

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни  
«Термодинаміка та теплопередача»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**272 Авіаційний транспорт**  
**(Аеронавігація)**

**Тема 4. Ідеальні цикли теплових двигунів.**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 р. № 7

**СХВАЛЕНО**

Методично радою Кременчуцького  
льотного коледжу  
Протокол від 28.08.2023 р. № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 р. № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 р. № 1

**Розробники:** викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки *Яніцький А.А.*

**Рецензенти:**

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

Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к.т.н., с.н.с. *Тягній В.Г.*

## **План лекції**

1. Термодинамічний метод дослідження циклів теплових двигунів;
2. Цикл газотурбінних двигунів – цикл Брайтона;
3. Цикли газотурбінних двигунів із ступінчастим підведенням теплоти;
4. Цикл Брайтона з регенерацією теплоти;
5. Цикли поршневих двигунів. Цикл Отто. Цикл Дизеля .

### **– Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Котовський В. Н. Технічна термодинаміка : тексти лекцій, 2015. 88 с.
2. Котовський В. Н. Теплопередача : тексти лекцій, 2015. 76 с.

#### **Допоміжна:**

3. Базаров І. П. Термодинаміка : підручник. 2010. 384 с.
4. Баранов В. М., Коньков А. Ю. Термодинаміка і теплопередача: навчальний посібник; 2-е видання, перероблене. 2004. 91 с.
5. Технічна термодинаміка і теплопередача : підручник для академічного бакалаврату В. А. Кудінов, Е. М. Карташов, Є. В. Стефанюк , 2016. 442 с.

#### **Інформаційні ресурси в інтернеті:**

6. URL : <http://klk.univd.edu.ua/uk/dir/177/biblioteka>
7. URL : <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl76.pdf>

**Викладач Яніцький Анатолій Анатолійович,**  
зворотній зв'язок на [smit1003@ukr.net](mailto:smit1003@ukr.net)

Вимоги до оформлення конспекту лекцій:

- Конспект на державній мові;
- Фото сторінки конспекту відсилає на мою пошту із зазначенням групи та прізвища курсанта.

## Лекція 8

### 4.1 Термодинамічний метод дослідження циклів теплових двигунів

Основними завданнями термодинамічної методу дослідження циклів теплових двигунів є:

- визначення величини підведеної  $q_1$  відведеної  $q_2$  теплоти, а також роботи циклу  $l_{\text{ц}}$ ;
- визначення ефективності перетворення підведеної до робочого тіла теплоти  $q_1$  в роботу циклу  $l_{\text{ц}}$ , тобто визначення термічного ККД циклу  $\eta_t$  і факторів, на нього впливають;
- оцінка шляхів підвищення ефективності циклу.

Перетворення теплоти в роботу в циклах реальних двигунів пов'язано з низкою складних фізичних, хімічних і газодинамічних процесів (горіння палива, тепловіддача від робочого тіла в стінки двигуна, протягом в'язкого газу в різних елементах двигуна і ін.). Вони вивчаються в теорії авіаційних двигунів.

У технічній термодинаміці проводяться вивчення і дослідження ідеальних циклів теплових двигунів. У них реальні процеси замінюються ідеальними. При ідеалізації циклів зазвичай приймаються наступні допущення:

- 1) процеси, що становлять цикл, є оборотними, тобто  $l_{\text{тр}} = 0$  і інші дисипативні явища відсутні;
- 2) робоче тіло в циклі має незмінним хімічним складом, якщо це газ, то він вважається ідеальним;
- 3) реальний процес горіння палива замінюється оборотним процесом підведення теплоти ззовні;
- 4) цикл вважається замкнутим, процес зміни робочого тіла не розглядається, а замінюється оборотним процесом відведення теплоти від робочого тіла в навколишнє середовище.

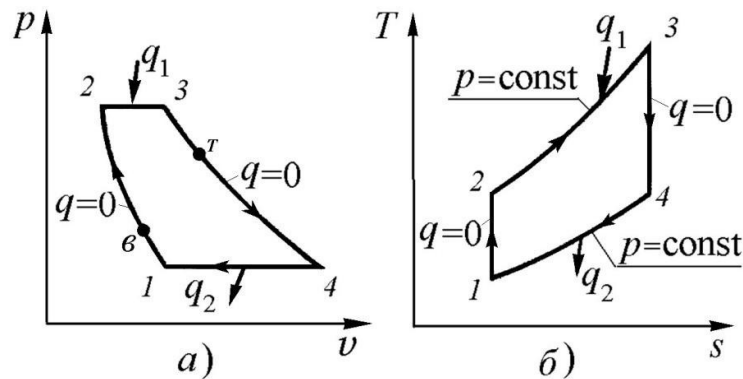
Максимально можливий ступінь перетворення теплоти в роботу циклу досягається в циклі Карно, який здійснюється в тому ж інтервалі температур, що і в досліджуваному циклі.

Досконалість довільного оборотного циклу оцінюється тим, на- скільки його термічний ККД відрізняється від термічного ККД циклу Карно, здійснюваного в той же інтервалі крайніх температур. Цю оцінку виконати складно, тому що важко обчислити  $\eta_t$  довільного циклу. Тому користуються такими методами порівняння ефективності циклів.

## 4.2 Цикл газотурбінних двигунів - цикл Брайтона

Даний цикл називається також циклом з підведенням теплоти при постійному тиску (рис. А і Б).

Від вихідного стану 1 робоче тіло стискається в адіабатні процесі 1-2. Далі в ізобарному процесі 2-3 до нього підводиться ззовні теплота  $q_1$ . Потім відбувається адіабатне розширення робочого тіла в процесі 3-4 до тиску  $p_4$ , рівного вихідного тиску  $p_1$ . Відведення теплоти  $q_2$  відбувається в замикає цикл ізобарном процесі 4-1, в результаті чого робоче тіло повертається в початковий стан 1.



Збільшення ступеня підвищення тиску в циклі є одним з основних засобів підвищення ККД і, отже, економічності теплових машин, що працюють за циклом Брайтона.

Практично всі сучасні воздушнореактивні і газотурбінні двигуни працюють по циклу Брайтона. У авіаційних двигунів значення в наземних умовах досягає 25 ... 30, а в польоті і того більше.

Розглянутий цикл Брайтона реалізується в ряді типів існуючих двигунів. В авіації це турбореактивні (рис. 1) і турбогвинтові двигуни (рис. 2), а також вертолітні газотурбінні двигуни (рис. 3). Цикл Брайтона застосовується, крім того, в турбостартер і в газотурбінних установках (ГТУ), використовуваних як допоміжні силові установки на важких літаках різного призначення.

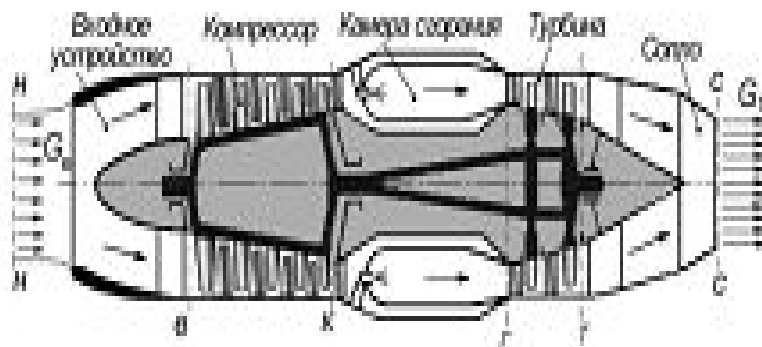
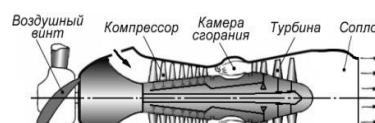


Рис. 1. Схema ТРД



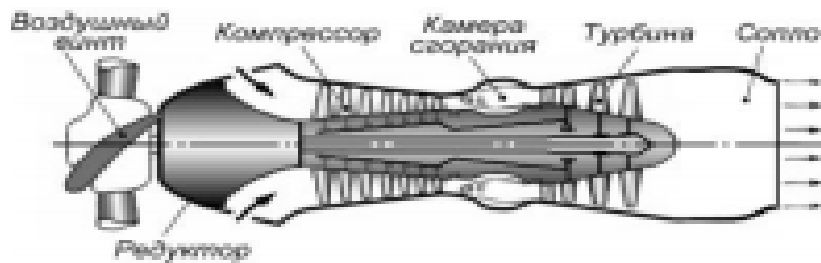


Рис. 2.СхемаТВД



Рис. 3. Схема ТВАД

#### 4.3 Циклі газотурбінних двигунів із ступінчастим підведенням теплоти

Один з варіантів циклу зі ступінчастим підведенням теплоти застосовується в авіаційних турбореактивних двигунах (ТРДФ), в яких одна камера згоряння розміщена перед турбіною, а друга, форсажна камера згоряння, • за турбіною (малюнок). Термодинамічні процеси протікають в цьому двигуні в такій послідовності:

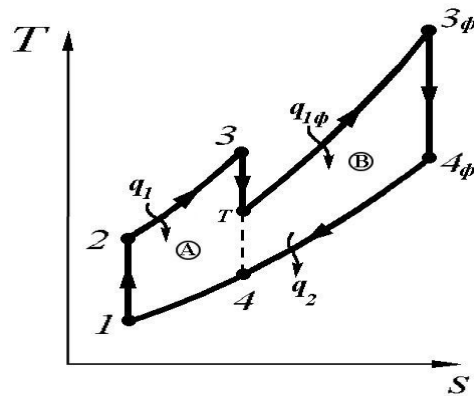
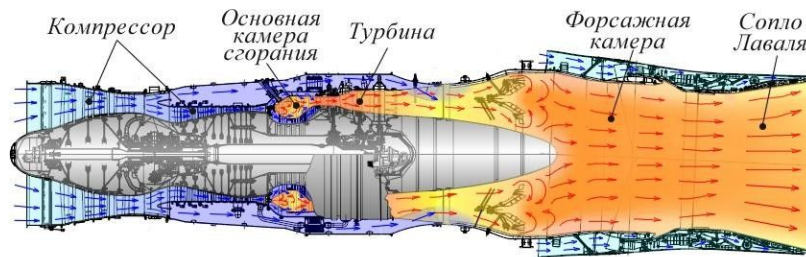
процесс1-2 - адиабатное стиснення повітря у вхідному пристрої і компресорі;  
 процесс2-3 - ізобарний підведення теплоти  $q_1$  в основній камері згоряння;  
 процесс3- T- адиабатное розширення газу в турбіні;  
 процессТ-3ф - ізобарний підведення теплоті  $q_{1ф}$  в форсажній камері згоряння;  
 процесс3ф-4ф - адиабатное розширення газу в соплі.

ТРДФ в порівнянні з ТРД створює велику тягу (через збільшення роботи циклу), але програє в економічності, так як при ступінчастому підводі теплоти термічний ККД циклу знижується.

Для доказу розглянемо два циклу: цикл А (1-2-3-4) і цикл В (4-Т-3ф-4ф), які разом, як видно на малюнку, складають цикл (А + В) зі ступінчастим підведенням теплоти. Ступінь підвищення тиску в циклі В менше, ніж ступінь підвищення тиску в циклі А. Тому і термічний ККД циклу В буде менше, ніж циклу А. Отже, перетворення підведеної теплоти в роботу у складеного циклу

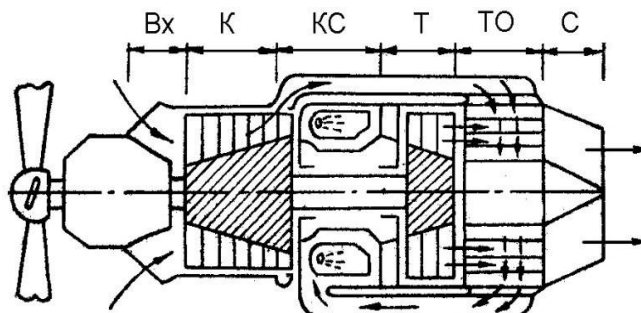
(циклу зі ступінчастим підведенням теплоти) в цілому буде протікати з меншим ККД, ніж у вихідного циклу А.

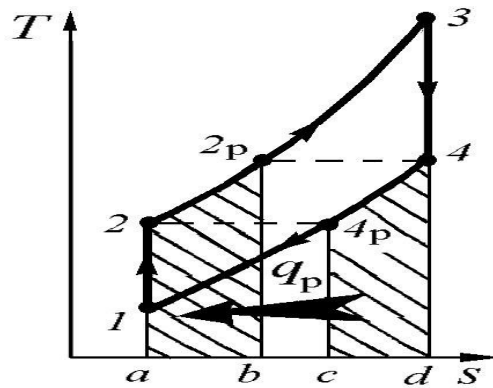
$$\eta_{t(A+B)} < \eta_{tA}$$



#### 4.4 Цикл Брайтона з регенерацією теплоти

Регенерація теплоти є одним із способів збільшення термічного ККД циклу. На рис. 6.10 показана принципова схема ТВД з регенерацією теплоти. Основна відмінність цього двигуна від ВМД, розглянутих вище, полягає в тому, що в ньому є теплообмінник (ТО), в якому вихідні з турбіни (Т) гази передають частину своєї теплоти  $q_r$ , що надходить в теплообмінник з компресора (К). Підігрів повітря зменшує кількість теплоти, яку необхідно підвести в камері згоряння (КС) для забезпечення заданої температури циклу  $T_3$ .





- 1) процес 1-2 - адіабатне стиснення у вхідному пристрої (ВХ) і компресорів (К);
  - 2) процес 2-2<sub>p</sub> - ізобарний підведення теплоти  $q_p$  до повітря в теплообміннику (ТО);
  - 3) процес 2<sub>p</sub>-3 - ізобарний підведення теплоти  $q_1$  в камері згоряння (КС);
  - 4) процес 3-4 - адіабатне розширення в турбіні (Т) і соплі (С);
  - 5) процес 4-4<sub>p</sub> - ізобарний відведення теплоти  $q_p$  від гарячого газу в теплообміннику (ТО);
  - 6) процес 4<sub>p</sub>-1 - ізобарний отвод теплоти  $q_2$  в атмосферу.
- при рівних параметрах циклу двигун, в якому реалізований цикл Брайтона з регенерацією теплоти, має більш високе значення термічного ККД і, отже, кращу економічність, ніж двигун без регенерації.

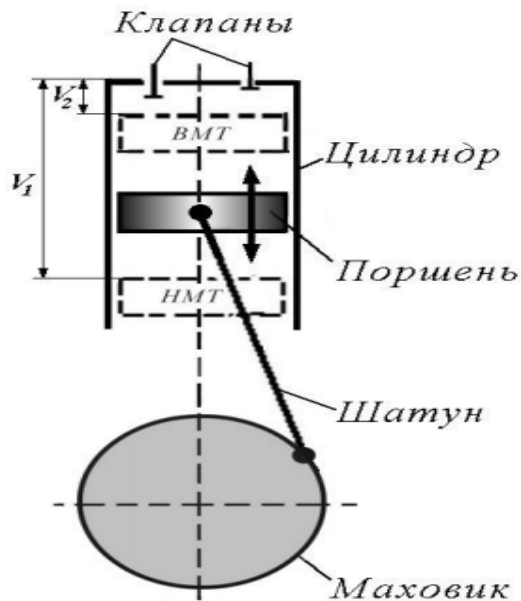
## Лекція 9

### 4.5 Циклі поршневих двигунів. Цикл Отто. цикл Дизеля

#### **Цикл з підведенням тепла при постійному об'ємі (цикл Отто)**

У 1876 році німецький винахідник Отто вперше розробив газовий двигун, в якому проводилося стиснення газової суміші з подальшим її займанням.



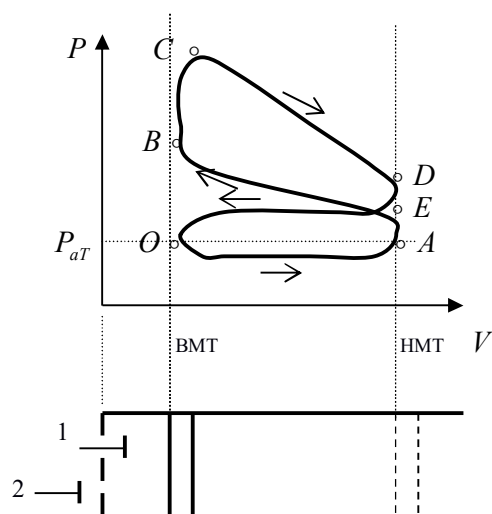


Ознайомимося з принципом дії. на рисунку зображена індикаторна діаграма такого чотиритактного двигуна.

Індикаторної діаграмою називають діаграму, яка побудована за експериментальними даними.

1 - й такт: хід поршня вправо від точки О. У циліндр через всмоктуючий клапан 1 засмоктується робоча суміш, що представляє собою суміш пального з повітрям. Процес всмоктування зображений на діаграмі лінією ОА.

2 - й такт: всмоктуючий клапан закривається і відбувається **стиснення робочої суміші** – лінія АВ. При досягненні поршнем верхньої мертвої



точки (ВМТ), робоча суміш запалюється від електричної іскри. У циліндрі внаслідок згоряння суміші швидко наростає тиск при малому зміщенні поршня – лінія ВС.

3 - й такт: горіння припиняється, відбувається **розширення продуктів**

згоряння, поршень рухається вправо. Цьому процесу на діаграмі відповідає лінія CD. Коли поршень досягне нижньої мертвої точки (НМТ), відкривається вихлопний клапан. Тиск в циліндрі різко падає - лінія DE.

4 - й такт: вихлопний клапан відкритий, поршень рухається вліво, **виштовхуючи продукти згоряння в атмосферу** – лінія EO. Далі цикл двигуна знову повторюється.

На індикаторній діаграмі процеси всмоктування і вихлопу не відображає зміни стану робочого тіла в циклі. Тому з точки зору термодинаміки вони не представляють інтересу. Крім того, сумарна робота їх в циклі дорівнює нулю.

У технічній термодинаміці дану діаграму ідеалізують. Процеси стиснення і розширення замінюють адіабатами, а процеси підвищення і зниження тиску при горінні суміші і відкритті вихлопного клапана - Ізохорами. Процеси всмоктування і вихлопу, які, по суті, забезпечують початковий стан робочого тіла в циклі, відкидають.

Відповідно до вищесказаного цикл з підведенням тепла при постійному тиску зображується в  $PV$  - координатах, як показано на малюнку.

тут:

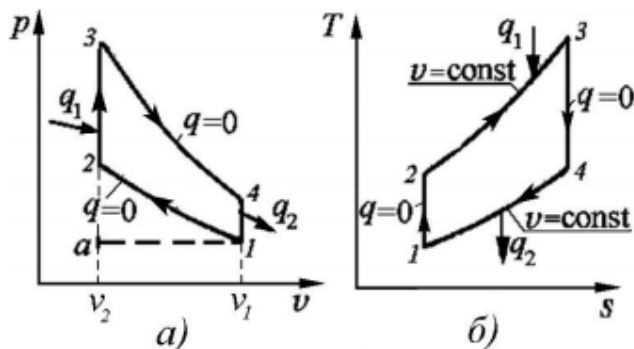
1-2 - адіабатне стиснення горючої суміші;

2-3 - Ізохоричний підведення тепла (при горінні палива);

3-4 - адіабатне розширення продуктів згоряння;

4-1 - умовний Ізохоричний процес відведення тепла, еквівалентний вихлопу відпрацьованих газів.

ставлення обсягів  $\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon$  називається ступенем стиснення.



З розгляду діаграм видно, що тиск  $P_3$  і температура  $T_3$  -Максимальний в циклі.

Термічний ККД обчислюється за загальною формулою:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

де  $q_1$  і  $q_2$  - кількості тепла, що підводиться і відводиться в циклі на 1кг робочого тіла.

Підведення і відведення тепла в циклі відбуваються при постійному об'ємі і тому ці теплоти рівні зміни внутрішньої енергії в процесах 2-3 і 4-1.

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) \quad \text{і} \quad q_2 = c_v(T_4 - T_1).$$

отже:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Підставами в формулу значення температур і знаходимо:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

З формули для ККД циклу Отто видно, що ККД тим більше, чим більше ступінь стиснення.

Досконалість двигунів внутрішнього згоряння відбувалося якраз в напрямку підвищення ступеня стиснення. У перших двигунах ступінь стиснення становило 2,5 атм, - в даний час до 12 атм. Ступінь стиснення обмежується температурою займання сжимаемой робочої суміші. Горюча суміш запалюється ще до досягнення поршнем вірніше мертвої точки. Внаслідок цього виникають великі зусилля на поршень, що може привести до поломки двигуна.

Високі тиск і температура, що досягаються при великих ступенях стиснення, призводять також до утворення в циліндрі двигуна умов, коли швидкість згоряння сильно зростає, а процес згоряння наближається до вибуху. Це явище називається детонацією. Поява детонації супроводжується миттєвим підвищенням тиску і призводить до пошкодження окремих деталей або пошкодження двигуна і знижує економічність двигуна.

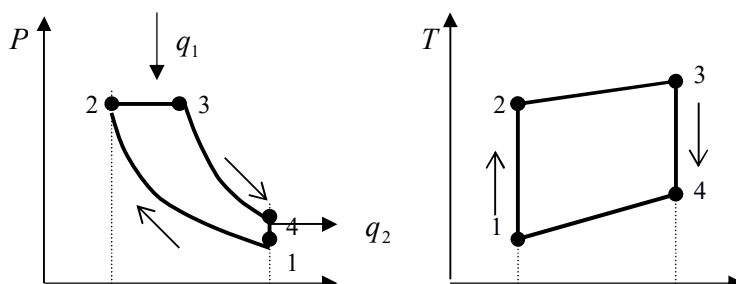
### Цикл з підведенням тепла при постійному тиску (цикл Дизеля)

Створення двигуна зі згорянням палива при постійному тиску пов'язане з ім'ям Дизеля.

Він показав безсумнівну перевагу в порівнянні з двигуном, з згоряння палива при постійному об'ємі. Ефективний ККД підвищився з 0,15 до 0,25.

Розглянемо принцип роботи такого двигуна і його теоретичний цикл.

У циліндр засмоктується чисте повітря при постійному тиску, близькому до атмосферного тиску. Далі усмоктувальні клапани закриваються, і повітря адіабатно стискається під дією поршня. В кінці стиснення тиск повітря становить 30-40 атм, а температура 600-800 °С. Після цього в циліндр вводиться через форсунку рідке паливо в дрібно розпиленому вигляді. Розпилення палива здійснюється стисненим повітрям при тиску 50-60 ат, що подається спеціальним компресором. Паливо, потрапляючи в середу стисненого гарячого повітря, запалюється і згорає в міру його введення при постійному тиску. При цьому виділяється на 1 кг палива  $q_1$  тепла. На PV- діаграмі цей процес 2-3. У точці 3 припиняється подача палива і гарячі газы починаються адіабатно розширюватися - лінія 3-4.



$$V_2 \quad V_1 \quad V \quad S_1 \quad S_2 \quad S$$

Коли поршень досягає нижньої мертвої точки, відкривається вихлопної клапан, і продукти згоряння видаляються в атмосферу. Цей процес умовно відображається лінією 4-1. Разом з відпрацьованими газами відводиться в атмосферу залишився тепло  $q_2$ .