

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

**Циклова комісія природничих дисциплін**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Фізика»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
**Технічне обслуговування та ремонт  
повітряних суден і авіадвигунів**

**Тема Робота та термодинамічний цикл 4-х тактного двигуна внутрішнього згорання. Термодинамічний цикл Отто**

**Харків 2022**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2022 № 8

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою Кременчуцького  
льотного коледжу ХНУВС

Протокол від 22.08.2022 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2022 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії природничих дисциплін, протокол від 10.08.2022 № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії природничих дисциплін, спеціаліст першої категорії, Москалик В.М.

**Рецензенти:**

1. Завідувач відділення фахової підготовки навчального відділу КЛК ХНУВС, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.
2. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, к.т.н., доцент Черниш А.А.

### **План лекцій:**

1. Термодинамічний цикл Отто.
2. Шляхи підвищення ефективності 4-х двигуна внутрішнього згорання

### **Література:**

#### **Основна:**

1. Дмитрієва В. Ф. Фізика: навчальний посібник / В. Ф. Дмитрієва. – К. : Техніка, 2008. – 608 с.
2. Трофімова Т.І. Курс фізики; 11-е изд., стер.: навчальний посібник для ВНЗ/ Т.І. Трофімова. – К.: Видавничий центр «Академія», 2006. – 560 с.

#### **Допоміжна:**

3. Курс фізики: навчальний посібник / [Зачек І. Р., Кравчук І. М., Романишин Б. М., Габа В. М., Гончар Ф. М.]. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2002. – 376 с.
4. Дмитрієва В. Ф. Основи фізики ; 2-е вид. исп. и доп. : навчальний посібник для студентів вишів/ В. Ф. Дмитрієва, В. Л. Прокоф'єв. –К. :Вища школа, 2001. – 527 с.
5. Волков О. Ф. Курс фізики; у 2-х т. – Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 224 с.
6. Волков О. Ф. Курс фізики; у 2-х т. – Т.2: Коливання і хвилі. Хвильова і квантова оптика. Елементи квантової механіки. Основи фізики твердого тіла. Елементи фізики атомного ядра: навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / О. Ф. Волков, Т. П. Лумпієва. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 208 с.
7. Збірник задач з фізики: навчальний посібник / [Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Серeda В. М., Крушельницька Т. Д., Українець Н. А.]. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 124 с.

## Текст лекції

### Поняття про цикл двигуна внутрішнього згоряння

Послідовність термодинамічних процесів в будь-якому сучасному поршневому двигуні внутрішнього згоряння в тій чи іншій мірі наближена до одного з трьох характерних циклів, званих ідеальними циклами Отто, Дизеля і Сабате - Трінклера (Сабатьє - Трінклера).

ідеальні цикли теплових двигателів. При цьому принципова відмінність цих циклів проявляється лише в характері процесу згоряння палива (підведення теплоти), який в ідеальному циклі Отто протікає в умовах постійного обсягу камери згоряння, в циклі Дизеля - при постійному тиску в циліндрі, а в циклі Сабате - послідовно по ізохорно, а потім по Ізобаричний процесам.

Виходячи з наведених характеристик, цикли Отто, Дизеля і Сабате - Трінклера іноді називають, відповідно, циклами швидкого, постійного і змішаного згоряння, які покладені в основу роботи карбюраторного, компресорного та Безкомпресорні двигунів.

Наведені нижче ідеальні цикли теплових двигунів внутрішнього згоряння описують послідовність термодинамічних процесів, що протікають по двотактному сценарієм, т. Е. Поршень в циліндрі здійснює за один цикл два ходи - вгору і вниз. Реальні теплові двигуни можуть працювати і по двотактному, і по більш ефективному чотиритактному циклу.

#### цикл Отто

Ідеальний цикл теплового двигуна внутрішнього згоряння з примусовим займанням горючої суміші, який зазвичай називають циклом Отто, насправді був описаний і запропонований ще в 1862 році французьким інженером Альфонсом Бо Де Роша (1815-1891), т. Е. Задовго до створення Ніколаусом Августом Отто свого знаменитого двигуна, перший зразок якого був виготовлений через півтора десятиліття - в 1878 році. Тому заслуга Отто полягає лише в здійсненні зазначеного циклу на практиці.

У своєму двигуні Отто першим застосував стиснення робочої суміші для підняття максимальної температури циклу, яке здійснювалося за адіабати (т. Е. Без теплообміну з зовнішнім середовищем). Послідовність термодинамічних процесів в циклі Отто можна простежити за наведеною нижче діаграмою (рис. 1).

Після стиснення газо-паливної суміші вона запалала від зовнішнього джерела (свічки), після чого починався процес підведення теплоти, який протікав практично по Ізохор (т. Е. При постійному обсязі циліндра двигуна). Цей процес на діаграмі представлений у вигляді вертикального ділянки, що починається з моменту займання горючої суміші в циліндрі.

Ізохорний характер процесу підведення теплоти пояснюється тим, що запалав газо-повітряна суміш згоряє дуже швидко, при цьому процес супроводжується різким підвищенням (стрибком) тиску і температури в циліндрі.

Далі слід було адіабатичне розширення, в процесі якого двигуном здійснювалася корисна робота (робочий хід поршня). В кінці процесу

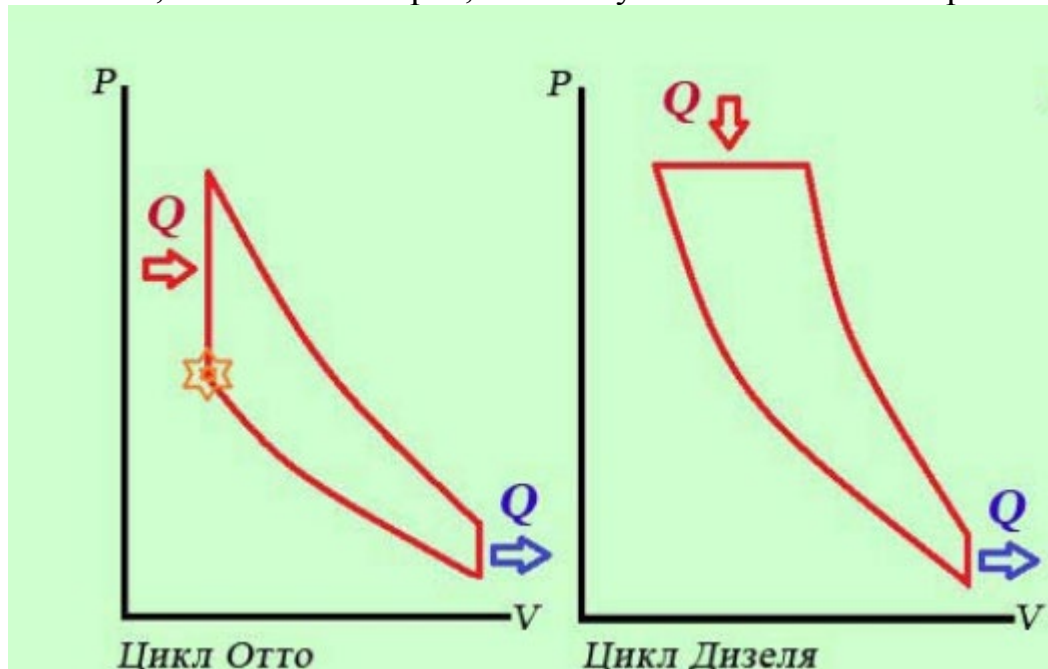
розширення слідував Ізохоричний відведення теплоти (відкривання клапанів і продування циліндра). На цьому цикл завершувався, після чого слід було повторення зазначеної послідовності процесів, що становлять низку аналогічних циклів.

Як зазначалося вище, А. Отто першим застосував стиснення робочої суміші перед займанням, завдяки чому ККД його двигуна значно перевищував ККД двигуна Е. Ленуара, в якому стиск не передбачалося. Сучасні двигуни, що працюють за схемою циклу Отто, мають ступінь стиснення (в залежності від конструктивних особливостей) від 8 до 12,5. За такого циклу працюють двигуни з примусовим займанням горючої суміші, що використовують як паливо бензин або газ.

Більш висока ступінь стиснення в таких двигунах призводить до детонаційного самозаймання суміші, т. Е. Втрачається контроль над процесом запалення і згоряння палива, а сам двигун, по суті, починає "перетворюватися" в безладно працює дизель з усіма наслідками, що випливають від детонації наслідками.

Через відносно невисокий ступінь стиснення горючої суміші в циліндрах, термічний ККД таких двигунів нижче, ніж в дизельних двигунах, і досягає 30-35%.

Двигуни, що працюють по циклу Отто, в даний час широко застосовуються в автомобілях, човнових моторах, малопотужних літальних апаратах і т. П.



Інший характерний ідеальний цикл для ДВС називають циклом Дизеля, на ім'я винахідника дизельного двигуна. Цей цикл характеризується підведенням теплоти (згоряння палива) по ізобарі, т. Е. При постійному тиску в циліндрі двигуна.

Як і у випадку з циклом Отто, називати цикл, в якому згорання палива здійснюється по ізобарі, циклом Дизеля буде не зовсім справедливо.

Спочатку Р. Дизель пропонував здійснювати спалювання палива по ізотерме (як в ідеальному циклі Карно) і запатентував саме такий спосіб підведення тепла до робочого тіла.

Однак, вже перші практичні випробування показали, що цикл, запропонований Р. Дизелем, не має ніякого практичного і теоретичного значення. Будь-яке наближення процесів горіння до ізотерме в циклі Дизеля призводило до збільшення витрати палива.

І лише через якийсь час аналіз діаграми робочого циклу дизельного двигуна, побудованого в Росії на заводі "Л. Нобеля" показав, що лінія згоряння палива в ньому протікає по ізобар. При цьому досягався найвищий ККД.

Проте, назва цикл Дизеля встановилося і тепер назавжди пов'язане з ім'ям знаменитого винахідника конструкції теплових двигунів унікального типу.

Цикл Дизеля протікає за наступним сценарієм (див. Діаграму на рис. 1).

Стиснення здійснюється по адіабати, як і в циклі Отто, з тією лише різницею, що ступінь стиснення і тиск в кінці такту значно вище. Це простежується на наведеній діаграмі.

В кінці такту стиснення відбувається впорскування палива і починається його горіння (підведення теплоти), яке здійснюється за ізобарі, т. Е. При постійному тиску.

Саме в цьому полягає принципова відмінність циклу Дизеля від циклу Отто, де теплота підводиться ізохорно (при постійному обсязі), оскільки паливо згорає дуже швидко, а його займання (від іскри) починається трохи раніше, ніж поршень досягав верхнього положення.

Ізобарна спалювання палива в дизельному двигуні пов'язано з відносно повільним (лавиноподібним) займанням - спочатку згоряють легкі фракції, потім більш важкі. В результаті процес горіння розтягується в часі і поршень встигає "втєкти" від верхньої мертвої точки, при цьому тиск в циліндрі залишається незмінним.

Далі, як і в циклі Отто, слід було адіабатичне розширення, а потім Ізохоричний відведення теплоти (випуск газів і продування циліндра після відкривання клапанів).

Принципова і конструктивна відмінність полягала в тому, що Дизель запропонував стискати в циліндрі НЕ топливовоздушную суміш, як в двигунах Отто, а повітря. В кінці такту стиснення температура повітря піднімалася настільки, що впорскується в циліндр паливо займається самостійно, т. Е. Відбувалося самозаймання палива.

Для здійснення самозаймання доводилося значно збільшити ступінь стиснення, яка в дизельних двигунах в 2-3 рази вище, ніж в карбюраторних двигунах.

Дизель, проектуючи свій двигун, припускав застосувати стократну ступінь стиснення, але, як показали перші ж випробування, теплова і механічна напруженість деталей двигуна при таких навантаженнях перевищувала

допустимі значення. Дослідні зразки не витримували навантаження і руйнувалися навіть при значне тяжких конструкції з метою підвищення міцності.

Проте, сучасні розробки щодо вдосконалення дизельних двигунів спрямовані, в тому числі, на значне збільшення ступеня стиснення, оскільки це безпосередньо пов'язано з підвищенням ККД і економічності двигуна.

За легендою вважається, що Р. Дизель винайшов свій знаменитий двигун, накачуючи ручним насосом колесо велосипеда. Після кількох енергійних маніпуляцій насосом, він зауважив, що його корпус-циліндр сильно нагрівся, і навіть обпікав руку. Це і наштотувало винахідника на ідею, яка принесла йому світову славу і безсмертя в пам'яті вдячного людства.

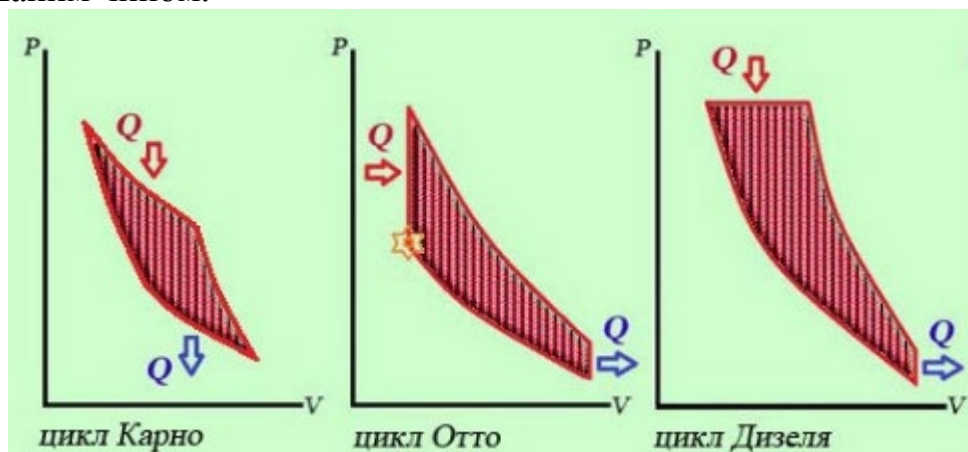
Особливістю системи живлення Дизеля, в його первозданному вигляді, було компресорне пневматична розпилювання палива, на зміну якому згодом прийшло механічне розпилювання за допомогою паливних насосів високого тиску (ТНВД) і форсунок, запропонованих в 1898 році французом Сабате.

Відмова від пневматичного (компресорного) впорскування був пов'язаний з тим, що на привід компресора доводилося 10-15% корисної роботи двигуна, в зв'язку з чим витрата палива у таких дизелів був не зовсім прийнятним, тобто ефективні показники були нижчими, ніж у циклу Сабате - Трінклера. Крім того, гідравлічний уприскування палива дозволяв збільшити динамічні показники роботи дизельного двигуна.

Однак індикаторні і екологічні показники компресорного ( "чистого") дизельного двигуна були вище, ніж у двигунів, що працюють за циклом Сабате - Трінклера (про них мова піде нижче). Пов'язано це було з більш якісним смесеобразованием - в циліндр подавалася топливовоздушная суміш, а не паливо в рідкій фазі як у сучасних дизелів.

### Термодинаміка поршневого двигуна

Ідеальні термодинамічні цикли поршневих двигунів (цикли Карно, Отто, Дизеля і Сабате-Трінклера) описують процеси, що відбуваються в циліндрах двигуна з умов максимального використання теплової енергії. Ці цикли розрізняються, в основному, способом підведення тепла - при постійній температурі робочого тіла, при постійному обсязі, при постійному тиску і змішаним чином.



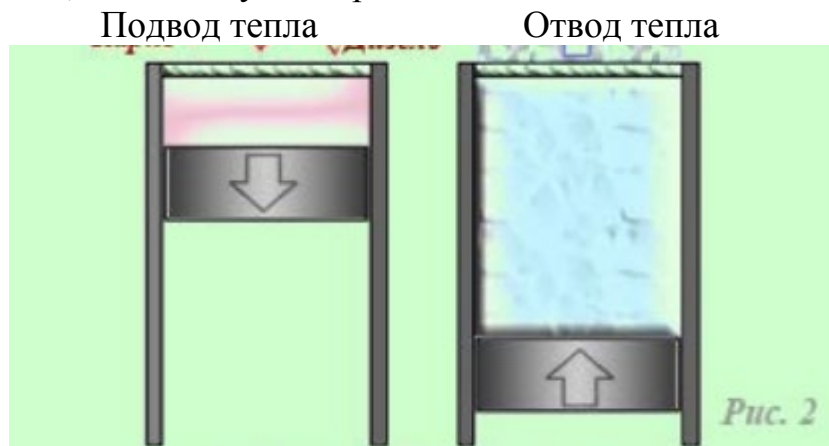
Щоб наочніше зрозуміти суть процесів, що складають ці цикли, спробуємо відкинути стереотипи, часто заважають реально осмислити причини, що приводять у рух поршень теплового двигуна і, в кінцевому підсумку, змушують двигун виконувати певну роботу.

Для цих цілей відмовимося від подачі паливо-повітряної суміші в циліндри, приберемо клапана, систему запалювання, і уявімо собі найпростішу систему (поршневий двигун), що складається з циліндра, поршня і укладеного між ними будь-якого газу, наприклад, звичайного повітря.

Верхнє денце циліндра «зробимо» з тонкого (але міцного) і прозорого матеріалу, здатного пропускати теплові промені.

А тепер уявімо, як протікають процеси підведення теплоти в різних термодинамічних циклах, розглядаючи описану вище найпростішу модель поршневого двигуна. Отже, ніякого палива у нас немає - тільки циліндр, поршень, і повітря між ними.

Розмістимо над прозорим денцем циліндра малопотужну лампу розжарювання, яка здатна повільно передавати тепло повітря, розміщеному між циліндром і поршнем (див. Рис. 2). Оскільки підігрів здійснюється повільно, підвищення тиску повітря супроводжується одночасним збільшенням його обсягу (поршень переміщається вниз), при цьому температура повітря в циліндрі залишається майже незмінною. Процес підведення теплоти здійснюється по ізотерме, як в циклі, описаному С. Карно.



Термодинамічний цикл

Приблизно в середній частині ходу поршня лампу вимикаємо, і наш поршень продовжує переміщатися вниз вже за рахунок внутрішньої енергії молекул повітря, накопиченої під час підведення теплоти.

Досягнувши нижньої мертвої точки, наш поршень повинен зупинитися - адже для того, щоб він почав рухатися в зворотному напрямку, повітря в циліндрі необхідно охолоджувати. Саме в цьому місці циклу Саді Карно увів свій знаменитий холодильник - пристрій, здатний забирати тепло у системи, т. Е. У нашого повітря в циліндрі.

Отже, замість лампи підігріву ми повинні обкласти циліндр з усіх боків льодом або снігом - тільки в цьому випадку охолоджуваній повітря почне зменшуватися в обсязі, і поршень поповзе вгору. У циклі Карно цей процес



називається ізотермічним відведенням теплоти - т. Е. Температура повітря залишається незмінною, а відведення теплоти супроводжується зменшенням об'єму повітря (негативна робота циклу).

Приблизно в середній частині ходу поршня видаляємо лід, і далі поршень переміщається до верхньої точки за рахунок внутрішньої енергії, здійснюючи все також негативну роботу.

Цикл замкнувся (див. Графічне відображення циклу карно

А тепер давайте цю модель можна застосовувати для циклу Отто (або, як його ще називають - циклу Бо де Роша).

Як і в попередньому випадку, поршень вгорі, між поршнем і циліндром повітря. Замість лампочки розжарювання на короткий час включаємо потужний лазер, здатний досить швидко розігріти повітря в циліндрі. Моментально зростає тиск в циліндрі, при цьому поршень (в силу своєї інертності і розташування кривошипно-шатунного ланки) не встигає піти з мертвої точки, т. Е. Процес підведення теплоти протікає при постійному обсязі (ізохорно).

Далі - робочий хід (виконання поршнем корисної роботи), який супроводжується збільшенням обсягу і поступовим зменшенням тиску. Температура повітря теж дещо знижується.

В ідеальній системі для продовження циклу необхідно відвести тепло за допомогою холодильника (обкласти циліндр льодом), тоді діаграма циклу на цій ділянці буде мало відрізнятися від діаграми циклу Карно. У реальному двигуні відведення теплоти здійснюється випуском гарячого робочого тіла і заміна його холодним робочим тілом (випуск газів і впуск свіжого заряду), з цієї причини цикл не є замкнутим і розривається в зоні відводу тепла (див. Рис. 1).

Отже, для реалізації циклу Отто ми використовували дуже швидке підведення теплоти за допомогою лазерного променя.

Для моделювання циклу Дизеля замість лазера розмістимо над скляним денцем циліндра знову ж лампу розжарювання, тільки значно потужніше, ніж у першому випадку. Тоді повітря в циліндрі буде інтенсивно розігріватися (але значно повільніше, ніж від розігріву лазером), при цьому поршень буде встигати піти від верхньої точки таким чином, що збільшення обсягу повітря не супроводжується зміною тиску.

термодинамічні цикли поршневих двигателів В результаті ми отримаємо процес підведення теплоти за допомогою потужної лампи, що протікає при изобарном процесі (при постійному тиску і змінних обсязі і температурі), т. е. аналогічний процесу підведення теплоти в циклі Дизеля.

Робочий хід, відведення тепла і стиснення повітря в циклі Дизеля протікають по таким же процесам, як і в циклі Отто (див. Графік на рис. 1).

Ну а цикл Сабате-Трінклера, як ви вже здогадалися, буде полягати для нашого «двигуна» короткочасним підведенням тепла за допомогою лазера, а потім підміною лазера на потужну лампочку розжарювання. Тоді повітря отримає потужну порцію тепла від лазера, в циліндрі різко збільшиться тиск при постійному обсязі, після чого поршень відносно повільно переміститься вниз, отримуючи тепло від лампи при постійному тиску в циліндрі (див. Рис. 1).

На підставі аналізу наведених вище віртуальних моделей термодинамічних циклів стає очевидним, що суть процесів, що відбуваються в двигуні, в загальному випадку, не залежить від того, яке паливо спалюється в циліндрі (можна обійтися взагалі без палива), а лише від способу підведення теплоти до робочого тілу.

В реальності все виглядає трохи інакше і, звичайно ж, складніше.