання і розширення

Продукти згорання при розширенні переміщує поршень від ВМТ до НМТ і здійснюють корисну роботу (лінія *z-b*), тому 3-й такт називається *робочим*, інші – *допоміжні*. При розширенні температура і тиск газів в циліндрі знижується (до 0,3...0,5 МПа). Для кращого очищення циліндра від відпрацьованих газів і для

зменшення роботи виштовхування випускний клапан відкривається раніше, ніж приход поршню в НМТ.

4-й такт – випуск відпрацьованих газів. Поршень рухається від НМТ до ВМТ. Випускний клапан відкритий. Відбувається випуск відпрацьованих газів в атмосферу (лінія *b-r*). Температура відпрацьованих газів – 650...900 °С.

Допоміжні такти виконуються за рахунок роботи інших циліндрів і інерції маховика. Робота газів в циліндрі дорівнює різниці: $l_u = l_n - l_{отр}$.

Показник $l_{отр}$ називається *насосною витратою двигуна*. Її звичайно відносять до загальної суми механичних втрат в двигуні.