

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

"Транспортні енергетичні установки"

для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
("Колісні та гусеничні транспортні засоби"),
усіх форм навчання

Частина 1 - змістовий модуль 1.

Двигуни внутрішнього згоряння: історія розвитку,
конструктивні особливості та принципи розрахунку

2019

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни "Транспортні енергетичні установки" для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби") усіх форм навчання. Частина 1 - змістовий модуль 1. Двигуни внутрішнього згоряння: історія розвитку, конструктивні особливості та принципи розрахунку / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 62 с.

Укладачі: О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;
О.В. Дударенко, доцент, канд.техн.наук;
А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук;
А.В. Щербина, доцент, канд.техн.наук

Рецензенти: О.С. Слюсаров, доцент, канд.техн.наук;
С.М. Турпак, професор, д-р.техн.наук

Відповідальний за випуск: А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук

Затверджено
на засіданні кафедри "Автомобілі"
Протокол № 10
від « 10 » травня 2019.

Рекомендовано для видання
НМК Транспортного факультету
Протокол № 76
від « 17 » травня 2019.

ЗМІСТ

Частина 1

Вступ	5
Тематичний план лекційних занять	6
Лекція № 1. Вступ до курсу.....	8
Лекція № 2. Класифікація двигунів і компоновальні схеми розміщення двигунів на транспортних засобах	27
Лекція № 3. Двигуни зовнішнього згоряння.....	41
Лекція № 4. Двотактні ДВЗ	53
Рекомендована література	60
Основна	60
Додаткова	60

Частина 2

Вступ	66
Тематичний план лекційних занять	67
Лекція № 5. Чотиритактні ДВЗ	69
Лекція № 6. Особливості конструкцій сучасних автомобільних бензинових ДВЗ	78
Лекція № 7. Особливості конструкцій сучасних автомобільних дизельних ДВЗ	108
Рекомендована література	122
Основна	122
Додаткова	124

Частина 3

Вступ	128
Тематичний план лекційних занять	129
Лекція № 8. Газові енергетичні установки на транспортних засобах ..	132
Лекція № 9. Роторно-поршневі ДВЗ	153
Лекція № 10. Газотурбінні ДВЗ.....	172
Рекомендована література	184
Основна	184
Додаткова	184

Частина 4

Вступ	190
Тематичний план лекційних занять	191
Лекція № 11. Гібридні й електричні енергетичні установки транспортних засобів.....	194
Лекція № 12. Двигуни внутрішнього згоряння з нетрадиційними робочими циклами.....	210
Лекція № 13. Водневі енергетичні установки.....	235
Лекція № 14. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок	258
Рекомендована література	266
Основна	266
Додаткова	266

ВСТУП

Метою курсу "Транспортні енергетичні установки" є вивчення робочих процесів енергетичних установок і особливостей їх конструкції.

Двигун внутрішнього згоряння - це основна енергетична установка сучасного транспорту (перед усім автомобільного), головною функцією якої є перетворення хімічної енергії палива в механічну роботу. Теорія енергетичної установки транспортної техніки вивчає робочі процеси, що відбуваються в енергетичній установці при перетворенні енергії палива в роботу за допомогою спеціальних пристроїв і механізмів, які складають конструкцію енергетичної установки. До енергетичної установки пред'являються вимоги по габаритах, масі та по надійності й довговічності.

Сучасна автомобільна транспортна техніка є складною машиною, створеною працею великої кількості інженерів з різних галузей науки й техніки багатьох країн.

Перші автомобілі з паровою силовою енергетичною установкою, що з'явилися в XVIII ст., були важкими й громіздкими. В 1860 р. французький інженер Етьєн Лєнуар винайшов перший двигун внутрішнього згоряння, що працював на світильному газі.

В 1870 р. Є. Ланген і Н. Отто (Німеччина) побудували чотири-тактні газові двигуни із примусовим запаленням суміші, а в 1897 г. німецький інженер Р. Дизель створив перший стаціонарний двигун із запаленням робочої суміші від стиску - дизель.

В 1883 г. з'явився автомобіль із двигуном внутрішнього згоряння, побудований К. Бенцем, в 1888 г. - перший мотоцикл Г. Даймлера.

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) поступово став основним джерелом енергії на транспорті будь якого типу та призначення.

Матеріал, викладений у даному конспекті лекцій, надає студентам необхідну інформацію з кожного з розділів навчальної програми курсу "Транспортні енергетичні установки", і допоможе студентам досягти необхідного рівня знань, практичних навичок та умінь.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Загальний об'єм курсу становить 28 годин і складається з двох змістових модулів. Даний конспект лекцій дисципліни "Транспортні енергетичні установки" складається з двох частин, і розроблений відповідно до:

Робоча програма з дисципліни "Транспортні енергетичні установки" для студентів за напрямом підготовки 6.050503 – "Машинобудування", спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування (Колісні та гусеничні транспортні засоби), усіх форм навчання. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 18 с.

Нижче наведено назву першого змістового модуля дисципліни "Транспортні енергетичні установки", найменування тем лекційних занять в модулі і вказано кількість годин аудиторних занять, для студентів денної форми навчання, окремо для кожної лекції.

Для кожної теми лекції вказано перелік питань які треба розглянути під час даної лекції. Слід враховувати те, що в даному конспекті лекцій приведено лише стислий огляд питань кожної лекції. Крім того навчальним планом дисципліни передбачено активну самостійну роботу студентів за вказаними темами курсу.

Вкінці кожної лекції наведено перелік питань для самоперевірки. Для самостійної роботи студенту слід користуватися рекомендованою літературою для вивчення дисципліни, перелік якої наведено в кінці даного конспекту лекцій, а також використовувати розроблені методичні вказівки:

Методичні вказівки з вивчення дисципліни "Транспортні енергетичні установки" та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби"), усіх форм навчання. / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 62 с.

Змістовий модуль 1. Двигуни внутрішнього згоряння: історія розвитку, конструктивні особливості та принципи розрахунку

Тема 1. Вступ до курсу (2 год.)

Особливості двигунів внутрішнього згоряння. Коротка історія розвитку двигунобудування. Характеристика двигунів внутрішнього

згоряння як джерел енергії. Області застосування поршневих і комбінованих двигунів. Принципи конструювання й розрахунків сучасних двигунів.

Тема 2. Класифікація двигунів і компоновальні схеми розміщення двигунів на транспортних засобах (2 год.)

Абревіатури та скорочення систем двигунів світових виробників. Умовне позначення двигунів. Класифікація двигунів. Аналіз компоновальних схем розміщення двигунів на транспортних засобах.

Тема 3. Двигуни зовнішнього згоряння (2 год.)

Винахід і розвиток парових машин. Класифікація й типи парових двигунів. Переваги й недоліки парових машин. Двигун Стірлінга: історія появи, принцип роботи, термодинамічний цикл, переваги й недоліки, область застосування.

Тема 4. Двотактні ДВЗ (2 год.)

Робочі цикли, діаграми, термодинаміка, процеси згоряння.

Тема 5. Чотиритактні ДВЗ (2 год.)

Робочі цикли, діаграми, термодинаміка, процеси згоряння.

Тема 6. Особливості конструкцій сучасних автомобільних бензинових ДВЗ (2 год.)

Сумішоутворення. Запалення робочої суміші. Елементи конструкції двигуна. Системи впорскування бензину.

Тема 7. Особливості конструкцій сучасних автомобільних дизельних ДВЗ (2 год.)

Сумішоутворення. Запалення робочої суміші. Елементи конструкції двигуна. Система Common Rail.

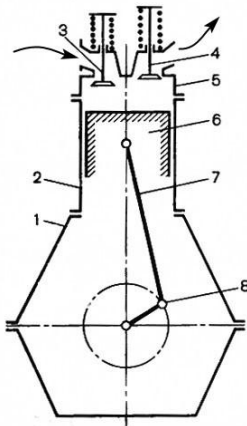
ЛЕКЦІЯ № 1. ВСТУП ДО КУРСУ

План лекції. Особливості двигунів внутрішнього згоряння. Коротка історія розвитку двигунобудування. Характеристика двигунів внутрішнього згоряння як джерел енергії. Області застосування поршневих і комбінованих двигунів. Принципи конструювання й розрахунків сучасних двигунів.

Література: [1], с. 6; [2], с. 11-14; [3], с. 8-20; [4], с. 8-26; [5], с. 8-9; [6], с. 7-12; [16], с. 3-7; [34], с. 5-10, 51-80.

Особливості двигунів внутрішнього згоряння. Теплові двигуни можуть бути розділені на дві основні групи: зовнішнього й внутрішнього згоряння.

До двигунів зовнішнього згоряння відносяться парові машини, парові турбіни, двигуни Стірлінга та ін. Двигуни Стірлінга по конструкції близькі до поршневих двигунів внутрішнього згоряння.



- 1- картер, 2 – циліндр,
3 – впускний, 4 - випускний
клапан, 5 – головка циліндра,
6 – поршень, 7 – шатун,
8 – колінчатий вал

Рисунок 1.1 – Схема двигуна внутрішнього згоряння

До двигунів внутрішнього згоряння відносяться поршневі й комбіновані двигуни, газові турбіни й реактивні двигуни. У них процеси спалювання палива, виділення теплоти й перетворення частини її в механічну роботу відбуваються безпосередньо усередині двигуна. За традицією під двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) прийнято розуміти поршневі двигуни. Основними деталями поршневого двигуна є: циліндр; кришка (головка) циліндра; картер; поршень; шатун; колінчатий вал; впускні й випускні клапани. Паливо й необхідне для його згоряння повітря вводяться в об'єм циліндра двигуна, обмежений днищем кришки, стінками циліндра й днищем поршня. Гази що утворюються при згорянні, з високою температурою й тиском, натискають на поршень і переміщують його в циліндрі.

Поступальний рух поршня, через шатун, перетворюється в обертальний рух колінчатим валом, розташованим у картері. У зв'язку зі зворотно-поступальним рухом поршня згоряння палива в поршневих двигунах можливо лише періодично, послідовними порціями, причому згорянню кожної порції повинен передувати ряд підготовчих процесів.

У *газових турбінах* спалювання палива відбувається у спеціальній камері згоряння. Паливо в неї подається насосом через форсунку, повітря, необхідне для горіння, нагнітається компресором, установленим на одному валу з робочим колесом газової турбіни. Продукти згоряння через напрямний апарат надходять у газову турбіну.

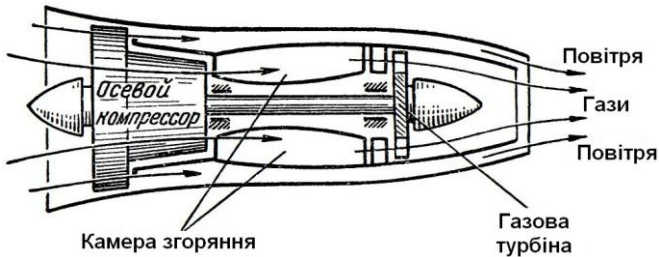


Рисунок 1.2 – Принципова схема газової турбіни

Газова турбіна має робочі органи у вигляді лопаток спеціального профілю, розташованих на диску, й утворюючих разом з останнім обертове робоче колесо і може працювати з високою частотою обертання. Застосування в турбіні декількох послідовно розташованих рядів лопаток (багатоступінчасті турбіни) дозволяє більш повно використовувати енергію гарячих газів. Однак газові турбіни уступають по економічності поршневим двигунам внутрішнього згоряння, особливо при роботі з неповним навантаженням, і крім того, відрізняються великою тепловою навантаженістю лопаток робочого колеса, обумовленою їхньою безперервною роботою в середовищі газів з високою температурою. При зниженні температури газів, що надходять у турбіну, для підвищення надійності лопаток зменшується потужність і погіршується економічність турбіни.

Газові турбіни широко використовуються в якості допоміжних агрегатів у поршневих і реактивних двигунах, а також як самостійні силові установки. Застосування жаростійких матеріалів і охолодження

лопаток, удосконалення термодинамічних схем газових турбін дозволяють поліпшити їхні показники й розширити область використання.

Комбінованими двигунами внутрішнього згоряння називають двигуни, що складаються із поршневої частини й декількох компресорних і розширювальних машин (або пристроїв), а також пристроїв для підведення й відводу теплоти, об'єднаних між собою загальним робочим тілом. У якості поршневої частини комбінованого двигуна використовують ДВЗ.

Енергія в такій установці передається споживачеві валом поршневої частини, або валом іншої розширювальної машини, або обома валами одночасно. Число компресорних і розширювальних машин, їх типи й конструкції, зв'язок з поршневою частиною й між собою - визначаються призначенням комбінованого двигуна, його схемою й умовами експлуатації.

Найбільш компактні й економічні комбіновані двигуни, у яких продовження розширення випускних газів поршневої частини здійснюється в газовій турбіні, а попередній стиск свіжого заряду проводиться у відцентровому або осьовому компресорі (цей тип двигуна поки не одержав поширення), причому потужність споживачеві звичайно передається через колінчатий вал поршневої частини.

Поршневий двигун і газова турбіна в складі комбінованого двигуна вдало доповнюють один одного: у ДВЗ найбільш ефективно в механічну роботу перетворюється теплота малих обсягів газу при високому тиску, а в газовій турбіні щонайкраще використовується теплота більших обсягів газу при низькому тиску.

Комбінований двигун складається із ДВЗ, газової турбіни й компресора. Випускні гази після поршневого двигуна, що мають ще високі значення температури й тиску, приводять в обертання лопатки робочого колеса газової турбіни, яка передає крутний момент компресору. Компресор засмоктує повітря з атмосфери й під певним тиском нагнітає його в циліндри поршневого двигуна. Збільшення наповнення циліндрів двигуна повітрям, шляхом підвищення тиску на впуску називають наддуванням. При наддуванні щільність повітря зростає й, отже, збільшується свіжий заряд, що заповнює циліндр при впуску, у порівнянні із зарядом повітря в тому ж двигуні без наддування.

Найбільш економічними є поршневі й комбіновані двигуни внутрішнього згоряння, що одержали широке застосування в транспортній і стаціонарній енергетиці. Вони мають досить великий термін

служби, порівняно невеликі габаритні розміри й масу, високу економічність, їх характеристики добре узгоджуються з характеристиками споживача. Основним недоліком таких двигунів слід уважати зворотно-поступальний рух поршня, пов'язаний з наявністю механізму, що ускладнює конструкцію й обмежуючого можливість підвищення частоти обертання, особливо при значних розмірах двигуна.

Коротка історія розвитку двигунобудування. Історія розвитку двигунів внутрішнього згоряння тісно пов'язана з еволюцією теплових двигунів і теплотехніки. Прототип теплового двигуна зберігся в начерках Леонардо да Вінчі (1500 р.). В 1678 г. абат Отфей висловив думку про можливість застосування порошу для виробництва безперервної роботи, а в 1680 р. Л. Гюйгенсом була почата спроба створення конструкції порохового газоатмосферного двигуна, прообразом якого стала порохова рушниця.

Ідея спалювання палива усередині робочої порожнини двигуна належить Джону Барберу (1791 р.). Запропонована ним установка мала всі основні елементи сучасних газотурбінних двигунів: газову турбіну, камеру згоряння й компресори для стиску газу й повітря. Горючий газ виходив у результаті перегонки вугілля, деревини або нафти у своєрідних газогенераторах.

В 1801 р. Ф. Лебон винайшов двигун подвійної дії, що працює на світильному газі з електричним запалом. В 1815 р. С. Броун уперше запропонував увести охолодження циліндрів водою, але тільки в 1823 р. він втілює цю ідею, що розв'язало проблему перегріву двигуна. У двигунах Ф. Лебона й С. Броуна суміш запалювалася на $1/3$ ходи поршня після початку впуску. В 1833 р. В. Райт запропонував робити запалення горючої суміші у верхній мертвій точці поршня. З інших винаходів слід виділити пропозиції стискати газ і повітря окремими насосами (В. Барнет, 1838 р.) і в самому циліндрі двигуна поршнем (В. Дегранд, 1858 р.).

Таким чином, до 1860 р. були сформульовані головні принципи роботи двигуна внутрішнього згоряння: попередній стиск робочої суміші, запалення її в "мертвому" положенні поршня, охолодження циліндра водою, використання електричної іскри для запалювання суміші. Спроби реалізації цих пропозицій у реальних конструкціях у той час були невдалими і не увійшли в історію техніки.

Перший двигун внутрішнього згоряння, що має практичне за-

стосування, був побудований у Франції в 1860 р. Е. Ленуаром. Це був двотактний двигун із золотниковим газорозподілом, що працює на світильному газі із запаленням від електричної іскри, із засмоктуванням газу на 1/2 ходи поршня, без стиску, із ККД 4,6 %. Е. Ленуар скомбінував винаходи попередників, використовував досвід створення парових машин, залучив до нового двигуна увагу промислових кіл, показавши перевагу конструкції свого двигуна - відсутність парового котла.

В 1861 р. французький інженер У де Роша запатентував двигун внутрішнього згоряння з попереднім стиском горючої суміші. В 1862 р. кельнський механік Н. Отто (1832 - 1891 рр.) з Е. Лангренем (банк'єр) і інженерами В. Майбахом і Г. Даймлером побудував перші чотиритактні ДВЗ зі стиском газоповітряної суміші потужністю 2 к.с. (1,47 кВт) при частоті обертання 150 хв^{-1} масою 2 т, які виявилися економічні парових машин.

Уже в період створення перших двигунів Н. Отто висловив ідею про необхідність продовження такту розширення з метою одержання більш високого ККД. В атмосферному двигуні Н. Отто й Е. Лангрена (1867 р.) кривошипний механізм був замінений передачею з рейкою. Двигун мав вертикальне виконання, поршень був вільний і з'єднувався з валом тільки при русі вниз. Корисна робота відбувалася падаючим поршнем. Було випущено 5000 таких двигунів.

В 1877-1878 рр. Н. Отто створив чотиритактний газовий двигун, що працює з попереднім стиском і підвищеною економічністю. Ця конструкція була запатентована. Однак в 1886 р. патент Н. Отто був анульований з посиланням на патент Бо де Роша 1861 р.

В 1879 р. російським інженером капітаном Балтійського флоту І.С. Костовичем був спроектований перший бензиновий ДВЗ із горизонтальним розташуванням циліндрів потужністю 80 к.с. (58,8 кВт) для дирижабля, який мав питому масу 3 кг/(к.с.). Такий двигун був побудований і випробований в 1885 р.

Необхідно відзначити, що разом з роботами з удосконалювання ДВЗ у ряді країн проводилися роботи з удосконалювання двигунів зовнішнього згоряння. Так, було видано три патенти (1816, 1827 і 1840 рр.) шотландському священикові Р. Стірлінгу на конструкції таких двигунів. Надалі вдосконаленням двигунів Стірлінга займався шведський інженер Дж. Ернсон. Так, в 1885 р. були побудовані двигуни Р. Стірлінга із КПД 5...7 %, потужністю 2 к.с. (1,47 кВт), масою 4 т і об-

сягом 20 м^3 .

В 1885 р. у Росії з'явилися двигуни конструкцій А. Яковлєва й Е.Є. Бромлєя, що працюють на гасі із запаленням від постійного джерела, а Г. Даймлером і В. Майбахом створені перші одноциліндрові двигуни для мотоциклів.

До 1886 р. відносяться кілька чудових подій в історії розвитку техніки: Капітеном запропонована конструкція двигуна, у якому здійснювався стиск повітря до температури запалення важкого палива, а наступне його згоряння відбувалося при постійному тиску; Г. Даймлер разом з К. Бенцем створили перший двигун для літаків.

В 1889 р. Г. Даймлер і В. Майбах (Німеччина) одержали патент на перший V-образний двигун.

Стаціонарні двигуни, що працюють на гасі й більш важких сортах палива, з'явилися в ряді країн у період з 1884 по 1890 р. Запалювання суміші палива й повітря в цих двигунах здійснювалося за допомогою з'єднаного з камерою згоряння калоризатора, що представляє собою порожню масивну кулю, на розпечену поверхню якої подавалося паливо. Подібні двигуни в Росії стали випускатися з 1890 р. (їх часто називали "нефтянками"); вони мали широке поширення. Це були неекономічні двигуни з питомою ефективною витратою палива більш $0,4 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

В 1890 р. у Москві на заводі Е.Є. Бромлєя (згодом "Червоний пролетарій") розпочали масове виробництво чотиритактних газових калоризаторних двигунів. В 1892 р. у Росії на заводі Є. Нобеля (згодом "Русский дизель") почали робити двотактні двигуни, а потім був освоєний випуск чотиритактних двигунів. У цьому ж році в Росії почате виробництво калоризаторних ДВЗ, що працюють на сирій нафті, потужністю $3,8\ldots 25,8 \text{ к.с. (} 2,8\ldots 19 \text{ кВт)}$.

У це ж час В. Майбах (Німеччина) створив замість гнотового випарного пристрою розпилювальний карбюратор.

В 1893 р. на Всесвітній промисловій виставці в м. Чикаго (США) за конструкцію газових двигунів завод Є. Нобеля "Русский дизель" одержав вищу нагороду - золоту медаль. Подібні двигуни на замовлення Головного артилерійського управління армії Росії були встановлені на полегшені генераторні візки й використовувалися в якості привода польових електростанцій.

В історії світового двигунобудування 1893 р. відзначений тим, що в Німеччині вийшла у світ брошура Р. Дизеля за назвою "Теорія й

конструкція раціонального теплового двигуна для заміни парових машин і відомих у цей час теплових двигунів". У ній пропонувалося підвищувати температуру повітря шляхом стиску й уводити в нього дрібно розпилене паливо, у тому числі й дрібно розмелене вугілля.

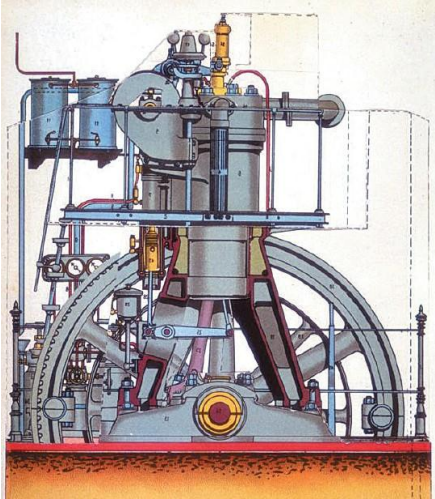


Рисунок 1.3 – Схема-рисунок двигуна Рудольфа Дизеля 1887 року

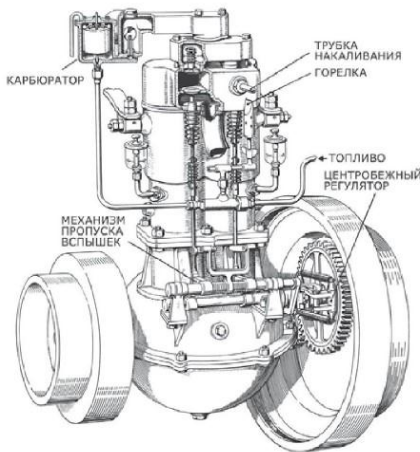


Рисунок 1.4 – Двигун "Фенікс" розроблений Вільгельмом Майбахом

Паливо, на думку Р. Дизеля, повинне було згоряти при постійній температурі. Однак реалізація цього циклу не вдалася. Інженери здійснили цикл, схожий на цикл сучасних дизельних двигунів.

Перший двигун Р. Дизеля, побудований на заводах МАН в 1897 р., мав потужність 61,5 кВт і питому витрату палива 327 г/(квт-год). Ці цифри були по тім часам не досяжні для теплових двигунів інших типів. В 1899 р. завод Є. Нобеля випустив перший промисловий чотиритактний двигун із запаленням від стиску, який на відміну від двигуна Р. Дизеля працював не на гасі, а на сирій нафті.

Його питома витрата палива становила 0,3 кг/(квт-год), тобто майже на 30 % менше, ніж у гасових двигунів. Двигун відрізнявся оригінальністю конструкції.

Тільки з переходом на сиру нафту й важке нафтове паливо двигун із запаленням від стиску (дизель) одержав визнання як найбільш економічний, що обумовило широке його поширення у всіх країнах світу. Принцип використання обертового поршня був відомий ще в XVI столітті, однак конструктивне втілення цього принципу було здійснено тільки

в 1957 р. Ф. Ванкелем, який створив працездатний зразок роторно-поршневого двигуна.

У Росії із самого початку виробництва дизелів розвернулися роботи зі створення вітчизняних двигунів оригінальних конструкцій. До них належить перший реверсивний судновий чотиритактний дизель потужністю близько 89 кВт, побудований в 1908 р. У цьому ж році Коломенський завод випустив горизонтальний двотактний реверсивний дизель із поршнями, що протилежно рухаються, набагато випередивши фірми Юнкерса й Фербенкс-Морзе, які значно пізніше стали робити двигуни такого типу. В 1911 р. був створений найбільш легкий для того часу V-образний дизель потужністю 147 кВт із питомою масою 13,6 кг/кВт.



Рисунок 1.5 – Вантажівка Готліба Даймлера (крайній праворуч) із встановленим попереду двигуном "Фенікс" розробки Вільгельма Майбаха (другий праворуч), 1898 рік

Розвиток вітчизняного двигунобудування супроводжувався розробкою питань теорії робочого процесу й конструкції двигунів. Уже в 1906 р. В.І. Гриневецький запропонував метод теплового розрахунку робочого циклу, покладений в основу сучасної теорії процесів двигунів внутрішнього згоряння, розвитку надалі Н.Р. Брілінгом, Е.К. Мазингом, Б.С. Стечкиним та ін.

Теоретичні основи робочих процесів комбінованих двигунів і перші їхні конструктивні схеми були розроблені В.І. Гриневецьким (1906 р.) і А.Н. Шелестом (1912 р.).

У СРСР було організоване виробництво двигунів для різних областей народного господарства: автомобілебудування, тракторобудування, авіації, морського й річкового флоту, залізничного транспорту, будівельного й дорожнього машинобудування та ін. З 1928 по 1941 р. був освоєний випуск 14 нових типів дизелів багатьох модифікацій. Серед них - суднові дизелі потужністю 1470 і 3100 кВт.

Були утворені спеціальні науково-дослідницькі інститути й конструкторські організації на заводах, у яких широким фронтом розвернулися конструкторські й дослідницькі роботи зі створення двигунів внутрішнього згоряння нових зразків, у тому числі й комбінованих. Велику популярність одержали комбіновані двигуни внутрішнього згоряння конструкції В.Я. Клімова, В.А. Константинова, А.А. Микуліна, А.Д. Чаромського, А.Д. Швецова, В.М. Яковлєва та ін.

Після 1945 р. створювалися й постійно удосконалювалися поршневі й комбіновані двигуни внутрішнього згоряння різних типів. Можна відзначити розроблені сімейства тракторних і автомобільних дизелів з повітряним і водяним охолодженням, у тому числі комбіновані двигуни із циліндровою потужністю 73,5 і 147 кВт, тепловозні дизелі з газотурбінним наддуванням потужністю 890...4450 кВт, двигуни для швидкохідних судів потужністю 890...2225 кВт і багато інших. Однією з характерних рис розвитку двигунобудування є широке застосування газотурбінного наддування, що дозволяє значно поліпшити техніко-економічні показники двигунів. Цьому сприяли роботи Центрального науково-дослідного дизельного інституту по створенню типорозмірного ряду турбокомпресорів і налагодженню їх спеціалізованого виробництва на ряді заводів.

Значний розвиток одержала теорія робочих процесів. У ній з'явилися нові напрямки, присвячені моделюванню процесів у циліндрах і системах ДВЗ, узгодженню характеристик складених елементів комбінованих двигунів між собою, розрахункам газодинамічних процесів потоків у газоповітряному тракті двигуна, прогнозуванню теплової навантаженості основних деталей та ін.

Досягнення в області ЕОМ дали можливість успішно використовувати математичне моделювання й системи автоматизованого проектування при створенні й доведенні комбінованих двигунів.

Характеристика двигунів внутрішнього згоряння як джерел енергії. Широке поширення двигунів внутрішнього згоряння в промисловості, на транспорті, у сільському господарстві й стаціонарній енергетиці було обумовлено наступним.



Рисунок 1.6 – Порівняння габаритних розмірів людини і авіаційних двигунів важкого радянського бомбардувальника ПЕ-8 часів війни

Здійснення робочого циклу в одному циліндрі (в одній порожнині) з малими втратами теплоти й значним перепадом температур і тисків між джерелом теплоти й холодним джерелом, забезпечує високу економічність, що є одним із самих вагомих показників двигунів внутрішнього згоряння.

Серед двигунів внутрішнього згоряння, дизель у цей час перетворює хімічну енергію палива в механічну роботу з найбільш високим ККД у широкому діапазоні зміни потужності.

До переваг двигунів внутрішнього згоряння слід віднести також те, що вони можуть бути з'єднані практично з будь-яким споживачем енергії. Це пояснюється їхньою можливістю одержання відповідних характеристик зміни потужності й крутного моменту.

Порівняно невисока вартість виготовлення, компактність і мала маса двигунів дозволили широко застосовувати їх у силових установках різних типів і призначень. Такі установки мають велику автономність. Літаки із двигунами внутрішнього згоряння могли літати десяти-

тки годин без поповнення запасу палива на борту (перельоти літаків АНТ-25 з Москви через Північний полюс у США). Теплоходи із двигунами внутрішнього згоряння покривали відстані в десятки тисяч миль без заходу в порт.

Важливою позитивною якістю двигунів є можливість їх швидкого пуску у звичайних умовах. Двигуни, що працюють при низьких температурах, постачають спеціальними пристроями для полегшення й прискорення пуску. Після пуску двигуни порівняно швидко можуть приймати повне навантаження.

В експлуатаційних умовах двигунам часто доводиться працювати на перехідних режимах. Поршневі й комбіновані двигуни досить добре пристосовані для роботи на таких режимах. Двигуни внутрішнього згоряння мають значний гальмовий момент, що дуже важливо при використанні їх на транспортних установках.

Позитивною якістю дизелів є здатність працювати на багатьох видах палива. Так, відомі конструкції автомобільних багатопаливних дизелів, а також судових двигунів великої потужності, які можуть працювати на різних паливах (від дизельного пального до мазуту).

Поряд з позитивними якостями двигуни внутрішнього згоряння мають і ряд недоліків: обмежену в порівнянні, наприклад, з паровими й газовими турбінами агрегатну потужність (потужність судових двигунів в одному агрегаті досягала тільки 80 Мвт); високий рівень шуму; відносно велика частота обертання колінчатого вала при пуску й неможливість безпосереднього з'єднання його з ведучими колесами споживача; токсичність випускних газів; зворотньо-поступальний рух поршня, що обмежує частоту обертання, що і є причиною появи нерівноважених сил інерції й моментів від них.

Області застосування поршневих і комбінованих двигунів.

Поршневі й комбіновані двигуни внутрішнього згоряння випускають потужністю від десятих часток кіловата до декількох десятків мегаватів. Їх застосовують у всіляких галузях народного господарства завдяки високій економічності й можливості одержання різних характеристик, що дуже важливо для споживача.

Двигун внутрішнього згоряння є основним джерелом енергії на автомобілях різного типу й призначення. Незважаючи на успіхи розвитку двигунів інших типів, вони по своїх основних характеристиках уступають двигунам внутрішнього згоряння і їх застосування поки

носить експериментальний характер.

На залізничному транспорті поршневі парові машини майже всюди замінені електричним приводом і приводом від двигунів внутрішнього згоряння. У нашій країні близько 1/2 вантажообігу здійснюється тепловозами із двигунами внутрішнього згоряння. Відомі спроби використання газових турбін для привода локомотивів, однак вони не одержали помітного поширення. Одиначна потужність тепловозних двигунів становить близько 4400 кВт.

У річковому флоті двигуни внутрішнього згоряння в цей час установлюють на всіх судах, що знову вводяться в експлуатацію.

У морському флоті двигуни внутрішнього згоряння також є основним джерелом енергії для невеликих суден і більшої частини суден з енергетичною установкою потужністю до 30 Мвт. За рубежом на судах застосовують двигуни внутрішнього згоряння потужністю 80 Мвт, можливе використання дизелів потужністю до 90 Мвт.

Широкому поширенню дизелів на судах сприяє істотне поліпшення їх економічності, досягнуте за останні роки, а також те, що в цей час дизелі великої й середньої потужності можуть працювати на важкому паливі, вартість якого значно нижче, чим звичайного дизельного. У зв'язку із цим використання важкого палива для судових двигунів не тільки основних, але й допоміжних, буде розширюватися.

Поява двигуна внутрішнього згоряння обумовила швидкий розвиток авіації. За рубежом були створені комбіновані двигуни внутрішнього згоряння потужністю до 3750 кВт. Надалі з'явилися авіаційні газотурбінні двигуни, які дозволили різко побільшати швидкість літака. У цей час поршневі й комбіновані двигуни внутрішнього згоряння застосовуються лише на невеликих літаках з малою тягою (навчальних, спортивних, індивідуальних, прогулянкових і транспортних, безпілотних).

Поршневі й комбіновані двигуни внутрішнього згоряння широко використовують у сільському господарстві: на тракторах, самохідних комбайнах і різних сільськогосподарських машинах. У нашій країні для цих цілей використовують дизелі (за винятком невеликих машин). Потужність тракторних двигунів безупинно росте. Без двигунів внутрішнього згоряння неможливий розвиток будівельно-дорожнього машинобудування; їх установлюють на бульдозерах, скреперах, грейдерах, екскаваторах, самохідних кранах, бетоновозах; вони є приводами бетононасосів, зварювальних агрегатів і компресорних установок.



Рисунок 1.7 – Сучасний судновий дизельний двигун



Рисунок 1.8 – Літак Ан-148 із двигуном Д-436-148 виробництва "Мотор Січ"

У стаціонарній енергетиці двигуни внутрішнього згоряння широко використовують на невеликих електростанціях (потужністю від декількох кіловатів до декількох сотень і тисяч кіловат), енергопоїздах і аварійних енергоустановках. Дизельні електростанції можуть будуватися великої потужності не тільки для покриття пікових наванта-

жень, але й для роботи в якості базисних. Ці двигуни одержали велике поширення також у якості привода компресорів і насосів для подачі газу, нафти, рідкого палива по трубопроводах, при виробництві розвідницьких робіт, для привода бурильних установок при буравленні шпар на газових і нафтових промислах.

Найширше поширення мають двигуни як джерело енергії для засобів малої механізації (бензопили, мотопомпи та ін.).

Принципи конструювання й розрахунків сучасних двигунів.

Проектування двигуна - це вирішення комплексу проблем, пов'язаних з компонованням двигуна й аналізом процесів, що відбуваються в циліндрі й різних системах двигуна. Спочатку слід визначитися з концепцією створюваного двигуна. При цьому повинна враховуватися тенденція розвитку двигунобудування стосовно до розглянутого класу машин, а також можливість подальшого вдосконалювання конструкції відповідно до вимог науково-технічного прогресу.

У знову створюваному двигуні повинні бути передбачені можливості застосування досягнень в області нових технологій, впровадження нетрадиційних матеріалів з підвищеними споживчими властивостями, що дозволить використовувати різні види палив без зниження надійності й термінів служби.

Створення нового двигуна включає: обґрунтування необхідності його розробки й виробництва в потрібній кількості, науково-технічні дослідження, розробку конструкторського проекту, виготовлення дослідних зразків і їх випробування, доведення з усуненням виявлених у ході випробувань недоліків, організацію серійного виробництва. При цьому в сучасних умовах усе більша увага приділяється технологіям, покликаним інтегрувати процеси конструювання, аналізу й виробництва в єдину багатofункціональну систему з метою підвищення ефективності використання сучасних науково-технічних можливостей на всіх етапах створення нового двигуна й підвищення його якості.

Після визначення доцільності створення двигуна проводяться наукові дослідження в області робочого процесу, включаючи екологію, компоновальних схем, застосовуваних матеріалів та ін., покликані забезпечити прогресивні техніко-економічні показники майбутнього двигуна.

Технічне завдання містить усі вихідні дані, необхідні для розробки проекту, але в ньому відсутній опис конкретних елементів майбу-

тньої конструкції. Технічне завдання встановлює призначення, технічні характеристики, показники якості й техніко-економічні відомості про новий двигун, стадію його розробки, склад конструкторської документації, оцінку технічного рівня двигуна в порівнянні з досягнутим рівнем вітчизняного й закордонного двигунобудування, строки виконання проекту, серійність випуску. Технічне завдання складається розроблювачем (головним) на базі обґрунтованих техніко-економічних вимог замовника.

На підставі затвердженого технічного завдання складається технічна пропозиція, що відбиває прийнятий в проекті технічний напрямок. Вона містить обґрунтування й оцінку, у тому числі техніко-економічну, можливих варіантів вирішення завдання з обліком конструкційних і експлуатаційних особливостей розроблювального й існуючих двигунів, перевірку варіантів на патентну чистоту й конкурентоспроможність. Дається інформація з обсягу й строкам етапів виконання проекту.

Технічна пропозиція після узгодження й твердження є підставою для проектування. Складаються технічні умови на проектування. Конструкторський проект у ході розробки проходить поетапне виконання, включаючи звичайно ескізний, технічний і робочий проекти.

Залежно від особливостей розроблювального двигуна й умов підприємства-виготовлювача, порядок виконання конструкторського проекту може бути іншим. Наприклад, при розробці двигуна на базі існуючого при широкому використанні серійного виробництва ескізний проект може не розроблятися. У результаті виконання конструкторського проекту двигуна створюється необхідна конструкторська документація.

Залежно від типу й розмірів двигуна може бути виготовлена дослідна партія двигунів для доводочних випробувань, а також наступних випробувань у реальних умовах експлуатації. Розробляються технічні умови на поставку двигуна з обліком доводочних і експлуатаційних випробувань. У випадку значних змін, внесених при виконанні робочих креслень, іноді знову виконуються креслення поперечного й поздовжнього розрізів, і уточнюються виконані раніше розрахунки.

У зв'язку з ускладненням сучасних двигунів і безперервним розширенням застосування ЕОМ, технологія процесу проектування постійно видозмінюється й удосконалюється: створюються наскрізні системи проектування з розробкою сценаріїв процесу проектування дви-

гуна й поведінки конструктора.

Концепція PLM (Product Lifecycle Management) передбачає створення єдиного інформаційного простору для підтримки життєвого циклу конкретного двигуна. На групу маркетингу покладається визначення вигляду двигуна й підготовка технічної пропозиції. До тріади CAD/CAE/CAM додається логістика із включенням стадії експлуатації.

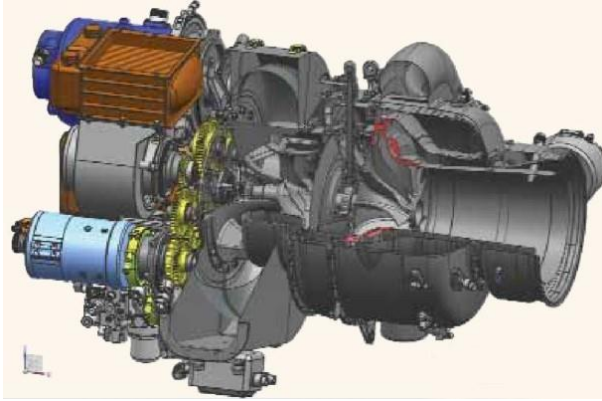


Рисунок 1.9 - 3D-модель авіаційного двигуна TA 18.100.000.01

Скорочення строків проектування нових двигунів, підвищення вимог до техніко-економічних показників, включаючи показники надійності, маси й габаритів, привело до підвищення ролі інженерного аналізу на всіх етапах розробки як окремих деталей і вузлів, так і двигуна в цілому.

Застосування сучасних методів розрахункового аналізу базових деталей двигуна в умовах постійного форсування по середньому ефективному тискові й літровій потужності, дозволяє на стадії проектування проводити оптимізацію конструкції, домагаючись прийнятних рівнів теплової й механічної напруженості, вібрації й шуму без надмірного збільшення питомої маси при необхідній міцності й надійності.

Проведення розрахункового аналізу припускає наявність відповідних математичних моделей. При цьому математична модель повинна задовольняти ряду вимог: повноти, точності, адекватності, економічності, стійкості стосовно погрішності вихідних даних, продуктивності, що передбачає наявність і вірогідність цих даних, наочності.

Складний технічний об'єкт, яким є двигун, або навіть його

окремі елементи як, наприклад, циліндро-поршнева група, важко описати однією математичною моделлю.

На практиці застосовують принцип декомпозиції, коли технічний об'єкт (двигун) умовно розділяють на елементи, які потім роздільно досліджуються з обліком їх взаємного впливу. Таким чином, виходить багаторівнева ієрархічна структура з певними завданнями на кожному щаблі ієрархії.

Стосовно інженерного аналізу, включаючи термо-міцнісний аналіз конструкції двигуна, першорядну роль відіграють фізичні моделі. Ефективність їх пов'язана із застосуванням при їхній побудові фундаментальних фізичних законів. Оцінка міцності деталей двигуна пов'язана зі знанням їх полів переміщень, деформацій і напруг, а у випадку теплонавантажених деталей - також полів температур на різних режимах роботи двигуна.

Граничні стани, несуча здатність і запаси міцності суттєво залежать від умов, у яких працює та або інша деталь. В умовах, типових для роботи деталей двигуна, руйнуванням після досить тривалої роботи, передують пластичні деформації матеріалу.

Величини цих деформацій і процес їх розвитку, включаючи нагромадження залишкових напруг, виявляють найбільш істотний вплив на міцність деталей. Таким чином, досить повний розв'язок завдання вимагає проведення комплексу взаємозалежних розрахунків, починаючи з вирішення, у загальному випадку, нелінійного нестационарного завдання теплопровідності й закінчуючи визначенням критеріїв міцності деталей в умовах неізотермічного навантаження.

На практиці першим етапом визначення напружено-деформованого стану деталей двигуна є проведення розрахунків у пружній області роботи матеріалу. Результати розрахунків використовуються при порівняльному аналізі різних варіантів конструкції тієї або іншої деталі двигуна. При цьому суттєво знання теплового стану деталі, тому що, з одного боку, від нього залежить рівень і розподіл температурних напруг, а з іншого - теплофізичні й характеристики міцності матеріалу.

При цьому слід зазначити, що методи, які традиційно викладаються в курсі опору матеріалів, виявляються хоча й необхідними, але часто недостатніми для розрахунків деформованого стану елементів конструкції форсованих двигунів. У багатьох важливих для практики випадках, потрібне застосування уточнених методів розрахунків і, на-

самперед, методів теорії пружності, що дозволяють визначати напруги й деформації для тіл довільної геометричної форми при досить загальних умовах навантаження.

В умовах постійного підвищення потужності й жорстких обмежень по масогабаритним показникам двигунів при роботі ряду деталей можлива поява зон пластичної деформації. Визначення напружено-деформованого стану в цьому випадку пов'язане із застосуванням методів теорії пластичності, а при підвищених температурах для теплонавантажених деталей двигуна - методів теорії повзучості.

Високі теплові навантаження характерні для поршнів, кришок (головок) циліндрів, втулок (гільз) циліндрів, клапанів, елементів турбокомпресорів. На відміну від пружної поведінки матеріалу в цих випадках після зняття навантаження в елементах конструкції мають місце залишкові деформації й напруги, визначення яких вимагає при розрахунках уведення інших зв'язків між деформаціями й напругами, відмінних від закону Гука.

Важливе місце в процесі створення двигуна займають випробування, коли один або кілька дослідних зразків двигунів ставиться на заводські тривалі доводочні випробування, а інша частина дослідної партії – на випробування в умовах експлуатації.

Після проведення заводських випробувань за узгодженням зі споживачем проводяться приймальні, міжвідомчі або державні випробування, як правило, у стендових умовах експериментального цеху. Вони встановлюють відповідність двигуна технічному завданню, вимогам стандартів і технічної документації, а також дають остаточну оцінку технічного рівня двигуна. За підсумками цих випробувань затверджується технічна документація для серійного виробництва. Потім організується серійний випуск двигуна.

Однак і після цього триває вивчення досвіду експлуатації, доробка технічної документації й подальше вдосконалювання двигуна з метою підтримки його технічного рівня відповідно до рівня вітчизняного й світового двигунобудування. Цей процес триває доти, поки двигун перебуває у виробництві.

Крім різних видів випробувань двигуна в цілому важливе значення мають експериментальні дослідження міцності окремих деталей і вузлів у процесі створення нових і модернізації існуючих двигунів. Численні фактори, що впливають на надійність (довговічність) базових деталей і вузлів двигуна, не вдається врахувати повною мірою при

математичному моделюванні навіть із застосуванням ускладнених тривимірних математичних моделей при використанні чисельних методів аналізу. До факторів, що впливають на витривалість, відносяться форма, розміри, використовувані технології, циклічність реального навантаження, обумовлена робочим процесом у циліндрі й роботою кривошипно-шатунного механізму двигуна.

Тому при створенні нових моделей сучасних форсованих двигунів раціональна комбінація математичного моделювання й експериментальних методів, включаючи тензометрирування й термометрирування натурних деталей і вузлів, а також їх випробування на утому.

Важливість експериментальних досліджень при створенні нових моделей двигунів пов'язана також з усе більш широким застосуванням нетрадиційних матеріалів, включаючи композитні і керамічні, а також новітніх технологій виробництва деталей циліндропоршневої групи, механізму газорозподілу (включаючи клапани), підшипники та ін.

Питання для самоперевірки

1. На які дві основні групи можуть бути розділені теплові двигуни?
2. Які двигуни відносяться до двигунів зовнішнього згоряння?
3. Назвіть типи двигунів внутрішнього згоряння.
4. Які двигуни називаються комбінованими?
5. Які двигуни є найбільш економічними?
6. Кому належить ідея спалювання палива усередині робочої порожнини двигуна?
7. Де, коли і ким був побудований перший двигун внутрішнього згоряння, який мав практичне застосування?
8. Ким був створений чотиритактний газовий двигун?
9. Який з ДВЗ має найбільше значення коефіцієнту корисної дії?
10. Назвіть позитивні якості дизелів.
11. Назвіть області застосування поршневих і комбінованих двигунів.
12. Що сприяє широкому поширенню дизелів на судах?
13. Коротко розкажіть про процес конструювання двигуна.
14. Яким вимогам повинні задовольняти математичні моделі проєктованих двигунів?
15. Що таке принцип декомпозиції?
16. Для чого в розрахунках двигуна застосовується теорія пластичності?
17. Як проводяться випробування створеного двигуна?

ЛЕКЦІЯ № 2. КЛАСИФІКАЦІЯ ДВИГУНІВ І КОМПОНУВАЛЬНІ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ ДВИГУНІВ НА ТРАСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

План лекції. Аббревіатури та скорочення систем двигунів світових виробників. Умовне позначення двигунів. Класифікація двигунів. Аналіз компоновальних схем розміщення двигунів на транспортних засобах.

Література: [1], с. 13; [2], с. 13-14; [30], с. 12-19; [31], с. 14-135; [32], с. 21-29; [33], с. 10-21.

Дизельні двигуни.

Незважаючи на те що принцип роботи у всіх двигунів із запаленням від стиску однаковий, а постачальників паливної апаратури можна перерахувати по пальцях, деякі виробники придумують власні назви системам живлення й сімействам двигунів:

- **TDI (Turbo Diesel Injection)** - вважається що цю аббревіатуру може носити будь-який турбодизель. Однак так називаються лише дизельні двигуни концерну "Фольксваген", який юридично закріпив за собою виключне право на використання цього словосполучення;
- **HDi (High-pressure Direct injection)** розшифровується як "безпосереднє упорскування під високим тиском". За цим позначенням ховаються агрегати концерну "Пежо-Сітроен" з паливною системою "коммон рейл";
- **JTD (Jet Turbo Diesel)** - оригінальне позначення двигунів найбільшого італійського концерну, які встановлюють на "Фіати", "Альфи-Ромео", "Лянчі". Англійське jet – форсунка. Багато виробників зашифровують в аббревіатурах те саме: **common rail diesel injection** - дизель із упорскуванням "коммон рейл". Різні лише кількість і послідовність букв. Наприклад, "Мерседес-Бенц" називає свої агрегати **CDI**, шильдік **CRDI** використовує корейські родичи KIA й "Хендай", а **dCi** відрізняє дизельні мотори концерну "Нісан-Рено";
- **CDTI (Common rail Diesel Turbo Injection)** - "Опель" підкреслює, що всі його дизелі оснащені турбонаддувом. Хоча

атмосферні агрегати в автомобільному світі вже давно стали історією.

Бензинові двигуни.

Безліч загадкових назв з'явилося з масовим поширенням двигунів з безпосереднім упорскуванням бензину в камеру згоряння. Ще більше підхльоснула фантазію маркетологів установка на ці агрегати наддування:

- "Мерседес-Бенц" представив перший серійний двигун з безпосереднім упорскуванням (на моделі 300 SL) аж в 1954 році. Нинішні двигуни із системою живлення **CGI (stratified-charged Gasoline Injection)** і компресором типу "Рутс" установлюють не тільки на спортивні купе, але й на представницькі седани;
- **GDI (Gasoline Direct Injection)** - ім'я піонера нової ери двигунів з безпосереднім упорскуванням. Перший такий серійний мотор з'явився в 1996 році на моделі "Міцубісі-Галант". Зараз технологію GDI позичають навіть деякі європейські марки, наприклад "Вольво";
- систему безпосереднього упорскування **D-4** "Тойота" представила на наступний рік після появи мотора GDI. У серію на внутрішній ринок двигуни **D-4** пішли в 1997-му;
- позначення **HPi (High-Pressure injection)** з'явилося на моторах концерну "Пежо-Сітроен" близько 10 років тому. Буквенний індекс **THP (Turbo High Pressure)** закріплений за двигунами з подачею палива в камеру згоряння й турбонаддувом, розробленими разом з фірмою БМВ;
- **FSI (Fuel Stratified Injection)** - пошарове упорскування палива. Один з варіантів подачі пального безпосередньо в камеру згоряння. Такою аббревіатурою користуються мотористи концерну "Фольксваген";
- **TFSI (Turbo Fuel Stratified Injection)** - спочатку ці букви носили всі двигуни концерну "Фольксваген", оснащені безпосереднім упорскуванням палива й турбонаддувом. Тепер право чотирьох букв залишили тільки за агрегатами з емблемою із чотирьох кілець (AUDI), а інші наддувні мотори з безпосереднім упорскуванням, призначені для автомобілів марок "Фольксваген", "Шкода", "SEAT", стали називати **TSI**.

Причому систем, що стискають повітря, може бути декілька: компресор з механічним приводом, турбонагнітач і навіть їх комбінація;

- **JTS (Jet Thrust Stoichiometric)** - за аналогією з дизелями назва бензинових двигунів ФІАТ з безпосереднім упорскуванням починається зі слова jet.

Системи регулювання фаз і висоти підйому клапанів.

Гідравлічні або електричні приводи змінюють положення розпредвалів, керуючих впускними й випускними клапанами, і в такий спосіб залежно від обертів зміщають фази газорозподілу, тобто, простіше говорячи, момент відкриття клапанів.

Це збільшує крутний момент на низьких обертах і потужність на високих, при цьому знижуються витрата палива й токсичність відпрацьованих газів. Часто із системою регулювання фаз газорозподілу, є ще одна, яка регулює висоту підйому клапанів і тим самим дозує надходження повітря (або суміші) у циліндри. Іноді їй надають власну назву, але часто аббревіатура або назва в цих пристроїв єдина:

- **VVT (Variable Valve Timing)** - просте й найбільш точне позначення зустрічається в багатьох моделях концерну "Джи-Ем" (серед них "Шевроле" і "Кадилак"). Приводами, що зміщують фази газорозподілу, оснащені впускні й випускні розпредвали;
- **VVT-i (Variable Valve Timing with intelligence)** - щоб розставити крапки над і, "Тойота" додала в позначення одну маленьку букву. Крім розповсюдженої схеми, де розпредвали обертає гідравліка, на деяких люксових модифікаціях "Лексуса" застосовують удосконалену **VVT-iE** з електроприводом для впускних клапанів;
- **VANOS** - уперше ця оригінальна назва з'явилася у БМВ в 1992 році. Вона народилася від словосполучення **variable Nockenwellensteuerung** (дослівно - змінне керування розподільними валами). Якщо зміщають фази й на впуску, і на випуску, виходить **Double VANOS**. Інша система, що одержала назву **Valvetronic**, за допомогою крокового двигуна, додаткового ексцентрикового вала, важелів і коромисел задає потрібний ступінь підйому впускним клапанам;
- **MIVEC (Mitsubishi Innovative Valve timing Electronic**

Control) - фірмова система "Міцубісі", що з'явилася ще на початку 1990-х. Від простого пристрою, що повертає розпре-
двал впускних клапанів, вона еволюціонувала до складної
системи, що змінює не тільки фази, але й висоту підйому ко-
жного клапана;

- під аббревіатурою **VTEC (Variable valve Timing and lift Electronic Control)** ховається відома система "Хонди", що задає потрібний хід і момент відкриття впускних і випускних клапанів. Більш досконала конструкція - **i-VTEC** (приставка і означає **intelligent** - "інтелектуальний" у перекладі з англій-
ської) вміє вдобавок плавно зміщати фази на впускному роз-
предвалі;
- в "Субару" під стать характеру автомобілів, що випускають-
ся, систему регулювання фаз газорозподілу назвали "актив-
ним контролем над клапанами": **AVCS (Active Valve Control System)**. А схему із двома валами що повертаються, логічно
охрестили **Dual AVCS**;
- **Variocam (Variable Camshaft**, тобто регульований розпред-
вал) зрушує фази газорозподілу на моторах "Порше". При-
ставка **plus** говорить про розширення можливостей - додатко-
во змінюється висота підйому впускних клапанів. Природ-
ньо, вперше **Variocam plus** було встановлено на "Порше-911"
зі Штутгарта;
- **C-VTC (Continuous Valve Timing Control)** управляє фазами
на двигунах "Нісан". Дорогі моделі - "Інфініті-G37" або "Ні-
сан GT-R" - мають у списку ще й систему **VVEL (Variable Valve Event and Lift)**, що змінює хід клапанів;
- у парі з безіменною системою, що обертає розпредвали, на
моторах "Ауді" працює **AVS (Audi Valvelift System)**. Вона
східчасто змінює висоту підйому клапанів.

Умовне позначення двигунів включає наступні букви й цифри:

Ч - чотиритактний; Д - двотактний; Р - реверсивний; 3 - судно-
вий з реверсивною муфтою; П - з редукторною передачею; К - крейц-
копфний; Н - з наддуванням;

перша цифра - число циліндрів; число перед рисою - діаметр
циліндра в сантиметрах; число за рисою - хід поршня в сантиметрах;
остання цифра - модернізацію (перша, друга і т.п.) двигуна.

В умовній позначці тронкового дизеля відсутня буква К, а в позначенні нереверсивного дизеля - буква Р.

Приклади умовних позначок наступні:

- **дизель 8ЧН14/14** - восьмициліндровий, чотиритактний, нереверсивний, тронковий, з наддуванням, діаметр циліндра 140 мм, хід поршня 140 мм;
- **дизель ЗДСП19/30** - трициліндровий, двотактний, тронковий, судновий з реверсивною муфтою й редукторною передачею, діаметр циліндра 190 мм, хід поршня 300 мм;
- **дизель 8ДКРН55/120** - восьмициліндровий, двотактний, крейцкопфний, реверсивний, з наддуванням, діаметр циліндра 550 мм, хід поршня 1200 мм.

Класифікація двигунів. Двигуни внутрішнього згоряння можуть бути класифіковані по наступних основних ознаках:

- по роду застосовуваного палива - працюючі на рідкому паливі, газові й газорідні;
- по способу сумішоутворення - із зовнішнім і внутрішнім сумішоутворенням;
- по способу здійснення робочого циклу - чотиритактні й двотактні (можливе здійснення робочого циклу й у більше число тактів);
- по способу запалення горючої суміші - із запаленням від стиску (дизелі) і із примусовим запаленням (в основному від електричної іскри);
- по способу регулювання потужності - з кількісним, якісним і змішаним регулюванням, з регулюванням зміною робочого обсягу, ходу поршня, відключенням частини циліндрів та ін.;
- по способу організації постачання повітря - без наддування й з наддуванням.

Крім того, можлива також **класифікація двигунів по конструктивних ознаках:**

- по конструкції механізму, що перетворює рух поршня в обертовий рух вала двигуна - із кривошипно-шатунним механізмом, роторно-поршневі та ін.
- по конструкції кривошипно-шатунного механізму - тронкові (високо- і середньоборотні) і крейцкопфні (переважно малооборотні);

- по розташуванню й числу робочих циліндрів - рядні, V-образні, W-образні, X-образні, зіркоподібні, опозитні, з поршнями що зустрічно рухаються, й складних компоновань;
- по ступеню швидкохідності - тихохідні (із середньою швидкістю поршня 10 м/с) і швидкохідні (із середньою швидкістю поршня вище 10 м/с);
- по напрямку обертання колінчатого вала - правого й лівого обертання, реверсивні й неревверсивні.

По призначенню двигуни ділять на наступні типи:

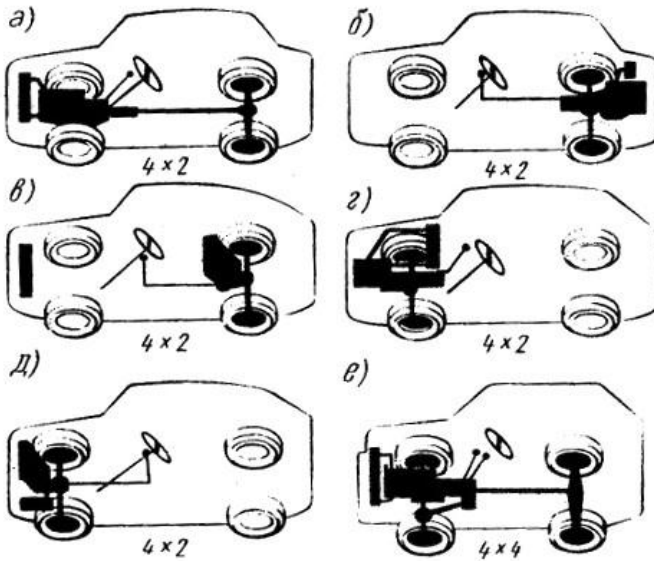
- стаціонарні промислового призначення - для установок на електростанціях, насосних станціях і т.п.;
- наземно-транспортні - тепловозні, автомобільні, тракторні, двигуни дорожніх і транспортно-навантажувальних машин та ін.;
- суднові - головні двигуни (реверсивні й неревверсивні), допоміжні (для привода допоміжних механізмів суднової силової установки);
- літальних апаратів (авіаційні та ін.);
- засобів малої механізації.

Двигуни можна класифікувати також по інших ознаках. Багато-річна продуктивна діяльність декількох поколінь винахідників, інженерів і вчених забезпечила найбагатший арсенал технічних рішень по конструкціях двигунів, їх системам, технології їх виробництва, що в підсумку забезпечило найширше їхнє застосування у всіх галузях народного господарства й перспективи подальшого розвитку.

На легкових автомобілях, розташування силового агрегату, число й розташування ведучих мостів, тип кузова, число дверей, розташування багажника визначають компоновальну схему легкового автомобіля. По розташуванню силового агрегату й приводного мосту встановилися три характерні компоновальні схеми.

I. Класична схема - двигун, зчеплення, коробка передач розташовані спереду, ведучий міст задній, його привод здійснюється через карданні вали й головну передачу з диференціалом.

II. Передньоприводна схема - двигун, зчеплення, коробка передач, головна передача, диференціал розташовані спереду, поперечно або подовжньо щодо осьової лінії автомобіля, ведучий міст передній.



а - двигун розташований подовжно попереду, ведучі колеса задні,
 б - двигун розташований подовжно позаду, ведучі колеса задні,
 в - двигун розташований поперечно позаду (перед заднім мостом),
 ведучі колеса задні; г - двигун розташований подовжно попереду,
 ведучі колеса передні; д - двигун розташований поперечно попереду,
 ведучі колеса передні; е - двигун розташований подовжно попереду,
 усі колеса ведучі

Рисунок 2.1 - Схеми розміщення силових агрегатів на легкових автомобілях

III. Схема із заднім розташуванням двигуна (заднемоторна) -

двигун, зчеплення, коробка передач, головна передача, диференціал розташовані позаду, подовжно або поперечно щодо осьової лінії автомобіля, ведучий міст задній. Заднемоторна схема мала широке поширення в минулому, і не перспективна із двох причин: недостатня стійкість автомобіля й малий обсяг багажник, який розміщається спереду, тому що великий обсяг займають ніші керованих коліс і елементи рульового керування. Найбільший обсяг багажник має при передньопривідній схемі, а найменший - при заднемоторній схемі. Розподіл навантаження на передню й задню осі заднемоторного автомобіля відповідно становить 40 і 60 %.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд автомобіля та схема трансмісії Subaru



Рисунок 2.3 – Розріз горизонтально-опозитного двигуна Subaru



Рисунок 2.4 – Розріз ЗАЗ-968М із двигуном V4 розташованим позаду

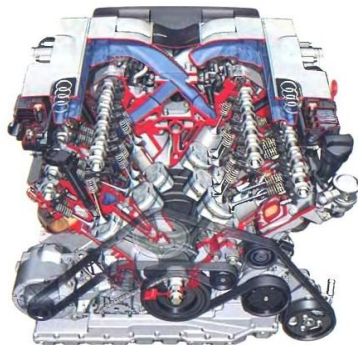
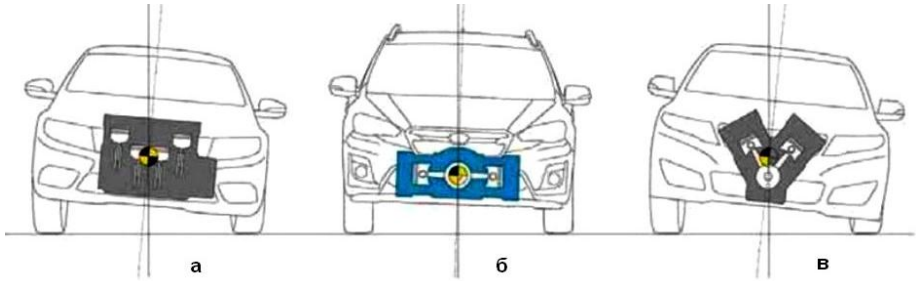


Рисунок 2.5 – Двигун W12 автомобіля Audi



а – рядний двигун із поперечним розташуванням,
б – горизонтально-опозитний, в – V-образний

Рисунок 2.6 – Вплив компоновки двигуна на керованість автомобіля (величини бокових ухилів) під час маневрування

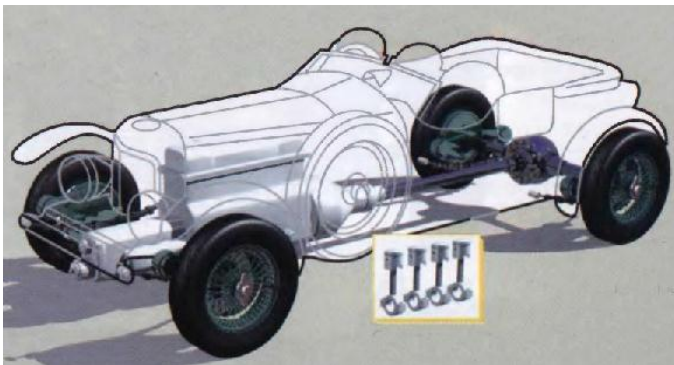


Рисунок 2.7 – Bentley 4 $\frac{1}{2}$ -Litre (1928 р.) - приклад розміщення двигуна позаду вісі передніх коліс

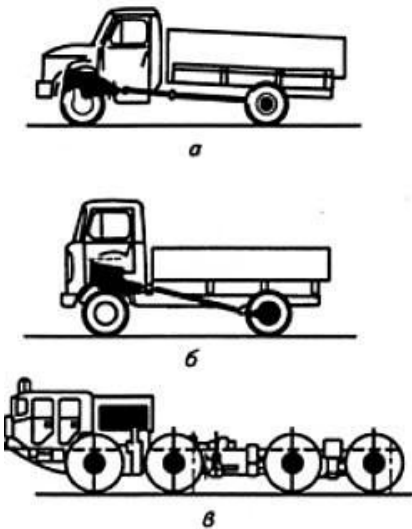
Такі автомобілі відрізняються зайвою поворотальністю, що погіршує керуваність автомобіля при русі по слизьких дорогах збільшує знос від бічного вітру.

Передньоприводна схема має широке застосування по двом основним причинам: забезпечення недостатньої поворотальності, що поліпшує стійкість автомобіля; поліпшення умов компоновання салону (відсутній тунель для карданної передачі й виступ для головної передачі). При навантаженні на передній міст у межах 51...52 % повної маси забезпечена гарна прохідність автомобіля.

При класичній схемі компоновання відбувається деяке збільшення довжини й маси автомобіля, погіршується компоновання салону.

Розташування силового агрегату на вантажних автомобілях.

Найпоширеніші чотири варіанти компоновальних схем вантажних автомобілів, вони характеризуються розташуванням двигуна й кабіни (рис. 2.8).



а - кабіна за двигуном, б - кабіна над двигуном, в - кабіна перед двигуном

Рисунок 2.8 - Компоновальні схеми вантажних автомобілів

I. Двигун над переднім мостом, кабіна за двигуном - капотне компоновання; переваги: гарна доступність до двигуна, зручність входу й виходу, найменш можливе навантаження на передній міст; недолік - обмежена передня оглядовість.

II. Двигун над переднім мостом, кабіна частково насунута на двигун - короткокапотне компоновання; переваги: можливість зменшення колісної бази й довжини автомобіля, помірне навантаження на передній міст; недоліки: підвищення висоти підлоги кабіни, утруднений доступ до задньої частини двигуна, менша ширина дверей, підвищений рівень шуму. Компоновання I і II застосовують для автомобілів, призначених для руху по дорогах будь-якої категорії з виходом на ґрунтові дороги.



Рисунок 2.9 – МАЗ 570 із двигуном розташованим за кабіною

Навантаження на дорогу від переднього мосту повинне відповідати 27...30 % повної маси й 50 % маси спорядженого автомобіля. Це поліпшує прохідність автомобіля.

III. Двигун над переднім мостом, кабіна над двигуном. Така схема компоновання називається кабіна над двигуном; переваги: можливість одержати мінімальну колісну базу й довжину автомобіля й збільшити навантаження на передні колеса для повнопривідних автомобілів, гарна оглядовість; недоліки: більша висота підлоги кабіни, утруднений вхід і вихід, неможливість розмістити в кабіні трьох людей, необхідність відкидання кабіни на шарнірах передньої опори для доступу до двигуна.

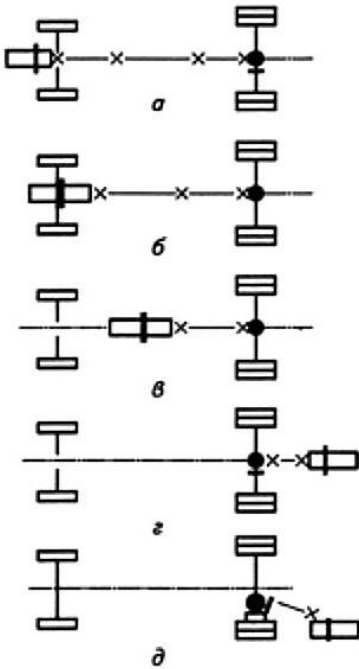
IV. Двигун позаду переднього мосту, кабіна максимально зсунута вперед - передня кабіна; переваги: гарна оглядовість, зручність входу н виходу, помірна висота підлоги, рівна підлога; недоліки: необхідність підйому кабіни або капота, об'єднаного із крильми для доступу до двигуна, вплив на водія великих вертикальних прискорень.

Навантаження на дорогу від переднього мосту відповідає 33...35 % повної маси автомобіля, що прийнятно для повнопривідного автомобіля, але для автомобілів з колісною схемою 4x2 або 6x4 це приводить до погіршення прохідності.

Тому таке компоновання застосовується для автомобілів, призначених для руху по гарних дорогах. Збільшення повної маси автомобіля, що доводиться на передній міст, дозволяє підвищити вантажопідйомність, не виходячи за межі дорожніх.

Компонувальні схеми автобусів. По розташуванню двигуна автобуси бувають трьох варіантів (рис. 2.10).

I. Двигун спереду. Для міського автобуса вагонного типу ця схема має непереборні недоліки й не перспективна; недоліки: переваження переднього мосту, незручне компонування місця водія й салону; шум і загазованість кабіни, високий рівень підлоги салону, неможливість розміщення дверей на передньому звісі.



а - двигун спереду переднього мосту, б - двигун над переднім мостом, в - двигун під підлогою в межах бази, г, д - двигун у задньому звісі (горизонтально, поперечно, вертикально)

Рисунок 2.10 - Компонувальні схеми автобусів

Для автобусів, використовуваних у сільській місцевості, виконаних на шасі вантажного автомобіля (яскравим прикладом є шкільні автобуси у США та Канаді), переднє розташування двигуна поза кузовом під капотом цілком виправдане, тому що при цьому не перевантажується передній міст.

Широко поширене переднє розташування двигуна на автобусах малого класу універсального призначення, що мають вагонне компонування. У цьому випадку перевагою є можливість уніфікації двигуна й трансмісії із цими агрегатами базового вантажного автомобіля. Можливе використання шасі вантажного автомобіля повністю (шкільні автобуси США).

II. Двигун під підлогою в межах колісної бази. Недоліки: необхідність застосування спеціального двигуна з горизонтальним розташуванням циліндрів, високий рівень підлоги (сума розмірів дорожнього просвіту, висоти двигуна, просвіту між двигуном і підлогою й товщини підлоги), зменшення обсягу багажного приміщення під підлогою (міжміські автобуси). Переваги: рівність підлоги, можливість застосування стандартного заднього мосту,

задовільний розподіл навантаження по мостах.

III. Двигун позаду, подовжньо або поперек, вертикально або горизонтально переваги: найкращий розподіл навантаження по мостах, найменший рівень підлоги в передній зоні салону, найменші заганяваність і рівень шуму в салоні; недоліки: нестандартний задній міст, необхідність підйому підлоги по задньому звису над двигуном, утруднення розміщення дверей на задньому звисі. Схема компоновання із заднім розташуванням двигуна має найбільше поширення й найбільш перспективна для великих і середніх міських і міжміських автобусів.

Питання для самоперевірки

1. Як класифікуються ДВЗ?
2. На які типи двигуни діляться за призначенням?
3. Що таке HDi (High-pressure Direct injection)?
4. Як позначається бензиновий двигун з безпосереднім упорскуванням палива?
5. Як позначаються системи регулювання фаз і висоти підйому клапанів автомобільних двигунів?
6. По яких основних признаках можна класифікувати двигуни внутрішнього згоряння?
7. Як класифікують двигуни по конструктивних ознаках?
8. Що розуміють під класичною схемою компоновки автомобіля?
9. Які переваги передньоприводної компоновочної схеми легкових автомобілів?
10. Яким чином і для чого необхідно зменшувати масу автомобіля?
11. Охарактеризуйте компоновочні схеми автобусів.
12. Які можливі схеми розміщення двигуна на вантажних автомобілях?
13. Які дві основні причини найбільшого поширення передньоприводної схеми на легкових автомобілях?
14. Яка схема розташування двигуна має найбільші перспективи для великих і середніх міських автобусів?
15. Який основний недолік розміщення двигуна під підлогою в межах колісної бази автобуса?

ЛЕКЦІЯ № 3. ДВИГУНИ ЗОВНІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

План лекції. Винахід і розвиток парових машин. Класифікація й типи парових двигунів. Переваги й недоліки парових машин. Двигун Стірлінга: історія появи, принцип роботи, термодинамічний цикл, переваги й недоліки, область застосування.

Література: [1], с. 175-191; [5], с. 23-28; [6], с. 255-258; [26]; [27]; [28]; [29].

Патент на теплову регенеративну машину Роберт Стірлінг одержав ще в 1816 г. (патент США № 4081). В 1818 г. був створений двигун, що працює на гарячому повітрі. У якості палива використовувалося вугілля; двигун розвивав потужність близько 2 к.с.



Рисунок 3.1 - Преподобний Роберт Стірлінг

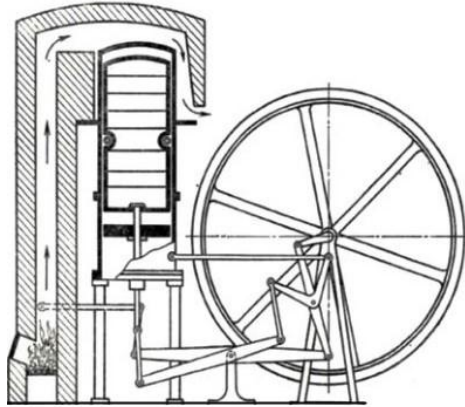
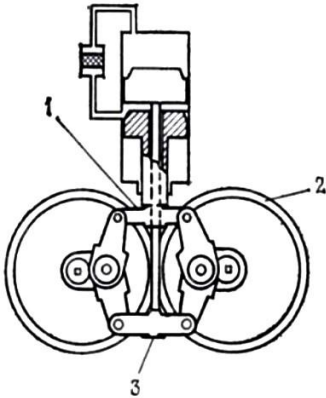


Рисунок 3.2 - Схема двигуна Стірлінга по патенту 1816 р.

Підвищена економічність у порівнянні з паровими машинами того часу, очевидно, з'явилася основною причиною того, що в період з 1818 по 1905 р. було побудовано кілька тисяч подібних двигунів потужністю від 0,1 до 45 л. с. Розвиток на початку XX в. двигунів внутрішнього згоряння, що мають більші питомі потужності, надовго призупинив розробку двигунів зовнішнього згоряння.

До ідеї двигуна Стірлінга повернулися в 1938 р., коли голланд-

ська фірма Філіпс почала посилено працювати над цією конструкцією, маючи кінцевою метою створення малопотужного безшумного джерела електричної енергії для живлення радіоприймачів.



- 1 - траверса робочого поршня,
2 - синхронізує зубчасте
колесо, 3 - траверса
витиснюючого поршня

Рисунок 3.3 - "Ромбічний
привод" двигуна Стірлінга

Електрифікація сільської місцевості усунула необхідність у подібного роду автономних джерелх струму для радіоприймачів, однак фірма продовжувала вести інтенсивні роботи, виявивши у двигуні Стірлінгу ряд якостей, що вигідно відрізняють його від інших широко розповсюджених двигунів.

До переваг двигуна зовнішнього згоряння слід віднести високу економічність, малий рівень шуму, багатопаливність, малу токсичність випускних газів, можливість роботи практично від будь-яких джерел теплоти, нечутливість до короточасних перевантажень. Винахід ромбічного механізму передачі руху на вал (рис. 3.3), забезпечив динамічну врівноваженість двигуна зовнішнього згоряння навіть в одноциліндровому виконанні.

Розробка двигунів різного цільового призначення в широкому діапазоні потужностей показала, що переваги двигуна Стірлінга найбільш повно проявляється при використанні його в якості:

- приводного двигуна в корабельних, суднових, а також в армійських електростанціях (малий шум і вібрація);
- двигуна міського транспорту (мала токсичність випускного газу);
- двигуна підводних апаратів (можливість роботи без використання атмосферного повітря).

Досягнуті фірмою Філіпс успіхи викликали інтерес до цього двигуна й в інших країнах. Ліцензії на право виробництва двигунів Стірлінга були куплені: в 1958 р. - фірмою Джeneral Моторс (США), в 1968 р.- фірмою МАН (ФРН), в 1969 р.- трьома шведськими фірмами, що утворювали дочірнє підприємство фірму Юнайтед Стірлінг, в 1972 р.- фірмою Форд (США). Дослідження й розробку лабораторних зразків двигунів Стирлиига ведуть різні наукові установи в США, зок-

рема Університет Калгарі, Массачусетський технологічний інститут та ін. У цей час, за офіційним даними, випробувані двигуни циліндровою потужністю від 10 до 100 к.с. (агрегатною потужністю до 400 к.с). Ведеться розробка двигунів потужністю до 5000 к.с. Фірми Філіпс і Юнайтед Стірлінг планують почати серійне виробництво двигунів потужністю 160-240 к.с. для міського транспорту.

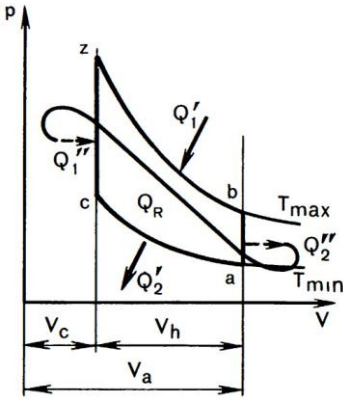


Рисунок 3.4 - Термодинамічний цикл Стірлінгу

В основі роботи двигуна Стірлінгу лежить термодинамічний цикл, показаний на рис. 3.4. Цей цикл складається з наступних процесів: стиску (ізотерма ас) з відводом теплоти Q'_2 ; підведення теплоти Q''_1 (ізохора cz); розширення (ізотерма zb) з підведенням теплоти Q'_2 відводу теплоти Q''_2 (ізохора ба). Ізотермічний стиск відбувається при мінімальній температурі $T_{\min}$ циклу, ізотермічне розширення - при максимальній температурі $T_{\max}$. Застосування внутрішньої регенерації теплоти Q_R у циклі дозволяє виключити зовнішнє ізохорне підведення й відвід теплоти, у цьому випадку $Q''_1 = Q''_2 = Q_R$.

Регенерація теплоти є специфічною особливістю термодинамічного циклу Стірлінгу. Термодинамічний цикл Стірлінгу реалізувати в машині з безперервним рухом поршнів неможливо. Використовуючи відомі приводні механізми, можна досягтися більшого або меншого наближення до термодинамічного циклу Стірлінгу.

Перш ніж розглянути робочий цикл Двигуна Стірлінгу, звернемося до принципової схеми, наведеної на рис. 3.5. Для того щоб у двигуні Стірлінгу відбувалося перетворення теплоти в механічну енергію, у його конструкції повинні бути наступні елементи: дві робочі порожнини зі змінним обсягом - гаряча V_E й холодна V_C ; три теплообмінники - нагрівач Н, регенератор R і охолоджувач Ох, сполучні канали, що зв'язують між собою теплообмінники й порожнини зі змінним об'ємом; механізм, що перетворює поступальний рух поршнів в обертальний. Окремі елементи, що складають газовий тракт робочого тіла у двигуні Стірлінгу, утворюють замкнену систему, тобто відсутній масообмін з навколишнім середовищем.

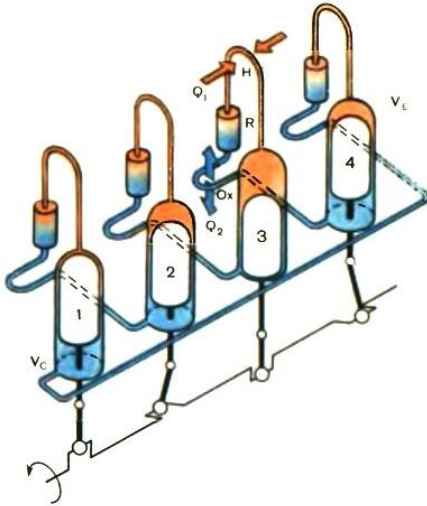


Рисунок 3.5 - Принципова схема двигуна Стірлінгу

Таким чином, усередині цього газового тракту сумарна маса того самого робочого тіла (газу) постійна й при роботі не перетерплює фазових перетворень (можуть бути використані робочі тіла, що змінюють фазові стани). У нагрівачі - компактному теплообмінному апарату до робочого тіла підводиться теплота Q_1 . Аналогічно при русі робочого тіла через охолоджувач від робочого тіла відводиться теплота Q_2 .

Яких-небудь пристроїв (клапанів, засувок, золотників і т.п.) немає, що безсумнівно спрощує конструкцію двигуна й підвищує його надійність.

Регенератор являє собою високопористу з наскрізних пор теплоакумулюючу масу (металічна сітка, путанка; спечена високопориста кераміка і т.п.), яка набуває теплоту від горячого робочого тіла що проходить крізь неї з нагрівача, і віддає її при зворотньому русі холодного робочого тіла. Таким чином, у регенераторі двигуна завдяки внутрішньому теплообміну здійснюється підігрів робочого тіла перед надходженням у нагрівач за рахунок акумульованої теплоти. У результаті зменшується кількість теплоти, підведеної ззовні, і підвищується ККД двигуна.

Кількість теплоти, що вводиться у внутрішній контур, а отже, чинена циклова робота, залежать від сумарної маси робочого тіла, що перебуває у внутрішніх порожнинах двигуна. Сумарна маса робочого тіла збільшується з ростом максимального тиску у внутрішніх порожнинах при подачі в них додаткового газу. У такий спосіб можна регулювати потужність двигуна.

Схема здійснення робочого циклу двигуна Стірлінга. При стиску робочого тіла в результаті зменшення суми обсягів гарячої й холодної порожнин, теплота що виділяється в холодній зоні (охолоджувач, частина регенератора, холодна порожнина) видаляється у зовнішнє середовище в охолоджувачі. Закономірність зміни обсягів га-

рячої й холодної порожнин підбирають таким чином, щоб при стиску більша частина робочого тіла перебувала в холодній зоні. Це обумовлює зменшення роботи стиску.

Наприкінці стиску починається витиснення робочого тіла з холодної зони в гарячу (частина регенератора, нагрівач, гаряча порожнина). При цьому робоче тіло, проходячи через регенератор, одержує теплоту, акумульовану в ньому в попередньому циклі.

Оскільки забезпечити в регенераторі повну регенерацію теплоти неможливо, при подальшому русі робоче тіло нагрівається до максимальної температури в нагрівачі. До цього моменту більша частина робочого тіла перебуває в гарячій зоні, і його внутрішня енергія в результаті підведення теплоти зростає. При наступному розширенні теплота за допомогою поршнів перетворюється в механічну роботу, яка передається на колінчатий вал, і віддається споживачеві.

Для підтримки температури робочого тіла при розширенні на досить високому рівні й близької до постійної від зовнішнього джерела до робочого тіла, в нагрівач підводиться теплота.

До кінця розширення починається витиснення робочого тіла з гарячої зони в холодну. При цьому робоче тіло, проходячи через регенератор, частину своєї теплоти передає теплоакумуючій насадці регенератора. У результаті неповної регенерації теплоти робоче тіло при подальшому русі охолоджується до мінімальної температури в охолоджувачі, який відводить теплоту в зовнішнє середовище.

З розглянутої схеми робочого циклу двигуна Стірлінгу видно, що підведення теплоти від зовнішнього джерела дозволяє ізолювати внутрішні порожнини (внутрішній контур) двигуна від зовнішнього середовища.

Завдяки цьому стає можливим застосування у двигунах Стірлінга, в якості робочого тіла, газів з найкращими теплофізичними властивостями (водень, гелій і т.п.). Крім того, стають непотрібними ряд систем, використовувані у двигунах внутрішнього згорання (системи газорозподілу, газообміну, запалювання, палив система високого тиску тощо).

У двигунах Стірлінгу робочий цикл здійснюється за два такти, тобто за один оберт колінчатого вала. У цьому сенсі двигун Стірлінгу аналогічний двотактному двигуну внутрішнього згорання. Однак у двотактному двигуні використання підпоршневих порожнин як робочих, пов'язане з певними труднощами, а у двигунах Стірлінгу таке

конструкційне рішення є звичайним.

На рис. 3.6 представлена принципова схема двигуна Стірлінгу подвійної дії. Характерною рисою схеми є те, що всі гарячі порожнини розташовані над поршнем, а холодні - у підпоршневих порожнинах. Це спрощує конструкцію ущільнень і підвищує надійність їх роботи. Кожний хід поршня є робочим.

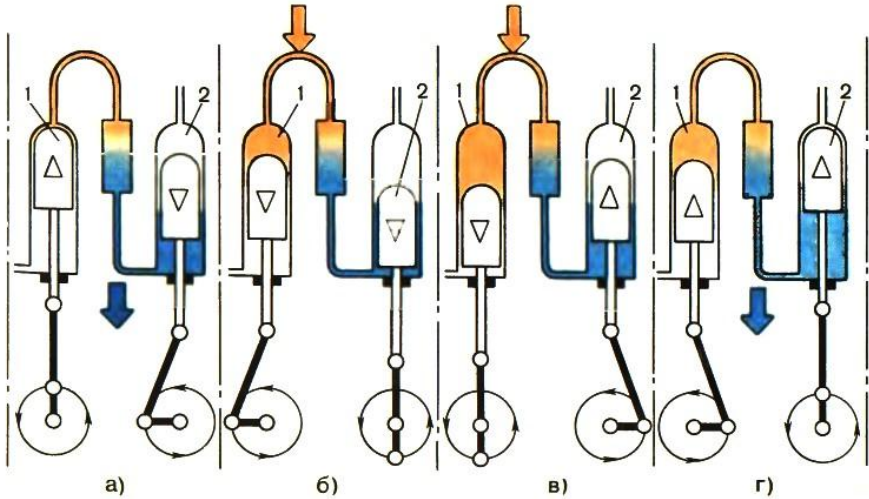


Рисунок 3.6 - Схеми здійснення робочого циклу двигуна Стірлінга подвійної дії

Фази, що складають робочий цикл двигуна Стірлінгу, розглянемо на прикладі роботи циліндрів 1 і 2. Коли поршень у циліндрі 1 підходить до ВМТ (рис. 3.6, а), поршень у циліндрі 2 двигуна рухається до НМТ. Більша частина робочого тіла зосереджена в холодній зоні, здійснюється процес стиску й охолодження робочого тіла в холодній зоні. При русі поршня циліндра 1 до НМТ (рис. 3.6, б) збільшується об'єм гарячої порожнини, поршень циліндра 2 підходить уводити, увести до ладу НМТ і об'єм холодної порожнини зменшується до мінімуму. Здійснюється нагрівання від зовнішнього джерела, а також у регенераторі й витиснення робочого тіла в гарячу порожнину.

У наступній фазі (рис. 3.6, в) поршень циліндра 1 наближається до НМТ, швидко збільшуючи об'єм гарячої порожнини. Поршень у циліндрі 2 почав рух до ВМТ, і обсяг холодної порожнини збільшується. Відбувається процес розширення з підведенням теплоти від зо-

внішнього джерела до робочого тіла в гарячій зоні.

Коли поршень циліндра 1 рухається до ВМТ, зменшуючи обсяг гарячої порожнини (рис. 3.6, г), поршень у циліндрі 2 наближається до ВМТ, і об'єм холодної порожнини збільшується. Робоче тіло витісняється в холодну порожнину, по шляху прохолоджуючись у регенераторі й охолоджувачі.

Класифікація конструкцій.

Двигуни Стірлінга, що випускаються або розроблюються закордонними фірмами, можна класифікувати по ступеню досконалості конструкцій, яка характеризується форсуванням робочого процесу, питомими масогабаритними характеристиками, а також технологічністю виробництва.

Двигуни Стірлінгу, які можна віднести до першого покоління, були конструктивно оформлені й відпрацьовані до кінця 1960-х років. У цей період були створені двигуни Стірлінга агрегатною потужністю до 265 кВт різного призначення. Характерними конструктивними рисами двигунів першого покоління є:

- роздільні камери згоряння для кожного циліндра;
- наявність у кожному циліндрі двох поршнів (робочого й витісняючого), що забезпечують термодинамічний процес;
- використання ромбічної передачі для перетворення зворотно-поступального руху поршнів в обертовий рух вала відбору потужності.

Ці конструктивні особливості добре видні на компоновальній схемі двигуна типу 4-615 (рис. 3.7), розробленого фірмою Юнайтед Стірлінг (Швеція). Ефективний ККД створених зразків двигунів досягає 30-38 %. Ресурс двигуна до першого перебирання (обумовлений зміною ущільнень) дорівнює 10 000 год.

У результаті широких експериментальних і теоретичних досліджень по оптимізації параметрів робочого процесу, накопичення досвіду експлуатації зразків, а також завдяки конструктивному вдосконалюванню окремих вузлів і елементів конструкції були створені двигуни Стірлінга другого покоління. Ці двигуни характеризуються істотним збільшенням циліндрової потужності й підвищенням ефективного ККД до 40 % і вище.

За питомими показниками двигуни зовнішнього згоряння перебувають на одному рівні з дизелями тієї ж потужності й призначення,

а в деяких випадках і перевершують їх, володіючи при цьому рядом вище згаданих переваг.

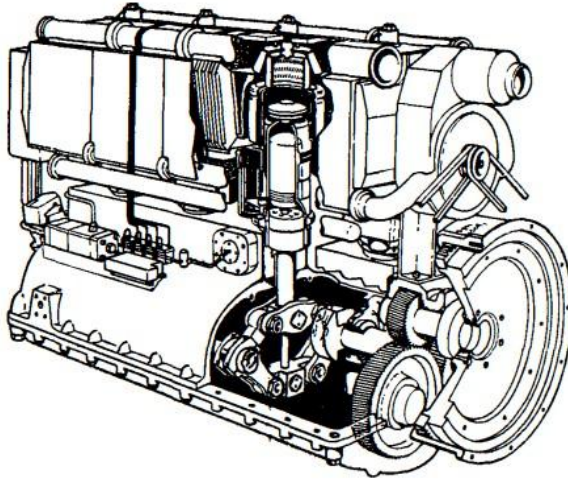


Рисунок 3.7 - Компонувальна схема двигуна типу 4-615 фірми Юнайтед Стірлінг (Швеція)

Основними конструктивними відмінностями двигунів другого покоління є:

- використання єдиної камери згоряння на всі циліндри або групу циліндрів, що спрощує конструкцію, а також сприяє зменшенню маси й габариту двигуна;
- наявність у циліндрі одного поршня подвійної дії, що виконує функції робочого й витісняючого;
- застосування як силової передачі різноманітних конструкцій, таких, як коса шайба, роторно-епітрохоїдальний механізм, а також кривошипно-шатунний крейцкопфний механізм.

У двигунах другого покоління суттєво поліпшена технологія виготовлення й підвищена ефективність усіх теплообмінних апаратів (нагрівача, економайзера, холодильника й регенератора).

Фірми ведуть інтенсивні дослідницькі роботи зі створення перспективних двигунів третього покоління. Дослідження спрямовані головним чином на зниження питомої маси двигунів за рахунок подальшого форсування робочого процесу. Проводяться роботи з удосконалення теплообмінних апаратів, впровадженню принципово нових

конструкцій (наприклад, двофазного регенератора) і застосуванню конструктивних елементів, які дозволили б підвищити ефективність використання двигунів Стірлінгу, таких, як теплові труби й тепловий акумулятор.

Основні компоувальні схеми.

За принципом дії й компоувальної схеми розроблені двигуни Стірлінгу можна розділити на наступні основні групи:

- двигуни витісняючого типу, включають рядні з ромбічною передачею й V-образні двигуни із крейцкопфним механізмом;
- двигуни подвійної дії, що включають рядні й V-образні двигуни із крейцкопфним механізмом, двигуни з барабанним розташуванням циліндрів і косою шайбою.

Нижче коротко описані характерні риси двигунів кожної компоувальної схеми.

Рядний двигун витісняючого типу, з ромбічною передачею.

До переваг компоування слід віднести повну врівноваженість сил інерції й відповідно плавну роботу машини. Наявність двох колінчатих валів забезпечує чотири точки відбору потужності. Буферний простір, діючи як акумулятор енергії, забезпечує вирівнювання кривої крутного моменту в порівнянні із двигунами внутрішнього згорання.

Велика кількість однотипних деталей (на кожний циліндр доводиться два поршні, два ущільнення, два штоки, два коромисла в зборі, два колінчаті вали й чотири шатуни) забезпечує помірні витрати праці при крупносерійному виробництві двигуна. Чималою перевагою є й те, що двигуни цієї схеми найбільш відпрацьовані в порівнянні з усіма іншими конструктивними компоуваннями.

Недоліками двигуна є насамперед його збільшений габарит і складність передавального механізму, особливо при багатоциліндровому виконанні. При малосерійному виробництві велика кількість деталей звичайно спричиняє пропорційне зростання вартості.

V-образний двигун витісняючого типу. Конструкція двигуна забезпечує повну подобу газового тракту з рядним двигуном. Витиснювач і робочий поршень укладені кожний у свій циліндр. Порожнина розширення - це об'єм циліндра над поршнем що витісняє, порожнина стиску - об'єм циліндра над робочим поршнем плюс об'єм циліндра під витиснювачем плюс об'єм сполучних каналів.

Прийняте компоновання дозволяє знизити масу двигуна в порівнянні з рядним двигуном. Оскільки заощадити на масі за рахунок деталей і вузлів, що утворюють теплопередаючі поверхні, при заданій потужності двигуна не представляється можливим, усіляко скорочена кількість деталей картера. Єдина шийка колінчатого вала використовується для обох шатунів. Картер перебуває під середнім тиском робочого газу, що усуває необхідність у сальниках, штоках поршнів і крейцкопфх. Острішки поршнів мають самозмащувальні тефлонові паски. Підшипники колінчатого вала - роликові з масляним набиванням, утримуваної сепараторами. Вихід колінчатого вала з картера ущільнений гідродинамічним гвинтовим сальником.

У-образний двигун подвійної дії із крейцкопфним механізмом.

Окремі циліндри не є самостійними з погляду здійснення термодинамічного процесу, як це було в описаних вище двигунів. У кожному циліндрі є по одному поршню, що виконує подвійну роль - витиснювача й робочого поршня. Простір над поршнем є порожниною розширення, а простір під поршнем - порожниною стиску. Порожнина стиску кожного циліндра зовнішнім каналом через холодильник, регенератор і нагрівач пов'язана з порожниною розширення сусіднього циліндра.

Двигун подвійної дії з косою шайбою. Якщо циліндри двигуна подвійної дії розташувати паралельно, навколо загальної осі, значно спрощується внутрішнє з'єднання циліндрів між собою, необхідне для забезпечення безперервної послідовності дій. Зникає існуюча в рядному двигуні проблема з'єднання останнього циліндра з першим. Барабанне розташування циліндрів дозволяє ущільнити компоновання двигуна. Можна спроектувати двигун із числом циліндрів від трьох до семи. У якості приводного механізму у двигуні з барабанним компонованням циліндрів вигідно використовувати "косу" шайбу. Експериментальні дослідження такої шайби, спеціально спроектованої для двигуна потужністю 18,4 кВт, показали що механічні втрати на ній становлять усього 1,38 кВт, або 7,3% потужності двигуна. Це доводить перспективність використання косої шайби як системи перетворення руху.

Переваги двигуна зовнішнього згоряння і області доцільного застосування.

Завдяки зовнішньому підведенню теплоти двигун може працю-

вати практично від будь-якого джерела енергії (тверде, рідке й газоподібне паливо, тепловий акумулятор, атомний реактор, сонячна енергія). Це, по-перше, означає, що для двигуна може бути використаний будь-який наявний сорт палива. З іншого боку, це дозволяє одержати установку, для роботи якої не потрібен атмосферне повітря, тобто енергетичну установку для підводного флоту або космічних об'єктів.

Значно більша тривалість згоряння в порівнянні із ДВЗ забезпечує більш повне згоряння палива й дозволяє суттєво знизити кількість шкідливих компонентів у випускних газах.

Використання ромбічного механізму передачі руху на вал гарантує практично повну динамічну врівноваженість двигуна навіть в одноциліндровому виконанні.

Плавне протікання робочого процесу забезпечує меншу нерівномірність крутного моменту за період циклу в порівнянні із двигунами внутрішнього згоряння.

Плавне синусоїдальне протікання робочого процесу, відсутність клапанів, повна динамічна врівноваженість дозволяють одержати гарні віброакустичні характеристики двигуна Стірлінгу.

Маючи термодинамічний ККД, рівний ККД циклу Карно, і механічний ККД на рівні двигунів внутрішнього згоряння, двигун Стірлінга відрізняється високою економічністю й може щодо цього конкурувати з дизелями, найбільш відпрацьованими по робочому процесу.

Працюючи від зовнішнього джерела теплоти при підтримці постійної температури нагрівача, двигун Стерлінга практично нечутливий до короткочасних перевантажень.

Перераховані особливості двигуна Стерлінга забезпечують можливість його широкого використання в автомобілі і суднобудуванні.

Малощумність, невибагливість до сорту палива, нечутливість до короткочасних перевантажень, висока рівномірність крутного моменту двигуна щонайкраще проявляються при використанні його в якості привода в судових електростанціях. Можливість роботи від зовнішнього джерела теплоти, незалежність від атмосферного повітря роблять двигун Стерлінга досить перспективним для застосування на підводних човнах, де особливо цінні їхні малощумність, динамічна врівноваженість і чистота випускних газів.

Таким чином, при певній стадії розвитку освоєння серійного виробництва, двигун Стерлінга зможе знайти застосування практично на будь-якому транспортному засобі, витиснувши інші типи традиційних

установок, і в першу чергу двигуни внутрішнього згорання.

Питання для самоперевірки

1. Які переваги двигунів зовнішнього згорання Ви можете назвати?
2. Розкажіть про минуле і сучасне паросилових автомобільних установок.
3. Як класифікуються парові двигуни?
4. Назвіть типи парових двигунів.
5. В якому році було створено двигун Стірлінга?
6. Поясніть принцип роботи поршневого двигуна Стірлінга.
7. Які основні переваги двигуна Стірлінга?
8. Який основний недолік двигуна Стірлінга?
9. Назвіть області застосування двигуна Стірлінга.
10. Розкажіть схему робочого циклу двигуна Стірлінга.
11. Які покоління двигунів Стірлінга Ви можете назвати і які їхні характерні риси?
12. Які основні конструктивні відмінності двигунів Стірлінга другого покоління?
13. Опишіть перспективи розвитку двигунів Стірлінга для транспортних засобів.
14. Поясніть відмінність перебігу робочого процесу двигунів із зовнішнім підведенням теплоти від робочого процесу ДВЗ.
15. Назвіть основні компоновальні схеми двигунів Стірлінга.

ЛЕКЦІЯ № 4. ДВОТАКТНІ ДВЗ

План лекції. Робочі цикли, діаграми, термодинаміка, процеси згоряння.

Література: [1], с. 21-23; [2], с. 58-60; [5], с. 18-23;
[6], с. 52-53; [7], с. 15-20; [34], с. 28-30.

Бажання більш раціонально використовувати переміщення поршня в циліндрі при організації послідовного чергування процесів робочого циклу призвело до розробки двигунів, у яких робочий цикл здійснюється за два ходи поршня, або всього за один оберт колінчатого вала.

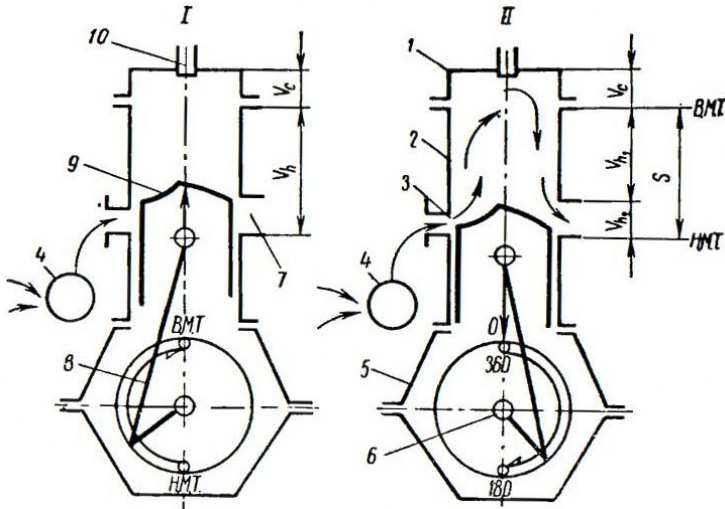
Допоміжні процеси, пов'язані з випуском і впуском робочого тіла, у цих двигунах здійснюються шляхом продувки циліндрів, що полягає в тому, що робоче тіло вводиться в циліндр під тиском, яке трохи перевищує атмосферне.

Підвищений тиск потоку, що входить у надпоршкову порожнину циліндра, сприяє швидкому витисненню з нього відпрацьованих газів і заповненню його свіжим зарядом. Досягається це за допомогою різних поршневих і роторних насосів, виконаних у вигляді окремих агрегатів, або використанням внутрішньої порожнини картера самого двигуна як продувального насоса. Метод продувки з використанням картера двигуна називається кривошипно-камерним. Він застосовується в малопотужних й дуже малих двигунах мотоциклетного типу.

Двигуни що працюють по двотактному циклу, будують як із зовнішнім, так і із внутрішнім сумішоутворенням. З будовою і принципом дії двотактного двигуна можна ознайомитися на прикладі двигуна із продувкою від окремого насоса, показаному на схемі рис. 4.1.

Циліндр 2 закритий кришкою (головкою) 1 і за допомогою фланця укріплений на верхній половині картера 5. Усередині циліндра переміщається поршень 9, шарнірно з'єднаний шатуном 8 із кривошипом вала 6 двигуна. У нижній частині циліндра є продувне 3 і випускне 7 вікна, які відкриваються й закриваються поршнем при його переміщенні уздовж осі циліндра. Днищу поршня надають форму, що полегшує продувку циліндра. У розглянутому випадку повітря або горюча суміш (залежно від типу двигуна), використовувані для продувки й заповнення циліндра, попередньо стискаються за допомогою

окремого насоса 4.



I - початок стиску, II - початок продувки циліндра

Рисунок 4.1 - Схема двотактного двигуна із продувкою циліндра від окремого насоса

Наявність продувних і випускних вікон у циліндрі впливає на ефективність використання ходу S поршня. Частина ходу поршня, яку він робить при відкритих вікнах 3 і 7, вважають неробочою, тобто не використовуюваною для процесів стиску й розширення, а відповідний цьому об'єм V_{h2} часто називають об'ємом що губиться. Тому дійсний робочий об'єм циліндра V_{h1} у двотактних двигунах завжди буває менше геометричного об'єму V_h , який описується поршнем при його переміщенні між в.м.т. і н.м.т.

У зв'язку із цим у двотактних двигунах розрізняють два об'єми циліндра - корисний V_{h1} і геометричний V_h , а відповідні ступені стиску називають дійсним й геометричним, або умовним.

Геометричний ступінь стиску являє собою відношення повного об'єму циліндра $V_h + V_c$ до об'єму камери стиску V_c .

Дійсний ступінь стиску - це відношення об'єму надпоршневої порожнини циліндра в момент перекриття випускного вікна $V_{h1} + V_c$ до об'єму камери стиску V_c .

Конструктивні особливості двотактних двигунів, показані на

схемі рис. 4.1, дозволяють здійснювати робочий цикл без окремих насосних ходів поршня, чим вони вигідно відрізняються від чотиритактних. Робочий цикл у двотактних двигунах часто розглядають, починаючи із процесу розширення, тобто формально з руху поршня від в.м.т. Але теплові процеси в будь-яких двигунах внутрішнього згоряння, починаються із впуску й стиску, а закінчуються розширенням і випуском. Тому й у двотактних двигунах доцільно зберігати цю природню послідовність у чергуванні процесів.

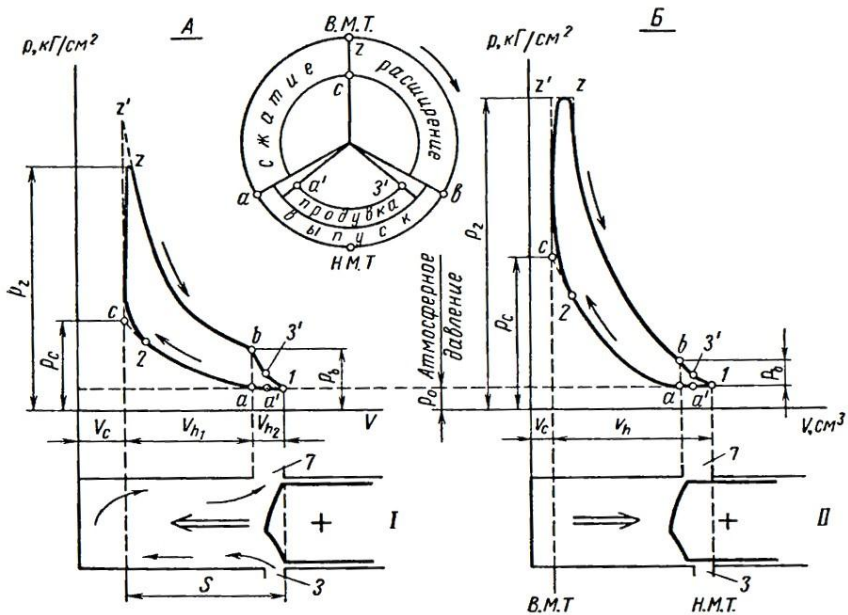
Тоді здійснення робочого циклу у двотактних двигунах можна представити в такий спосіб (див. схеми й діаграми рис. 4.1 і 4.2).

I такт відповідає переміщенню поршня від н.м.т. до в.м.т. під дією колінчатого вала, причому, коли поршень перебуває в н.м.т., продувні 3 і випускні 7 вікна відкриті, як показано на рис. 4.2. Горюча суміш або чисте повітря (у дизелях) під невеликим тиском, дорівнюючим $0,11-0,14 \text{ мН/см}^2$, подаються в циліндр через продувне вікно й завдяки спрямованому руху потоку (на рис. 4.1 і 4.2 відзначеному стрілками) продовжують заповнювати надпоршневую порожнину циліндра й одночасно витісняють із неї продукти згоряння, що залишилися від попереднього циклу.

Спільне протікання процесів наповнення й примусового витиснення відпрацьованих газів триває доти, поки своїм рухом убік в.м.т. поршень не перекриє продувне вікно 3. На індикаторних діаграмах А і В рис. 4.2 ці процеси зображені лінією 1-а'. Однак процес стиску починається пізніше, з моменту перекриття поршнем більш високого випускного вікна 7, як показано на рис. 4.1. На індикаторних діаграмах закриття випускного вікна відзначене точкою а. До цього моменту колінчатий вал встигає повернутися приблизно на кут в 60° від н.м.т. (див. рис. 4.2, кругову діаграму).

При подальшому переміщенні поршня до в.м.т. здійснюється звичайний у поршневих двигунах процес стиску, зображений на індикаторних діаграмах рис. 4.2 лінією а-с. Поблизу в.м.т. після проскакування електричної іскри між електродами свічі запалювання 10 у карбюраторних двигунах або початку упорскування палива в дизелях (точка 2 на діаграмах) починається процес згоряння.

Процеси стиску й згоряння по своїй закономірності не відрізняються від аналогічних процесів у чотиритактних двигунах. При порівнянних ступенях стиску й наповнення циліндрів вони характеризуються приблизно тим же рівнем тисків і температур.



І - положення поршня в н.м.т., ІІ - початок випуску відпрацьованих газів,
А - індикаторна діаграма бензинового двигуна: Б – дизеля

Рисунок 4.2 - Схема роботи двотактного двигуна внутрішнього згорання

Таким чином, за розглянутий хід поршня від н.м.т. до в.м.т. (за 180° кута повороту колінчатого вала) триває процес наповнення, здійснюється процес стиску й починається згоряння палива. Але основне місце, як було показано, належить процесу стиску, тому перший такт у двотактних двигунах є такт стиску.

II такт відповідає переміщенню поршня від в.м.т. до н.м.т., яке поблизу в.м.т. супроводжується процесом згоряння, що почалися ще наприкінці такту стиску. Інтенсивне виділення тепла при згорянні палива викликає різке підвищення температури і тиску в надпоршне-вій порожнині (див. рис. 4.2 індикаторні діаграми А і Б). Під дією ти-ску газів, що розширюються, поршень переміщається до н.м.т. і через шатун повертає колінчатий вал на наступні 180°, роблячи корисну роботу.

На індикаторних діаграмах рис 4.2 процеси розширення й част-

ково згоряння зображені лінією z-b, причому закономірності протікання їх аналогічні однойменним процесам чотиритактного робочого циклу із зовнішнім і внутрішнім сумішоутворенням.

У міру віддалення поршня від в.м.т. температура й тиск у надпоршневій порожнині знижуються, і як тільки крайка днища поршня відкриє випускне вікно 7 (див. положення поршня на рис. 4.2, II), продукти згоряння, що перебувають ще під значним тиском, починають виходити в атмосферу із критичними звуковими швидкостями й характерним шумом вихлопу (див. рис. 4.2, на діаграмах цьому відповідає точка b).

При наступному переміщенні поршня відкривається продувне вікно 3 (точка 3' на діаграмах), і тому що до цього часу тиск у надпоршневій порожнині знижується з $0,4\text{--}0,6 \text{ мН/м}^2$) майже до величини тиску продувки, то в неї починає надходити горюча суміш або повітря з насоса 4 (див. положення II рис. 4.1). Це другий період звільнення циліндра від продуктів згоряння шляхом примусового їхнього витиснення свіжим зарядом що надходить у циліндр. На індикаторних діаграмах рис. 4.2 ці процеси зображені лінією 3'-1. Їхня тривалість, виражена в градусах кута повороту колінчатого вала, становить приблизно 50° .

Виходить, основним процесом розглянутого другого ходу поршня є процес розширення, тому заключний другий такт двотактного робочого циклу називається тактом розширення.

Від н.м.т. поршень знову йде до в.м.т., і поки продувні вікна 3 (їх може бути кілька) залишаються відкритими, у циліндр надходить свіже робоче тіло, що витісняє відпрацьовані гази, тобто триває наповнення й очищення циліндра.

Спільне здійснення двох допоміжних процесів наповнення й випуску називається продувкою циліндра. Тривалість продувки визначається загальною тривалістю часу, протягом якого перебуває у відкритому стані продувне вікно 3. В існуючих двигунах це відповідає приблизно 100° кута повороту колінчатого вала. На діаграмах рис. 4.2 продувка зображена лінією 3'-1-a'.

Загальна тривалість випуску газів із циліндра дорівнює тривалості відкритого стану випускного вікна 7, що відповідає приблизно 120° кута повороту колінчатого вала, тобто трохи перевищує тривалість продувки. На діаграмах рис. 4.2 випуск зображений лінією b-3'-1-a'-a.

Далі від точки а знову починається процес стиску, і робочий цикл повторюється в розглянутій послідовності при кожному оберті колінчатого вала або через 360° повороту його кривошипа. Тому двотактний процес буває більш напруженим, ніж чотиритактний, здійснюваний за 720° повороту вала двигуна.

У розглянутому прикладі був показаний варіант так званої контурної продувки, коли продувні й випускні вікна розташовані в нижній частині циліндра, а вхідний у циліндр потік направляється по його контуру (див. рис. 4.1). Розрізняють поперечну й петлеву контурні продувки. У першому випадку продувні й випускні вікна розташовані на протилежних сторонах циліндра, як показано на рис. 4.1 і 4.2, а в другому - вікна розташовані на одній стороні циліндра.

Недоліком контурної продувки є можливість часткової втрати свіжого заряду внаслідок перемішування його з відпрацьованими газами й слабка продувка окремих зон циліндра.

Більш досконале очищення циліндрів і краще їхнє наповнення досягаються в прямоточних системах продувки, коли потік що ввійшов у циліндр не міняє свого напрямку. Потік входить через продувні вікна, розташовані в нижній частині циліндра, а випуск здійснюється, наприклад, через клапани, розташовані в головці циліндра. Такі досить складні системи називаються клапанно-щілинними.

На відміну від чотиритактного робочого циклу у двотактних двигунах на допоміжні процеси впуску й випуску не витрачається двох самостійних ходів поршня, тобто цілого оберту колінчатого вала. Протікання цих процесів забезпечується наприкінці такту розширення й на початку такту стиску. При будь-якому методі продувки циліндрів ці процеси протікають усього за $100-120^\circ$ кута повороту колінчатого вала. Це велика перевага двотактних двигунів певною мірою є і їх недоліком.

Дійсно, продувка у двотактних двигунах здійснюється за рахунок деякого зменшення активного ходу поршня, причому частина циліндрової потужності витрачається на привод продувного насоса. До того ж разом із продуктами згоряння із циліндра викидається частина свіжого заряду, а робоча суміш зайво забруднюється залишковими газами. При використанні контурних систем продувки, особливо із застосуванням кривошипної камери самого двигуна, помітно погіршується також вагове наповнення циліндрів. У результаті цього у двотактних двигунах не виходить подвоєння потужності в порівнянні з од-

нотипними чотиритактними двигунами при однакових розмірах робочого циліндра й даному числі обертів вала. Хоча, на перший погляд, від подвоєння числа робочих ходів при переході на двотактний робочий цикл варто було б очікувати й подвоєння потужності.

Практика показала, що потужність двотактних двигунів у порівнянних умовах зростає всього в 1,4-1,6 рази.

Безсумнівною перевагою двотактних двигунів є більш проста їхня конструкція (якщо двигун не постачений клапанно-щільною продувкою), більша рівномірність ходу, що дозволяє обходитися без важких маховиків, зниження рівня шумів при роботі і т.п.

Проте, на автомобілях двотактні двигуни використовуються вкрай рідко й застосовуються переважно двотактні дизелі. Це пояснюється тим, що втрата частини свіжого заряду у двигунах із зовнішнім сумішоутворенням помітно знижує їхню економічність, а подвоєна інтенсивність робочого циклу підвищує теплову напруженість основних деталей двигуна, погіршуючи умови їх роботи.

Двотактні карбюраторні двигуни широко використовуються лише в якості мотоциклетних двигунів. Застосовуються вони також у малопотужних стаціонарних силових установках. У стаціонарних установках використовують також двотактні калоризаторні двигуни з низьким ступенем стиску, у яких момент запалення палива від розпечених стінок неохолоджуваної частини камери згоряння регулюється зміною подачі води в потік продувного повітря.

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте індикаторні, механічні та ефективні показники робочого циклу двотактного двигуна.
2. Опишіть робочий цикл поршневого двотактного двигуна внутрішнього згоряння.
3. Назвіть переваги й недоліки двотактного двигуна.
4. Де найбільш широко використовуються двотактні двигуни?
5. Як називається метод продувки з використанням картера двигуна?
6. За рахунок чого здійснюються допоміжні процеси у двотактному двигуні?
7. За рахунок чого виникає підвищений тиск потоку у надпоршневій порожнині циліндра?
8. Який такт є першим у двотактних двигунах?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови : навч. посіб. / Ю. Ф. Гутаревич та ін. К. : НТУ, 2015. 244 с.
2. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є. Автомобільні двигуни: Підручник. К. : Арістей, 2006. 476 с.
3. Загальний курс транспорту: Підручник / М. Ф. Дмитриченко, І. І. Кельман, Є. К. Вільковський, З. І. Пеклич, О. І. Мельниченко Львів, 2011. 524 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания : Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1984. 384 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1990. 286 с.

Додаткова

6. Гроз Х., Русс Г. Бензиновые и дизельные двигатели. М. : "Издательство "За рулем", 2013. 272 с.
7. Курасов В. С. Теория двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. Краснодар, КубГАУ. 2013. 86 с.
8. Кузнецов А. С. Устройство и работа двигателя внутреннего сгорания: учеб. пособие. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 80 с.
9. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. М. : "За рулем", 2004. 480 с.
10. Системы управления и основы диагностики дизельных двигателей : учебное руководство. Германия : Mazda Motor Europe GmbH., 2010. 263 с.
11. Корнилов Э. В., Фока А. А., Бойко П. В. Судовые главные двигатели с электронным управлением. Одесса, Экспресс-Реклама, 2010. 224 с.
12. Возницкий И. В. Судовые Двигатели внутреннего сгорания : в 2 т. М. Моркнига, 2008. Т 1. 282 с.

13. Возницкий И. В. Судовые Двигатели внутреннего сгорания : в 2 т. М. Моркнига, 2008. Т 2. 470 с.
14. Автомобильные двигатели. Курсовое проектирование: учеб. пособие / М. Г. Шатров, И. В. Алексеев, С. Н. Богданов и др. ; под ред. М. Г. Шатрова. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 256 с.
15. Тер-Мкртчян Г. Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами М. : МАДИ, 2015. 80 с.
16. Пушкарева О. Б. Энергетические установки автомобилей и тракторов. Екатеринбург : ФГБОУ ВПО "Уральский государственный лесотехнический университет", 2015. 48 с.
17. Мищенко А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей. К. : Наукова думка, 1984. 143 с.
18. Копытов В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. М. : Litres, 2017. 504 с.
19. Тер-Мкртчян Г. Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. М. : Metallurgizdat, 2011. 304 с.
20. Кей Энтони Л. История разработки и создания реактивных двигателей и газовых турбин в Германии (1930-1945). Рыбинск : НПО Сатурн, 2006. 329 с.
21. Газотурбинные энергетические установки : учебное пособие для вузов / С. В. Цанев и др. ; под ред. С. В. Цанева. М. : Издательский дом МЭИ, 2011. 428 с.
22. Вертолетные газотурбинные двигатели / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и др.; под общ. ред. В. А. Григорьева и Б. А. Пономарева. М. : Машиностроение, 2007. 491 с.
23. Автомобильные двигатели : учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. Г. Шатров, К.А. Морозов, И. В.Алексеев и др. ; под ред. М.Г.Шатрова. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 464 с.
24. Тер-Мкртчян Г. Г., Кутенев В. Ф., Яманин А. И. Вопросы теории двигателей с управляемым движением поршней с плоскими преобразующими механизмами. М. : НАМИ, 2004. 240 с.
25. Машиностроение. Энциклопедия. М. : Машиностроение, 2013. Т. IV-14 : Двигатели внутреннего сгорания / под ред. А. А. Александрова и Н.А. Иващенко. 784 с.
26. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. М. : Мир, 1986. 464 с.
27. Уокер Г. Двигатели Стирлинга М. : Машиностроение, 1985. 408 с.
28. Трухов В. С., Турсунбаев И. А., Умаров С.Я. Расчет параметров

внутреннего теплообменного контура двигателя Стирлинга. Ташкент : Фан, 1979. 80 с.

29. Мышинский З. Л., Рыжков-Дудонов М. А. Судовые поршневые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга). Л. : Судостроение, 1976. 76 с.
30. Оsepчугов В. В., Фрумкин А. К. Автомобиль : Анализ конструкций, элементы расчета. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.
31. Проикшат А. Шасси автомобиля : Типы приводов. М. : Машиностроение, 1989. 232 с.
32. Конструкция автомобиля. Шасси / под ред. А. Л. Карунина. М. : МАМИ, 2000. 528 с.
33. Долматовский Ю. А. Автомобиль в движении. М. : Машиностроение, 1987. 159 с.
34. Рывинский Г. Н. Знакомьтесь – двигатель. М. : Машиностроение, 1993. 176 с.
35. Григорьев Е. Г., Колубаев Б. Д., Ерохов В. И. Газобаллонные автомобили. М. : Машиностроение, 1989. 216 с.
36. Тур Е. Я. Устройство автомобиля : Учебник для учащихся автотранспортных техникумов. М. : Машиностроение, 1991. 352 с.

Інформаційні ресурси

37. A Compelling Alternative to the conventional Internal Combustion Engine URL: <http://www.scuderigroup.com/our-patents/> (дата звернення: 12.04.2019)
38. Platform for Complete Combustion
<http://www.zajacmotors.com/technology.phtml> (дата звернення: 12.04.2019)
39. Tour Engine Technology URL: <http://www.touengine.com/technology> (дата звернення: 12.04.2019)
40. Alternative Motorentechnik bei Verbrennungsmotoren URL:
<http://www.mein-werkstattwagen.de/wissen/alternative-motorentechnik-bei-verbrennungsmotoren/> (дата звернення: 12.04.2019)
41. Six-stroke engine high level of efficiency URL:
<http://bajulazsa.com/Site/sixstroke.html> (дата звернення: 12.04.2019)