МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

О. М. Артюх, О. В. Дударенко
В. В. Кузьмін, А. Ю. Сосик
А. В. Щербина

ТРАНСПОРТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

Навчальний посібник

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2021

УДК 621.431.73(075.8)
Т 65

Рекомендовано до друку Вченою радою
Національний університет «Запорізька політехніка»
(Протокол № 3 від 6.12.2021 р.)

Рецензенти:

Сахно В. П. – д.т.н., професор, академік Транспортної академії України, Заслужений працівник освіти України, завідувач кафедри «Автомобілі» Національного транспортного університету (м. Київ).

Панченко А. І. – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Мехатронні системи та транспортні технології» Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

Воронін С. В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинобудування та технічний сервіс машин» Українського державного університету залізничного транспорту.

Т 65 Транспортні енергетичні установки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 264 с.

ISBN 978-617-529-343-0

Навчальний посібник призначений для вивчення процесів що протікають в транспортних енергетичних установках різних типів, навчитися вибирати раціональні шляхи вдосконалювання їх конструкції з метою поліпшення експлуатаційних характеристик наземних транспортних засобів. Посібник призначений для студентів які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

УДК 621.431.73(075.8)

ISBN 978-617-529-343-0

© Національний університет «Запорізька політехніка», 2021
© Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В., 2021

ЗМІСТ

Вступ 7
1 Вступ до курсу 8
1.1 Особливості двигунів внутрішнього згоряння 8
1.2 Коротка історія розвитку двигунобудування 11
1.3 Характеристика двигунів внутрішнього згоряння як джерел енергії 17
1.4 Області застосування поршневих і комбінованих двигунів 19
1.5 Принципи конструювання й розрахунків сучасних двигунів 22
2 Класифікація двигунів і компонувальні схеми розміщення двигунів на траспортних засобах 29
2.1 Дизельні двигуни 29
2.2 Бензинові двигуни 30
2.3 Системи регулювання фаз і висоти підйому клапанів 31
2.4 Умовне позначення двигунів 33
2.5 Класифікація двигунів 33
2.6 Аналіз компонувальних схем розміщення двигунів на транспортних засобах 35
3 Двигуни зовнішнього згоряння 44
3.1 Винахід і розвиток парових машин 44
3.2 Схема здійснення робочого циклу двигуна Стірлінга 48
3.3 Класифікація конструкцій 50
3.4 Основні компонувальні схеми 52
3.5 Переваги двигуна зовнішнього згоряння та області доцільного застосування 54
4 Двотактні ДВЗ 57
4.1 Робочий цикл у двотактних двигунах 59
5 Чотиритактні ДВЗ 65
5.1 Робочий цикл у чотиритактних двигунах 67
6 Особливості конструкцій сучасних автомобільних бензинових ДВЗ 75
6.1 Система безпосереднього впорску палива 76
6.2 Принцип дії системи безпосереднього упорскування палива 79
6.3 Принцип роботи подвійного наддуву двигуна TSI 82

6.4 Турбонаддув двигуна TSI 83
6.5 Механічний нагнітач повітряу двигун 84
6.6 Інтеркулер – проміжне охолодження повітря 88
6.7 Двоконтурна система охолодження двигуна 90
6.8 Система впорскування води у двигун 94
6.9 Система зміни геометрії впускного колектора 95
6.10 Система зміни фаз газорозподілу 98
7 Особливості конструкцій сучасних автомобільних дизельних ДВЗ 108
7.1 Принцип роботи дизельного двигуна 108
7.2 Система упорскування Common Rail 109
7.3 Система рециркуляції відпрацьованих газів 110
7.4 Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску 110
7.5 Сажевий фільтр 114
7.6 Сажевий фільтр із каталітичним покриттям 116
7.7 Сажевий фільтр із системою введення присадки в паливо 118
7.8 Турбонаддув двигуна TDI 119
7.9 Принцип роботи наддуву двигуна TDI 122
8 Газові енергетичні установки на траспортних засобах 124
8.1 Автомобілі на природному газі 124
8.2 Газобалонне обладнання 127
8.3 Автомобіль на зрідженому газі 130
8.4 Газобалонне обладнання 6 покоління 131
8.5 Газогенераторні установки 133
8.6 Принцип роботи газогенераторних установок 138
8.7 Безпека газобалонного обладнання 142
9 Роторно-поршневі ДВЗ 147
9.1 Конструктивні особливості РПД 155
9.2 Переваги РПД 163
9.3 Недоліки РПД 164
10 Газотурбінні ДВЗ 167
10.1 Переваги малого газотурбінного автомобільного двигуна 169
10.2 Деякі недоліки малого газотурбінного двигуна 173
10.3 Можливі переваги застосування газотурбінних двигунів для вантажних автомобілів 178

11 Гібридні та електричні енергетичні установки транспортних засобів 180
11.1 Послідовна схема гібридного автомобіля 181
11.2 Паралельна схема гібридного автомобіля 183
11.3 Послідовно-паралельна схема гібридного автомобіля ... 187
11.4 Переваги автомобілів з гібридною силовою установкою 192
11.5 Загальні недоліки гібридів 194
12 Двигуни внутрішнього згоряння з нетрадиційними робочими циклами 197
12.1 Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ 197
12.2 Двигуни з розділеними тактами 199
12.2.1 Двигун Кушуля 200
12.2.2 Двигун Скудері 202
12.2.3 Двигун Zajacmotors 203
12.2.4 Двигун TourEngine 204
12.3 Розділений цикл із робочим процесом НСРС 205
12.4 Двигуни з доданими тактами 205
12.4.1 П’ятитактний двигун ILMOR. 206
12.5 Реалізація п’ятитактного циклу у двигунах традиційної конструкції 209
12.6 Шеститактні двигуни 212
12.6.1 Двигун Кроуера 213
12.6.2 Двигун Баюласа 214
12.6.3 Двигун Revelation Power 215
12.7 Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об’ємом 216
13 Водневі енергетичні установки 224
13.1 Моторні властивості водню й передумови його використання як палива для ДВЗ 224
13.2 Принцип роботи й типи водневого двигуна 227
13.3 Силові установки на основі водневих паливних елементів 228
13.4 Водневі двигуни внутрішнього згоряння 229
13.5 Конструктивні схеми водневих силових установок на транспортних засобах 230
13.6 Особливості конструкції Mazda RX-8 Hydrogen RE 231

13.7 Особливості конструкції водневих Toyota та Honda 234
13.8 Виробництво водню 240
13.9 Зберігання водню 241
13.10 Тенденція створення заправних водневих станцій в різних країнах світу 241
13.11 Витрати на утримання водневих станцій 244
13.12 Фактори, що стримують широке впровадження водневих технологій 245
13.13 Небезпека водневого палива 246
14 Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок 249
Література 258

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 Ленуар винайшов перший двигун внутрішнього згоряння, що працював на світильному газі.

В 1870 р. Є. Ланген і Н. Отто (Німеччина) побудували чотиритактні 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.

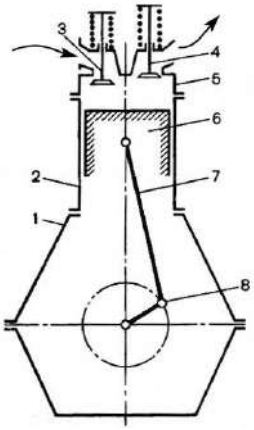
Матеріал, викладений у даному навчальному посібнику, надає студентам необхідну інформацію з кожного з розділів навчальної програми курсу «Транспортні енергетичні установки», і допоможе студентам досягти необхідного рівня знань, практичних навичок та умінь.

1 ВСТУП ДО КУРСУ

1.1 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 температуро й тиском, натискають на поршень і переміщають 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.

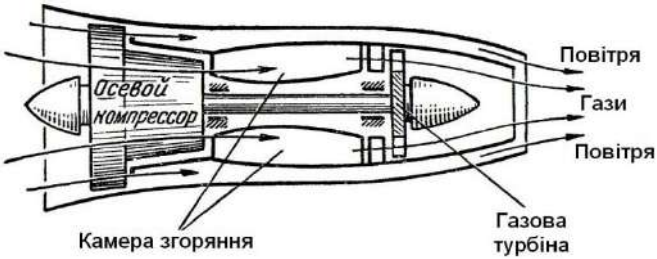


Рисунок 1.2 – Принципова схема газової турбіни

Газова турбіна має робочі органі 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 навантаженністю 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.

1.2 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 пороху 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 втілив 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 ввійшли в історію техніки.

Перший двигун внутрішнього згоряння, що має практичне застосування, 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. Лангреном (банкір) 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 випробуваний 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. Ернксон. Так, в 1885 р. були побудовані двигуни Р. Стірлінга із КПД 5...7 %, потужністю 2 к.с. (1,47 кВт), масою 4 т і обсягом 20 $м^3$.

В 1885 р. у Росії з'явилися двигуни конструкцій А. Яковлєва й Е.Є. Бромлея, 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 кг/(квт-год).

В 1890 р. у Москві на заводі Е.Є. Бромлея (згодом «Червоний пролетарій») розпочали масове виробництво чотиритактних гасових 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...25,8 к.с. (2,8...19 кВт). У це ж час В. Майбах (Німеччина) створив замість ґнотового випарного пристрою розпилювальний карбюратор.

В 1893 р. на Всесвітній промисловій виставці в м. Чикаго (США) за конструкцію гасових 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.

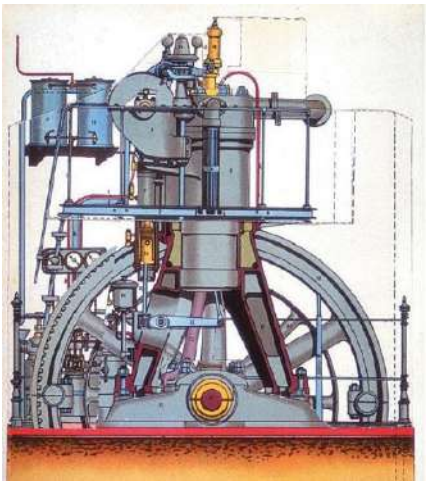


Рисунок 1.3 – Схема-рисунок двигуна Рудольфа Дизеля 1887 року

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.

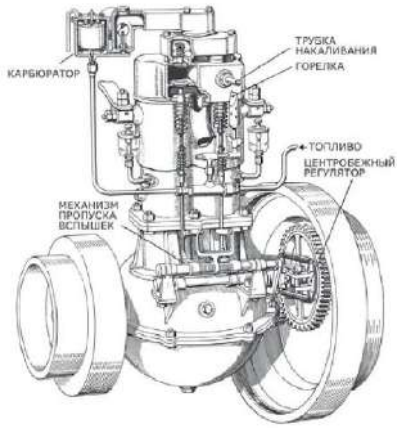


Рисунок 1.4 – Двигун «Фенікс» розроблений Вільгельмом Майбахом

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. Розвиток вітчизняного двигунобудування супроводжувався розробкою питань теорії робочого процесу й конструкції двигунів.

Вже у 1906 р. В.І. Гриневецький запропонував метод теплового розрахунку робочого циклу, покладений в основу сучасної теорії процесів двигунів внутрішнього згоряння, розвитому надалі Н.Р. Брилінгом, Е.К. Мазингом, Б.С. Стечкіним 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.



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

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.

1.3 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. 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.



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

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 десятки 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 суднових 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 суднових 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; зворотно-поступальний рух поршня, що обмежує частоту обертання, що і є причиною появи неврівноважених сил інерції й моментів від них.

1.4 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. Одинична 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 рубежем 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 суднових двигунів не тільки основних, але й допоміжних, буде розширюватися.

Поява двигуна внутрішнього згоряння обумовила швидкий розвиток авіації. За рубежем 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 навантажень, 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.).

1.5 Принципи конструювання й розрахунків сучасних двигунів

Проектування двигуна – це вирішення комплексу проблем, пов'язаних з компонуванням 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 багатофункціональну 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, компонувальних 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 майбутньої 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 постадійне 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 двигуна 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.

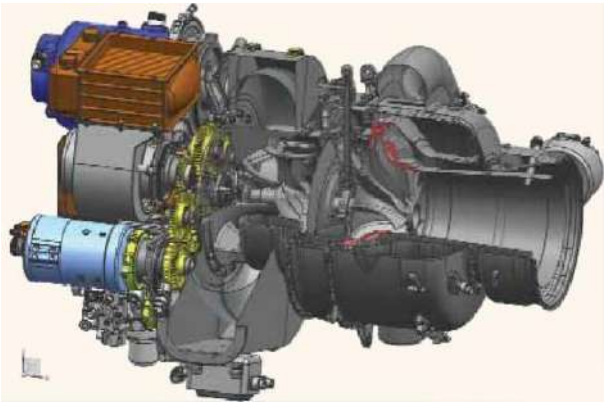


Рисунок 1.9 – 3D-модель авіаційного
двигуна ТА 18.100.000.01

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-міцністний 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 нестаціонарного 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, насамперед, 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 суднах?
13. Коротко розкажіть про процес конструювання двигуна.
14. Яким вимогам повинні задовольняти математичні моделі проектованих двигунів?
15. Що таке принцип декомпозиції?
16. Для чого в розрахунках двигуна застосовується теорія пластичності?
17. Як проводяться випробування створеного двигуна?

2 КЛАСИФІКАЦІЯ ДВИГУНІВ І КОМПОНУВАЛЬНІ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ ДВИГУНІВ НА ТРАСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

2.1 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 абревіатуру 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 абревіатурах те саме: **common rail diesel injection** – дизель із упорскуванням «коммон рейл». Різні лише кількість і послідовність букв. Наприклад, «Мерседес-Бенц» називає свої агрегати **CDI**, шильдик **CRDI** використовує корейськи родичи КІА й «Хёндай», 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.

2.2 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. Буквений 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 абревіатурою 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», «СЕАТ», 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 ФИАТ з безпосереднім упорскуванням починається зі слова jet.

2.3 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 абревіатура або назва в цих пристроїв єдина:

- **VVT (Variable Valve Timing)** – просте й наибільш точне позначення зустрічається в багатьох моделей 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 розпредвал впускних клапанів, вона еволюціонувала до складної системи, що змінює не тільки фази, але й висоту підйому кожного клапана;
- під абревіатурою **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 англійської) вміє вдобавок плавно зміщати фази на впускному розпредвалі;
- в «Субару» під стать характеру автомобілів, що випускаються, систему регулювання фаз газорозподілу назвали «активним контролем над клапанами»: **AVCS (Active Valve Control System)**. А схему із двома валами що повертаються, логічно охрестили **Dual AVCS**;
- **Variocam (Variable Camshaft**, тобто регульований розпредвал) зрушує фази газорозподілу на моторах «Порше». Приставка plus говорить про розширення можливостей – додатково змінюється висота підйому впускних клапанів. Природньо, 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 «Нісан 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.

2.4 Умовне позначення двигунів

Умовне позначення двигунів включає наступні букви й цифри:

Ч – чотиритактний; Д – двотактний; Р – реверсивний; З – судновий з реверсивною муфтою; П – з редукторною передачею; К – крейцкопфний; Н – з наддуванням;

перша цифра – число циліндрів; число перед рискою – діаметр циліндра в сантиметрах; число за рискою – 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, крейцкопфный, реверсивний, з наддуванням, діаметр циліндра 550 мм, хід поршня 1200 мм.

2.5 Класифікація двигунів

Двигуни внутрішнього згоряння можуть бути класифіковані по наступних основних ознаках:

- по роду застосовуваного палива – працюючі на рідкому паливі, газові й газорідинні;
- 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 средньоборотні) 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 компонувань;
- 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 нереверсивні.

За призначенням 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 нереверсивні), допоміжні (для привода допоміжних механізмів суднової силової установки);
- літальних апаратів (авіаційні та ін.);
- засобів малої механізації.

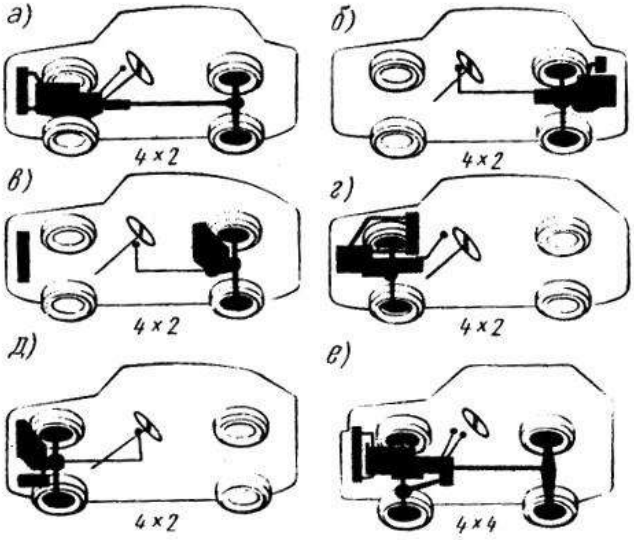
Двигуни можна класифікувати також по інших ознаках. Багаторічна продуктивна діяльність декількох поколінь винахідників, інженерів і вчених забезпечила найбагатший арсенал технічних рішень по конструкціях двигунів, їх системам,

технології їх виробництва, що в підсумку забезпечило найширше їхнє застосування у всіх галузях народного господарства й перспективи подальшого розвитку.

2.6 Аналіз компонувальних схем розміщення двигунів на транспортних засобах

На легкових автомобілях, розташування силового агрегату, число й розташування ведучих мостів, тип кузова, число дверей, розташування багажника визначають компонувальну схему легкового автомобіля.

По розташуванню силового агрегату й приводного мосту встановилися три характерні компонувальні схеми.



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

Рисунок 2.1 – Схеми розміщення силових агрегатів на легкових автомобілях

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.

III. Схема із заднім розташуванням двигуна (заднємоторна) – двигун, зчеплення, коробка передач, головна передача, диференціал розташовані позаду, подовжньо або поперечно щодо осьової лінії автомобіля, ведучий міст задній.

Заднємоторна 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 передньоприводній схемі, а найменший – при заднємоторній схемі. Розподіл навантаження на передню й задню осі заднємоторного автомобіля відповідно становить 40 і 60 %.

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

Передньоприводна схема має широке застосування по двом основним причинам: забезпечення недостатньої повертальності, що поліпшує стійкість автомобіля; поліпшення умов компонування 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 компонування відбувається деяке збільшення довжини й маси автомобіля, погіршується компонування салону.

Розташування силового агрегату на вантажних автомобілях. Найпоширеніші чотири варіанти компонувальних схем вантажних автомобілів, вони характеризуються розташуванням двигуна й кабіни (рис. 2.8).



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд автомобіля та схема трансмісії Subaru



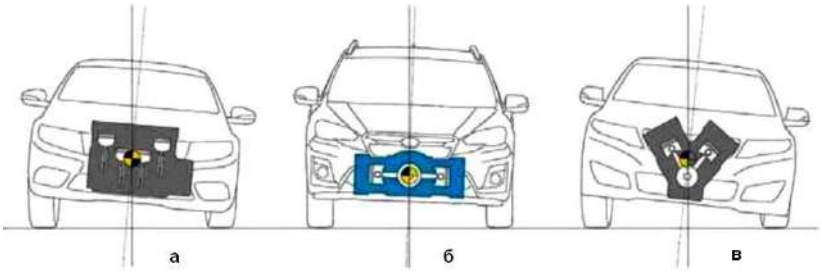
Рисунок 2.3 – Розріз горизонтально-опозитного двигуна Subaru



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



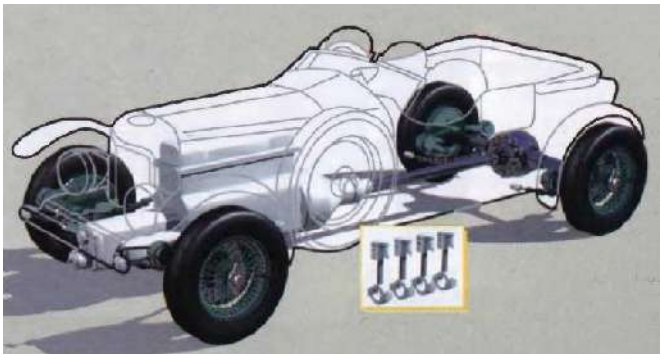
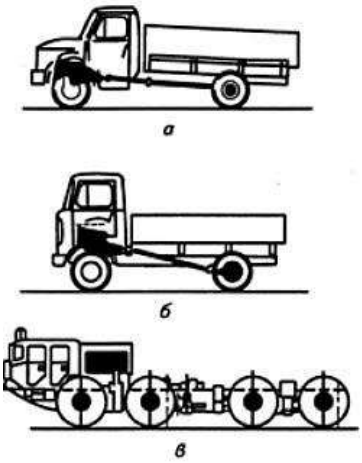


Рисунок 2.7 – Bentley 4 $^{1}/_{2}$-Litre (1928 р.) – приклад розміщення двигуна позаду вісі передніх коліс



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

Рисунок 2.8 – Компонувальні схеми вантажних автомобілів

I. Двигун над переднім мостом, кабіна за двигуном – капотне компонування; 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 компонування; 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.



Рисунок 2.9 – МАЗ 570 із двигуном розташованим за кабіною

Компонування I і II застосовують для автомобілів,

призначених для руху по дорогах будь-якої категорії з виходом на ґрунтові дороги. 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 компонування 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.

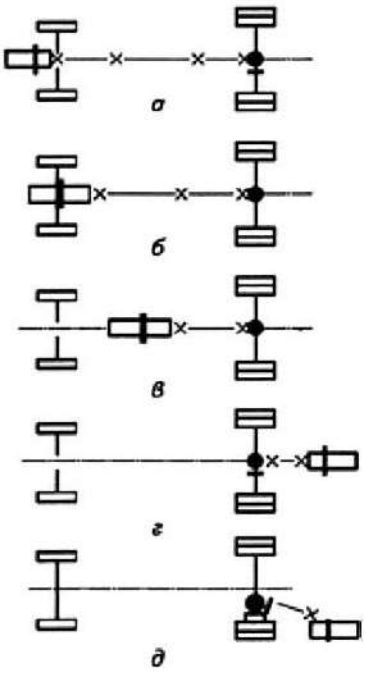
IV. Двигун позаду переднього мосту, кабіна максимально зсунута вперед – передня кабіна; переваги: гарна оглядовість, зручність входу н виходу, помірна висота підлоги, рівна підлога; недоліки: необхідність підйому кабіни або капота, об'єднаного із крильми для доступу до двигуна, вплив на водія великих 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 4х2 або 6х4 це приводить до погіршення прохідності.

Тому таке компонування 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: перевантаження переднього мосту, незручне компонування місця водія й салону; шум і загазованість кабіни, високий рівень підлоги салону, неможливість розміщення двері на передньому звисі. 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.



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

Рисунок 2.10 – Компонувальні схеми автобусів

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 загазованість і рівень шуму в салоні; недоліки: нестандартний задній міст, необхідність підйому підлоги по задньому звису над двигуном, утруднення розміщення двері на задньому звисі. Схема компонування 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?

3 ДВИГУНИ ЗОВНІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

3.1 Винахід і розвиток парових машин

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

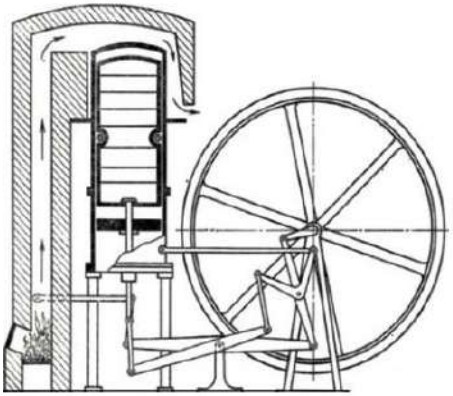
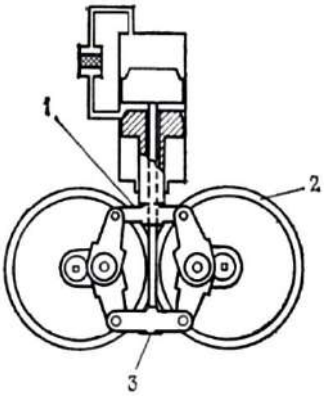


Рисунок 3.2 – Схема двигуна Стірлінга по патенту 1816 р.

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 голландська фірма Філіпс почала посилено працювати над цією конструкцією, маючи кінцевою метою створення малопотужного безшумного джерела електричної енергії для живлення радіоприймачів. Електрифікація сільської місцевості усунула необхідність у подібного роду автономних джерелах струму для



1 – траверса робочого поршня, 2- синхронізуюче зубчасте колесо, 3 – траверса витиснюючого поршня

Рисунок 3.3 – «Ромбічний привод» двигуна Стірлінга

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 короткочасних 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 Дженерал 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, зокрема

Університет Калгарі, Массачусетський технологічний інститут та ін. У даний 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.

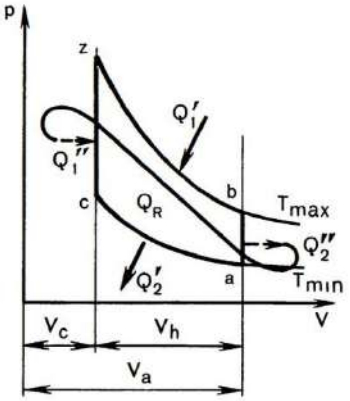


Рисунок 3.4 – Термодинамічний цикл Стірлінгу

В основі роботи двигуна Стірлінгу лежить термодинамічний цикл, показаний на рис. 3.4. Цей цикл складається з наступних процесів: стиску (ізотерма ac) з відводом теплоти Q'_2; підведення теплоти Q''_1 (ізохора cz); розширення (ізотерма zb) з підведенням теплоти Q'_2 відводу теплоти Q''_2 (ізохора ba).

Ізотермічний стиск відбувається при мінімальній температурі Tmin циклу, ізотермічне розширення – при максимальній температурі Tmax.

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 H, регенератор R і охолоджувач Ox, 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.

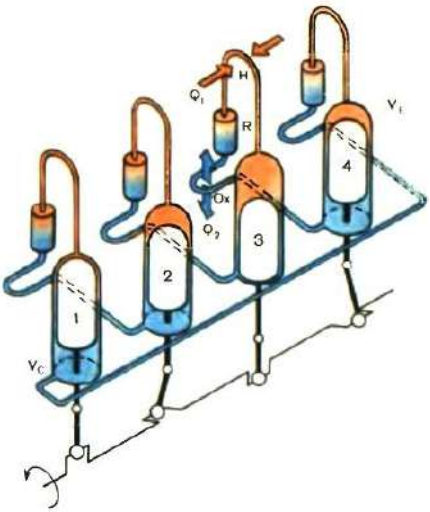


Рисунок 3.5 – Принципова схема двигуна Стірлінгу

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 апараті 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 тепло-акумулюючу 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.

3.2 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 гарячої 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 перетвориться 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 теплоакумулючій 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 згоряння (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 згоряння. 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.

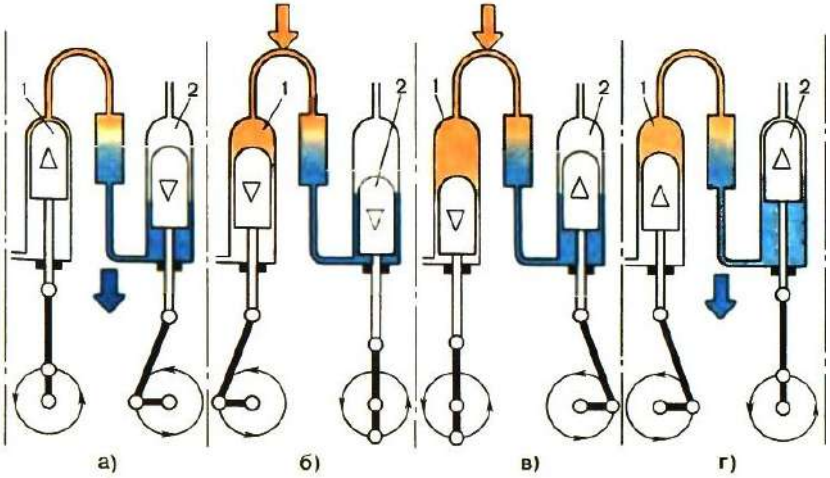


Рисунок 3.6 – Схеми здійснення робочого циклу двигуна Стірлінга подвійної дії

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 зовнішнього 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.

3.3 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 компонувальній 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 згадуваних переваг.

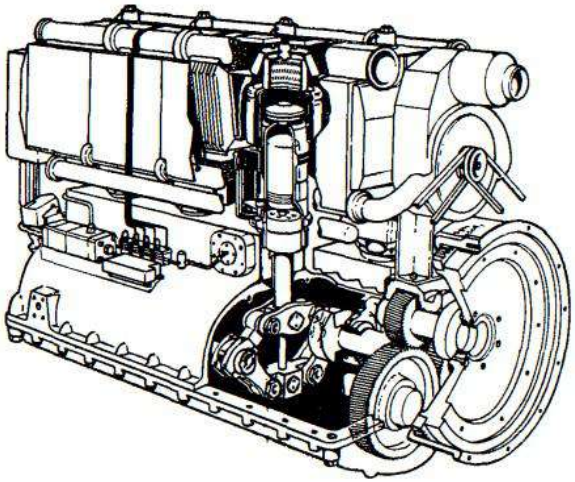


Рисунок 3.7 – Компонувальна схема двигуна типу 4-615 фірми Юнайтед Стірлінг (Швеція)

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-епітрохоідальний 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.

3.4 Основні компонувальні схеми

За принципом дії й компонувальної 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 компонувальної схеми.

Рядний двигун витісняючого типу, з ромбічною передачею. До переваг компонування 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 згоряння.

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 компонуваннями.

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 компонування 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 крейцкопфах.

Острішки поршнів мають самозмащувальні тефлонові паски. Підшипники колінчатого вала – роликові з масляним набиванням, утримуваної сепараторами. Вихід колінчатого вала з картера ущільнений гідродинамічним гвинтовим сальником.

V-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 компонування двигуна.

Можна спроектувати двигун із числом циліндрів від трьох до семи. У якості приводного механізму у двигуні з барабанним компонуванням 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.

3.5 Переваги двигуна зовнішнього згоряння та області доцільного застосування

Завдяки зовнішньому підведенню теплоти двигун може працювати 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 виброакустические 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 автомобіле і суднобудуванні.

Малошумність, невибагливість до сорту палива, нечутливість до короткочасних перевантажень, висока рівномірність крутного моменту двигуна щонайкраще проявляються при використанні його в якості привода в суднових 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 малошумність, 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 згоряння.

Питання для самоперевірки

1. Які переваги двигунів зовнішнього згоряння 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 компонувальні схеми двигунів Стірлінга.

4 ДВОТАКТНІ ДВЗ

Бажання більш раціонально використовувати переміщення поршня в циліндрі при організації послідовного чергування процесів робочого циклу призвело до розробки двигунів, у яких робочий цикл, здійснюються 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 надпоршневу порожнину циліндра, сприяє швидкому витисненню з нього відпрацьованих газів і заповненню його свіжим зарядом.

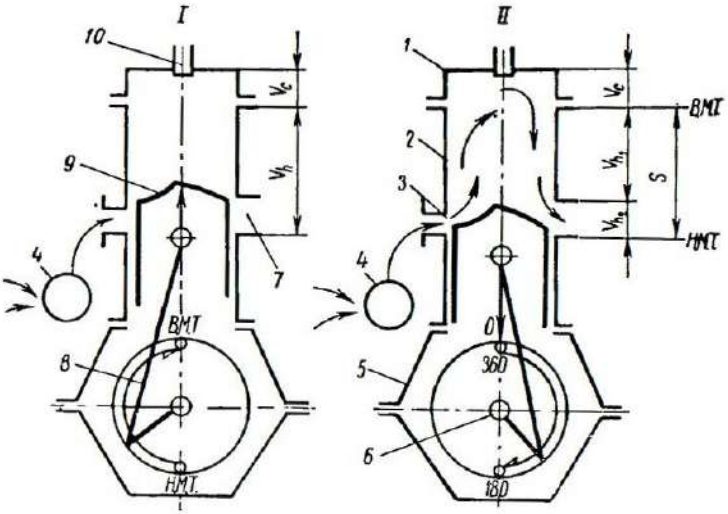
Досягається це за допомогою різних поршневих і роторних насосів, виконаних у вигляді окремих агрегатів, або використанням внутрішньої порожнини картера самого двигуна як продувного насоса. Метод продувки з використанням картера двигуна називається кривошипно-камерним. Він застосовується в малопотужних 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 стискуються за допомогою окремого насоса 4. Наявність продувних і випускних вікон у циліндрі впливає на ефективність використання ходу S поршня.



I – початок стиску, II – початок продувки циліндра

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

Частина ходу поршня, яку він робить при відкритих вікнах 3 і 7, уважають неробочою, тобто не використовуваною 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.

4.1 Робочий цикл у двотактних двигунах

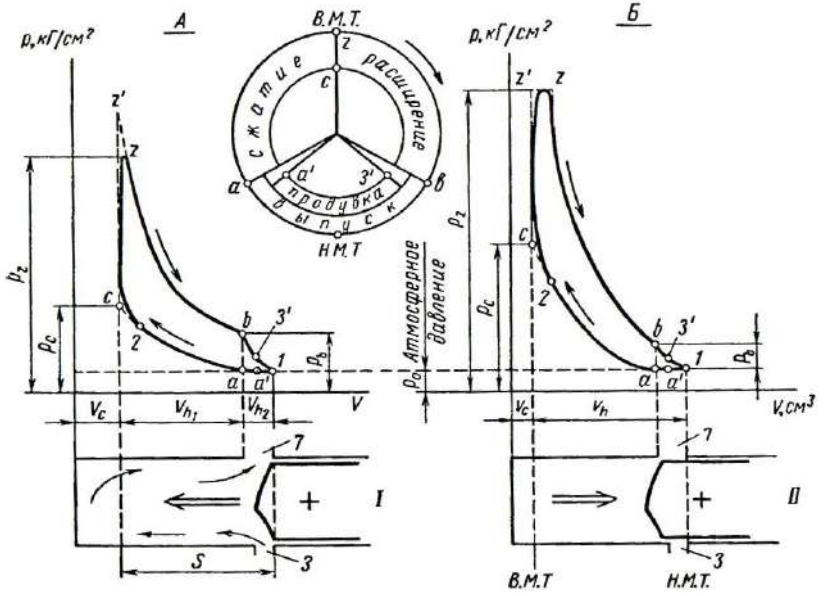
Тоді здійснення робочого циклу у двотактних двигунах можна представити в такий спосіб (див. схеми й діаграми рис. 4.1 і 4.2).

І 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 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 надпоршневу 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.



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

Рисунок 4.2 – Схема роботи двотактного двигуна внутрішнього згоряння

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 надпоршневій порожнині (див. рис. 4.2 індикаторні діаграми А и Б). Під дією тиску газів, що розширюються, поршень переміщається до н.м.т. і через шатун провертає колінчатий вал на наступні 180º, роблячи корисну роботу.

На індикаторних діаграмах рис 4.2 процеси розширення й частково 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 0,4-0,6 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-а’.

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 -а’-а.

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» 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 однотипними 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-щілинною 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 те 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?

5 ЧОТИРИТАКТНІ ДВЗ

У поршневих двигунах внутрішнього згоряння, що працюють по чотиритактному циклу, усі процеси здійснюються за чотири ходи поршня або за два оберти колінчатого вала. Їх будують як із зовнішнім, так і із внутрішнім сумішоутворенням.

Залежно від цього, запалення робочої суміші здійснюється в них або від електричної іскри або від тепла, що накопичується в циліндрі при стиску робочого тіла. Із примусовим електричним запалюванням працюють в основному бензинові й газові двигуни, а із запаленням від стиску – дизелі.

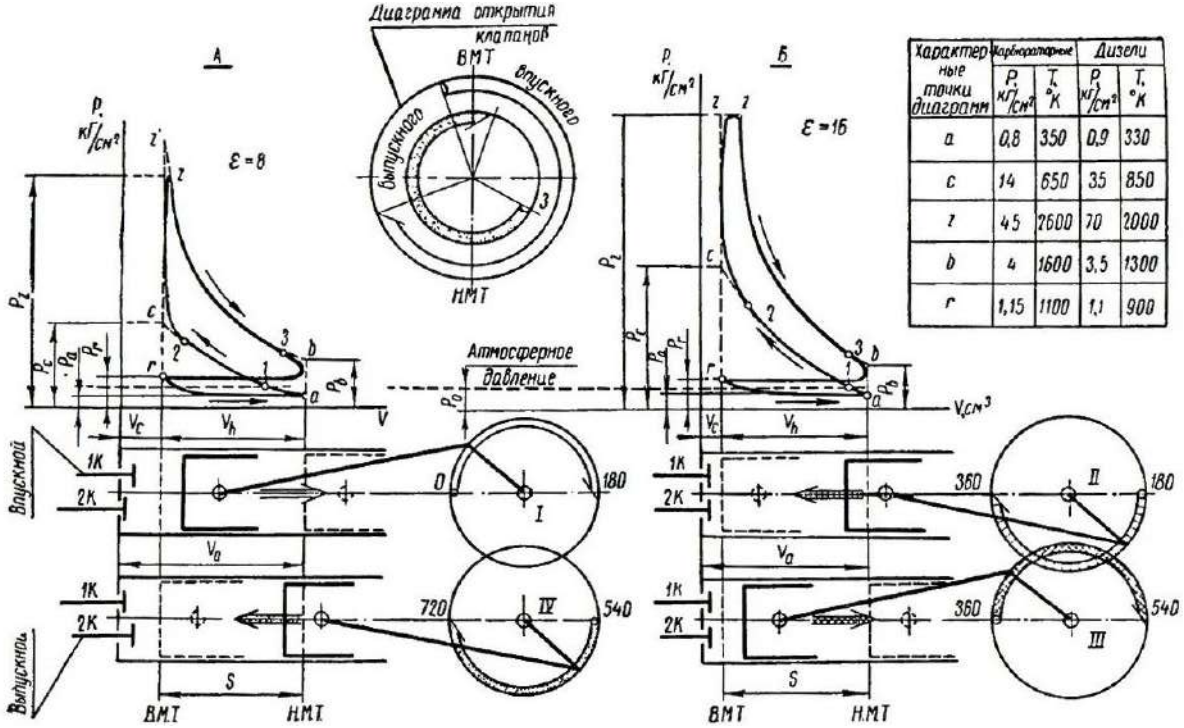
У двигунах із примусовим запалюванням (бензинових та інших) величина ступеня стиску вибирається так, щоб при даному виді палива в циліндрах не виникало довільне запалення (самозапалювання) робочої суміші.

У дизелях, навпаки, робоче тіло стискають із розрахунку, щоб до моменту подачі палива температура в циліндрі була вище температури самозапалювання палива.

Таким чином, при використанні того самого робочого циклу умови протікання окремих процесів у циліндрах чотиритактних двигунів різко різняться залежно від прийнятого способу сумішоутворення. У цьому можна переконатися, наприклад, по величинах тисків, що виникають у циліндрі, які прийнято зображувати у вигляді діаграм.

Такі діаграми, одержувані за допомогою спеціального приладу – індикатору, називаються індикаторними. Індикаторні діаграми (рис. 5.1) будують у координатах pV (залежність тиску в циліндрі від об'єму його надпоршневої порожнини).

Щоб підвищити наочність у розглянутому випадку, для бензинового двигуна й дизеля, прийняті однакові розміри (зокрема, хід поршня S), а самі діаграми побудовані в однаковому масштабі. Значення середніх величин тисків і відповідних температур у вузлових точках обох діаграм А – бензинового двигуна й Б – дизеля зведені в загальну таблицю (рис. 5.1); тут же наведена так звана кругова діаграма фаз газорозподілу. Ця діаграма характеризує тривалість відкриття клапанів, виражену в градусах повороту колінчатого вала й момент їх відкриття й закриття щодо мертвих точок.



Характерные точки диаграмм	Карбюраторные		Дизели	
	P, кГ/см²	T, °К	P, кГ/см²	T, °К
a	0,8	350	0,9	330
c	14	650	35	850
z	45	2600	70	2000
b	4	1600	3,5	1300
r	1,15	1100	1,1	900

I – впуск, II – стиск, III – розширення, IV – випуск,
А – індикаторна діаграма бензинового двигуна, Б-Дизеля
Рисунок 5.1 – Схема роботи чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння

Кругова діаграма, як і діаграми тисків у циліндрі, полегшують вивчення особливостей протікання робочого циклу в різних двигунах.

5.1 Робочий цикл у чотиритактних двигунах

І такт – такт впуску в чотиритактних двигунах починається з руху поршня від верхньої мертвої точки до нижньої мертвої точки. Хід впуску здійснюється поршнем за рахунок повороту колінчатого вала двигуна на кут від 0 до 180º (рис. 5.1, А – положення І).

У працюючому двигуні до початку ходу впуску об'єм камери стиску Vc заповнений залишковими газами, що перебувають під тиском приблизно 0,105-0,12 Мн/м^2 (точка r на діаграмах А и Б). У міру віддалення поршня від в.м.т. і збільшення об'єму надпоршневої порожнини, тиск у циліндрі зменшується, рівняється з атмосферним p_0 а потім стає нижче атмосферного.

Тому що перед початком руху поршня впускний клапан 1К за допомогою механізму газорозподілу є вже відкритий, то під дією перепаду тисків p_0-p_a горюча суміш (у бензинових і газових двигунах) або чисте повітря (у дизелях) спрямовуються в циліндр і заповнюють його надпоршневу порожнину.

На діаграмах А и Б процес впуску зображений лінією r-a. Середній тиск на впуску p_a звичайно становить 0,07-0,095 Мн/м^2 і залежить від наступних факторів: опору трубопроводів і приладів системи впуску, величини прохідного отвору в клапана, числа обертів колінчатого вала, ступеня підігріву свіжого заряду, від інерційних і хвильових рухів газу в трубопроводах і т.п.

Оскільки в циліндри дизеля надходить атмосферне повітря, то немає опору потоку повітря, а величина p_a виходить при цьому трохи більше, ніж у циліндрах бензинових двигунів.

Свіжий заряд що надходить у циліндр, стикається з нагрітими стінками впускного тракту й надпоршневої порожнини циліндра, а також змішується з гарячими залишковими газами, температура яких рівняється приблизно 1000° К (рис. 5.1, позиція r у табл.), внаслідок чого температура в циліндрі наприкінці ходу поршня (у точці а діаграм) становить 330-380° К.

Наповнення циліндрів оцінюється коефіцієнтом наповнення, рівним відношенню ваги свіжого заряду, що фактично надійшов

в циліндр, до його ваги при рівних тиску й температурі в циліндрі й у навколишньому середовищі. Однак у силу гідравлічного опору впускного тракту, практично це не здійсненне, тому величина коефіцієнта наповнення завжди буває менше одиниці.

Для сучасних двигунів, що працюють у режимі номінальної потужності (на яку вони розраховуються), коефіцієнт наповнення для бензинових двигунів коливається в межах 0,75-0,85. У двигунах із внутрішнім сумішоутворенням коефіцієнт наповнення завжди буває вище, ніж у бензинових двигунах внаслідок меншого опору впускного тракту й досягає величини 0,9.

Тому що потужність двигуна залежить від вагового наповнення циліндрів, то для поліпшення наповнення ухвалюють ряд заходів. Наприклад, впускний клапан 1К відкривають із цією метою з випередженням на 5-20° кута повороту колінчатого вала, тобто ще до початку ходу впуску, а закривають із запізнюванням на 40-70° і більше, коли поршень мине н.м.т.

Колінчатий вал просуває поршень убік в.м.т., тобто здійснюється хід стиску (рис. 5.1, положення II). Отже, тривалість відкриття впускного клапана буває значно більше 180º, тобто більше кута повороту кривошипа вала, за який поршень робить хід впуску від в.м.т. до н.м.т. (рис. 5.1, положення I).

Деяке випередження відкриття впускного клапана дозволяє краще використовувати мінливий по величині прохідний перетин клапанного отвору, а необхідність у запізнюванні закриття цього клапана виявляється з індикаторних діаграм А і Б.

Дійсно, наприкінці ходу впуску в точці а тиск у циліндрі p_a буває нижче атмосферного тиску p_0, тому циліндр може наповнюватися ще й після того, як поршень змінить напрямок свого руху, поки тиск у циліндрі не досягне рівня, відзначеного на розглянутих діаграмах точкою 1. Більше того, у швидкохідних автомобільних двигунах при відповідному швидкісному напорі стовпа горючої суміші або повітря, можлива дозарядка циліндра при тиску, що трохи перевищує тиск у точці 1.

Цей принцип широко використовується в сучасних двигунах, хоча на режимах роботи з малими обертами вала й, отже невеликим швидкісним напором потоку на вході в циліндри в

таких двигунах спостерігається так званий зворотний викид. Через велике запізнювання закриття впускного клапана частина свіжого заряду викидається із циліндра. Таким чином, на ділянці лінії стиску, що примикає до точки 1 (діаграми А і Б), можлива як дозарядка циліндрів, так і зворотний викид частини свіжого заряду. Проте в автомобільних двигунах прагнуть повніше використовувати переваги дозарядки, оскільки це дозволяє без збільшення робочого об'єму циліндрів (літражу) збільшувати потужність двигуна на характерні для автомобіля більших швидкостях руху.

II такт – такт стиску здійснюється при русі поршня від н.м.т. до в.м.т. за рахунок повороту колінчатого вала на кут від 180º до 360° (рис. 5.1, положення II). У початковій стадії ходу стиску, як було показано вище, відбувається стискання робочого тіла й одночасне збільшення його вагового вмісту за рахунок триваючого вступу свіжого заряду, поки тиск у циліндрі двигуна, що працює без наддування, не зрівняється з тиском навколишнього середовища p_0 (точка 1 на діаграмах А і Б).

Далі у зв'язку з можливим подальшим запізнюванням закриття впускного клапана при даному швидкісному режимі роботи двигуна циліндри можуть дозаряджатися, або буде відбуватися зворотний викид. З моменту закриття впускного клапана (рис. 5.1) відбувається стиск робочого тіла в циліндрі доти, поки поршень не досягне в.м.т. Об'єм надпоршневої порожнини дорівнює при цьому об'єму Vc, тобто об'єму камери згоряння.

На діаграмах процес стиску зображений лінією а-с. Стан робочого тіла наприкінці стиску визначається ступенем стиску ε, початковим тиском p_a, якістю ущільнення циліндра тощо. У двигунах із примусовим запалюванням, що працюють без наддування, кінцевий тиск стиску p_c становить 1,2-1,7 Мн/м^2, а в дизелях – 3-4 Мн/м^2) і відповідно температура T_c досягає 600-700°К і 800-900°К (рис. 5.1).

Однак і при цих умовах у циліндрі для запалення палива потрібен якийсь час. Досвід показує, що з найбільшою ефективністю паливо згоряє, якщо заходи до запалення його в циліндрі вживають до приходу поршня у в.м.т. Так у режимі роботи двигуна з номінальною потужністю, подача в циліндри

електричної іскри високої напруги або упорскування палива в дизелях, повинні здійснюватися з випередженням 20-30° по куту повороту колінчатого вала.

На діаграмах А і В моменти подачі іскри (у бензинових двигунах) і упорскування палива (у дизелях) відзначені точкою 2. Але запалення палива (поява відкритого полум'я) виникає трохи пізніше, після закінчення необхідних окисних процесів (так званого періоду індукції).

Про появу відкритого полум'я звичайно судять по більш різкому наростанню тиску в циліндрі в порівнянні з тиском, що характеризується лінією а-с, відповідної до процесу стиску без запалення палива (на діаграмах А і Б рис. 2 – пунктирна ділянка лінії стиску поблизу точки с).

Помітне підвищення тиску над поршнем при підході його до в.м.т. трохи передчасно навантажує кривошипно-шатунний механізм двигуна, однак це необхідно для підвищення ефективності згоряння. Пізніше запалювання (безпосередньо у в.м.т.), так само як і занадто раннє запалення палива, порушує нормальне протікання наступних процесів робочого циклу й приводить до погіршення економічних та показників потужності двигуна.

При пізньому запалюванні через зменшення тиску p_z, що виникає в процесі згоряння, і шкідливому затягуванню цього процесу, при ранньому – внаслідок надмірно великого протитиску на підході поршня до в.м.т. У бензинових двигунах занадто велике випередження подачі іскри служить звичайно причиною виникнення детонаційного згоряння.

Таким чином, хід стиску в початковій стадії сполучається триваючим ще наповненням циліндра, а наприкінці його починається вже процес згоряння палива. Але основним процесом цього ходу є все-гаки процес стиску, тому другий такт роботи чотиритактного двигуна називається тактом стиску.

III такт – такт розширення в чотиритактному двигуні починається при обох закритих клапанах триваючим процесом згоряння, підготовленим наприкінці ходу стиску. Інтенсивне протікання процесу згоряння палива й виділення при цьому великої кількості тепла приводить до різкого підвищення температури й тиску в надпоршневій порожнині.

Під дією тиску газів що розширюються, поршень переміщається від в.м.т. до н.м.т. і через шатун повертає колінчатий вал на кут від 360º до 540º, роблячи корисну роботу (рис. 5.1, положення III).

Хід поршня, відповідний до такту розширення й пов'язаний з виділенням тепла й частковим перетворенням його в механічну роботу, називається робочим ходом. На індикаторних діаграмах А і В процес розширення зображений лінією z – b.

Інтенсивність процесу згоряння на індикаторній діаграмі оцінюється вертикальним відрізком c-z лінії підвищення тиску в циліндрі. У дійсності лінія підвищення тиску на згаданих діаграмах трохи відхиляється вправо від вертикалі c-z, тому що поршень при цьому віддаляється від в.м.т.

Досвід показує, що робота розширення газів найкраще використовується, коли максимальний тиск у циліндрі p_z виникає при положенні поршня, що відповідає приблизно 10-15° кута повороту колінчатого вала від в.м.т.

У цьому випадку, незважаючи на деяке збільшення об'єму надпоршневої порожнини, максимальний тиск у циліндрах двигунів, що працюють без наддування із примусовим запалюванням, становить приблизно 4,0-5,5 Мн/м^2, у дизелях автомобільного типу в межах 5,5-8,0 Мн/м^2, у тепловозних, суднових, стаціонарних та інших двигунах, що працюють із наддуванням, досягає 10 Мн/м^2 і ще більш високих значень.

Тому що в дизелях подача палива закінчується після в.м.т., то в ході розширення поблизу в.м.т. у циліндрі практично підтримується постійний тиск. На індикаторній діаграмі Б ця ділянка ходу розширення, зображений лінією z-z' характеризує ступінь попереднього розширення, яке враховують при розрахунках дизелів.

У зв'язку з особливостями протікання процесу згоряння у двигунах із зовнішнім і із внутрішнім сумішоутворенням максимальна температура в їхніх циліндрах у першому випадку досягає 2500-2800°К, а в другому (у дизелях) становить 1900-2200°К (рис. 5.1). У міру віддалення поршня від в.м.т. при ході розширення, тиск і температура в циліндрі знижуються.

Наприкінці ходу розширення (точка b на діаграмах і в таблиці, зображених на рис. 5.1) тиск у циліндрі становить 0,3-0,5

Мн/м^2, а температура 1100º-1800°К. Двигунам з високими ступенями стиску, через порівняно велике розширення відповідають і більш низькі значення зазначених величин.

Для кращого очищення циліндрів від продуктів згоряння (відпрацьованих газів) випускний клапан 2К відкривається значно раніше приходу поршня в н.м.т. Випередження відкриття випускного клапана звичайно становить 40-60° кута повороту колінчатого вала. На індикаторних і круговий діаграмах момент відкриття випускного клапана відзначений точкою 3.

До моменту відкриття клапана в циліндрі зберігається ще досить високий тиск, тому витікання продуктів згоряння в атмосферу відбувається під впливом значного перепаду тисків із критичною звуковою швидкістю, що породжує характерний шум вихлопу, яким супроводжується випуск відпрацьованих газів, у поршневих двигунах.

Тому що гази випускаються до приходу поршня в.м.т., тиск у циліндрі наприкінці ходу розширення, як можна це бачити на індикаторних діаграмах різко знижується. Це створює сприятливі умови для заключного такту робочого циклу, пов'язаного в чотиритактних двигунах з випуском продуктів згоряння.

Робочий хід поршня сполучається, як було показано, із процесом згоряння й з першою стадією випуску продуктів згоряння, проте основним процесом цього ходу й такту є процес розширення.

IV такт – такт випуску починається (при трохи відкритому 5 же випускному клапані 2К) рухом поршня від н.м.т. до в.м.т. під впливом колінчатого вала, що робить поворот на кут від 540 до 720° (рис. 5.1, положення IV).

За хід випуску поршень виштовхує, відпрацьовані гази із циліндра в атмосферу, завершуючи цим другу примусову стадію очищення циліндра. На індикаторних діаграмах А і Б процес випуску зображений лінією b-r. Через опір клапанного отвору й трубопроводів випускної системи тиск у циліндрі при завершенні поршнем ходу випуску залишається вище атмосферного й становить у середньому 0,105-0,12 Мн/м^2. Температура газів до кінця випуску знижується, але все-таки для різних двигунів становить 850-1200°К.

Якщо зіставити загальну тривалість відкриття випускного

клапана, виражену у градусах кута повороту колінчатого вала (рис. 5.1, кругова діаграма), з кутом повороту кривошипа, за який поршень робить хід випуску (рис. 5.1, положення IV), то легко можна виявити, що клапан тримається відкритим майже в 1,5 рази довше, чим відбувається сам хід випуску.

Проте, повністю очистити циліндри від продуктів згоряння, як відзначалося вже, не вдається. В обсязі камери стиску вони завжди залишаються, тому їх називають залишковими газами. Щоб звести до мінімуму кількість залишкових газів, випускний клапан закривають із деяким запізнюванням, що досягають іноді 20 і більш градусів кута повороту колінчатого вала, тобто клапан залишається відкритим, коли поршень починає вже хід впуску.

Таким чином, між двома суміжними робочими циклами одночасно бувають відкриті обидва клапани. Це положення називають перекриттям клапанів. В існуючих поршневих двигунах перекриття клапанів становить 40 і більш градусів кута повороту колінчатого вала. Але помітного перетікання газів не спостерігається, тому що клапани при цьому відкриті на дуже малу величину.

Випуск є четвертим заключним тактом робочого циклу в чотиритактних двигунах. За випуском знову починається впуск – перший такт, і робочий цикл повторюється в розглянутій послідовності, причому впускний і випускний клапани, як було встановлено, відкриваються всього по одному разу за всі чотири такти, на які витрачається два оберти колінчатого вала.

Отже, вал механізму газорозподілу, керуючий у чотиритактних двигунах своєчасним відкриттям і закриттям клапанів при впуску в циліндр свіжого заряду й випуску з нього відпрацьованих газів, повинен обертатися зі швидкістю, у два рази меншої швидкості обертання колінчатого вала.

Отже, у двигунах, що працюють по чотиритактному циклу, корисна робота відбувається тільки в період такту розширення, коли поршень переміщається під дією газів, що розширюються, повертаючи колінчатий вал на 180º, тобто всього на півоберту.

Інші три такти є підготовчими й виконуються при повертанні колінчатого вала на 540º, або на півтора оберти за рахунок інерції маховика й роботи інших циліндрів (у багатоциліндрових двигунах). Таке співвідношення між чотирма ходами поршня є

причиною нерівномірності обертання вала, тобто нерівномірності ходу двигуна.

Однак один з підготовчих ходів поршня (хід стиску) необхідний для підвищення термічного коефіцієнта корисної дії двигуна. А в продовженні двох ходів (впуску й випуску) чотиритактний двигун працює як насос при низьких тисках у циліндрі.

Таким чином, чотиритактні двигуни тільки половину часу працюють як теплові двигуни. Проте, чотиритактні двигуни мають гарну економічність, велику надійність та інші позитивні якості, тому вони одержали особливо широке поширення.

Питання для самоперевірки

1. Опишіть робочий цикл поршневого чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння.
2. Охарактеризуйте індикаторні, механічні те ефективні показники робочого циклу чотиритактного двигуна.
3. Що показує індикаторна діаграма двигуна?
4. Що є обов’язковою умовою безперебійної роботи двигуна?
5. Які ще системи обов’язково наявні у двигуні?
6. Чому чотиритактні двигуни одержали найбільше поширення?

6 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ БЕНЗИНОВИХ ДВЗ

Серед поршневих двигунів внутрішнього згоряння в наш час найпоширенішим є бензиновий двигун. У бензиновому двигуні запалення паливно-повітряної суміші відбувається примусово, за рахунок електричної іскри.

Основними напрямками вдосконалювання бензинових двигунів є зниження витрати палива, токсичності відпрацьованих газів, підвищення потужності двигуна.

Для реалізації цих вимог на сучасних бензинових двигунах застосовуються ряд систем: безпосереднього упорскування, вдосконалені впускна й випускна системи, турбонаддув, зміни фаз газорозподілу, електронне запалювання паливної суміші, система рециркуляції відпрацьованих газів, електронне управління роботою двигуна.

Система безпосереднього упорскування – забезпечує упорскування палива безпосередньо в камеру згоряння. Залежно від режиму роботи двигуна регулюється кількість палива що впорскується, момент упорскування й утворюються різні види паливно-повітряної суміші (пошарова, гомогенна, стехіометрична гомогенна).

У сучасній впускній системі як правило наявна дросельна заслінка з електричним приводом і впускними заслінками на кожний циліндр. Впускні заслінки розділяють потік повітря на два канали – вільний, й перекриваний заслінкою. Закриті впускні заслінки забезпечують пошарове сумішоутворення за рахунок вихрового руху повітря в камері згоряння.

Турбонаддув є досить ефективною системою підвищення потужності бензинового двигуна, що ґрунтується на стиску усмоктуваного повітря за допомогою енергії відпрацьованих газів. Разом з тим, застосування турбонаддуву на бензинових двигунах обмежене можливістю настання детонації.

Система зміни фаз газорозподілу забезпечує ефективну роботу газорозподільного механізму в різних режимах роботи двигуна (холостий хід, низькі оберти, високі оберти). У різних

конструкціях систем ефект досягається за рахунок зміни моменту відкриття (закриття) клапанів, тривалості їх відкриття, а також висоти їхнього підйому.

Найбільш досконалою системою запалення паливно-повітряної суміші бензинового двигуна є електронна система запалювання, у якій створення й розподіл струму високої напруги по циліндрах двигуна здійснюється за допомогою електронних компонентів – датчиків і блоку управління.

Випускна система крім випуску відпрацьованих газів, у значній мірі також знижує їхню токсичність. Цю функцію в системі виконує каталітичний нейтралізатор, що працює під керуванням кисневого датчика – лямбда-зонда.

Зниженню токсичності відпрацьованих газів, сприяє система рециркуляції відпрацьованих газів. Система зменшує вміст у відпрацьованих газах, оксиду азоту шляхом повернення їх частини у впускний колектор.

Система управління двигуном поєднує роботу всіх перерахованих систем, забезпечуючи їх оптимальне функціонування на всіх режимах роботи двигуна.

Далі розглянемо більш детально конструктивні особливості вказаних систем сучасних бензинових двигунів серійних автомобілів.

6.1 Система безпосереднього впорску палива

Система безпосереднього упорскування палива є найсучаснішою системою упорскування палива бензинових двигунів. Робота системи заснована на упорскуванні палива безпосередньо в камеру згоряння двигуна.

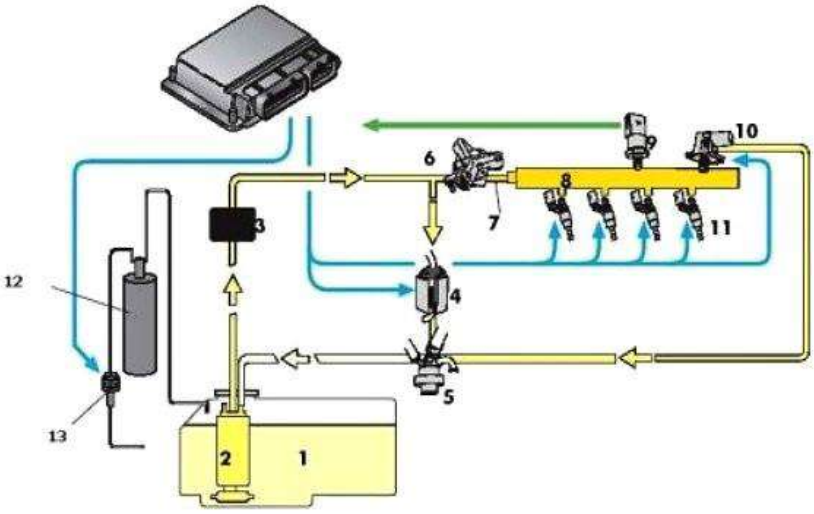
Вперше система безпосереднього упорскування була застосована на двигуні GDI (Gasoline Direct Injection – безпосереднє упорскування бензину), встановлюваному на автомобілі компанії Mitsubishi. У цей час система безпосереднього упорскування використовується у двигунах багатьох автовиробників. Найбільш часто такі системи використовуються на автомобілях Audi (двигуни TFSI) і Volkswagen (двигуни FSI, TSI), які практично повністю перейшли на бензинові двигуни з безпосереднім упорскуванням.

Двигуни з безпосереднім упорскуванням також мають у

своєму активі компанії BMW (двигуни N54, N63), Infiniti (двигуни M56), Ford (двигуни Ecoboost), General Motors (двигуни Ecotec), Hyundai (двигуни Theta), Mazda (двигуни Skyactiv), Mercedes-Benz (двигуни CGI).

Застосування системи безпосереднього упорскування дозволяє досягти до 15 % економії палива, а також скорочення викиду шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Конструкцію системи безпосереднього упорскування палива розглянемо на прикладі системи, установлюваної на двигуни FSI (Fuel Stratified Injection – пошарове упорскування палива).



1 – паливний бак, 2 – паливний насос, 3 – паливний фільтр,
4 – перепускний клапан, 5 – регулятор тиску палива,
6 – паливний насос високого тиску, 7 – трубопровід високого тиску,
8 – розподільний трубопровід, 9 – датчик високого тиску,
10 – запобіжний клапан, 11 – форсунки упорскування,
12 – адсорбер, 13 – електромагнітний запірний клапан
продувки адсорбера

Рисунок 6.1 – Схема системи упорскування Motronic MED7

Система безпосереднього упорскування містить у собі контур високого тиску паливної системи двигуна й включає

паливний насос високого тиску, регулятор тиску палива, паливну рампу, запобіжний клапан, датчик високого тиску й форсунки упорскування.

Паливний насос високого тиску служить для подачі палива до паливної рампи й далі до форсунок упорскування під високим тискам (3-11 МПа) відповідно до потреб двигуна. Основу конструкції насоса складає один або кілька плунжерів. Насос приводиться в дію від розподільного валу впускних клапанів.

Регулятор тиску палива забезпечує дозовану подачу палива насосом відповідно до упорскування форсунки. Регулятор розташований у паливному насосі високого тиску.

Паливна рампа служить для розподілу палива по форсунках упорскування й запобігання пульсації палива в контурі.

Запобіжний клапан захищає елементи системи упорскування від граничних тисків, що виникають при температурному розширенні палива. Клапан установлюється на паливній рампі.

Датчик високого тиску призначений для виміру тиску в паливній рампі. Відповідно до сигналів датчика блок управління двигуном може змінювати тиск у паливній рампі. Форсунка упорскування забезпечує розпилення палива в камері згоряння для утвору паливно-повітряної суміші.

Погоджену роботу системи забезпечує електронна система управління двигуном, яка є подальшим розвитком об'єднаної системи упорскування й запалювання. Традиційно система управління двигуном поєднує вхідні датчики, блок управління й виконавчі механізми.

Крім датчика високого тиску палива в інтересах системи безпосереднього упорскування працюють датчик частоти обертання колінчатого вала, датчик положення розподільного вала, датчик положення педалі акселератора, витратомір повітря, датчик температури охолодної рідини, датчик температури повітря на впуску.

У сукупності датчики забезпечують необхідною інформацією блок управління двигуном, на підставі якої блок впливає на виконавчі механізми – електромагнітні клапани форсунок, запобіжний і пропускний клапани.

6.2 Принцип дії системи безпосереднього упорскування палива

Система безпосереднього упорскування в результаті роботи забезпечує кілька видів сумішоутворення:

- пошарове;
- стехіометричне гомогенне;
- гомогенне.

Різноманіття в сумішоутворенні визначає високу ефективність використання палива (економія, якість утвору суміші, її повне згоряння, збільшення потужності, зменшення шкідливих викидів) на всіх режимах роботи двигуна.

Пошарове сумішоутворення використовується при роботі двигуна на малих і середніх обертах і навантаженнях.

Стехіометричне (інше найменування – легкозаймисте) гомогенне (інше найменування – однорідне) сумішоутворення застосовується при високих обертах двигуна й великих навантаженнях. На бідній гомогенній суміші двигун працює в проміжних режимах.

При пошаровому сумішоутворенні дросельна заслінка майже повністю відкрита, впускні заслінки закриті. Повітря надходить у камери згоряння з великою швидкістю, з утвором повітряного вихру. Упорскування палива проводиться в зону свічі запалювання наприкінці такту стиску.

За нетривалий час до запалення в районі свічі запалювання утворюється паливно-повітряна суміш із коефіцієнтом надлишку повітря від 1,5 до 3. При запаленні суміші навколо неї залишається досить багато чистого повітря, яке виступає в ролі теплоізолятора.

Гомогенне стехіометричне сумішоутворення відбувається при відкритих впускних заслінках, дросельна заслінка при цьому відкривається відповідно до положення педалі газу. Упорскування палива проводиться на такті впуску, що сприяє утвору однорідної суміші. Коефіцієнт надлишку повітря становить 1. Суміш запалюється й ефективно згоряє в повному об’ємі камери згоряння.

Бідна гомогенна суміш утворюється при максимально відкритій дросельній заслінці й закритими впускними заслінками.

При цьому створюється інтенсивний рух повітря в циліндрах. Упорскування палива проводиться на такті впуску. Коефіцієнт надлишку повітря підтримується системою керування двигуном на рівні 1,5. При необхідності до складу суміші додаються відпрацьовані гази з випускної системи, вміст яких може доходити до 25 %.

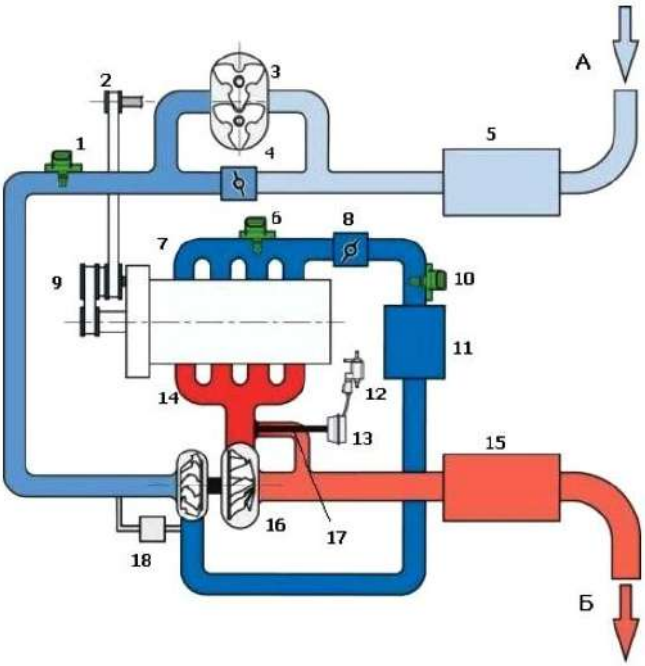
Двигун **TSI** (**Turbo Stratified Injection**, дослівно – турбонаддув і пошарове упорскування) поєднує останні досягнення конструкторської думки – безпосереднє упорскування палива і турбонаддув. Концерн Volkswagen розробив і пропонує на своїх автомобілях лінійку двигунів TSI, що різняться по конструкції, обсягу двигуна, показникам потужності. У конструкції двигунів TSI виробником реалізовано два підходи: подвійне наддування й просто турбонаддув. Абревіатура TSI є запатентованим товарним знаком концерну Volkswagen.

Подвійне наддування двигуна TSI здійснюється залежно від потреби двигуна двома пристроями: механічним нагнітачем і турбокомпресором. Комбіноване застосування даних пристроїв дозволяє реалізувати номінальний крутний момент у широкому діапазоні обертів двигуна.

У конструкції двигуна використовується механічний нагнітач типу Roots. Він являє собою два ротори певної форми, поміщених у корпус. Ротори обертаються в протилежні сторони, чим досягається усмоктування повітря з одного боку, стиск і нагнітання – з іншого. Механічний нагнітач має ремінний привод від колінчатого вала. Привод активізується за допомогою магнітної муфти. Для регулювання тиску наддування паралельно компресору встановлена регулювальна заслінка.

На двигуні TSI з подвійним наддуванням установлений стандартний турбокомпресор. Охолодження наддувочного повітря здійснюється інтеркулером повітряного типу.

Ефективну роботу подвійного наддування забезпечує система управління двигуном, яка крім електронного блоку поєднує вхідні датчики (тиску у впускному трубопроводі, тиску наддування, тиску у впускному колекторі, потенціометр регулюючої заслінки) і виконавчі механізми (магнітну муфту, серводвигун регулюючої заслінки, клапан обмеження тиску наддування, клапан рециркуляції турбокомпресора).



А – повітря, Б – відпрацьовані гази
1 – датчик тиску у впускному трубопроводі з датчиком температури повітря, 2 – привод компресора, 3 – механічний нагнітач, 4 – регулююча заслінка, 5 – повітряний фільтр, 6 – датчик тиску у впускному колекторі з датчиком температури повітря, 7 – впускний колектор, 8 – дросельна заслінка, 9 – магнітна муфта, 10 – датчик тиску наддування з датчиком температури повітря, 11 – інтеркулер, 12 – клапан обмеження тиску наддування, 13 – вакуумний привод, 14 – випускний колектор, 15 – каталітичний нейтралізатор, 16 – турбокомпресор, 17 – перепускний клапан, 18 – клапан рециркуляції турбокомпресора

Рисунок 6.2 – Схема подвійного наддування двигуна TSI

Датчики відслідковують тиск наддування в різних місцях системи: після механічного нагнітача, після турбокомпресора й після інтеркулера. Кожний з датчиків тиску об’єднаний з датчиками температури повітря.

Магнітна муфта включається по сигналах блоку управління

двигуном, при яких на магнітну котушку подається напруга. Магнітне поле притягає фрикційний диск і замикає його зі шківом. Механічний компресор починає обертатися. Робота компресора проводиться доти, поки на магнітну котушку подається напруга.

Серводвигун повертає регулюючу заслінку. При закритій заслінці все усмоктуване повітря проходить через компресор. Регулювання тиску наддування механічного компресора проводиться шляхом відкриття заслінки. При цьому частина стисненого повітря подається знову в компресор, а тиск наддування знижується. При непрацюючому компресорі заслінка повністю відкрита.

Клапан обмеження тиску наддування спрацьовує, коли енергія відпрацьованих газів створює надлишковий тиск наддування. Клапан забезпечує роботу вакуумного привода, який у свою чергу відкриває перепускний клапан. Частина відпрацьованих газів іде повз турбіну.

Клапан рециркуляції турбокомпресора забезпечує роботу системи на примусовому холостому ході (при закритій дросельній заслінці). Він запобігає створенню надлишкового тиску в проміжку між турбокомпресором і закритою дросельною заслінкою.

6.3 Принцип роботи подвійного наддуву двигуна TSI

Залежно від частоти обертання колінчатого вала двигуна (навантаження) розрізняють наступні режими роботи системи подвійного наддування:

- безнаддувний режим (до 1000 об/хв);
- робота механічного нагнітача (1000-2400 об/хв);
- спільна робота нагнітача й турбокомпресора (2400-3500 об/хв);
- робота турбокомпресора (понад 3500 об/хв).

На холостих обертах двигун працює у безнаддувному режимі. Механічний нагнітач виключений, регулююча заслінка відкрита. Енергія відпрацьованих газів невелика, турбокомпресор не створює тиску наддування.

З ростом числа обертів, включається механічний нагнітач і закривається регулююча заслінка. Тиск наддування, в основному,

створює механічний нагнітач (0,17 МПа). Турбокомпресор забезпечує невеликий додатковий стиск повітря.

При частоті обертання колінчатого вала двигуна в межі 2400-3500 об/хв тиск наддування створює турбокомпресор. Механічний нагнітач підключається при необхідності, наприклад, при різкому прискоренні (різкому відкритті дросельної заслінки). Тиск наддування може досягати 0,25 МПа.

Далі робота системи здійснюється тільки за рахунок турбокомпресора. Механічний нагнітач виключений. Регулююча заслінка відкрита. Для запобігання детонації з ростом числа обертів тиск наддування трохи падає. При частоті обертання 5500 об/хв він становить порядку 0,18 МПа.

6.4 Турбонаддув двигуна TSI

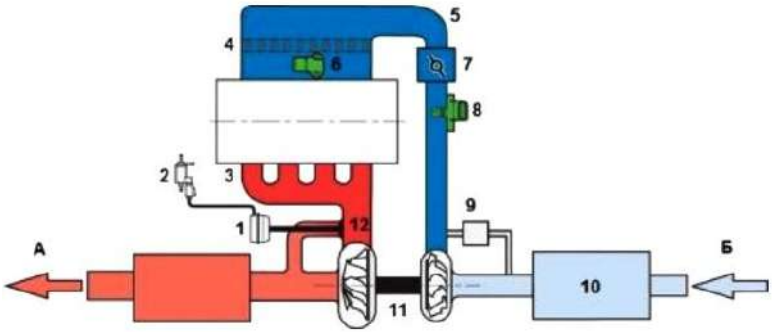
У даних двигунах наддування здійснюється винятково турбокомпресором. Конструкція турбокомпресора забезпечує досягнення номінального крутного моменту вже при низьких обертах двигуна й підтримує його в широкій межі (від 1500 до 4000 об/хв). Видатні характеристики турбокомпресора отримані за рахунок максимального зниження інерції обертових частин: зменшений зовнішній діаметр робочого колеса турбіни й компресора.

Регулювання наддування в системі традиційно здійснюється за допомогою пропускного клапана. Клапан може мати пневматичний або електричний привод. Роботу пневматичного привода забезпечує електромагнітний клапан обмеження тиску наддування. Електричний привод представлений електричним напрямним пристроєм, що складається із електродвигуна, зубчастої передачі, важільного механізму й датчика положення пристрою.

У двигуні з турбонаддувом, на відміну від подвійного наддування, використовується рідинна система охолодження наддувочного повітря. Вона має незалежний від системи охолодження двигуна контур і утворює з нею двоконтурну систему охолодження.

Система охолодження наддувочного повітря включає: охолоджувач наддувочного повітря, насос, радіатор і систему трубопроводів. Охолоджувач наддувочного повітря розміщений у

впускному колекторі. Охолоджувач складається з алюмінієвих пластин, через які проходять труби системи охолодження.



А – повітря, Б – гази, що відробили
1 – вакуумний привод, 2 – електромагнітний клапан обмеження тиску наддування, 3 – випускний колектор, 4 – охолоджувач наддувочного повітря, 5 – впускний колектор, 6 – датчик тиску у впускному колекторі з датчиком температури повітря, 7 – модуль дросельної заслінки, 8 – датчик тиску наддування з датчиком температури повітря, 9 – клапан рециркуляції турбокомпресора, 10 – повітряний фільтр, 11 – турбокомпресор, 12 – перепускний клапан

Рисунок 6.3 – Схема турбонаддуву двигуна TSI

Охолодження наддувочного повітря проводиться по сигналу блоку керування двигуном включенням насоса. Потік нагрітого повітря проходить через пластини, віддає їм тепло, а ті, у свою чергу, віддають його рідині. Охолодна рідина рухається по контуру за допомогою насоса, прохолоджується в радіаторі й далі по колу.

6.5 Механічний нагнітач повітряу двигун

Механічний нагнітач – це основний конструктивний елемент системи механічного наддування. За допомогою нагнітача у впускному тракті створюється тиск вище атмосферного, а механічний він тому, що привод робочого органа здійснюється безпосереднього від колінчатого вала двигуна. За рубежем механічний нагнітач називають одним словом – **supercharger**.

Застосування механічного нагнітача забезпечує підвищення потужності (до 50 %) і крутного моменту (до 30 %) двигуна. Разом з тим, механічний нагнітач відрізняють значні витрати потужності двигуна на привод, які можуть досягати 30%.

Механічний нагнітач виконує наступні взаємозалежні функції: втягування повітря, стиск повітря й нагнітання повітря у впускну систему. Втягування повітря відбувається за допомогою створеного розрядження.

Для того щоб створити тиск, нагнітач повинен обертатися швидше ніж двигун. Нагнітання повітря у впускний тракт здійснюється за рахунок різниці тисків у системі.

Повітря має властивість нагріватися при стиску, при цьому знижується його щільність і відповідно тиск. Тому в системах наддування стиснене повітря прохолоджується за допомогою спеціального повітряного або рідинного охолоджувача – інтеркулера.

Механічний нагнітач конструктивно може мати один з наступних приводів:

- прямий привод (безпосереднє кріплення нагнітача на фланець колінчатого вала);
- ремінний привод (різні види ременів – клиновий, зубчастий, плаский);
- ланцюговий привод;
- зубчаста передача (циліндричний редуктор);
- електричний привод (окремий електродвигун).

На сучасних автомобілях застосовуються три основні типи механічних нагнітачів: кулачковий (нагнітач Roots), гвинтовий (нагнітач Lysholm) і відцентровий.

Кулачковий нагнітач є самим старим типом механічного нагнітача, тому що використовується на автомобілях з 1900 року. Має іншу назву по імені винахідників – нагнітач Roots; його повсякденна назва «повітродувка».

Сучасний кулачковий нагнітач має два трьох- або чотирьохкулачкових ротора, які обертаються назустріч один одному. Кулачки розташовані по спіралі на всій довжині ротора. Кут закручення кулачків забезпечує максимальну ефективність у плані нагнітання й втрат.



Рисунок 6.4 – Механічний нагнітач типу Ruts

По конструкції й принципу дії кулачковий нагнітач дуже схожий на шестеренний масляний насос. Повітря в нагнітачі захоплюється кулачками, переміщається в просторі між кулачками й стінками корпуса, нагнітається у впускний трубопровід. Має місце так зване зовнішнє нагнітання.

Нагнітач Roots характеризує швидке створення необхідного тиску наддування, а також ріст цього тиску зі збільшенням частоти обертання колінчатого вала. Разом з тим у певний момент може утворюватися надлишок тиску, і як наслідок – затори в нагнітальному каналі, зниження потужності двигуна.

Тому при використанні механічних нагнітачів усіх типів здійснюється регулювання тиску наддування.

Регулювання тиску наддування проводиться двома способами:

- відключенням нагнітача (наприклад, за допомогою електромагнітної муфти);
- перепусканням повітря при безперервній роботі нагнітача (за допомогою перепускного клапана).

Сучасні системи механічного наддування мають електронне регулювання наддування, яке включає вхідні датчики (датчик тиску наддування, датчик температури у впускному колекторі та ін.), електронний блок управління, виконавчі механізми (електромеханічний модуль привода перепускного клапана, електромагнітні муфти та ін.).

Нагнітачі Roots мають досить високу вартість, обумовлену

малими допусками у виготовленні. Вони висувають підвищені вимоги до чистоти подаваного повітря, тому що сторонній предмет у впускній системі може привести до виходу з ладу нагнітача. Необхідно відзначити велику вагу нагнітача й високий рівень шуму при його роботі. Виробники досить ефективно борються із шумом. Для цього вони використовують спеціальні конструкції корпуса, демпфіруючі пластини, резонатори, демпфери тощо.

Провідним виробником нагнітачів Roots є фірма Eaton, яка в цей час пропонує високоефективні чотирьохкулачкові нагнітачі TVS, Twin Vortices Series (дослівно – спарена серія вихрів). Дані нагнітачі встановлюються на серійні двигуни автомобілів Cadillac, Toyota, Audi. На деяких двигунах кулачкові нагнітачі використовуються разом з турбонагнітачами, наприклад подвійне наддування двигуна TSI.

Гвинтовий нагнітач (інше найменування по імені винахідника – нагнітач Lysholm) по конструкції схожий на нагнітач Roots. Нагнітач включає два ротори-шнека спеціальної форми (один ротор с виступами, інший – з вилученнями). Ротори мають конічну форму, при якій повітряні камери між роторами зменшуються в розмірі по довжині.

Порція повітря захоплюється шнеками, переміщається й стискується при обертанні шнеків і нагнітається у впускний патрубок. На відміну від кулачкових нагнітачів гвинтовий нагнітач забезпечує внутрішнє (тобто між шнеків) нагнітання повітря, яке більш ефективно. Але ціна гвинтових нагнітачів значно більша, тому й застосовуються вони рідше, в основному на дорогих спортивних автомобілях.

Відцентровий нагнітач у частині нагнітання повітря аналогічний турбокомпресору. Основу нагнітача становить робоче колесо (крильчатка), яке обертається з високою швидкістю (порядку 50000-60000 об/хв).

Повітря засмоктується в центральну частину колеса. Відцентрова сила направляє повітря по лопатах спеціальної форми назовні. З робочого колеса він виходить на великій швидкості й з низьким тиском. При виході повітря зустрічається з дифузором, що має безліч стаціонарних лопаток навколо робочого колеса. Високошвидкісний потік повітря низького

тиску перетворюється в потік повітря низької швидкості й високого тиску. Відцентрові нагнітачі найпоширеніші з усіх механічних нагнітачів. Вони компактні, легкі, ефективні, мають можливість різноманітного кріплення на двигуні. До недоліків відцентрових нагнітачів слід віднести залежність продуктивності від швидкості обертання колінчатого вала.

Ця якість відцентрових нагнітачів припускає використання привода зі змінним передатним відношенням. Максимальне передатне відношення привода потрібне при низьких обертах двигуна, мінімальне – при високих обертах.

Область застосування механічних нагнітачів досить широка: спортивні й серійні автомобілі, а також тюнінг автомобілів. Практично всі спортивні автомобілі використовують механічні нагнітачі – це їх основне застосування. Установка механічних нагнітачів є одним з напрямків тюнінгу автомобілів.

Виробники пропонують комплекти, що включають необхідні конструктивні елементи для установки на двигун. На серійних автомобілях механічні нагнітачі зустрічаються досить рідко.

У силу своєї конструкції нагнітачі Roots і Lysholm застосовуються для забезпечення високої розгінної динаміки, відцентрові нагнітачі ефективні в підтримці високих швидкостей.

6.6 Інтеркулер – проміжне охолодження повітря

У двигунах, обладнаних турбонаддувом, усмоктуване повітря стискується зі збільшенням щільності. Разом з тим, термодинамічний ефект від стиску повітря приводить до збільшення температури до 200°С. Цьому сприяє й сам турбокомпресор, що нагрівається відпрацьованими газами.

При нагріванні щільність повітря знижується й відповідно знижується тиск наддування. У бензинових двигунах, крім цього, гаряче повітря збільшує ймовірність настання детонації, а у відпрацьованих газах у великій кількості утворюються оксиди азоту. Для охолодження повітря, що надходить від турбокомпресора, застосовується інтеркулер (intercooler, дослівно – проміжний охолоджувач, інша назва – охолоджувач наддувочного повітря). Інтеркулер забезпечує охолодження повітря до 50-60°С, чим досягається краще наповнення циліндрів і відповідно збільшується потужність двигуна.

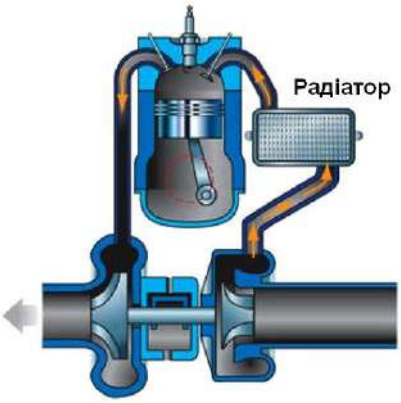


Рисунок 6.5 – Проміжне охолодження повітря

Як показує практика, зниження температури наддувочного повітря на 10°С дає близько 3% приросту потужності. При цьому горіння паливно-повітряної суміші стає більш ефективним, підвищується паливна економічність і зниження шкідливих викидів. В цілому ефект від використання інтеркулера становить порядку 20% підвищення потужності двигуна.

Але не все так гладко із застосуванням інтеркулера. Прохолоджуючи наддувочне повітря, інтеркулер створює перешкоду для цього повітря, а виходить, знижується тиск наддування. Тому інтеркулер у системі турбонаддуву це завжди компроміс ефекту й втрат для досягнення цього ефекту.

За принципом охолодження наддувочного повітря розрізняють два типи охолоджувачів: повітряного охолодження й водяного охолодження. Завдяки своїй простоті найбільше поширення одержали проміжні охолоджувачі повітряного типу.

Інтеркулер установлюється між компресором і впускним колектором. Конструктивно охолоджувач являє собою теплообмінник, що складається із системи труб й пластин між ними.

Труби змінюють свій напрямок по довжині, чим досягається збільшення загальної довжини теплообмінника й краще охолодження повітря. З іншої сторони кожний вигин труби являє собою перешкоду для повітря й приводь до зниження тиску наддування. Пластини збільшують площу поверхні інтеркулера й забезпечують кращу тепловіддачу. У якості матеріалу для труб і пластин використовується алюміній що володіє високою теплопровідністю. Рідше застосовується мідь.

Інтеркулер повітряного типу встановлюється у вільному місці в підкапотному просторі:

- у центральній частині за переднім бампером (у бампері виконується відповідний виріз);
- над двигуном під капотом (у капоті виконується повітрозабірник спеціальної форми);
- у бічній частині передніх крил ліворуч і праворуч (у крилах виконуються повітрозабірники спеціальної форми).

Створення інтеркулера для потреб конкретного двигуна полягає у визначенні безлічі конструктивних параметрів: фронтальна площа теплообмінника, внутрішній прохідний перетин, внутрішній об'єм, товщина теплообмінника, напрямок потоку в теплообміннику й ряд інших.

Інтеркулер водяного типу має ряд незаперечних переваг, у порівнянні з повітряним аналогом. Завдяки своїй компактності водяний охолоджувач може бути встановлений у будь-якому вільному місці в підкапотному просторі. Вода (охолодна рідина) відводить тепло більш інтенсивно, тому ефективність водяного інтеркулера значно вища. Правда, при нагріванні рідини потрібно більше часу для остигання.

За всі переваги доводиться розплачуватися досить складною конструкцією інтеркулера, яка крім водяного теплообмінника включає повітряний радіатор, водяний насос, систему патрубків, електронний блок керування. Разом із системою охолодження двигуна вони утворюють двоконтурну систему охолодження.

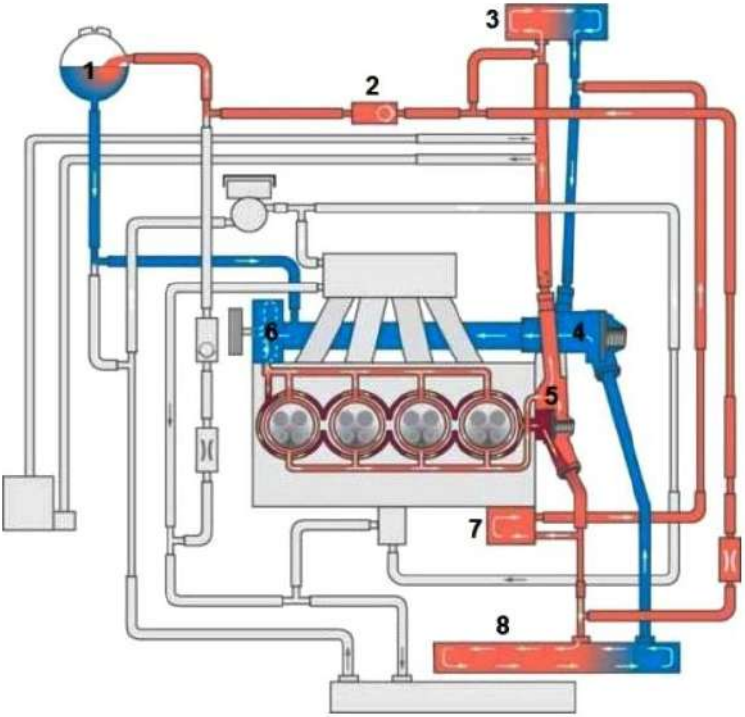
Через складність конструкції система охолодження наддувочного повітря водяного типу застосовується досить рідко, у випадках, коли повітряний охолоджувач застосувати неможливо. Наприклад, водяний охолоджувач наддувочного повітря застосовується на деяких двигунах TSI.

6.7 Двоконтурна система охолодження двигуна

На деяких моделях бензинових двигунів з турбонаддувом застосовується двоконтурна система охолодження. Один контур забезпечує охолодження двигуна, інший – охолодження наддувочного повітря. Контури охолодження незалежні друг від друга, але мають з'єднання й використовують загальний розширювальний бачок. Незалежність контурів дозволяє підтримувати різну температуру охолодної рідини в кожному з

них, різниця температури може досягати 100°С. Змішуватися потокам охолодної рідини не дають два зворотні клапани й дросель.

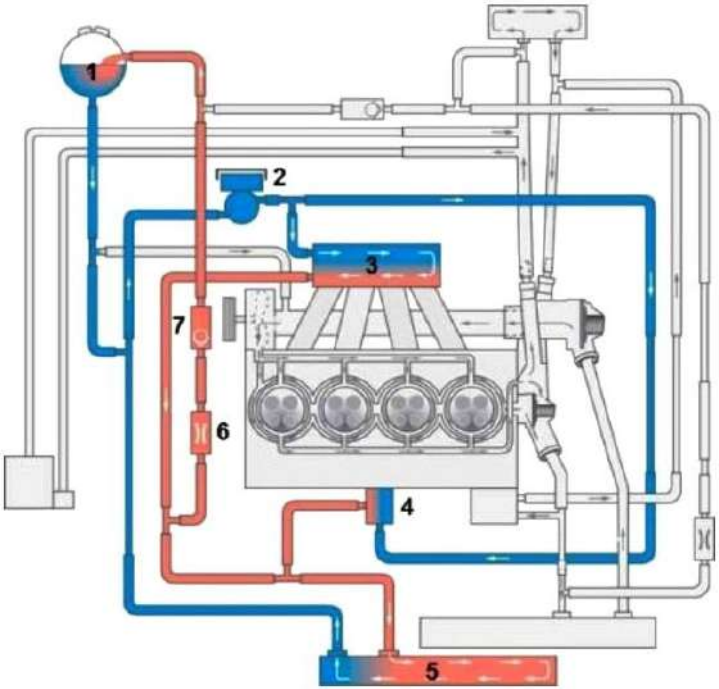
Перший контур – система охолодження двигуна. Стандартна система охолодження підтримує температурний режим двигуна в межах 105°С. На відміну від стандартної, у двоконтурній системі охолодження забезпечується температура в головці блоку циліндрів у межах 87°С, у блоці циліндрів – 105°С. Це досягнуто за рахунок застосування двох термостатів. По своїй суті це двоконтурна система охолодження.



1 – розширювальний бачок, 2 – зворотний клапан, 3 – теплообмінник нагрівника, 4 – перший термостат, 5 – другий термостат, 6 – насос охолодної рідини, 7 – масляний радіатор, 8 – радіатор системи охолодження двигуна

Рисунок 6.6 – Схема двоконтурної системи охолодження (перший контур)

Тому що в контурі головки блоку циліндрів повинна підтримуватися більш низька температура, то в ньому циркулює більший обсяг охолодної рідини (порядку 2/3 від загального обсягу). Інша охолодна рідина циркулює в контурі блоку циліндрів.



1 – розширювальний бачок, 2 – насос циркуляції охолодної рідини, 3 – охолоджувач наддувочного повітря, 4 – турбокомпресор, 5 – радіатор систем охолодження наддувочного повітря, 6 – дросель, 7 – зворотний клапан

Рисунок 6.7 – Схема системи охолодження наддувочного повітря (другий контур)

Для забезпечення рівномірного охолодження головки блоку циліндрів циркуляція охолодної рідини в ній проводиться по напрямкові від випускного колектора до впускного. Така схема роботи називається поперечним охолодженням.

Висока інтенсивність охолодження головки блоку циліндрів супроводжується високим тиском охолодної рідини. Цей тиск змушено долати термостат при відкритті.

Для полегшення роботи в конструкції системи охолодження один з термостатів виконаний із двоступінчастим регулюванням. Тарілка такого термостата складається із двох взаємозалежних частин: малої й великої тарілки. Спочатку відкривається мала тарілка, яка потім піднімає більшу тарілку.

Керування роботою системи охолодження здійснює система управління двигуном. При запуску двигуна обоє термостата закриті. Забезпечується швидкий прогрів двигуна.

Охолодна рідина циркулює по малому колу контуру головки блоку циліндрів: від насоса через головку блоку циліндрів, теплообмінник нагрівника, масляний радіатор і далі в розширювальний бачок. Даний цикл здійснюється до досягнення охолодною рідиною температури 87°С.

При температурі 87°С відкривається термостат контуру головки блоку циліндрів і охолодна рідина починає циркулювати по великому колу: від насоса через головку блоку циліндрів, теплообмінник нагрівника, масляний радіатор, відкритий термостат, радіатор і далі через розширювальний бачок. Даний цикл здійснюється до досягнення охолодною рідиною в блоці циліндрів температури 105°С.

При температурі 105°С відкривається термостат контуру блоку циліндрів і в ньому починає циркулювати рідина. При цьому в контурі головки блоку циліндрів завжди підтримується температура на рівні 87°С.

Другий контур – система охолодження наддувочного повітря. Система охолодження наддувочного повітря представлена охолоджувачем, радіатором, насосом, які з’єднані трубопроводами. У систему охолодження також включений корпус підшипників турбокомпресора.

Циркуляція охолодної рідини в контурі здійснюється за допомогою окремого насоса, який включається при необхідності по сигналу блоку керування двигуном. Рідина, проходячи через охолоджувач, забирає тепло наддувочного повітря й далі охолоджується в радіаторі.

6.8 Система впорскування води у двигун

Компанія Bosch постійно працює над удосконалюванням систем безпосереднього упорскування палива. Однією з її нових розробок є система упорскування води у двигун.

У минулому столітті упорскування води у двигун вже застосовувалося на автомобілях General Motors, Saab. Але з появою у двигуні інтеркулера, що прохолоджує впускне повітря, необхідність у системі упорскування води відпала. Система продовжує застосовуватися в автоспорті, але й тут вона не в пошані. У перегонах Формули-1 і WRC система заборонена регламентом.

Система Waterboost від Bosch відкриває нову сторінку в історії упорскування води у двигун. Сьогодні більшість електронних систем упорскування палива запрограмовані на додаткову подачу палива при високих навантаженнях. Додаткове паливо (до 20% від загального обсягу) необхідно для охолодження камери згоряння й зниження температури горіння паливно-повітряної суміші.

Для охолодження в системі Waterboost використовується вода замість бензину. Вода активно прохолоджує паливно-повітряну суміш, за рахунок чого підвищується стійкість до детонації, проводиться більш раннє запалювання й, у звичайно підсумку, збільшується продуктивність двигуна. Як заявляє розроблювач, система упорскування води у двигун на 5% підвищує потужність двигуна, на 13% скорочує витрати палива, на 4% знижує викиди вуглекислого газу.

Конструкція системи упорскування води включає водяний бачок, водяний насос і водяні форсунки. Електронне керування упорскуванням води здійснює система управління двигуном.

П’ятилітрового бачка дистильованої води вистачає на 5000 км шляху. Але навіть якщо вода в бачку закінчитися, шкоди двигуну це не доправить. Мотор не буде розвивати максимальну потужність і збільшиться витрата палива. Не варто турбуватися й про можливе замерзання води в бачку. Як тільки двигун нагріє підкапотний простір, вода в бачку розтане.

Першим автовиробником, який довів розробку Bosch до впровадження, стала компанія BMW. Сьогодні BMW установлює

систему упорскування води на автомобілях M-Серії, що забезпечують безпеку на перегонах Motogp. Також система упорскування води випробовується на прототипі BMW 1-й серії.

Система упорскування води у двигун нагнітає воду з бачка й розпорошує її у впускному колекторі, чим досягається зниження температури згоряння суміші на 25°С. Це дозволяє BMW використовувати ступінь стиску 11:1, замість припустимого співвідношення 9,5:1. Завдяки більш високому ступеню стиску на 8% знижується витрата палива й на 10% збільшується крутний момент і потужність двигуна.

Більш низька температура згоряння суміші знижує навантаження на кривошипно-шатунний механізм, газорозподільний механізм, турбокомпресор, каталітичний нейтралізатор, все це підвищує термін служби цих компонентів.

У системі використовується дистильована вода, яка може заправлятися в бачок ззовні або заповнюватися конденсатом від системи кондиціювання. Для запобігання корозії й розморожування, при зупинці двигуна вода повністю виганяється із системи в бачок. Про строки повномасштабного впровадження системи упорскування води у двигун BMW поки не повідомляє.

6.9 Система зміни геометрії впускного колектора

Ця система є однією із затребуваних технологій підвищення потужності двигуна, економії палива, зниження токсичності відпрацьованих газів. Зміна геометрії впускного колектора може бути реалізовано двома способами:

- зміною довжини впускного колектора;
- зміною поперечного перерізу впускного колектора.

У ряді випадків зміна геометрії впускного колектора на одному двигуні здійснюється одночасно двома способами.

Впускний колектор змінної довжини застосовується в атмосферних бензинових і дизельних двигунах для забезпечення кращого наповнення камери згоряння повітрям на всьому діапазоні обертів двигуна. На низьких обертах двигуна потрібне досягнення максимального крутного моменту якнайшвидше, для чого використовується довгий впускний колектор. Високі оберти виводять двигун на максимальну потужність при короткому впускному колекторі.

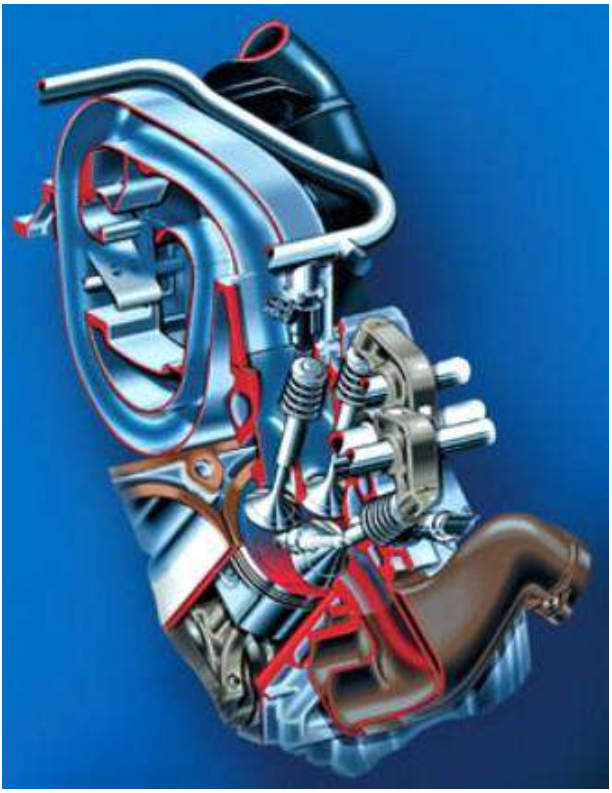


Рисунок 6.8 – Впускний колектор змінної довжини

Впускний колектор змінної довжини використовують у конструкції двигунів багато виробників, деякі надали системі власні назви:

- Dual-Stage Intake, DSI від Ford;
- Differential Variable Air Intake, DIVA від BMW;
- Variable Inertia Charging System, VICS, Variable Resonance Induction System, VRIS від Mazda.

Регулювання довжини впускного колектора (перемикання з однієї довжини на іншу) проводиться за допомогою клапана, що входить до складу системи управління двигуном.

Робота впускного колектора змінної довжини здійснюється в такий спосіб. При закритті впускних клапанів у впускному

колекторі залишається частина повітря, яка робить коливання із частотою пропорційній довжині колектора й обертам двигуна. У певний момент коливання повітря входять у резонанс, чим досягається ефект нагнітання – так зване резонансне наддування.

При відкритті впускних клапанів повітряна суміш у камери згоряння нагнітається з більшим тиском. У надувних двигунах впускний колектор змінної довжини не використовується, тому що необхідний обсяг повітря в камері згоряння забезпечується механічним і (або) турбокомпресором. Впускний колектор у таких двигунах дуже короткий, що скорочує розміри двигуна і його вартість.

Впускний колектор змінного перетину застосовується як на бензинових, так і на дизельних двигунах, у т.ч. обладнаних наддуванням. При зменшенні поперечного перерізу каналів впускного колектора досягається збільшення швидкості повітряного потоку, краще сумішоутворення й відповідно забезпечується повне згоряння паливно-повітряної суміші, зниження токсичності відпрацьованих газів.

Відомими системами впуску змінного перетину є:

- Intake Manifold Runner Control, IMRC, Charge Motion Control Valve, CMCV від Ford;
- Twin Port від Opel;
- Variable Intake System, VIS від Toyota;
- Variable Induction System, VIS від Volvo.

У системі впускний канал до кожного циліндра розділений на два канали (окремий канал на кожний впускний клапан), один з яких перекритий заслінкою. Привод заслінки здійснює вакуумний регулятор або електродвигун, що є виконавчим пристроєм системи керування двигуном.

При частковому навантаженні заслінки закриті, паливно-повітряна суміш (двигуни з розподіленим упорскуванням) або повітря (двигуни з безпосереднім упорскуванням) надходить у камеру згоряння кожного із циліндрів по одному каналу. При цьому створюються завихрення, які забезпечують краще сумішоутворення.

При зменшенні перетину впускного колектора раніше вступає в роботу система рециркуляції відпрацьованих газів, тим самим підвищується паливна економічність двигуна. При

повному навантаженні заслінки впускного колектора відкриваються, збільшується подача повітря (паливно-повітряної суміші) у камери згоряння й відповідно підвищується потужність двигуна.



1 – робота системи при повному навантаженні (заслінка відкрита), 2 – робота системи при частковому навантаженні (заслінка закрита, завихрення паливно-повітряної суміші), 3 – вихровий канал, 4 – вакуумний регулятор заслінки, 5 – форсунка, 6 – заслінка, 7 – канал наповнення

Рисунок 6.9 – Схема системи зміни геометрії впускного колектора

6.10 Система зміни фаз газорозподілу

Загальноприйнята міжнародна назва цієї системи – **Variable Valve Timing (VVT)**. Вона призначена для регулювання параметрів роботи газорозподільного механізму залежно від режимів роботи двигуна. Застосування даної системи забезпечує

підвищення потужності й крутного моменту двигуна, паливну економічність і зниження шкідливих викидів.

До регульованих параметрів роботи газорозподільного механізму відносяться:

- момент відкриття (закриття) клапанів;
- тривалість відкриття клапанів;
- висота підйому клапанів.

У сукупності ці параметри складають фази газорозподілу – тривалість тактів впуску й випуску, виражену кутом повороту колінчатого вала відносно «мертвих» точок. Фаза газорозподілу визначається формою кулачка розподільного вала, що впливає на клапан.

На різних режимах роботи двигуна потрібна різна величина фаз газорозподілу. Так, при низьких обертах двигуна фази газорозподілу повинні мати мінімальну тривалість («вузькі» фази). На високих обертах, навпаки, фази газорозподілу повинні бути максимально широкими й при цьому забезпечувати перекриття тактів впуску й випуску (природню рециркуляцію відпрацьованих газів).

Кулачок розподільного вала має певну форму й не може одночасно забезпечити вузькі й широкі фази газорозподілу. На практиці форма кулачка являє собою компроміс між високим крутним моментом на низьких обертах і високою потужністю на високих обертах колінчатого вала. Це протиріччя саме й вирішує система зміни фаз газорозподілу.

Залежно від регульованих параметрів роботи газорозподільного механізму розрізняють наступні способи змінювання фаз газорозподілу:

- поворот розподільного вала;
- застосування кулачків з різним профілем;
- зміна висоти підйому клапанів.

Найпоширенішими є системи зміни фаз газорозподілу, які використовують поворот розподільного вала:

- VANOS (Double VANOS) від BMW;
- **VVT-i (Dual VVT-i)**, Variable Valve Timing with intelligence від Toyota;
- **VVT,** Variable Valve Timing від Volkswagen;
- **VTC**, Variable Timing Control від Honda;

- **CVVT**, Continuous Variable Valve Timing від Hyundai, Kia, Volvo, General Motors;
- **VCP**, Variable Cam Phases від Renault.

Принцип роботи даних систем заснований на повороті розподільного вала по ходу обертання, чим досягається раннє відкриття клапанів у порівнянні з вихідним положенням.

Конструкція системи зміни фаз газорозподілу даного типу включає гідрокеровану муфту й систему керування цією муфтою.



Рисунок 6.10 – Механізм газорозподілу двигуна

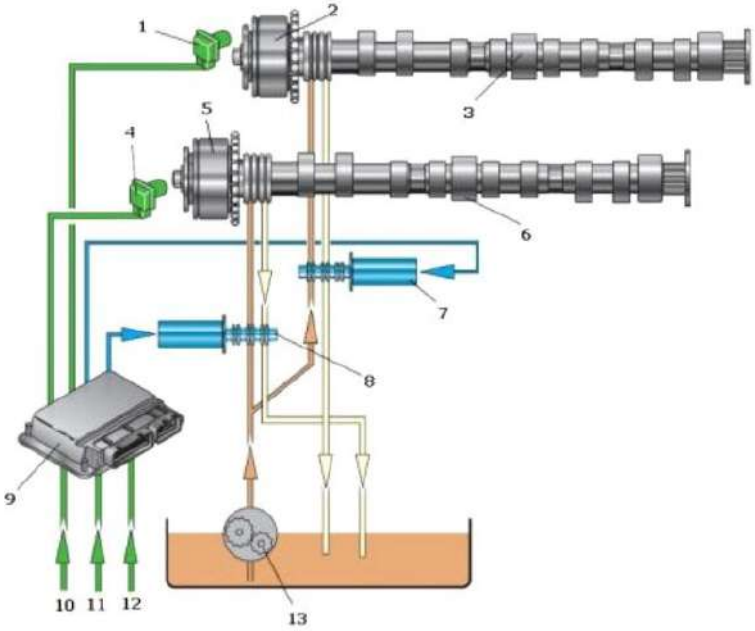
Гідрокерована муфта (повсякденна назва – «фазообертач») безпосередньо здійснює поворот розподільного вала. Муфта складається з ротора, з'єднаного з розподільним валом, і корпуса, у ролі якого виступає шків привода розподільного вала. Між ротором і корпусом є порожнини, до яких по каналах підводиться моторне масло.

Заповнення тієї або іншої порожнини маслом забезпечує поворот ротора щодо корпуса й відповідно поворот розподільного вала на певний кут.

Здебільшого гідрокерована муфта встановлюється на розподільний вал впускних клапанів. Для розширення параметрів регулювання в окремих конструкціях муфти встановлюються на впускний і випускний розподільні вали.

Система керування забезпечує автоматичне регулювання роботи гідрокерованої муфти. Конструктивно вона включає вхідні датчики, електронний блок керування й виконавчі пристрої. У роботі системи керування використовуються датчики

Холу, що оцінюють положення розподільних валів, а також інші датчики системи керування двигуном: частоти обертання колінчатого вала, температури охолодної рідини, витратомір повітря.



1 – датчик Холу впускного розподільного вала, 2 – гідрокерована муфта впускного вала (фазообертач), 3 – впускний розподільний вал, 4 – датчик Холу випускного розподільного вала, 5 – гідрокерована муфта випускного вала (фазообертач), 6 – випускний розподільний вал, 7 – електрогідравлічний розподільник впускного вала (електромагнітний клапан), 8 – електрогідравлічний розподільник випускного вала (електромагнітний клапан), 9 – блок керування двигуном, 10 – сигнал від датчика температури охолодної рідини, 11 – сигнал витратоміра повітря, 12 – сигнал датчика частоти обертання колінчатого вала двигуна, 13 – масляний насос

Рисунок 6.11 – Схема системи автоматичної зміни фаз газорозподілу

Блок управління двигуном приймає сигнали від датчиків і формує керуючі впливи на виконавчий пристрій –

електрогідравлічний розподільник. Розподільник являє собою електромагнітний клапан і забезпечує підведення масла до гідрокерованої муфти й відвід від неї залежно від режимів роботи двигуна.

Система зміни фаз газорозподілу передбачає роботу, як правило, у наступних режимах:

- холостий хід (мінімальні оберти колінчатого вала);
- максимальна потужність;
- максимальний крутний момент.

Інший різновид системи зміни фаз газорозподілу побудований на застосуванні кулачків різної форми, чим досягається східчаста зміна тривалості відкриття й висоти підйому клапанів. Відомими такими системами є:

- **VTEC**, Variable Valve Timing and Lift Electronic Control від Honda;
- **VVTL-i**, Variable Valve Timing and Lift with intelligence від Toyota;
- **MIVEC**, Mitsubishi Innovative Valve timing Electronic Control від Mitsubishi;
- Valvelift System від Audi.

Дані системи мають, в основному, схожу конструкцію й принцип дії, за винятком Valvelift System. Приміром, одна з найвідоміших система VTEC включає набір кулачків різного профілю й систему керування. Розподільний вал має два малі й один великий кулачок.

Малі кулачки через відповідні коромисла (рокери) з'єднані з парою впускних клапанів. Великий кулачок переміщає вільне коромисло. Система керування забезпечує перемикання з одного режиму роботи на інший шляхом спрацьовування блокувального механізму. Блокувальний механізм має гідравлічний привід.

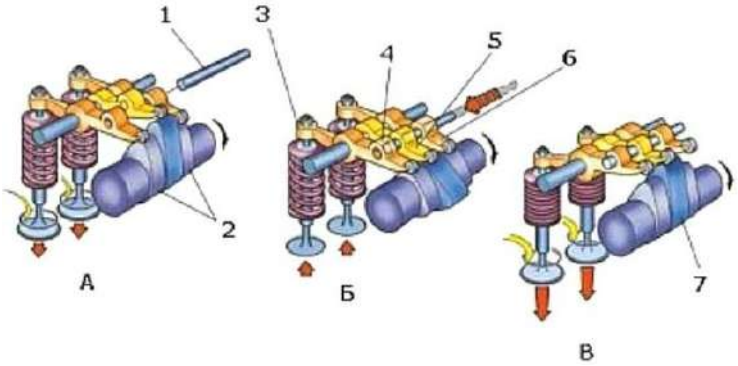
При низьких обертах двигуна (малому навантаженню) робота впускних клапанів проводиться від малих кулачків, при цьому фази газорозподілу характеризуються малою тривалістю. При досягненні обертів двигуна певного значення, система керування пускає в хід блокувальний механізм. Коромисла малих і великого кулачків з'єднуються за допомогою стопорного штифта в одне ціле, при цьому зусилля на впускні клапани передається від великого кулачка.

Інша модифікація системи VTEC має три режими регулювання, обумовлені роботою одного малого кулачка (відкриття одного впускного клапана, малі оберти двигуна), двох малих кулачків (відкриття двох впускних клапанів, середні оберти), а також великого кулачка (високі оберти).

Сучасною системою зміни фаз газорозподілу від Honda є система I-VTEC, що поєднує системи VTEC і VTC. Дана комбінація істотно розширює параметри регулювання двигуна.

Найбільш досконалий, з конструктивної точки зору, різновид системи зміни фаз газорозподілу, заснований на регулюванні висоти підйому клапанів. Дана система дозволяє відмовитися від дросельної заслінки на більшості режимів роботи двигуна. Піонером у цій області є компанія BMW і її система **Valvetronic**. Аналогічний принцип використаний і в інших системах:

- **Valvematic** від Toyota;
- **VEL**, Variable Valve Event and Lift System від Nissan;
- **Multiair** від Fiat;
- **VTI**, Variable Valve and Timing Injection від Peugeot.

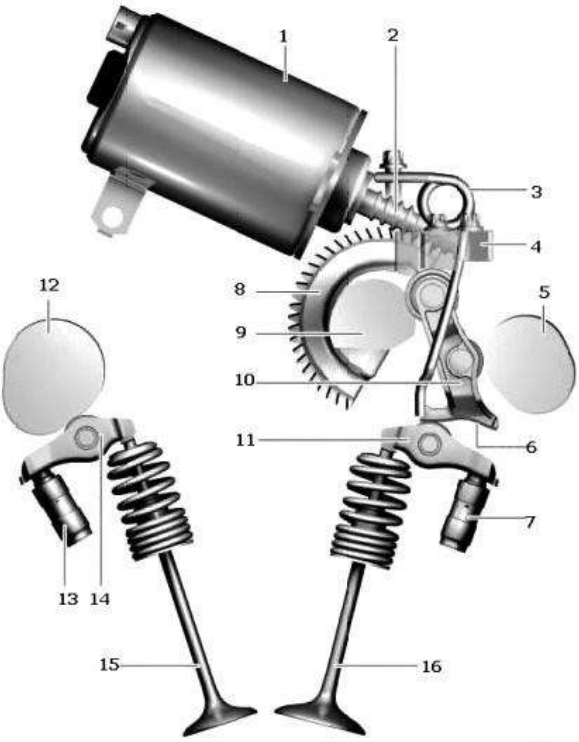


А – режим низьких обертів двигуна, Б – перехід з одного режиму на інший, В – режим високих обертів двигуна

1 – блокувальний механізм (стопорний штифт), 2 – малі кулачки (кулачки низьких обертів), 3 – впускний клапан, 4 – коромисло (рокер) першого впускного клапана, 5 – проміжне коромисло, 6 – коромисло другого впускного клапана, 7 – великий кулачок (кулачок високих обертів)

Рисунок 6.12 – Схема системи VTEC

У системі **Valvetronic** зміну висоти підйому клапанів забезпечує складна кінематична схема, у якій традиційний зв'язок кулачок-коромисло-клапан доповнений ексцентриковим валом і проміжним важелем. Ексцентриковий вал обертається електродвигуном через черв'ячну передачу.



1 – сервопривод (електродвигун), 2 – черв'ячний вал, 3 – зворотна пружина, 4 – кулісний блок, 5 – впускний розподільний вал, 6 – похила частина проміжного важеля, 7 – гідрокомпенсатор впускного клапана, 8 – черв'ячне колесо, 9 – ексцентриковий вал, 10 – проміжний важіль, 11 – коромисло впускного клапана, 12 – випускний розподільний вал, 13 – гідрокомпенсатор випускного клапана, 14 – коромисло випускного клапана, 15 – випускний клапан, 16 – впускний клапан

Рисунок 6.13 – Схема системи Valvetronic

Обертання ексцентрикового вала змінює положення проміжного важеля, який, у свою чергу, задає певний рух коромисла й відповідне йому переміщення клапана. Зміна висоти підйому клапана здійснюється безупинно залежно від режимів роботи двигуна. Система Valvetronic установлюється тільки на впускні клапани.

Перспективними конструкціями ГРМ є механізми без розподільного вала, у яких клапани управляються індивідуальними пристроями за допомогою електромагнітних соленоїдів.

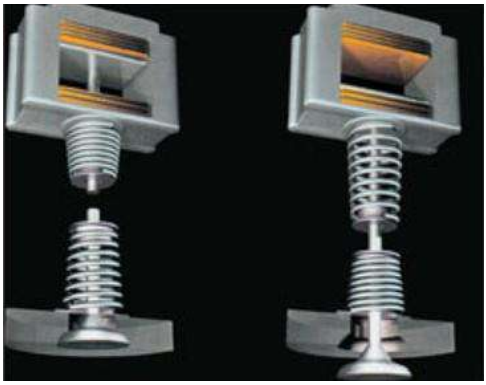


Рисунок 6.14 – Електромагнітні соленоїди ГРМ

Використання такої техніки дає можливість індивідуального контролю над роботою кожного клапана. При цьому можна не тільки оптимально управляти часом відкриття кожного клапана й забезпечувати одержання максимальних потужності або крутного моменту, але й відключати деякі циліндри повністю або переводити їх на мале навантаження для більш ефективної роботи інших циліндрів.

Можна переводити двигун у режим компресора, розвантажуючи, таким чином, гальма, і, можливо, запасаючи частину енергії у випадку спуску вантажного автомобіля (важкого автопоїзда) з косогору (процес рекуперації). Але головна перевага цієї системи полягає в тому, що час і ступінь відкриття клапанів, у будь-який момент часу, можуть бути оптимальними для роботи двигуна за даних умов руху.

Сьогодні вже створені і випробувані такі експериментальні системи з гарною ефективністю дії (зменшена витрата палива до 20 %). Крім того, конструкція самого двигуна може бути спрощена, тому що звичайний привод ГРМ – ланцюги, зубчасті ремені, механізми натягу, шестірні й кулачкові вали – стають непотрібними.

Перешкодою на шляху до широкого застосування таких «безкулачкових» клапанних механізмів – є велике споживання електроенергії й більші габарити приводних пристроїв, одержувані при існуючому 12-вольтовому електроустаткуванні. Ці проблеми значно зменшуються у випадку підвищення робочої напруги на борту автомобіля в кілька разів.

Питання для самоперевірки

1. Розкажіть принцип роботи сучасного бензинового двигуна?
2. Які основні напрямки вдосконалювання бензинових двигунів?
3. Які системи використовуються на сучасних бензинових двигунах?
4. Що таке фази газорозподілу двигуна? Намалюйте приклади кругових діаграм фаз газорозподілу чотиритактного бензинового ДВЗ та поясніть їх.
5. Ким і коли було вперше застосовано систему безпосереднього упорскування палива на автомобільних бензинових двигунах серійного виробництва?
6. Поясніть принцип роботи системи упорскування Motronic MED7.
7. Яку функцію виконує регулятор тиску палива?
8. Назвіть види сумішоутворення при безпосередньому упорскуванні палива та поясніть їхні відмінності.
9. Розкажіть конструктивні особливості двигуна TSI (Turbo Stratified Injection).
10. Поясніть принцип роботи подвійного наддування двигуна TSI.
11. Для чого необхідне охолодження наддувочного повітря?
12. Які види нагнітачів повітря у двигунах ви можете назвати? Які їх конструктивні переваги й недоліки?
13. Поясніть принцип дії та конструктивні особливості

інтеркулера.

14. З якою метою використовується двоконтурна система охолодження двигуна? Які її конструктивні особливості?
15. Поясніть призначення системи упорскування води у двигун. Які переваги й недоліки цієї системи?
16. Для чого використовують системи зміни геометрії впускного колектора?
17. Як працює впускний колектор змінної довжини?
18. Розкажіть про конструктивні особливості впускного колектора змінного перетину.
19. Розкажіть про системи зміни фаз газорозподілу двигуна: типи систем, особливості конструкції, переваги й недоліки різних систем.

7 ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВЗ

Завдяки високій ефективності дизельний двигун широко застосовується на вантажних автомобілях. Разом з тим, більшість легкових автомобілів мають у лінійці своїх моторів дизельні двигуни. У Європі до останнього часу (дизельгейт), дизельні двигуни поступово витісняли бензинові. Так ще зовсім недавно понад 50% нових легкових автомобілів там мали дизельні двигуни. На легкових автомобілях використовуються швидкохідні дизелі, які мають високу еластичність, тобто здатність розвивати номінальний крутний момент у широкому діапазоні частот обертання колінчатого вала.

7.1 Принцип роботи дизельного двигуна

Принцип роботи дизельного двигуна заснований на мимовільному (компресійному) запаленні дизельного палива, що впорскується в камеру згоряння й змішується зі стислим і нагрітим до високої температури повітрям. На відміну від бензинового двигуна процес роботи дизеля не залежить від коефіцієнта надлишку повітря, а визначається гетерогенністю (неоднорідністю) паливно-повітряної суміші.

Дизельний двигун має ряд відмінних рис:

- має більшу ступінь стиску і як наслідок більш високий коефіцієнт корисної дії, більшу вагу й габарити, низькі витрати палива;
- має низькі оберти колінчатого вала і як наслідок меншу питому потужність, супроводжувані неповним згорянням палива, сажеутворенням;
- не має дросельної заслінки, тому розвиває високий крутний момент на низьких обертах;
- має складну конструкцію паливної апаратури і як наслідок високу чутливість до якості палива.

Основними напрямками вдосконалювання дизельних двигунів є зниження витрати палива, токсичності відпрацьованих газів, рівня шуму, підвищення потужності двигуна, полегшення

холодного запуску. Для реалізації цих вимог на сучасних дизельних двигунах застосовується ряд систем: Common Rail, впускна й випускна системи, рециркуляції відпрацьованих газів, турбонаддув, передпусковий підігрів.

7.2 Система упорскування Common Rail

Система упорскування Common Rail накопичує паливо в акумуляторі високого тиску (загальній паливній рейці – common rail) і упорскує його в циліндри двигуна електронно-керованими форсунками.

Електроніка забезпечує упорскування строго визначених порцій палива, чим досягається висока економія, повне згоряння й підвищення потужності. При необхідності паливо може впорскуватися багаторазово протягом одного циклу.

Випускна система сучасного дизеля орієнтована на зниження у відпрацьованих газах сажі, незгорілих вуглеводнів і оксидів азоту. Для цього в системі встановлюється ***сажевий фільтр***. Сажа, що накопичується у фільтрі, видаляється шляхом регенерації.

Система рециркуляції відпрацьованих газів, призначена для зниження вмісту у відпрацьованих газах оксиду азоту, для чого частина газів вертається у впускний колектор. Для підвищення ефективності роботи системи, відпрацьовані гази примусово охолоджуються в спеціальному охолоджувачі, включеному в систему охолодження двигуна.

Впускна система дизельного двигуна може бути обладнана впускними заслінками. Застосування заслінок утворює два канали усмоктування, забезпечує завихрення повітряного потоку й поліпшене сумішоутворення на всіх режимах.

При запуску двигуна й роботі на низьких обертах заслінки закриті, при високій частоті обертання колінчатого вала й високому крутному моменті – відкриті. Закриття заслінок приводить до зниження у відпрацьованих газах оксиду вуглецю й незгорілих вуглеводнів.

Найбільш ефективною системою підвищення потужності дизельного двигуна є турбонаддув. Для створення оптимального тиску наддування на всіх режимах роботи двигуна в системі використовується ***турбонагнітач зі змінюваною геометрією***

турбіни.

Для полегшення запуску дизельного двигуна в холодний час застосовується система передпускового розігріву, що представляє собою електронно-керовані ***свічі накалювання***, установлені у впускному колекторі. Додатково на автомобіль може встановлюватися ***підігрівник дизельного палива***.

Далі більш детально розглянемо конструктивні особливості перерахованих вище систем, які застосовуються на сучасних дизельних двигунах встановлюваних на серійних автомобілях.

7.3 Система рециркуляції відпрацьованих газів

Система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR – Exhaust Gas Recirculation) призначена для зниження кількості у відпрацьованих газах оксидів азоту, за рахунок повернення частини газів у впускний колектор. Оксиди азоту утворюються у двигуні під дією високої температури. Чим вище температура в камерах згоряння двигуна, тим більше утворюється оксидів азоту.

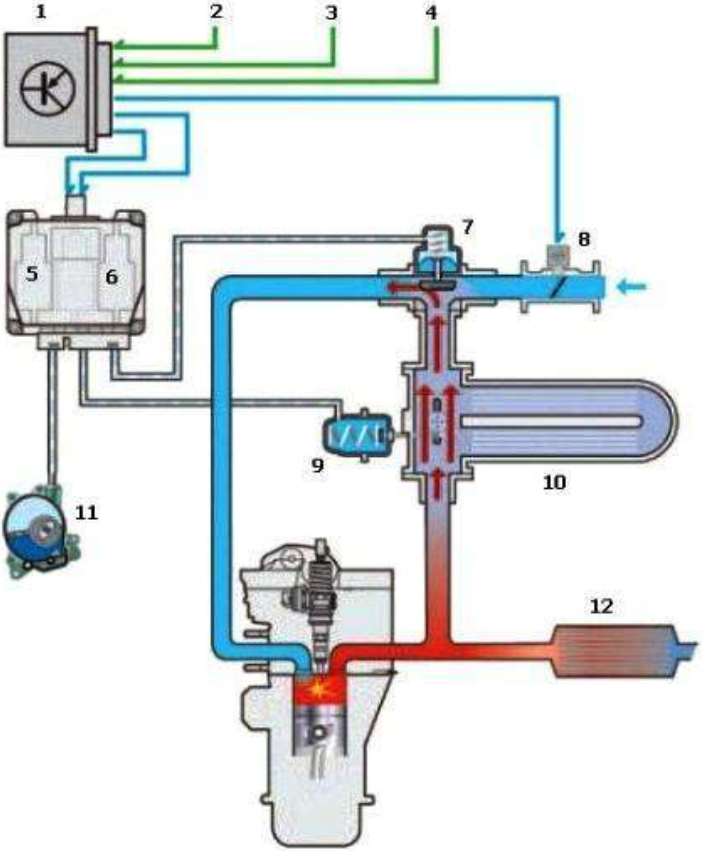
Повернення частини відпрацьованих газів у впускний колектор дозволяє знизити температуру згоряння паливно-повітряної суміші, і тим самим, зменшити утвір оксидів азоту.

При цьому співвідношення компонентів у паливно-повітряній суміші залишається незмінним, а характеристики потужності двигуна змінюються незначно. Система рециркуляції відпрацьованих газів застосовується як на дизельних, так і на бензинових двигунах. На бензинових двигунах внутрішнього згоряння, обладнаних турбонаддувом, система рециркуляції відпрацьованих газів не застосовується.

Залежно від стандарту токсичності відпрацьованих газів на дизельних двигунах внутрішнього згоряння застосовуються різні схеми системи рециркуляції відпрацьованих газів: високого тиску, низького тиску й комбінована система рециркуляції.

7.4 Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску

Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску застосовується на дизельних двигунах, що відповідають вимогам Євро 4 (вміст оксиду азоту у відпрацьованих газах не більше 0,25 г/км).



1 – блок управління двигуном, 2 – сигнал датчика частоти обертання колінчатого вала, 3 – сигнал датчика масової витрати повітря, 4 – сигнал датчика температури охолодної рідини, 5 – електромагнітний клапан керування рециркуляцією, 6 – електромагнітний клапан керування заслінкою охолоджувача, 7 – клапан рециркуляції відпрацьованих газів, 8 – електропривод впускної заслінки, 9 – вакуумний привод заслінки охолоджувача, 10 – охолоджувач відпрацьованих газів що перепускаються, 11 – вакуумний насос, 12 – каталітичний нейтралізатор

Рисунок 7.1 – Схема системи рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску

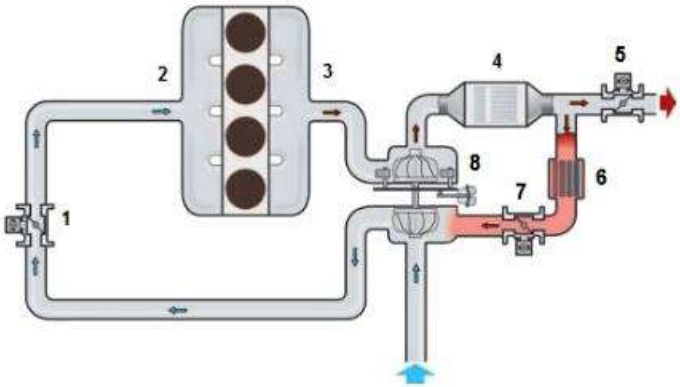
Система забезпечує відвід частини відпрацьованих газів безпосередньо з випускного колектора перед турбокомпресором і подачу в канал перед впускним колектором.

Конструктивно система поєднує клапан рециркуляції й патрубки відводу відпрацьованих газів. Клапан рециркуляції здійснює перепускання відпрацьованих газів з випускної системи у впускний колектор. Клапан має пневматичний або електричний привод. Робота пневматичного клапана заснована на розрядженні, що виникає у впускному колекторі (бензинові двигуни), або створюваного вакуумним насосом (дизельні двигуни). Величину розрядження, що подається на клапан рециркуляції, регулює керуючий електромагнітний клапан.

Інтенсивність рециркуляції відпрацьованих газів залежить від різниці тисків у впускній і випускній системах. Величина тиску у впускній системі регулюється за допомогою дросельної заслінки. При закритті дросельної заслінки зменшується тиск на впуску, й відповідно підвищується інтенсивність рециркуляції. Разом з тим, з ростом обсягу рециркуляції зменшується потік відпрацьованих газів, що проходять через турбіну компресора, і це знижує тиск наддування.

Система рециркуляції відпрацьованих газів не працює на холостому ходу, при холодному двигуні, а також при повністю відкритій дросельній заслінці. Рециркуляція відпрацьованих газів проводиться під контролем системи управління двигуном. По сигналу блоку управління переміщається дросельна заслінка, й спрацьовує клапан рециркуляції. Положення дросельної заслінки контролюється потенціометричним датчиком.

На окремих двигунах у системі рециркуляції відпрацьованих газів застосовується охолодження відпрацьованих газів яке додатково знижує температуру згоряння й, тим самим, зменшує утвір оксидів азоту. Охолодження проводиться шляхом проходження охолодної рідини через спеціальний радіатор, включений у систему охолодження двигуна. Для захисту від перегріву в систему охолодження включений і корпус клапана рециркуляції. На дизельних двигунах, що відповідають нормам Євро 5 (вміст оксиду азоту у відпрацьованих газах становить не більше 0,18 г/км), застосовується система рециркуляції відпрацьованих газів низького тиску.



1 – дросельна заслінка, 2 – впускний колектор, 3 – випускний колектор, 4 – сажевий фільтр, 5 – випускна заслінка, 6 – радіатор системи рециркуляції, 7 – заслінка рециркуляції, 8 – турбонагнітач

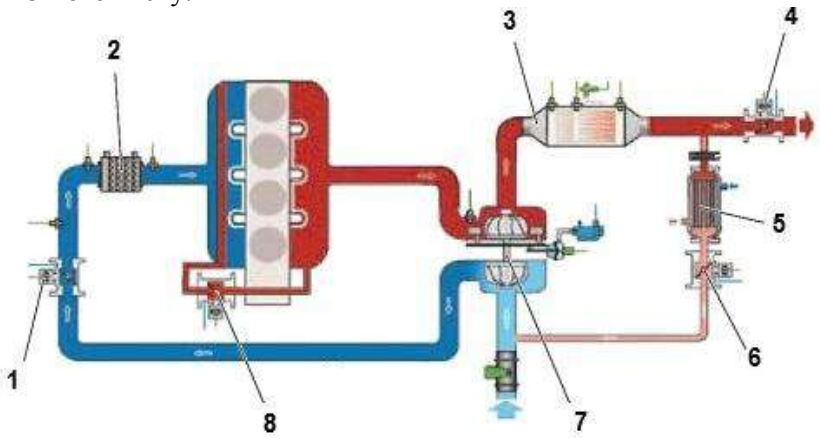
Рисунок 7.2 – Схема системи рециркуляції відпрацьованих газів низького тиску

У такій системі відпрацьовані гази, відводяться після сажевого фільтра, охолоджуються в радіаторі системи рециркуляції, проходять через клапан (заслінку) рециркуляції й подаються у впускну систему безпосередньо перед турбокомпресором. Система низького тиску забезпечує меншу температуру відпрацьованих газів відсутність часток сажі й, в остаточному підсумку, менший вміст оксидів азоту у вихлопі. Крім цього, всі відпрацьовані гази проходять через турбіну компресора, тому тиск наддування не знижується.

Регулювання інтенсивності рециркуляції відпрацьованих газів здійснює система управління двигуном за допомогою дросельної заслінки, заслінки рециркуляції й випускної заслінки.

Заслінки мають електричний привод. Величина відкриття кожної із заслінок фіксується потенціометричними датчиками. Ступінь відкриття заслінок визначається на підставі закладеної в блок управління цифрової моделі, яка враховує наповнення циліндрів, тиск наддування й інтенсивність рециркуляції відпрацьованих газів. На дизельних двигунах, що відповідають вимогам стандарту Євро 6 (вміст оксиду азоту у відпрацьованих

газах, не більше 0,08 г/км) застосовується комбінована система рециркуляції відпрацьованих газів. Система має дві окремі магістралі рециркуляції відпрацьованих газів – високого й низького тиску.



1 – дросельна заслінка, 2 – охолоджувач наддувочного повітря, 3 – сажевий фільтр, 4 – випускна заслінка, 5 – радіатор системи рециркуляції, 6 – заслінка рециркуляції низького тиску, 7 – турбонагнітач, 8 – заслінка рециркуляції високого тиску

Рисунок 7.3 – Схема комбінованої системи рециркуляції відпрацьованих газів

Рециркуляція відпрацьованих газів здійснюється аналогічно рециркуляції на двигунах Євро 5. Крім того в певних режимах роботи двигуна відбувається додаткова подача відпрацьованих газів з магістралі високого тиску, а це ще більше зменшує вміст оксидів азоту. Магістраль високого тиску не має охолоджувача відпрацьованих газів.

7.5 Сажевий фільтр

На легкових автомобілях з дизельним двигуном, з 2000 року у складі випускної системи застосовується сажевий фільтр. Із уведенням норм Євро-5 у січні 2011 року застосування сажевого фільтра на легкових автомобілях з дизельним двигуном стало обов’язковим.

Дизельний сажевий фільтр (в англійському варіанті Diesel Particulate Filter, DPF, у французькому варіанті Filtre a Particules, FAP, у німецькому варіанті Rubpartikelfilter, RPF) призначений для зниження викиду сажевих часток в атмосферу з відпрацьованими газами. Застосування фільтра дозволяє добитися зниження часток сажі у відпрацьованих газах до 99,9 %.

У дизельному двигуні сажа утворюється при неповному згорянні палива. Частки сажі мають розмір від 10 Нм до 1 мкм. Кожна частка складається з вуглецевого ядра, з яким з'єднані вуглеводні, оксиди металів, сірка й вода. Конкретний состав сажі визначається режимом роботи двигуна й составом палива.

У випускній системі сажевий фільтр розташовується за каталітичним нейтралізатором. У ряді конструкцій сажевий фільтр об'єднаний з каталітичним нейтралізатором окисного типу й розташовується відразу за випускним колектором там, де температура відпрацьованих газів максимальна. Він називається сажевий фільтр із каталітичним покриттям.

Основним конструктивним елементом сажевого фільтра є матриця, яка виготовляється з кераміки (карбіду кремнію). Матриця поміщена в металевий корпус. Керамічна матриця має ніздрювату структуру, утворену з каналів малого перетину, поперемінно закритих з однієї та з іншої сторони. Бічні стінки каналів мають пористу структуру й відіграють роль фільтра.

У перетині гнізда матриці мають квадратну форму. Більш досконалими є вхідні гнізда восьмикутної форми. Вони мають більшу площу поверхні (у порівнянні з вихідними гніздами), пропускають більше відпрацьованих газів і забезпечують більший термін служби сажевого фільтра.

У роботі сажевого фільтра є два послідовні етапи: фільтрація й регенерація сажі. При фільтрації відбувається захват часток сажі й осідання їх на стінках фільтра. Найбільшу складність для затримки представляють частки сажі малого розміру (від 0,1 до 1 мкм). Їхня частка невелика (до 5%), але це самі небезпечні для людини викиди.

Сучасні сажеві фільтри затримують і ці частки. Частки сажі що скопилися при фільтрації, створюють перешкода для відпрацьованих газів і це приводить до зниження потужності двигуна. Тому періодично потрібне очищення фільтра від

накопиченої сажі, або регенерація. Розрізняють пасивну й активну регенерацію сажевого фільтра. У сучасних фільтрах використовується, як правило, пасивна й активна регенерація.

Пасивна регенерація сажевого фільтра здійснюється за рахунок високої температури відпрацьованих газів (порядку 600ºС), яка досягається при роботі двигуна з максимальним навантаженням. Іншим способом пасивної регенерації є додавання в паливо спеціальних присадок, які забезпечують згоряння сажі при більш низькій температурі (450-500°С).

При певних режимах роботи двигуна (невелике навантаження, рух у місті та ін.), спостерігається недостатньо висока температура відпрацьованих газів і пасивна регенерація відбуватися не може. У цьому випадку здійснюється активна (примусова) регенерація сажевого фільтра.

Активна регенерація сажевого фільтра проводиться шляхом примусового підвищення температури відпрацьованих газів протягом певного проміжку часу. Накопичена при цьому сажа окиснюється (згоряє). Розрізняють кілька способів збільшення температури відпрацьованих газів при активній регенерації:

- пізнє упорскування палива;
- додаткове упорскування палива на такті випуску;
- використання електричного нагрівача перед сажевим фільтром;
- упорскування порції палива безпосередньо перед сажевим фільтром;
- нагрівання відпрацьованих газів мікрохвилями.

Конструкція сажевого фільтра й систем, що забезпечують його роботу, постійно удосконалюється. У цей час найбільш затребуваний сажевий фільтр із каталітичним покриттям і сажевий фільтр із системою введення присадок у паливо.

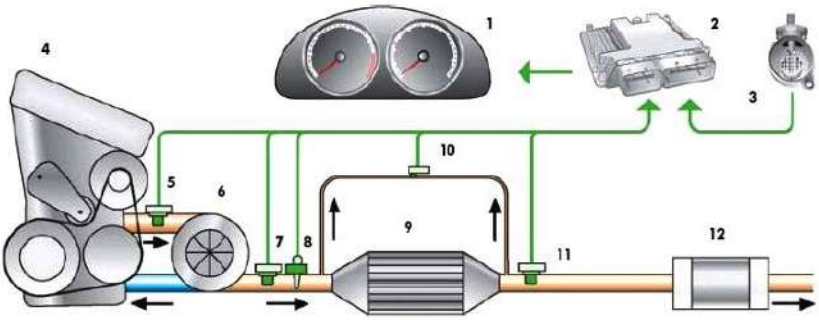
7.6 Сажевий фільтр із каталітичним покриттям

Сажевий фільтр із каталітичним покриттям застосовується на автомобілях концерну Volkswagen і ряду інших виробників. У роботі сажевого фільтра з каталітичним покриттям розрізняють активну й пасивну регенерацію.

При пасивній регенерації відбувається безперервне окиснення сажі за рахунок дії каталізатора (платини) і високої

температури відпрацьованих газів (350-500ºС). Ланцюжок хімічних перетворень при пасивній регенерації має такий вигляд:

- оксиди азоту вступають у реакцію з киснем у присутності каталізатора з утвором діоксиду азоту;
- діоксид азоту вступає в реакцію із частками сажі (вуглецем) з утвором оксиду азоту й вигарного газу;
- оксид азоту й вигарний газ вступають у реакцію з киснем з утвором діоксиду азоту й вуглекислого газу.



1 – приладова панель, 2 – блок управління двигуном, 3 – витратомір повітря, 4 – дизельний двигун, 5 – датчик температури відпрацьованих газів перед турбокомпресором, 6 – турбокомпресор, 7 – датчик температури відпрацьованих газів перед сажевим фільтром, 8 – кисневий датчик, 9 – сажевий фільтр, 10 – датчик перепаду тиску в сажевому фільтрі, 11 – датчик температури відпрацьованих газів після сажевого фільтра, 12 – глушитель

Рисунок 7.4 – Схема сажевого фільтра з каталітичним покриттям

Активна регенерація відбувається при температурі 600-650°С, яка створюється за допомогою системи керування дизелем. Необхідність активної регенерації визначається на підставі оцінки пропускної здатності сажевого фільтра, яка здійснюється за допомогою наступних датчиків системи керування дизелем: витратоміра повітря; температури відпрацьованих газів до сажевого фільтра; температури відпрацьованих газів після сажевого фільтра; перепаду тиску в сажевому фільтрі.

На підставі електричних сигналів датчиків електронний блок управління робить додаткове упорскування палива в камеру згоряння, а також знижує подачу повітря у двигун і припиняє рециркуляцію відпрацьованих газів. При цьому температура відпрацьованих газів піднімається до величини, необхідної для початку процесу рециркуляції.

7.7 Сажевий фільтр із системою введення присадки в паливо

Сажевий фільтр із системою введення присадки в паливо є розробкою концерну PSA (Peuqeot-Citroen). Оскільки першопрохідниками використання присадки для регенерації є французи, то за фільтром закріпилася назва Fap-Фільтр (від французького Filtre a Particules). Аналогічний підхід реалізований у сажевих фільтрах інших автовиробників (Ford, Toyota).

У системі використовується утримуюча церій присадка, яка додається в паливо й забезпечує спалювання сажі при більш низькій температурі (450-500°С).

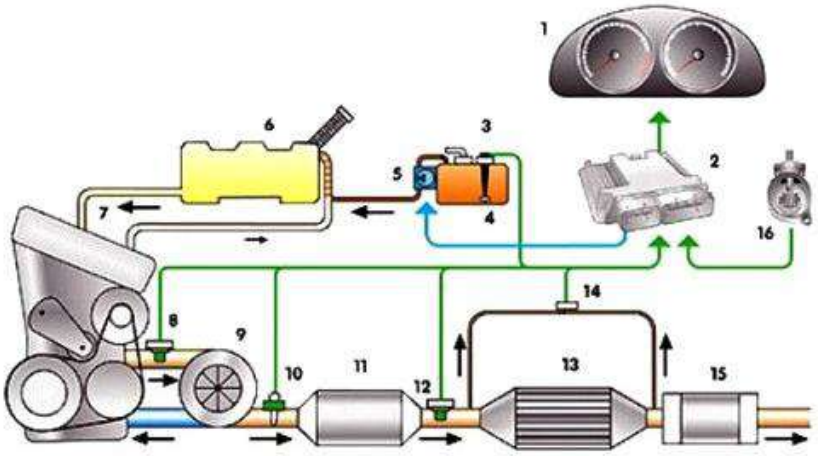
Але й ця температура відпрацьованих газів не завжди може бути досягнута, тому в системі періодично виконується активна регенерація сажевого фільтра. Сажевий фільтр установлюється, як правило, окремо за каталітичним нейтралізатором.

Присадка зберігається в окремому бачку, ємністю 3-5 л, якої вистачає на 80-120 тис. км пробігу (термін служби фільтра). Конструктивно бачок може перебувати в паливному баку або поза ним. Рівень присадки в бачку контролюється за допомогою датчика поплавкового типу.

У паливний бак присадка подається за допомогою електричного насоса. Початок і тривалість подачі присадки регулюється блоком управління двигуном (у деяких конструкціях окремим електронним блоком).

Побічним ефектом застосування присадки є те, що при згорянні вона осідає у вигляді золи на стінки фільтра й не виводиться з нього, а це скорочує ресурс пристрою.

Термін служби сучасного сажевого фільтра становить 120 000 км пробігу. Виробники декларують випуск найближчим часом фільтра з ресурсом більше 250 000 км.



1 – приладова панель, 2 – блок керування двигуном, 3 – бачок для зберігання присадки, 4 – датчик рівня присадки в бачку, 5 – електричний насос, 6 – паливний бак, 7 – дизельний двигун, 8 – датчик температури відпрацьованих газів перед турбокомпресором, 9 – турбокомпресор, 10 – кисневий датчик, 11 – каталітичний нейтралізатор, 12 – датчик температури відпрацьованих газів перед сажевим фільтром, 13 – сажевий фільтр, 14 – датчик перепаду тиску в сажевому фільтрі, 15 – глушитель, 16 – витратомір повітря

Рисунок 7.5 – Схема сажевого фільтра із системою введення присадки у паливо

Через високу вартість, сажеві фільтри які виробили ресурс, автовласниками, як правило, не заміняються, а видаляються з наступним перепрошиванням системи управління двигуном.

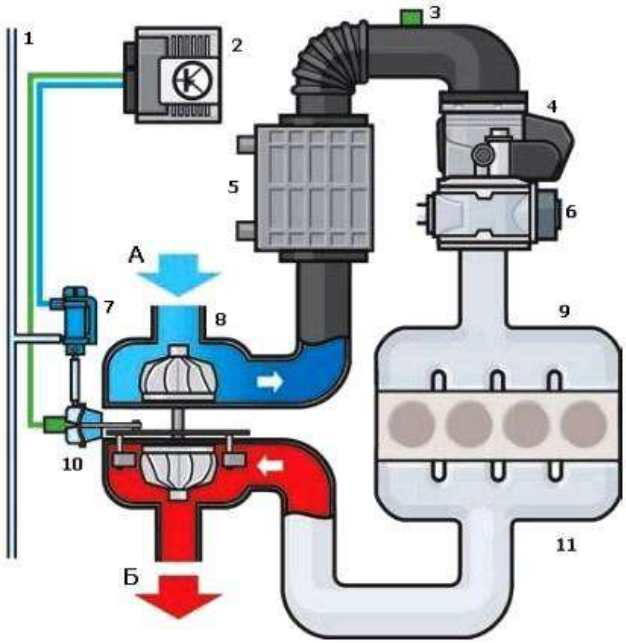
7.8 Турбонаддув двигуна TDI

Двигун **TDI** (**Turbocharged Direct Injection**, дослівно – турбонагнітач і безпосереднє упорскування) є сучасним дизельним двигуном з турбонаддувом. Двигун розроблений концерном Volkswagen, а назва TDI є зареєстрованим товарним знаком.

Турбонаддув двигуна TDI забезпечує високу динаміку автомобіля, економічність і екологічну безпеку. Для створення оптимального тиску наддування в широкому діапазоні

швидкісних режимів у конструкції двигуна використовується турбокомпресор зі змінюваною геометрією турбіни. Турбокомпресор має дві загальноприйняті назви, які використовуються різними виробниками:

- **VGT, Variable Geometry Turbocharger** (дослівно – турбокомпресор зі змінюваною геометрією) застосовує Borgwarner;
- **VNT, Variable Nozzle Turbine** (дослівно – турбіна зі змінним соплом) застосовує Garrett.

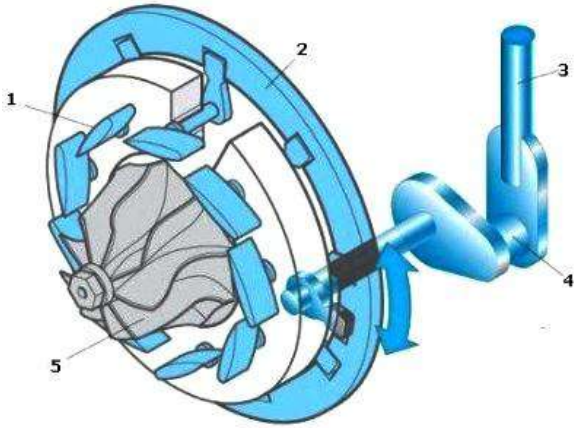


А – повітря, Б – відпрацьовані гази
1 – вакуумна магістраль, 2 – блок управління двигуном,
3 – датчики тиску наддування й температури повітря на впуску,
4 – блок керування повітряною заслінкою, 5 – інтеркулер,
6 – клапан рециркуляції відпрацьованих газів,
7 – клапан обмеження тиску наддування,
8 – турбонагнітач, 9 – впускний колектор, 10 – вакуумний привод напрямних лопаток, 11 – випускний колектор

Рисунок 7.6 – Схема турбонаддуву двигуна TDI

На відміну від звичайного турбокомпресора турбонагнітач зі змінюваною геометрією може регулювати напрямок і величину потоку відпрацьованих газів чим досягається оптимальна частота обертання турбіни й відповідно продуктивність компресора.

VNT-турбіна поєднує напрямні лопатки, механізм керування й вакуумний привод. Напрямні лопатки призначені для зміни швидкості й напрямку потоку відпрацьованих газів, за рахунок зміни величини перетину каналу. Вони повертаються на певний кут навколо своєї осі.



1 – напрямні лопатки, 2 – кільце, 3 – важіль,
4 – тяга вакуумного привода, 5 – турбінне колесо

Рисунок 7.7 – Схема турбіни зі змінюваною геометрією (VNT-турбіни)

Поворот лопаток проводиться за допомогою механізму керування. Механізм складається з кільця й важеля. Спрацьовування механізму керування забезпечує вакуумний привод, що впливає через тягу на важіль керування. Робота вакуумного привода регулюється клапаном обмеження тиску наддування, підключеним до системи управління двигуном.

Клапан обмеження тиску наддування спрацьовує залежно від величини тиску наддування, вимірюваної двома датчиками: датчиком тиску наддування й датчиком температури повітря на впуску.

7.9 Принцип роботи наддуву двигуна TDI

При роботі системи наддування двигуна TDI забезпечується оптимальний тиск повітря в широкому діапазоні частоти обертання двигуна. Це досягається за рахунок регулювання енергії потоку відпрацьованих газів.

При низьких обертах двигуна енергія відпрацьованих газів невелика. Для ефективного її використання напрямні лопатки перебувають у закритому положенні, при якому площа каналу відпрацьованих газів найменша. За рахунок малої площі перетину потік відпрацьованих газів підсилюється й змушує турбіну обертатися швидше. Відповідно швидше обертається компресорне колесо, а продуктивність турбокомпресора збільшується.

При різкому збільшенні обертів двигуна, внаслідок інерційності системи, енергії відпрацьованих газів стає недостатньо. Тому для проходження «турбоями» лопатки повертаються з деякою затримкою, чим досягається оптимальний тиск наддування.

На високих обертах двигуна енергія відпрацьованих газів максимальна. Для запобігання надлишкового тиску наддування лопатки повертаються на максимальний кут, забезпечуючи найбільшу площу поперечного перерізу каналу.

Питання для самоперевірки

1. Який принцип роботи дизельного двигуна?
2. Чим визначається процес роботи дизеля?
3. Назвіть відмінні риси дизельного двигуна.
4. Які основні напрямки вдосконалювання дизельних двигунів Ви можете назвати?
5. В чому полягають конструктивні особливості системи упорскування палива Common Rail?
6. Яке призначення сажевого фільтра?
7. Які конструктивні особливості системи впуску сучасного дизельного двигуна?
8. Для чого призначені свічі накалювання?
9. Навіщо потрібен підігрівач дизельного палива?
10. Як працює система рециркуляції відпрацьованих газів

дизеля?

11. Які є способи збільшення температури відпрацьованих газів при активній регенерації?
12. Що таке пасивна регенерація відпрацьованих газів?
13. Як працює система введення присадки в дизельне паливо?
14. Як працює турбонаддув двигуна TDI?
15. Поясніть принцип роботи VNT-турбіни.
16. В чому суть метода селективної каталітичної нейтралізації вихлопу з використанням рідких реагентів (AdBlue, DEF, AUS 32)?

8 ГАЗОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ТРАСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

У якості автомобільних газових двигунів, як правило використовуються звичайні бензинові та дизельні двигуни, систему живлення яких постачають двома комплектами приладів, що дозволяють працювати на газоподібному й на рідкому паливах.

Це змушене рішення, економічно виправдане лише слабким розвитком мережі газових станцій на великих територіях, що обслуговуються автотранспортом.

У результаті істотні експлуатаційні властивості газового палива використовуються тільки частково. Так, висока детонаційна стійкість газу, октанове число якого перевищує 100 одиниць, належним чином взагалі не реалізується, оскільки ступінь стиску двигуна при проектуванні вибирають стосовно до рідкого палива, яке має не настільки сприятливу характеристику.

Для автомобільних двигунів застосовуються природні, промислові й газогенераторні гази. Природні й промислові гази використовуються в стислому або зрідженому стані. Запас їх в автомобілі зберігається в спеціальних балонах, що становлять основу таких систем живлення.

Газогенераторний газ одержують шляхом газифікації твердого палива в газогенераторах, які монтують безпосередньо на шасі автомобіля. Для зберігання запасу палива відводять частину кузова автомобіля. Тому залежно від прийнятого типу палива, автомобілі з газовими двигунами постачають газобалонними або газогенераторним» установками.

8.1 Автомобілі на природному газі

Природний газ є самим екологічним викопним паливом. Використання природного газу в автомобілях дозволяє знизити вміст у вихлопі вуглекислого газу на 25 %, угарного газу на 75 %.

Основним компонентом природного газу виступає метан. Природний газ зберігатися під тиском 200 бар, тому інша його назва – стислий (компрімірований) природний газ (**Compressed Natural Gas, CNG**). У цей час понад 15 мільйонів автомобілів у світі вже експлуатується на природному газі.



Рисунок 8.1 – Міський автобус MAN
на природному газі (Туреччина)

Іншою перевагою природного газу є його низька ціна (метан в 2-3 рази дешевше бензину). До недоліків використання природного газу можна віднести падіння потужності автомобіля (одразу до 20%, і більше залежно від конструкції), нерозвинена мережа заправних станцій у країні, підвищене зношування клапанів при роботі двигуна на газі, висока вартість газобалонного устаткування.

Окремо необхідно сказати про безпеку автомобілів на природному газі. Дослідження німецького автомобільного клубу (ADAC) показали, що ризик виникнення пожежі при лобовому й бічному ударі транспортного засобу не збільшується. Тобто при аварії автомобіль, що працює на природному газі, поводиться як звичайний автомобіль.

Розрізняють наступні види автомобілів на природному газі:

- серійні автомобілі (випущені серійно на заводах автовиробників);
- модифіковані автомобілі (переустатковані на спеціалізованих підприємствах).

Серійні автомобілі на природному газі випускаються у двох варіантах виконання: двопаливні (газ і бензин використовуються

на однакових правах, є можливість перемикання режимів) і монопаливні (основне паливо газ, є аварійний бензобак, автоматичне перемикання на бензин). Монопаливні автомобілі краще пристосовані для роботи на природному газі, у них оптимальна витрата палива й низький рівень шкідливих викидів.

Для переходу на природний газ автовиробники використовують наявні бензинові двигуни (двигуни з іскровим запалюванням). Щонайкраще для переходу на газ пристосовані двигуни з турбонаддувом. Адаптація роботи турбокомпресора (більший стиск, додатковий тиск наддування) дозволяє добитися однакової для газу й бензину характеристики потужності й крутного моменту двигуна.

Особливостями стислого природного газу є підвищена детонаційна стійкість (октанове число 130) і відсутність змащувальних властивостей, що приводить до підвищених навантажень на двигун.

Для протидії перерахованим факторам у механічну частину двигуна вносяться різні зміни, що підвищують міцність окремих елементів і вузлів (поршневих пальців і кілець, шатунних вкладишів і сідел клапанів). При необхідності підвищується теплопровідність бензинових форсунок, збільшується продуктивність водяного й масляного насосів, заміняються свічі запалювання.

Серійні автомобілі на природному газі пропонують більшість автовиробників, у тому числі Audi, BMW, Citroen, Chevrolet, Fiat, Ford, Honda, Hyundai, Mercedes-Benz, Opel, Peugeot, Seat, Skoda, Toyota, Volkswagen, Volvo. Автомобілі реалізуються в регіонах, де використання природного газу найпоширеніше.

Модифіковані автомобілі на природному газі.

Теоретично всі автомобілі з бензиновим двигуном можуть бути переустатковані для роботи на природному газі. Спеціалізовані центри пропонують установку газобалонного устаткування на природному газі від різних виробників.

У результаті ви одержуєте двопаливний автомобіль, здатний працювати на газі й бензині. Через високу вартість газобалонне устаткування на природному газі встановлюється, в основному, на комерційний транспорт (таксі, автобус, вантажні автомобілі), де воно швидше окупається й дозволяє одержати істотну вигоду.

Дизельні двигуни також можуть бути переведені на природний газ. Тут реалізується два підходи: примусове запалення паливно-повітряної суміші (установка системи запалювання разом з газобалонним устаткуванням); самозапалювання паливно-повітряної суміші (робота двигуна на суміші дизельного палива й природного газу). Через високу вартість на природний газ переводяться дизельні двигуни автобусів і вантажівок.



Рисунок 8.2 – Розміщення газових
балонів на дизельному КамАЗі

8.2 Газобалонне обладнання

Газобалонне обладнання (ГБО) для роботи на стислому природному газі поєднує систему живлення газом і електронну систему керування. Состав газобалонного обладнання для серійних і модифікованих автомобілів в основному ідентичний і може мати конструктивні відмінності залежно від конкретного виробника ГБО.

Система живлення природним газом включає заправну горловину, газові балони, газову магістраль високого тиску,

регулятор тиску газу, газову розподільну магістраль і клапани подачі газу.

Заправна горловина (газозаправний штуцер) розташовується поруч із заливною горловиною паливного бака. Через неї при заправленні газ під тиском надходить у газові балони. Залежно від обсягу двигуна, конструкції автомобіля встановлюється один або кілька товстостінних газових балонів різної ємності. У серійних автомобілях балони розміщаються, як правило, під днищем автомобіля, у модифікованих автомобілях – у багажному відсіку. Балони кріпляться до корпуса хомутами.



Рисунок 8.3 – Газозаправний штуцер поруч
із заливною горловиною паливного бака

З балонів газ по магістралі високого тиску надходить у регулятор тиску газу, який забезпечує зниження тиску газу до номінального робочого тиску (7-9 бар). У газобалонному встаткуванні використовуються регулятори тиску діафрагменного або плунжерного типу. Зниження тиску (розширення) газу супроводжується його сильним охолодженням. Для запобігання замерзання корпус регулятора тиску газу включений у систему охолодження двигуна.

Газ номінального робочого тиску надходить у газову розподільну магістраль і далі до клапанів подачі газу у впускному

колекторі. Клапан подачі газу (у деяких джерелах – газова форсунка) являє собою електромагнітний клапан. При подачі струму на котушку електромагніту, піднімається якір і відкривається дозуючий отвір. Газ в імпульсному режимі надходить у впускний колектор і змішується з повітрям. При відсутності струму, пружина втримує клапан у закритому положенні.

Електронна система керування подачею газу включає вхідні датчики, блок керування й виконавчі пристрої. Для серійних автомобілів система керування подачею газу є розширенням системи управління двигуном. Модифіковані автомобілі мають окрему систему управління.

До вхідних датчиків відносяться датчик тиску в балоні й датчик тиску в газовій розподільній магістралі. Датчик тиску в балоні розташовується на регуляторі тиску. Він визначає запас газу в балоні (балонах) величину заправлення газом, а також герметичність балона (балонів). Датчик тиску в газовій розподільній магістралі визначає тиск газу в контурі низького тиску, на підставі якого визначається тривалість відкриття клапанів подачі газу.

Сигнали від датчиків надходять в електронний блок управління. У своїй роботі блок управління використовує інформацію від інших датчиків системи керування двигуном: частоти обертання колінчатого вала, положення дросельної заслінки, кисневого датчика та ін.

Відповідно до закладеного алгоритму блок керування виконує рад функцій:

- керування упорскуванням газу (залежно від числа обертів двигуна, навантаження, якості й тиску газу);
- лямбда-регулювання роботи на газі (забезпечення роботи на гомогенній суміші, адаптація якості газу);
- холодний пуск двигуна (при температурі повітря нижче 10ºС запуск двигуна проводиться на бензині);
- аварійний пуск двигуна (якщо протягом декількох секунд не проводиться запуск на газі, проводиться запуск на бензині).

Перераховані функції реалізуються за допомогою виконавчих пристроїв: клапанів подачі газу, запірних клапанів на

балонах, клапанів високого тиску в регуляторі тиску.

8.3 Автомобіль на зрідженому газі

Зріджений нафтовий газ (**Liquefied Petroleum Gas, LPG**) є найпоширенішим альтернативним паливом у світі й третім після бензину й дизельного палива. Зріджений газ виходить при видобутку й переробці нафти як побічного продукту.

Зріджений газ, використовуваний для моторного палива, складається із суміші газів пропану й бутану. Кількісний состав суміші залежить від сезонності застосування палива (узимку в суміші більше пропану). Зріджений нафтовий газ має високу детонаційну стійкість (105-115, залежно від состава суміші).

Використання зрідженого нафтового газу на автомобілях дає ряд переваг:

- зріджений газ в 1,5-2 рази дешевше бензину;
- при роботі на зрідженому газі викиди вуглекислого газу на 15-20 % менше в порівнянні з бензином;
- установка газобалонного встаткування на зрідженому газі не вимагає механічної зміни двигуна;
- розвинена мережа заправних станцій у країні.

Разом з тим, автомобіль на зрідженому газі не позбавлений недоліків:

- витрати зрідженого газу на 20-30 % більше ніж витрати бензину (даний недолік компенсується низькою ціною на газ);
- зниження потужності двигуна при роботі на зрідженому газі в середньому до 5 %;
- зменшення обсягу багажного відсіку, пов’язане з установкою газового балона.

Сьогодні у світі понад 16 мільйони автомобілів працюють на зрідженому нафтовому газі, половина з них перебувають у Туреччині, Південній Кореї, Польщі, Італії й Австралії. У Росії зріджений нафтовий газ особливо широко використовується на комерційному транспорті. Виробники з Італії, Нідерландів, Польщі, Росії, Туреччини та ін. країн розробляють різні власні системи живлення зрідженим газом.

Дані системи у вигляді комплектів газобалонного обладнання (ГБО) установлюються на автомобілі серійно на заводах або

індивідуально в спеціалізованих організаціях. Після установки ГБО, автомобіль стає двопаливним, тобто може працювати на бензині й газі.

Залежно від конструкції й області застосування газобалонне встаткування на зрідженому газі умовно розділяють на покоління. Усього розрізняють 6 поколінь ГБО. Технологічним, економічним, безпечним і тому затребуваним є газобалонне обладнання 4, 5 і 6 поколінь.

Газобалонне обладнання 4 покоління забезпечує розподілене упорскування випаруваного газу. Газобалонне обладнання 5 покоління відрізняє упорскування у впускний колектор рідкого газу. Безпосереднє упорскування рідкого газу в камеру згоряння реалізується за допомогою газобалонного обладнання 6 покоління.

8.4 Газобалонне обладнання 6 покоління

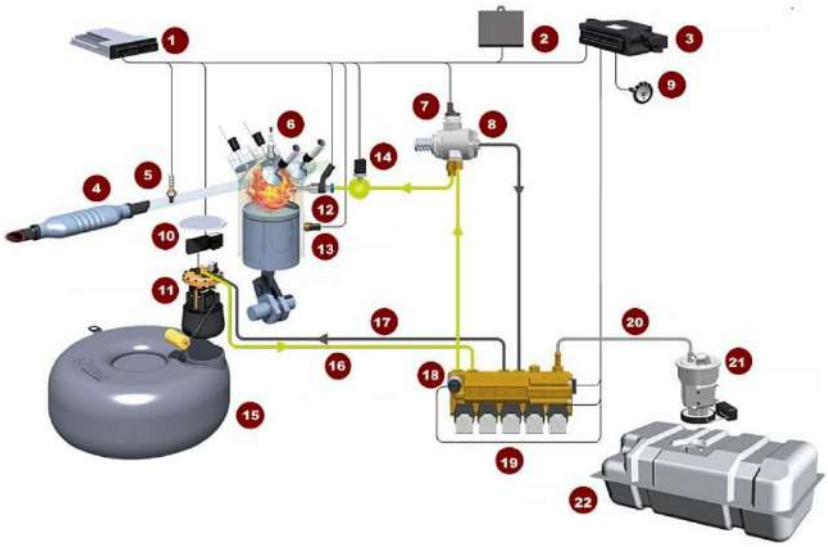
Газобалонне обладнання 6 покоління (рис. 8.4) є продовженням системи упорскування рідкого газу, у якій газ впорскується безпосередньо в камеру згоряння циліндра двигуна.

Тому інша назва – система безпосереднього упорскування рідкого газу. У даній системі усунутий недолік ГБО 4 покоління для двигунів з безпосереднім упорскуванням палива – необхідність упорскування порції бензину для збереження бензинових форсунок.

Газобалонне обладнання 6 покоління є розробкою голландської компанії Vialle. Система **Liquid Propane Direct Injection (Lpdi)** забезпечує безпосереднє упорскування рідкого газу за допомогою стандартних бензинових форсунок. Аналогічне обладнання пропонують італійські фірми ICOM, BRC.

Переваги системи безпосереднього упорскування рідкого газу:

- скорочення шкідливих викидів у відпрацьованих газах на 20 % у порівнянні з бензином;
- оптимальна витрата палива, пов’язана з його точним дозуванням;
- можливість роботи в монопаливному режимі (запуск двигуна, у тому числі холодний пуск на газі).



1 – блок керування двигуном, 2 – діагностичний роз'єм,
3 – газовий блок керування, 4 – каталізатор, 5 – кисневий датчик,
6 – свіча запалювання, 7 – регулятор тиску, 8 – паливний насос
високого тиску, 9 – перемикач режимів роботи, 10 – блок керування
насосом, 11 – газовий насос, 12 – форсунка, 13 – датчик температури
охолодної рідини, 14 – датчик тиску, 15 – газовий балон,
16 – трубопровід подачі газу, 17 – зворотний трубопровід,
18 – датчик тиску, 19 – модуль вибору палива, 20 – бензиновий
трубопровід проведення, 21 – бензиновий насос, 22 – паливний бак

Рисунок 8.4 – Схема газобалонного
устаткування 6 покоління

ГБО 6 покоління включає балон для зберігання зрідженого газу, інтегрований у балон газовий насос, модуль вибору палива, модифікований паливний насос високого тиску, форсунки упорскування, трубопровід подачі, зворотний трубопровід, електронну систему керування.

Рідкий газ із балона нагнітається паливним насосом убік модуля вибору палива. Якщо модуль переключений для роботи на газі, рідке паливо надходить у паливний насос високого тиску, де його тиск підвищується до 150-200 бар.

Під високим тиском газ надходить до форсунок і впорскується безпосередньо в камеру згоряння двигуна. Надлишки газу від насоса високого тиску по зворотному трубопроводу вертаються в газовий балон.

Серцем системи безпосереднього упорскування рідкого газу є модуль вибору палива (**Fuel Selection Unit, FSU**). Він здійснює перемикання з одного палива на інше. Зріджений нафтовий газ має більш високий тиск ніж бензин. Тому перемикання з бензину на газ відбувається швидко й без проблем.

При перемиканні з газу на бензин необхідно перейти від високого тиску газу до низького тиску бензину. Модуль вибору палива спочатку зменшує тиск зрідженого газу, а потім робить його перемішування з бензином. На такій суміші двигун працює кілька хвилин, і тільки потім починає працювати на бензині. Керування модулем вибору палива здійснює окремий блок управління, що входить до складу системи керування упорскуванням.

При тривалій стоянці й впливі високої температури навколишнього повітря газ, що заповнює систему, випаровується. Це приводить до затримки запуску двигуна, пов’язаної з необхідністю прокачування системи. Для запобігання даного недоліку газовий насос починає працювати вже при відкритті водійських дверей автомобіля.

У цей час газобалонне обладнання 6 покоління доступно не для всіх моделей автомобілів з безпосереднім упорскуванням палива. Доступні транспортні засоби публікуються на сайті виробника відповідного ГБО.

8.5 Газогенераторні установки

До Другої світової війни, а також з метою економії бензину в роки самої війни, як у Радянському Союзі так і в Німеччині багато експериментували з газогенераторними установками, що працювали на деревині або на вугіллі. Якщо дуже коротко, то принцип газогенератора полягає в наступному: у циліндричному контейнері спалюється тверде паливо, у процесі спалювання виробляється газ CO; далі газ охолоджується, фільтрується й змішується з повітрям, після чого надходить у циліндри двигуна, де підпалюється свічами запалювання.

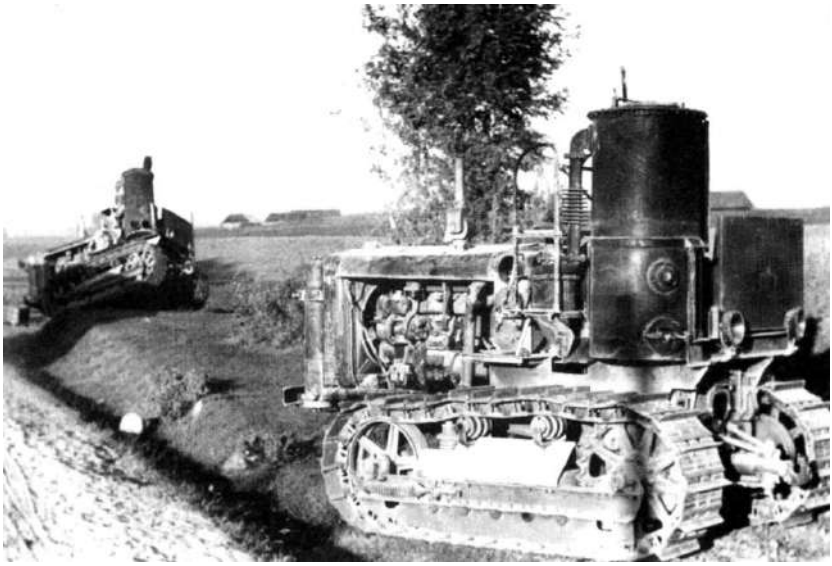


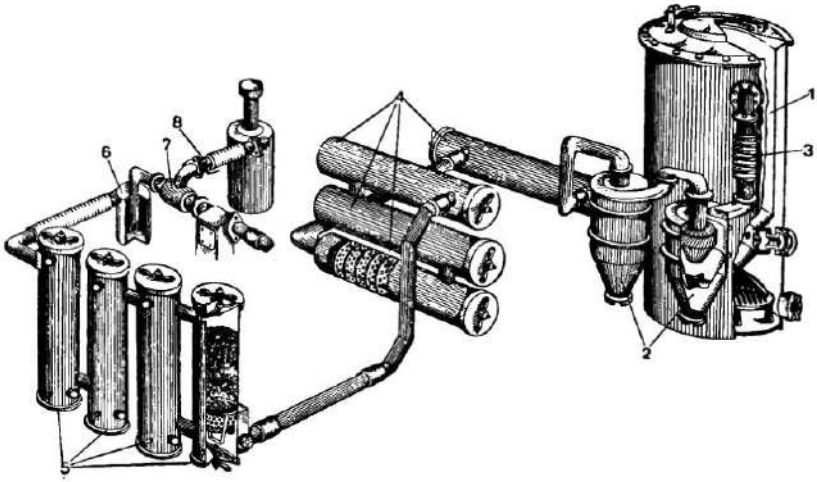
Рисунок 8.5 – Газогенераторний ГАЗ-42 на лісозаготівлях у Сибіру



Рисунок 8.6 – Використання під час війни німецьким Вермахтом захваченого радянського газогенераторного трактора ХТЗ-Т2Г для буксирування зенітної гармати

Практично будь-який двигун внутрішнього згоряння в ті роки можна було швидко конвертувати у газогенераторний, але при цьому потужність моторів відразу падала min на 20 %.





1 – генератор, 2 – фільтр, 3 – з’єднувач, 4 – фільтри,
5 – охолодні фільтри, 6 – дренажна система, 7 – клапан,
що змішує, 8 – приєднання повітряного фільтра

Рисунок 8.7 – Загальний вид трактора СГ-65 «Сталинец»
Челябінського тракторного заводу та елементи
його газогенератора

У військові роки через нестачу рідкого палива газогенераторні установки широко застосовувалися й у СРСР (в основному на лісозаготівлях у Сибіру) і в Німеччині.



Рисунок 8.8 – Автомобіль обладнаний для роботи на деревному газі (Берлін, 1946 р.)

Зокрема у СРСР на Колимі увесь автотранспорт був переведений на «дерев'яну цурпалку»: були спеціальні комбінати по заготовці й сушінню цурпалок; йдучи в рейс, водій брав шість-вісім мішків цурки, які в міру необхідності засипав у спеціальний бункер за кабіною.

У Німеччині під час війни стали робити газогенератори не тільки дров'яні, але й на брикетах із крихти й пилу бурого вугілля, тому що цього палива там було достатньо багато.

Зазвичай тягачі з газогенераторними установками використовувалися в армії в обозних частинах. Для буксирування артилерійських систем такі машини використовувалися тільки в крайньому випадку оскільки вимагали близько 20 хвилин часу для початку руху.

Так у Берліні в 1943 р., для Вермахту навіть була випущена спеціальна інструкція «Der Gasgenerator», де був описаний устрій дров'яного газогенератора GMR-13/55/17 для «Russen-Raupenschlepper», тобто газогенератор радянського трактора СХТЗ-НАТИ-1ТА. Ці трактори ХТЗ (Харківський тракторний завод) серійно будував з 1937 по 1941 рр.

Під час Другої світової війни, через обмеження й дефіцит копалин і рідких видів палива, газогенераторні технології стали звичайним явищем у багатьох європейських країнах. Тільки в одній Німеччині, до кінця війни, близько 500 000 автомобілів були дообладнані газогенераторами для експлуатації на деревному газі.

В 1942 (коли технологія ще не досягла піка своєї популярності), налічувалося близько 73 000 газогенераторних автомобілів у Швеції, у Франції 65 000, 10 000 у Данії, 9 000 в Австрії й Норвегії, і майже 8 000 у Швейцарії. У Фінляндії значилося 43 000 газогенераторних машин в 1944 році, з яких 30 000 автобуси й вантажні автомобілі, 7 000 легкові автомобілі, 4 000 тракторів і 600 човнів.

Газогенераторні автомобілі також з'явилася в США й в Азії. В Австралії налічувалося близько 72 000 газогенераторних автомобілів. У цілому під час Другої світової війни, по всьому світу в експлуатації перебувало більше мільйона автомобілів на деревному газі. Після війни, коли бензин став знову доступний, газогенераторні технології майже миттєво зникли. Проте у тій же

Західній Німеччині на початку 1950-х років, в експлуатації ще залишалося понад 20 000 газогенераторів.

8.6 Принцип роботи газогенераторних установок

У транспортних газогенераторних установках можуть газифікуватися як рослинні, так і викопні тверді палива якщо вони забезпечують стійкий процес газифікації й мають достатню механічну міцність (не подрібнюються від тряски), мають порівняно високу теплоту згоряння, реакційну здатність, певну вологість (10-15%) і т.п.

Процес газифікації полягає в неповному згорянні палива з утвором окису вуглецю, як основного компонента генераторного газу. Схематично процес газифікації можна представити таким чином.

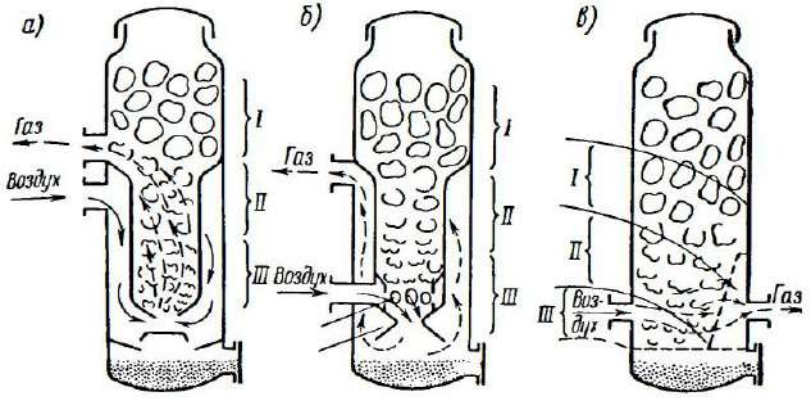


Рисунок 8.9 – Принципові схеми газогенераторів

У зоні горіння вуглець палива згоряє повністю ($C+O_2 \rightarrow CO_2$). Проходячи далі через шар розпеченого вугілля при відсутності кисню, вуглекислий газ відновлюється в окис вуглецю ($CO_2+C \rightarrow 2CO$). У зоні відновлення утворюються також CO і H_2 у результаті реакції парів води (паливо містить вологу) з вуглецем ($H_2O+C \rightarrow CO+H_2$). Водень у свою чергу частково реагує з вуглецем, внаслідок чого утворюється метан ($2H_2+C \rightarrow CH_4$).

Таким чином, при газифікації твердого палива утворюються CO (≈20%), H_2 (≈15%) і CH_4 (≈4%) – складові горючої частини

генераторного газу. Негорючу частину складають азот (≈55%) і вуглекислий газ (≈12%). Баластова частина генераторного газу становить більшу його половину, тому теплота згоряння не перевищує 1100-1300 ккал/м^3 (≈5,2·10^6 Дж/м^3).

По напрямкові руху потоків повітря й газу в газогенераторі їх підрозділяють на газогенератори із прямим, зверненим (перекинутим або зворотним) і горизонтальним процесами газифікації. Принципові схеми цих газогенераторів і рух у них потоків повітря й газу показані на рис. 8.9.

Верхня частина газогенератора називається бункером, а нижня, розташована під колосниковими ґратами, є зольником. Для кожного з них характерні три зони:

- I – підсушування з температурою близько 200° С;
- II – сухої перегонки, де паливо нагрівається до 400-600ºС без доступу кисню, внаслідок чого відбувається суха перегонка палива з виділенням з нього летучих смолистих речовин;
- III – активна, у якій здійснюються процеси горіння відновлення, тобто процеси газифікації твердого палива.

В міру вигоряння палива в активну зону надходять нові його порції під дією власної ваги.

За схемою рис. 8.9, а – із прямим процесом газифікації, повітря в зону горіння засмоктується знизу. Гази, не міняючи напрямку, проходять через зону сухої перегонки, захоплюють за собою продукти сухої перегонки й разом з ними виводяться в магістраль живлення двигуна. Температура в зоні горіння підвищується до 1600°С. Щоб знизити її до 1100-1300° С, з потоком повітря подають воду.

За схемою (рис. 8.9, б) зі зворотним або зверненим процесом газифікації повітря надходить у зону горіння через фурмені отвори, а продукти згоряння видаляються убік зольника, міняючи напрямок свого руху, по кільцевій порожнині надходять у магістраль живлення двигуна. У цьому випадку продукти сухої перегонки теж проходять через зону горіння й газифікуються, Що має важливе значення.

За схемою рис. 8.9, в – з горизонтальним процесом газифікації, повітря й продукти згоряння рухаються в напрямку, перпендикулярному до осі генератора.



Рисунок 8.10 – Використання автомобільних
газогенераторів у сучасній Північній Кореї

Горизонтальний процес у принципі схожий із прямим процесом газифікації. Для автомобільних установок більш прийнятні генератори зі зворотним процесом газифікації.





Рисунок 8.11 – Суворі будні водіїв газогенераторних автомобілів у сучасній Північній Кореї

Летучі смолисті речовини їх газифікуються й не засмолюють

систему живлення, процес проходить без підведення води, а заправлення бункера можна робити без зупинки двигуна.

Небезпеки викиду полум'я з бункера тут немає. Газогенераторний газ зазнає очищення й охолодження в грубих охолоджувачах-очисниках і потім пропускається через тонкий очисник.

Проте потік газу на вході в циліндри має температуру 40-50°С і містить порівняно багато твердих часточок. У результаті погіршується вагове наповнення циліндрів й підвищується зношування двигуна.

Газогенераторні установки громіздкі й складні в експлуатації. Застосування газогенераторного живлення доцільно тільки у випадках, коли економічно це виправдовується (на лісозаготівлях і т.п.).

Якщо говорити про автомобілі з газогенераторними установками, то їх суттєвою перевагою є можливість працювати на переробному паливі, без його попередньої хімобробки, тобто без розтрати засобів на виробництво цього самого палива.

Якщо порівнювати шкоду для навколишнього середовища від автомобілів, які їздять на дизелі й бензині, і газогенераторних автомобілів, то певна перевага за останніми. Забруднення від таких двигунів можна зрівняти із двигунами, що працюють на природному газі.

Незважаючи на очевидні «екологічні» переваги, машини з такими установками вже ніколи не повернуть свою минулу затребуваність. Сьогодні про їхнє існування в основному нагадують музейні експонати й ентузіасти, які модернізують свої особисті автомобілі для роботи на такому газі.

Північна Корея навіть сьогодні активно використовує автомобілі з газогенераторними установками. Ізоляція від зовнішнього світу абсолютно природно привела до дефіциту традиційного рідкого палива в країні, і змушує корейців використовувати газогенератори.

8.7 Безпека газобалонного обладнання

Метан – абсолютно не отруйна речовина. На відміну від пропан-бутанової суміші, отруїтися їм не можна. Можна тільки задихнутися, якщо витік настільки сильний, що газ витисне весь

кисень із кабіни. А така ситуація мало реальна. Безпека при аварії забезпечується дуже міцними товстостінними балонами (не плутати з балонами для зрідженого газу).

Вони, у принципі, є самими міцними вузлами автомобіля й залишаються непошкодженими при повному руйнуванні транспортного засобу. І навіть якщо ушкодиться запірна арматура, природний газ, який на додачу легше повітря, просто випариться на відміну від повільно паркого важкого пропан-бутану, що накопичується в низьких місцях.

Самий небезпечний ворог водіїв – це самостійна переробка й наступна експлуатація машини з використанням перероблених і перефарбованих кисневих 160 атмосферних балонів і наступним заправленням їх метаном під тиском 200 атмосфер.

На другому місці хіт-параду піротехніків-аматорів ідуть спроби за допомогою компресорів високого тиску, призначених для зарядки аквалангів, заправити автомобіль від побутової газової мережі.

Навіть якщо такі аматори не підриваються в процесі приєднання свого устаткування, то компресор швидко викачує весь тиск у побутовій трубі, робить його негативним, далі через відкриті конфорки сусідів повітря попадає в газ і вся ця гримуча суміш надходить у балони автомобіля.

Ну а далі останки автовласника і його машини після такого заправлення не можуть знайти навіть ворони. Така дурня досить поширена в нашій післямайданній Україні, оскільки рівень доходів населення стрімко наближається до рівня «провідних» африканських країн.

Варіант номер три – накачати в балон побільше газу. У своїх інтернет-щоденниках деякі власники газобалонних авто хвастаються тим, що знайшли «чудесну колгоспну заправку», де йому «накачали аж 250 атмосфер»!!! Ці горе-водії навіть не усвідомлюють що роблять…

Але бувають і такі вибухи, коли максимальний тиск у балоні навіть не перевищений. Ніколи не замислювалися, навіщо на газових заправках між колонками такі товсті стіни, а сам заправник ніколи не стоїть поруч із машиною?

Тому що левова частина вибухів відбувається саме при наповненні балонів.



Рисунок 8.12 – Наслідки розриву композитного метанового балону



Рисунок 8.13 – Розрив стального газового балону

Як правило, балони авто, що вибухнули при заправленні, ніхто не оглядав від дня установки обладнання. Але ж газові балони не вічні. Балони зношуються, метал може втомитися й

піти мікротріщинами. Усе це відбувається дуже неквапливо: мікротріщини в балоні повинен виявити періодичний огляд, який проводиться для балонів з легованої сталі раз у п'ять років, з вуглеродистої – раз у три роки й кожні два роки для балонів з композитних матеріалів. Це теоретично.

Практично – ніколи. Як результат – розрив балона в момент підвищення в ньому тиску, тобто, на заправленні. І хоч класичного вибуху з вогнем при цьому не відбувається, наслідки навіть такого «неядерного» вибуху вражають – легкові й легкі комерційні автомобілі руйнуються повністю, вантажівки й автобуси одержують важкі ушкодження.

Вибухнути балон може й від перегріву. Накачали ранком у нього холодний газ із напівпричепа з балонами, що стоїть де-небудь у тіні, а вдень настала спека.

Машина стоїть без руху, газ не витрачається, тиск не знижується. І хоча повністю заправлені балони повинні витримувати нагрівання, відбувається це не завжди. При виготовленні як самих балонів, так і арматур для газу цілком може бути допущений брак.

Ну й ще одна можлива причина – скупчення газу в підкапотному просторі при довгій стоянці автомобіля. Сучасні машини автоматично перекривають свої балони при заглушеному двигуні або втраті електроживлення, але так буває не завжди.

Пропан-бутан, як не дивно, набагато небезпечніше метану. Він витікає через мікроскопічні тріщини, отрутний, гірше чим метан випаровується у випадку витоку, й перебуває під тиском у тонкостінних балонах.

Газові машини вибухали й будуть вибухати, але якщо дотримуватися елементарних вимог безпеки, імовірність такої події приблизно така ж, як падіння літака.

Питання для самоперевірки

1. Що таке зріджений нафтовий газ (Liquefied Petroleum Gas, LPG)?
2. Які переваги використання зрідженого нафтового газу на автомобілях?
3. Що таке стислий природний газ (Compressed Natural Gas, CNG)?

4. Які переваги використання природного газу?
5. Назвіть два види автомобілів на природному газі.
6. Які види автомобілів краще пристосовані для роботи на природному газі?
7. Коротко розкажіть принцип дії газогенератора.

9 РОТОРНО-ПОРШНЕВІ ДВЗ

Фелікс Ванкель народився 13 серпня 1902 р. у німецькому містечку Лар, у родині Рудольфа й Марти Ванкель. У віці 15 років Фелікс залишився без батька який загинув під час Першої світової війни.

В 1921 р. дев'ятнадцятирічний Фелікс закінчив гімназію й змушений був влаштуватися на роботу для продовження навчання – в його родини не було коштів. Його першим місцем роботи стало книжкове видавництво, де він працював дрібним службовцем.



Рисунок 9.1 – Фелікс Ванкель поруч зі своїм двигуном

Але через кілька років він залишає це місце. Очевидно, до цього часу Ванкелю вдалося зібрати деякі кошти, яких вистачило на відкриття невеликої автомайстерні у Гейдельберзі, яка одночасно була для нього власним невеликим КБ. Саме тут Ванкель і створює перші креслення роторнопоршневого двигуна (РПД), або, як він назвав спочатку свою конструкцію, «машини з обертовими поршнями». Але заявку на двигун за схемою РПД він подає тільки в 1933 р., а сам патент одержує в 1936 р.

Тоді його розробки одразу зацікавили фірму BMW, і він одержав фінансування під власну лабораторію. В 1936 р. Ванкеля запросили на роботу на підприємство, що належало державі й працювало на армію. Разом з ним переїжджає і його невелика лабораторія. У цей час йому доводиться відійти від розробки РПД і зосередитися на розробці золотникових механізмів і технологіях ущільнень. Але робота не стояла, і вдалося створити

кілька прототипів машин типу РПД.

В 1945 р. його лабораторія потрапила під бомбардування й була повністю знищена (деякі джерела стверджують, що лабораторія була викрадена військами союзників, але сам Ванкель говорив про перший варіант), а самому конструкторові довелося провести у в'язниці два роки: з 1945 по 1946 рр.



Рисунок 9.2 – NSU Wankel Spider (осінь 1963 р.): односекційний двигун 0,5 л, розвивав 50 к.с. при 6000 об/хв і 152 км/год

Справа в тому, що в 1942 р. хтось помітив перспективність робіт Ванкеля для військової авіації і його перевели в бюро за назвою DVL, де він займався авіаційними моторами й двигунами для швидкохідних катерів. Саме роботи в цій сфері й привели Ф. Ванкеля у в'язницю.

Ванкель покинув тюремні стіни тільки в 1947 р. Цілих шість років він присвятив відтворенню своєї лабораторії, що йому й удалося зробити до 1951 р. У цьому ж році він зареєстрував власне конструкторське бюро в г. Ліндау. Тоді ж почалося його співробітництво з фірмою NSU, зайнятої випуском мотоциклів.

Завдяки співробітництву з Ванкелем, цій фірмі вдалося досить голосно заявити про себе, поставивши світовий рекорд в

одному із класів – мотоцикл їх виробництва розвив швидкість в 193 км/год. Цікаво, що з його двигуна, обсягом усього в 50 см^3, Ванкелю вдалося зняти 14 к.с. Зрозуміло, що двигун був побудований за схемою, запропонованої їм 20 років тому.



Рисунок 9.3 – NSU Ro 80 1968 року, з двосекційним РПД потужністю 115 к.с. розвивала швидкість 180 км/год

Не можна сказати, що напрямок роботи Ванкеля прийшов до душі керівництву NSU, але, той факт, що мотоцикл їх виробництва, дякуючи двигуну Ванкеля, поставив світовий рекорд, змусив їх зм'якшитися й виділити кошти на розробку нового мотора.

І результати не змусили себе чекати. Однак, Ванкелю довелося кардинально змінити свій підхід до конструкції двигуна. Причиною цього стало те, що колишня конструкція мало підходила для масового виробництва, тому й довелося вносити чималі зміни. Але в результаті двигун став більш пристосований для масового виробництва, простіше в обслуговуванні й ремонті.

Новий двигун був у перший раз було запущено 1 лютого 1957 р. Завівшись із третьої спроби, працюючи на метанолі, двигун пережив більш 100 годин випробувань, розвіявши всі сумніви про свою працездатність.

Уже в 1958 NSU зробили невелику партію автомобілів,

оснащених новим двигуном NSU Spider. Але через 10 років громадськості був представлений автомобіль NSU Ro 80, який приніс Ванкелю світове визнання. Однак для NSU цей проект став останнім. В 1969 р. фірма була змушена перейти під контроль Volkswagen. Але Фелікс Ванкель продовжив роботу над своїм двигуном.

Після NSU основними «споживачами» ідей Ванкеля стали Toyo Kogyo (майбутня Mazda) і ВАЗ (СРСР). Президент компанії Mazda Цунеджи Мацуда відразу ж оцінив величезні можливості цього винаходу й особисто уклав договір про співробітництво з NSU. В 1963 році був заснований спеціальний підрозділ компанії Mazda, під керівництвом Кенічі Ямамото, яке займається дослідженням роторних двигунів і донині. 30 травня 1967 року в продаж надійшов Cosmo Sport, оснащений двигуном Type 10A потужністю 110 к.с. – перший автомобіль від Mazda із двороторним двигуном.



Рисунок 9.4 – Mazda Cosmo Sport (1967 р.)

Розробки, які були початі надалі, дозволили японцям знизити витрати палива більше ніж на 40 % і суттєво зменшити кількість токсичних вихлопів. До 1970 року загальне число автомобілів з роторним двигуном досягло 100 тисяч. До 1975 року було зібрано

500 тисяч таких автомобілів. До 1978 року вже більше мільйона.

В СРСР на початку 1970-х, ВАЗ одержав держзамовлення на розробку автомобіля для КДБ. Необхідно було в стандартний зовні кузов виробництва ВАЗ умістити яка можна потужніший двигун. Багатоциліндрові двигуни для цього не підходили. Вихід був знайдений за допомогою придбання ліцензії на виробництво двигунів Ванкеля. Після початку власних розробок, Ванкеля таємно привозили на ВАЗ. Тоді він критично оцінив і схвалив власну ВАЗівську компоновку РПД.

Результатом цього стала поява одноротороного двигуна ВАЗ-311 (потужністю 70 к.с.), яким оснащували автомобіль, що одержав індекс ВАЗ-21108. Усього було випущено 50 таких автомобілів. Але двигун не задовольнив замовників. У першу чергу, йому не вистачало потужності. У результаті, в 1982 р. з'явився двосекційний РПД: ВАЗ-411 (потужність 110-120 к.с.) і ВАЗ 413 (140 к.с.) Автомобілі, оснащені цим двигуном носили індекс ВАЗ-21109.



Рисунок 9.5 – Сімейство роторних двигунів ВАЗ-311 і -411 розроблених у 1970-ті роки у СРСР на заводі ВАЗ

В 1992 році ВАЗ знову вертається до розробки РПД. Цього разу вже для своїх передньоприводних моделей. Цей двигун одержав індекс ВАЗ-414. Трохи пізніше в 1995 р. – був представлений двигун, що дотепер не має аналогів.

Його унікальність полягала в тому, що він був разюче універсальний: їм можна було оснастити будь-який ВАЗовський

автомобіль : «класику», передньо- і повнопривідні! Більше того, цим двигуном можна обладнати будь-який «Москвич» і навіть «Волгу»! І це не все! Існує модифікація цього ж ВАЗ – 415, призначена для малої авіації! Але, після кризи 1998 року, ВАЗ згорнув усі роботи, пов'язані із РПД. І на даний момент у світі двигунами цієї конструкції займається лише компанія Mazda.

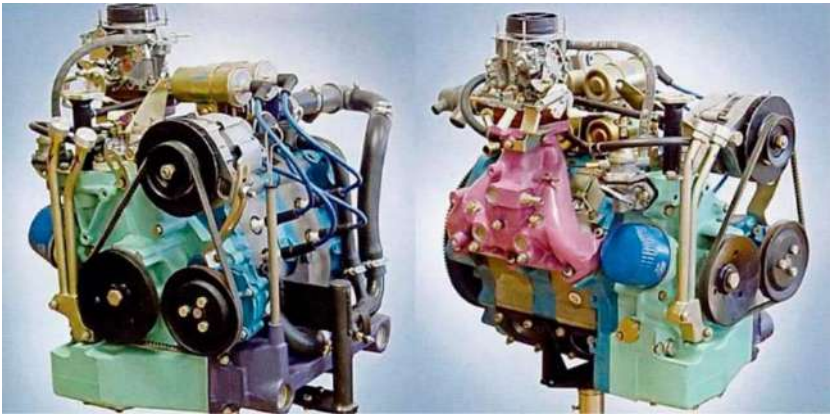


Рисунок 9.6 – Серійний двигун ВАЗ-415

Треба сказати, що Mazda із завидним терпінням продовжувала вдосконалювати роторні автомобілі і зараз міцно зайняла свою нішу на ринку з автомобілями, оснащеними двигуном Ванкеля: у цілому по світу, ними продано близько 2,5 мільйонів автомобілів, оснащених РПД.

Так їхня модель RX-8 2004 року, з 280-сильним двигуном, мала розгін до 100 км/год за 8,4 с. Але, щоб одержати від двигуна все, на що він здатний, доводилося тримати оберти не нижче 4000. Цю машину офіційно продавали в СНД.

Компанія Mazda увійшла в історію ще й завдяки тому, що в 1990-му виграла гонку в Ле-Мані із прототипом Mazda 787B. Її роторний мотор (700 к.с. при 5000 об/хв) витримав 24-годинний марафон.

Причому зробив це завдяки небувалій швидкості, а сам автомобіль був не дуже надійний. Але поки ця перемога залишається єдиною для автомобілів з роторними двигунами.



Рисунок 9.7 – Mazda RX-8

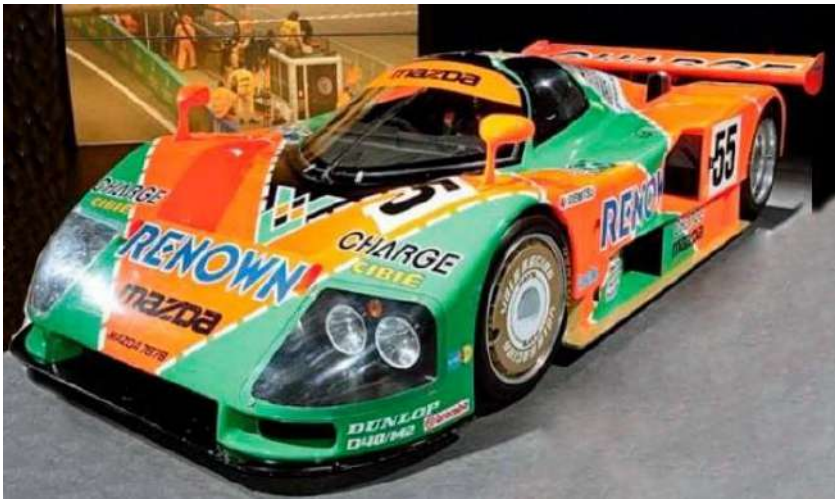


Рисунок 9.8 – Mazda 787B

Але самому Феліксу Ванкелю не вдалося дожити до тріумфу в Ле-Мані. 9 жовтня 1988 р. його не стало. До самих останніх днів він продовжував роботу над удосконалюванням свого дітища. Справа в тому, що та схема, яка й понині лежить в основі серійних РПД, не задовольняла самого інженера, і він до останнього вдосконалював ту схему, якою він займався ще до початку роботи в NSU.

В 2012 році японці припинили серійне виробництво купе Mazda RX-8. Але продовжили вести дослідницькі роботи в цьому напрямку. В 2015 році в Токіо був показаний концепт-кар RX-Vision. А в травні 2017 Mazda офіційно заявила що повертається до серійного виробництва роторно-поршневих двигунів і їх новий роторний двигун буде працювати на різних паливах, у тому числі й на водні.

Новий РПД буде мотор-генератором, яким оснастять майбутній електромобіль Мазда. Так японці планують збільшити запас ходу свого електрокара. Такий мотор компактний і не займає багато місця, а ще досить економічний при роботі на стабільних обертах. Тобто, він непогано підходить на роль генератора, що виробляє електроенергію.



Рисунок 9.9 – Mazda RX-Vision

Також новий роторно-поршневий мотор-генератор працюючи на водні буде задовольняти усім нормам токсичності Євро 4-6, оскільки в цьому випадку його вихлоп буде містити тільки водяну пару. Крім цивільних автомобілів з РПД, Mazda має багато інших цікавих й успішних розробок в цій області.

Роторними двигунами займалися багато світових компаній, навіть американські. Але до серії справа дійшла не в усіх. Крім німців і японців у цім питанні відносного успіху досягли французи. Вони теж відзначилися дрібносерійними роторними автомобілями. Спочатку вони робили 50-сильне купе M35 на базі моделі Ami 8, потім – Citroen GS Birotor з 106-сильним двигуном. Проте сумарний їхній випуск ледь перевалив за тисячу.



Рисунок 9.10 – Роторний Citroen M35 – купе

9.1 Конструктивні особливості РПД

Конструктивні особливості РПД розглянемо на прикладі двигуна 13B-MSP який свого часу ставили на Mazda RX-8.

У поршневому моторі енергія згоряння паливоповітряної суміші спочатку перетворюється у зворотно-поступальний рух поршневої групи, а вже потім в обертання колінчатого вала. У роторному ж двигуні це відбувається без проміжного щабля, а виходить, з меншими втратами.

Є дві версії бензинового 1,3 літрового атмосферника 13B-MSP із двома роторами (секціями) – стандартної потужності (192 к.с.) і форсована (231 к.с). Конструктивно це «бутерброд» з п’яти корпусів, які утворюють дві герметичні камери. У них під дією енергії згоряння газів обертаються ротори, закріплені на ексцентриковому валу (подоба колінчатого валу).

Кожний ротор не просто обертається, а обкатується своєю внутрішньою шестірнею навколо стаціонарної шестірні, закріпленої по центру однієї з бічних стінок камери. Ексцентриковий вал проходить крізь поєднання корпусів і стаціонарні шестірні. Ротор рухається таким чином, що на кожний його оберт доводиться три оберти ексцентрикового вала.

У роторному моторі здійснюються ті ж цикли, що й у чотиритактному поршневому агрегаті: впуск, стиск, робочий такт і випуск. При цьому в ньому немає складного механізму газорозподілу – привода ГРМ, розпредвалів і клапанів. Усі його функції виконують впускні й випускні вікна в бічних стінках

(корпусах) – і сам ротор, який, обертаючись, відкриває й закриває «вікна».

Принцип роботи роторного двигуна показаний на рис. 9.11. Для простоти наведений приклад мотора з однієї секцією – друга функціонує так само. Кожна бічна сторона ротора утворює зі стінками корпусів свою робочу порожнину. У положенні 1 об'єм порожнини мінімальний, і це відповідає початку такту впуску. У міру обертання ротор відкриває впускні вікна й у камеру всмоктується паливно-повітряна суміш (позиції 2-4). У положенні 5 робоча порожнина має максимальний об'єм. Далі ротор закриває впускні вікна й починається такт стиску (позиції 6-9). У положенні 10. коли об'єм порожнини знову мінімальний, відбувається запалення суміші за допомогою свічок і починається робочий такт. Енергія згоряння газів обертає ротор.

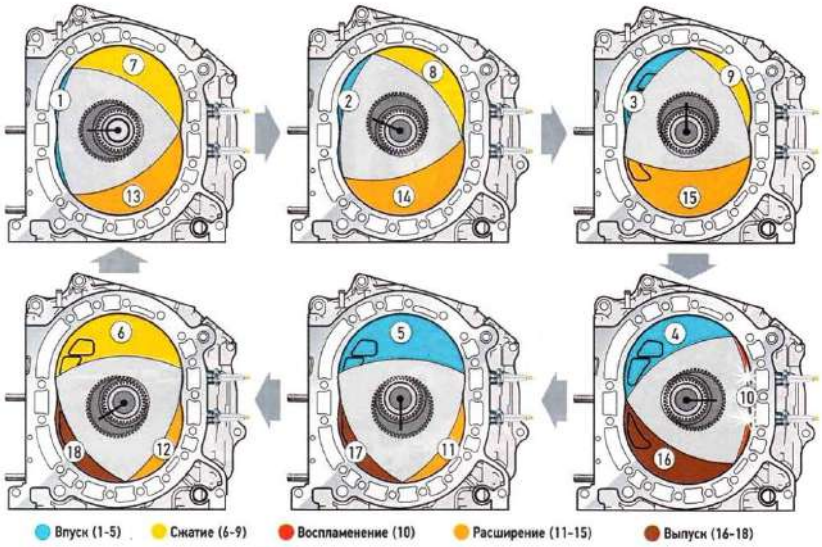
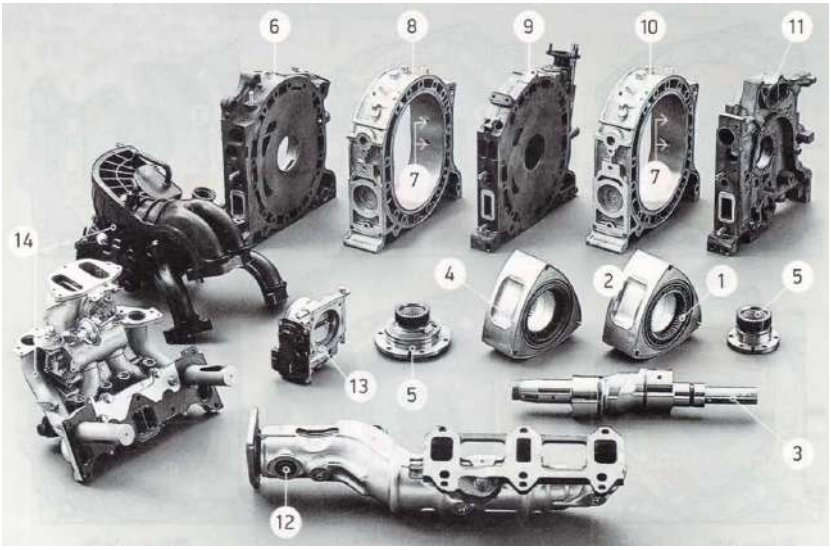


Рисунок 9.11 – Схема роботи роторного двигуна

Розширення газів іде до положення 13, а максимальний об'єм робочої порожнини відповідає позиції 15. Далі, до положення 18, ротор відкриває випускні вікна й виштовхує, відпрацьовані гази. Потім цикл починається знову.

Інші робочі порожнини працюють так само. А оскільки порожнин три, то за один оберт ротора відбувається аж три робочі такти! А враховуючи, що ексцентриковий (колінчатий) вал обертається в три рази швидше ротора, на виході одержуємо по одному робочому такту (корисна робота) на один оберт вала для односекційного мотора. У чотиритактного поршневого двигуна з одним циліндром це співвідношення у два рази нижче.

По співвідношенню числа робочих тактів на оберт вихідного вала двосекційний 13B-MSP схожий на звичний чотирициліндровий поршневий мотор. Але при цьому з робочого об'єму 1,3 л він видає приблизно стільки ж потужності й крутного моменту, скільки поршневий з 2,6 л!



1 – внутрішня шестірня ротора, 2 – передній ротор, 3 – ексцентриковий вал, 4 – задній ротор, 5 – стаціонарна (нерухлива) шестірня, 6 – задній корпус (бічний), 7 – отвір свічок запалювання, 8 – корпус заднього ротора (статор), 9 – проміжний корпус (бічний), 10 – корпус переднього ротора (статор), 11 – передній корпус (бічний), 12 – випускний колектор, 13 – дросель, 14 – впускний колектор

Рисунок 9.12 – Конструкція роторного мотора

Секрет у тому, що мас що рухаються, у роторного мотора в

кілька раз менше – обертаються тільки ротори й ексцентриковий вал, та й то в одну сторону. У поршневого ж частина корисної роботи йде на привод складного механізму ГРМ і вертикальний рух поршнів, який постійно міняє свій напрямок.

Ще одна особливість роторного мотора – більш висока стійкість до детонації. Саме тому він перспективніший для роботи на водні. У роторному двигуні руйнівна енергія аномального згоряння робочої суміші діє тільки в напрямку обертання ротора – це наслідок його конструкції. А в поршневого мотора вона спрямована в противохід руху поршня, що й викликає жалюгідні наслідки.

Хоча в роторного мотора й менше елементів, ніж в поршневого, у ньому застосовані більш хитрі конструктивні рішення й технології. Але між ними можна провести паралелі.

Корпуси роторів (статори) виготовлені за технологією вставки листового металу: у корпус із алюмінієвого сплаву вставлена подложка зі спеціальної сталі. Завдяки цьому конструкція легка й міцна. Сталева подложка має хромове покриття з мікроскопічними канавками для кращого втримання масла. По суті, такий статор нагадує звичний циліндр із сухою гільзою й хоном на ній.

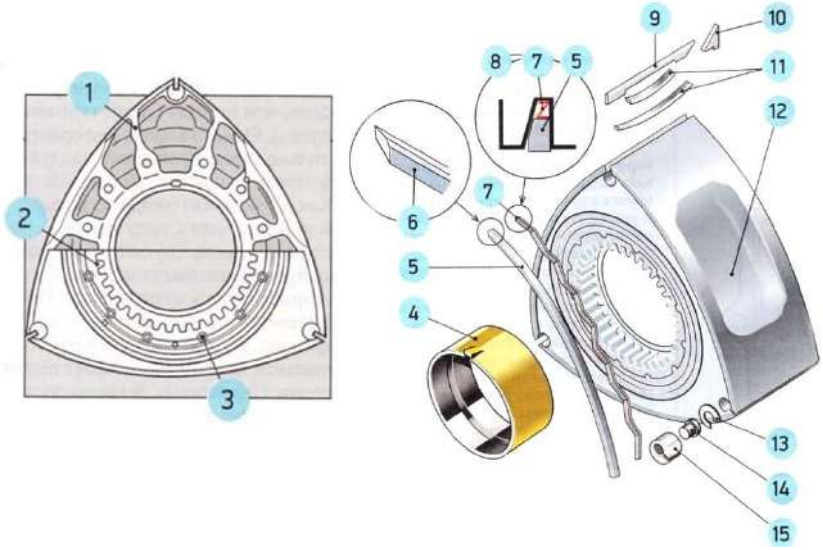
Бічні корпуси – зі спеціального чавуну. У кожному є впускні й випускні вікна. А на крайні (передньому й задньому) закріплені стаціонарні шестірні. У моторів попередніх поколінь ці вікна були в статорі. Тобто в новій конструкції збільшили їхній розмір і кількість. За рахунок цього покращилися характеристики впуску й випуску робочої суміші, а на виході – КПД двигуна, його потужність і паливна економічність. Бічні корпуси в парі з роторами по функціоналу можна зрівняти з механізмом ГРМ поршневого мотора.

Ротор – по суті, той же самий поршень і одночасно шатун. Виготовлений зі спеціального чавуну, пустотілий, максимально полегшений. На кожній його стороні є кюветообразна камера згоряння й, звичайно ж, ущільнювачі. У внутрішню частину вставлений роторний підшипник – свого роду шатунний вкладиш колінчатого вала.

Якщо звичний поршень обходиться всього трьома кільцями (два компресійні й одне маслозйомне), то в ротора подібних

елементів у кілька разів більше. Так, апекси (ущільнення вершин ротора) відіграють роль перших компресійних кілець. Вони виготовлені із чавуну з електронно-променевою обробкою – для підвищення зносостійкості при контакті зі стінкою статора.

Апекси складаються із двох елементів – основного ущільнювача й ріжка (куточка). До стінки статора їх притискає пружина й відцентрова сила. Роль других компресійних кілець відіграють бічні й кутові ущільнення. Вони забезпечують газощільність контакту ротора й бічних корпусів. Як і апекси, до стінок корпусів вони притискаються своїми пружинами. Бічні ущільнювачі металокерамічні (на них доводиться основне навантаження), а кутові зроблені зі спеціального чавуну.



1 – ребро жорсткості, 2 – внутрішня шестірня, 3 – пружинний штифт, 4 – підшипник ротора, 5 – бічне ущільнення, 6 – форма крайки бічного ущільнення, 7 – пружина бічного ущільнення, 8 – ротор, 9 – ущільнення вершини ротора (апекс), 10 – куточок апекса, 11 – пружини апекса, 12 – камера згоряння ротора, 13 – пружина кутового ущільнення, 14 – вставка кутового ущільнення, 15 – кутове ущільнення

Рисунок 9.13 – Конструкція ротора
та його основних ущільнень

А ще є ізолюючі ущільнення. Вони перешкоджають перетіканню частини відпрацьованих газів у впускні вікна через зазор між ротором і бічним корпусом. На обох сторонах ротора є й подоба маслозйомних кілець – масляні ущільнення. Вони затримують масло, що подається в його внутрішню порожнину для охолодження.

Система змащення теж витончена. Вона має мінімум один радіатор для охолодження масла при роботі мотора на великих навантаженнях і кілька видів масляних форсунок. Одні вбудовані в ексцентриковий вал і прохолоджують ротори (по суті, схожі на форсунки охолодження поршнів). Інші вбудовані в статори – по парі на кожний.

Форсунки розташовані під кутом і спрямовані на стінки бічних корпусів – для кращого змащення корпусів і бічних ущільнень ротора. Масло попадає в робочу порожнину й змішується з паливноповітряною сумішшю, забезпечуючи змащення інших елементів, і згоряє разом з нею.

Тому важливо використовувати тільки мінеральні масла або схвалену виробником спеціальну напівсинтетику. Невідповідні види змащення при згорянні дають велика кількість вуглецевих відкладань, а це приводить до детонації, пропусків запалювання й зниженню компресії.

Паливна система досить проста – за винятком кількості і розташування форсунок. Дві – перед впускними вікнами (по одній на ротор), ще стільки ж – у впускному колекторі. У колекторі форсованого мотора на дві форсунки більше.

Камери згоряння дуже довгі, і, щоб згоряння робочої суміші було ефективним, довелося застосувати по дві свічі на кожний ротор. Вони відрізняються одна від одної довжиною й електродами. Щоб уникнути неправильної установки на провода й свічі нанесені кольорові мітки.

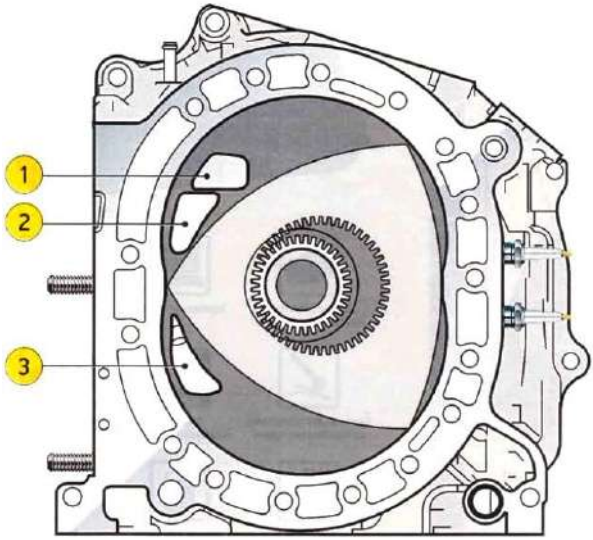
Ресурс мотора 13B-MSP становить приблизно 100 000 км. Як не дивно, він страждає тими ж проблемами, що й поршневий.

Першою слабкою ланкою видадуться ущільнення ротора, які випробовують сильне нагрівання й високі навантаження. Це дійсно так, але раніше природнього зношування їх прикінчать детонація й виробіток підшипників ексцентрикового вала й роторів. Причому страждають тільки торцеві ущільнення

(апекси), а бічні зношуються вкрай рідко.

Детонація деформує апекси і їх посадкові місця на роторі. У результаті на додачу до зниження компресії куточки ущільнень можуть вивалитися й ушкодити поверхню статора, який не підлягає обробці.

Розточення марне: по-перше, складно знайти потрібне устаткування, а по-друге, запчастин під збільшений розмір просто немає. Не підлягають ремонту й ротори при ушкодженні пазів під апекси. Як водиться, корінь лиха – у якості палива. Якісний 98-й бензин знайти не так вже й просто.



1 – додаткове впускне вікно (тільки для форсованого мотора),
2 – впускне вікно, 3 – випускне вікно

Рисунок 9.14 – Схема бічного корпуса ротора

Швидше всього зношуються корінні вкладиші ексцентрикового вала. Очевидно, через те, що він обертається в три рази швидше роторів. У результаті ротори одержують зсув щодо стінок статора.

А вершини роторів повинні бути рівновіддалені від них. Рано або пізно куточки апексів випадають і задирають поверхню статора. Це лихо ніяк не вгадати – на відміну від поршневого

мотора, роторний практично не стукає, навіть при зношуванні вкладишів.

У форсованих наддувних моторів бувають випадки, коли через дуже бідну суміш апекс перегрівається. Пружина під ним вигинає його – у результаті компресія значно падає.

Друге слабке місце – нерівномірне нагрівання корпуса. Верхня частина (тут протікають такти впуску й стиску) холодніше, чим нижня (такти згоряння й випуску). Однак корпус деформується тільки у форсованих наддувних моторів потужністю більш 500 к.с.

Як і слід було сподіватися, мотор дуже чутливий до типу масла. Практика показала, що синтетичні масла, нехай і спеціальні, утворюють при згорянні дуже багато нагару. Він накопичується на апексах і знижує компресію. Потрібно використовувати мінеральне масло – воно згоряє майже повністю. Сервісмени рекомендують міняти його через кожні 5000 км.

Масляні форсунки в статорі виходять із ладу в основному через влучення бруду у внутрішні клапани. Атмосферне повітря проникає в них через повітряний фільтр, і несвоєчасна заміна фільтра веде до проблем. Клапани форсунок промиванню не піддаються.

Проблеми з холодним пуском мотора, особливо в зимовий час, обумовлені втратою компресії внаслідок зношування апексів і появи відкладань на електродах свічок через неякісний бензин.

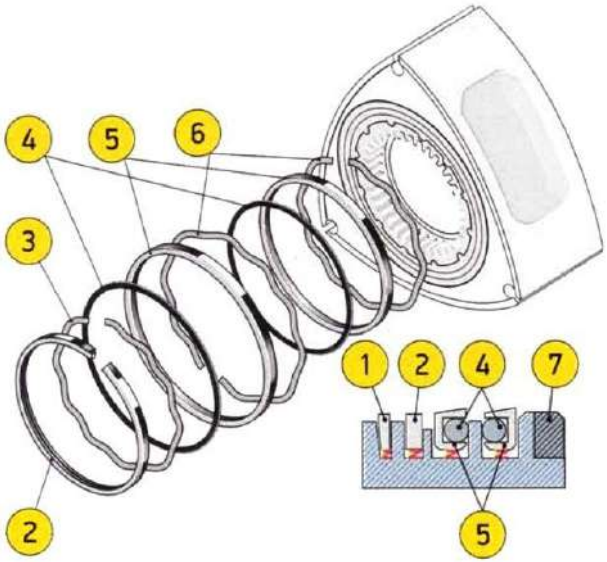
Свічок вистачає в середньому на 15 000-20 000 км.

Всупереч розхожій думці, виробник рекомендує глушити мотор як звичайно, а не на середніх обертах. «Знавці» впевнені, що при вимиканні запалювання в робочому режимі згоряють усі залишки палива й це полегшує наступний холодний пуск. На думку сервісменів, користі від подібних хитрувань нуль. А от дійсно корисним для мотора буде хоча б невеликий прогрів перед початком руху. З теплим маслом (не нижче 50°) його зношування буде меншим.

При якісній дефектовці роторного двигуна й наступному ремонті він відходить ще 100 000 км. Найчастіше потрібна заміна статорів і всіх ущільнень роторів.

Незважаючи на перераховані вище проблеми, у світі вистачає

шанувальників роторних машин. Хоча сама Мазда зняла роторну «вісімку» з виробництва, з її спадкоємицею поки не поспішає.



1 – бічне ущільнення, 2 – ізолююче ущільнення, 3 – пружина ізолюючого ущільнення, 4 – кільця, 5 – масляні ущільнення, 6 – пружини масляних ущільнень, 7 – внутрішня шестірня ротора

Рисунок 9.15 – Конструкція масляних та ізолюючих ущільнень

9.2 Переваги РПД

Головною перевагою роторно-поршневого двигуна є простота конструкції. У РПД на 35-40 % менше деталей, чим у поршневому чотиритактному двигуні. У РПД відсутні поршні, шатуни, колінчатий вал. В «класичному» варіанті РПД немає й газорозподільного механізму.

Паливо-повітряна суміш надходить у робочу порожнину двигуна через впускне вікно, яке відкриває грань ротора. Відпрацьовані гази викидаються через випускне вікно, яке перетинає, знову ж, грань ротора (це нагадує пристрій газорозподілу двотактного поршневого двигуна).

Окремої уваги заслуговує система змащення, яка в

найпростішому варіанті РПД практично відсутня. Масло додається в паливо – як при експлуатації двотактних мотоциклетних моторів. Змащення пар тертя (насамперед ротора й робочої поверхні камери згоряння) проводиться самою паливо-повітряною сумішшю.

Оскільки маса ротора невелика й легко врівноважується масою противаг ексцентрикового вала, РПД відрізняється невеликим рівнем вібрацій і гарною рівномірністю роботи. В автомобілях із РПД легше зрівноважити двигун, досягши мінімального рівня вібрацій, що добре позначається на комфортабельності машини в цілому. Особливою плавністю ходу відрізняються двороторні двигуни, у яких ротори самі є балансирами, що знижують рівень вібрацій.

Ще одна приваблива якість РПД – висока питома потужність при високих обертах ексцентрикового вала. Це дозволяє добитися від автомобіля із РПД відмінних швидкісних характеристик при відносно невеликій витраті палива. Мала інерційність ротора й підвищена в порівнянні з поршневими двигунами внутрішнього згоряння питома потужність дозволяють поліпшити динаміку автомобіля.

Нарешті, немаловажною перевагою РПД є невеликі розміри. Роторний двигун менше поршневого чотиритактного мотора тієї ж потужності приблизно вдвічі. І це дозволяє більш раціонально використовувати простір моторного відсіку, більш точно розраховувати розташування вузлів трансмісії й навантаження на передню й задню вісь.

9.3 Недоліки РПД

Головний недолік роторно-поршневого двигуна – невисока ефективність ущільнень зазору між ротором і камерою згоряння. Ротор РПД має складну форму і вимагає надійних ущільнень не тільки по гранях (а їх чотири в кожної поверхні – дві по верховим, дві по бічних гранях), але й по бічній поверхні, що стикається із кришками двигуна. При цьому ущільнення виконані у вигляді пружних смужок з високолегованої сталі з особливо точною обробкою як робочих поверхонь, так і торців.

Закладені в конструкцію ущільнень, допуски на розширення металу від нагрівання, погіршують їхні характеристики –

уникнути прориву газів у торцевих ділянок ущільнювальних пластин практично неможливо (у поршневих двигунах використовують лабіринтовий ефект, установлюючи ущільнювальні кільця зазорами в різні сторони).

В останні роки надійність ущільнень різко зросла. Конструктори знайшли нові матеріали для ущільнень. Однак, говорити про якийсь прорив поки не доводиться. Ущільнення дотепер залишаються самим вузьким місцем РПД.

Складна система ущільнень ротора вимагає ефективного змащення тертьових поверхонь. РПД споживає більше масла, ніж чотиритактний поршневий двигун (від 0,4 л до 1 л на 1000 кілометрів). При цьому масло згоряє разом з паливом, що погано позначається на екологічності моторів. У вихлопних газах РПД небезпечних для здоров'я людей речовин більше, чим у вихлопних газах поршневих двигунів.

Особливі вимоги пред'являються й до якості масел, використовуваних у РПД. Це пов'язано, по-перше, зі схильністю до підвищеного зношування (через велику площу дотичних деталей – ротора й внутрішньої камери двигуна), по-друге, до перегріву (знову ж через підвищене тертя й через невеликі розміри самого двигуна).

Для РПД смертельно небезпечні нерегулярна зміна масла – оскільки абразивні частки в старому маслі різко збільшують зношування двигуна, і переохолодження мотора. Запуск холодного двигуна й недостатній його прогрів приводять до того, що в зоні контакту ущільнень ротора з поверхнею камери згоряння й бічними кришками виявляється мало змащення. Якщо поршневий двигун заклинює при перегріві, то РПД найчастіше – під час запуску холодного двигуна (або при русі в холодну погоду, коли охолодження виявляється надлишковим).

У цілому робоча температура РПД вище, чим у поршневих двигунів. Сама термічно навантажена область – камера згоряння, яка має невеликий об'єм і, відповідно, підвищену температуру, що утрудняє процес запалення паливо-повітряної суміші (РПД через протяжну форму камери згоряння схильні до детонації, що теж можна віднести до недоліків цього типу двигунів). Звідси вимогливість РПД до якості свічок запалення. Звичайно їх установлюють у двигуни попарно.

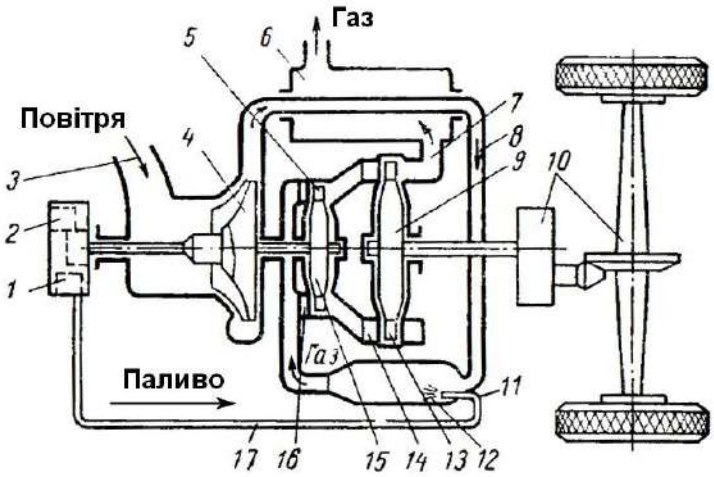
Роторно-поршневі двигуни при чудових потужності і швидкісних характеристиках виявляються менш гнучкими (або менш еластичними), ніж поршневі. Вони видають оптимальну потужність тільки на досить високих обертах, що змушує конструкторів використовувати РПД у парі з багатоступінчастими КП і ускладнює конструкцію автоматичних коробок передач. В остаточному підсумку РПД виявляються не такими економічними, якими повинні бути в теорії.

Питання для самоперевірки

1. Назвіть розробника першого працездатного РПД.
2. В якому році було одержано перший патент на РПД?
3. Коротко розкажіть устрій РПД.
4. Який середній ресурс сучасного РПД?
5. За рахунок чого досягається спрощення, врівноваження конструкції та зменшення загальної маси РПД?
6. Які основні задачі вирішують створюючи роторні двигуни?
7. В чому полягає принцип роботи роторно-поршневих двигунів?
8. Опишіть принцип роботи роторного двигуна Ванкеля.
9. Назвіть переваги двигуна Ванкеля.
10. Назвіть недоліки двигуна Ванкеля.
11. Який ресурс свічок запалення у РПД?
12. Який бажаний інтервал заміни масла у РПД?
13. За рахунок яких конструктивних рішень вдалося істотно знизити витрати палива у РПД?
14. Які середні значення витрати масла у сучасному РПД?
15. Як можна істотно збільшити потужність РПД?
16. Які існують напрямки удосконалення конструкцій роторних двигунів?
17. Які переваги застосування водню в якості палива для РПД?

10 ГАЗОТУРБІННІ ДВЗ

Газотурбінний двигун являє собою тепловий агрегат, який за принципом дії відноситься до двигунів внутрішнього згоряння. Характерна риса таких двигунів полягає в тому, що робоче тіло (повітря) проходить через них безупинно. Тому їх іноді називають струминними двигунами внутрішнього згоряння. Принципова схема автомобільної двохвальної газотурбінної установки з регенерацією тепла показана на рис. 10.1.



1 – паливний насос, 2 – масляний насос, 3 – патрубок, 4 – відцентровий компресор, 5 – робочі лопатки компресорної турбіни, 6 – теплообмінник, 7 – канал, 8 – трубопровід, 9 – тягова турбіна, 10 – трансмісія, 11 – форсунка, 12 – камера згоряння, 13 – робочі лопатки тягової турбіни, 14 – напрямна лопатка тягової турбіни, 15 – компресорна турбіна, 16 – направляючі лопатки компресорної турбіни, 17 – паливний трубопровід

Рисунок 10.1 – Схема автомобільної газотурбінної установки

Установка працює таким чином. Повітря, засмоктуване з атмосфери через патрубок 5, стискується у відцентровому компресорі 4 і, проходячи через регенератор (теплообмінник) 6, по трубопроводу 8 надходить у камеру згоряння 12. Насос 1 по

паливопроводу 17 нагнітає паливо до форсунки 11, через яку впорскує його в камеру згоряння. З камери 12 продукти згоряння спрямовуються через напрямні 16 і робочі 5 лопатки компресорної турбіни 15, а потім через напрямні 14 і робочі 13 лопатки тягової турбіни 9 у теплообмінник 6.

Компресорна турбіна пускає в хід компресор і допоміжні механізми (паливний 1 і масляний 2 насоси, електрогенератор). Тягова турбіна за допомогою трансмісії 10 з'єднана з ведучими колесами автомобіля. Продукти згоряння проходять через кільцевий канал 7 і регенератор 6, у якому віддають частину теплоти повітрю, що надходить по трубопроводу 8 у камеру згоряння 12.

Повітря в компресорі стискають до 4-4,5 атм, причому окружна швидкість лопаток досягає 400-500 м/сек, а число обертів – 30-40 тис. у хвилину.

Нерухливі напрямні лопатки (соплові апарати) 14 і 16 турбін, розташовані по окружності й утворюють між собою канали, через які проходять гази зі швидкістю, що доходить до 500-700 м/сек. Потім гази, ударяючись об робочі лопатки 5 і 13, змушують обертатися колеса й вали турбін 9 і 15.

Розглянута схема автомобільної газотурбінної установки характерна тим, що паливо й повітря надходять у камеру згоряння безупинно, а горюча суміш згоряє у відкритій камері при постійному тиску.

Для автомобілів зазвичай використовують двохвальні газотурбінні установки, у яких колеса компресорної й тягової турбін розташовані на окремих валах. У цьому випадку колеса турбін можуть розвивати різні числа обертів: компресорна турбіна – велика кількість обертів, що забезпечує високу продуктивність відцентрового компресора, а тягова турбіна – невелике число обертів при роботі або пуску в. хід.

У двохвальній установці зі зменшенням числа обертів тягової турбіни величина крутного моменту збільшується й при мінімальному числі обертів в 2-2,5 рази перевищує величину на номінальному режимі.

Крім того, двохвальна схема забезпечує кращу паливну економічність установки в порівнянні з одновальною при часткових навантаженнях.

10.1 Переваги малого газотурбінного автомобільного двигуна

1. Більш плавна робота у порівнянні з поршневими двигунами внаслідок того, що робочі елементи двигуна роблять чисто обертові рухи, завдяки чому відсутні вібрації двигуна, крутний момент на валу більш рівномірний при всіх числах обертів двигуна.

2. Більш проста конструкція більшості складених елементів двигуна й значно менша кількість таких елементів. Звичайно в газотурбінному двигуні число деталей становить 1/4-1/6 числа деталей шестициліндрового бензинового двигуна однакової потужності, наприклад, обертові елементи, шестірні, вали і т.п. Ротори компресора й турбіни з їхніми робочими лопатками, а також лопатки соплових і спрямляючих апаратів являють собою найбільш дорогі елементи конструкції двигуна.

3. Відносно малі вага й габарити. Вага простого газотурбінного двигуна становить усього 1/4-1/6 ваги поршневого двигуна рівної потужності. Двигун з вільною турбіною має трохи більшу вагу. Завдяки тому, що газотурбінний двигун має циліндричну форму, його можна виготовити більш компактним і з меншими бічними розмірами, ніж поршневий двигун. Вагу газотурбінного двигуна можна ще зменшити за рахунок більш широкого використання для виготовлення лопаток і дисків компресора легких матеріалів, наприклад магнієвих і титанових сплавів.

4. Відсутність муфти зчеплення й коробки передач. У двигуні з вільною турбіною потужність, що розвивається турбіною на холостому ході при декількох тисячах обертів вала у хвилину, недостатня для рушання автомобіля з місця при звільненні ручного гальма. Тому необхідність у муфті зчеплення відпадає. При збільшенні подачі палива в камеру згоряння крутний момент, що розвивається вільною турбіною, буде також збільшуватися, і автомобіль, починаючи рух, буде швидко розганятися. Таким чином, у такому двигуні вільна турбіна виконує функції автоматичної коробки передач. Однак для автомобіля може з’явитися необхідність в установці на ньому допоміжної нижчої зубчастої передачі. Також необхідне

застосування в автомобілі, передачі заднього ходу, як і в автомобілях з поршневими двигунами.

5. Більш просте керування. При відсутності педалі, муфти зчеплення й рукоятки перемикання передач переднього ходу необхідними, очевидно, є тільки ручка включення передачі заднього ходу, педалі газу й ножного гальма. Однак потрібно відзначити, що дві передачі переднього ходу могли б бути в автомобілі корисними.



Рисунок 10.2 – Chrysler Turbine це єдиний у світі газотурбінний легковий автомобіль, який був випущений невеликою серією. Майже всі з 80 вироблених машин компанія знищила. На даний час у світі залишилися одиниці

6. Повне згоряння палива. При великому надлишку повітря, що подається в камеру згоряння двигуна для здійснення процесу згоряння й охолодження гарячих газів, згоряння палива здійснюється повністю при нормальній роботі двигуна. Тому продукти згоряння не містять ніяких шкідливих або отруйних газів, наприклад окису вуглецю. Однак при надлишковій кількості палива, подаваного в камеру згоряння, що може трапитися під час запуску двигуна, незгоріле паливо у вигляді пару може пройти через турбіну й вийти з вихлопними газами, створюючи характерний сморід.

7. Відсутність системи водяного охолодження. Газотурбінний двигун має повітряне охолодження й не має потреби у водяному охолодженні, подібно поршневим двигунам. У зв’язку із цим вага конструкції додатково не збільшується й сама конструкція не ускладнюється. При порівнянні ваги силових

установок із системами охолодження слід ураховувати (але не завжди) вагу цих систем.

8. Відсутність постійно діючої системи запалювання. У газотурбінному двигуні немає необхідності застосовувати систему запалювання, аналогічну системі запалювання поршневих двигунів, яка забезпечує через певні інтервали часу іскровий розряд у циліндрах для запалення паливно-повітряної суміші. За винятком запалювального пристрою для запуску камери згоряння, ніякої іншої системи запалювання не потрібно, тому що якщо процес згоряння почався, то він триває безупинно доти, поки в камеру подається паливо. В автомобільних бензинових двигунах, система запалювання є одним з основних джерел дорожніх неполадок.

9. Дуже низька витрата масла. Кількість масла, що витрачається у газотурбінному двигуні незначна, в порівнянні з витратою масла в бензинових двигунах або у дизельних двигунах. Це пояснюється тим, що в газотурбінному двигуні менше підшипників і зубчастих передач, які вимагають змащення, у порівнянні із численними підшипниками та іншими тертьовими деталями поршневих двигунів. Досвід експлуатації газотурбінних двигунів в авіації показав, що витрати масла в бензиновому двигуні в 30-40 разів більші витрат масла в газотурбінному двигуні такої ж потужності.

10. Малі робочі тиски. Малі газотурбінні двигуни, що мають звичайні величини ступенів підвищення тиску, що лежать у межах від 3,5 до 5,5, з теплообмінником або без нього, працюють при порівняно низьких тисках повітря порядку 4,2-7 атм. У той же час у бензиновому двигуні в процесі згоряння палива тиск у циліндрах при повному навантаженні становить від 38,6 до 52,6 атм, а у дизельному двигуні – від 49,1 до 70 атм. Таким чином, у газотурбінному двигуні ті елементи конструкції, які піддані дії підвищених тисків, можуть бути зроблені більш легкими. Однак при цьому потрібно враховувати високі температурні напруги, які можуть виникати в цих деталях конструкції.

11. Запуск і прогрів двигуна. Подача палива в камеру згоряння і його запалення при запуску газотурбінного двигуна з холодного стану здійснюється порівняно просто. Однак для обертання вала газотурбінного двигуна під час запуску потрібна

більша потужність, ніж при запуску бензинового двигуна, або двигуна Дизеля однакової потужності. Проте запуск газотурбінного двигуна може здійснюватися автоматично, тому що первісне запалення палива в камері згоряння досить просте.

Після запуску двигуна й початку стійкої роботи, не потрібен час для його прогріву, як це має місце в поршневих двигунах, тому що в газотурбінному двигуні відсутня складна система змащення стінок циліндрів і підшипників ковзання, яка існує у двигунах поршневого типу. Основні кулькові й роликові підшипники більшості газотурбінних двигунів не вимагають спеціальної організації змащення при запуску; потрібно тільки застосовувати відповідне масло для роботи при низьких температурах.

Майже відразу ж після запуску газотурбінний двигун поступово може бути доведений до своєї повної потужності, незалежно від розігріву масла в системі змащення.

12. Значно менший догляд при експлуатації. Простий газотурбінний двигун розвиває свою потужність за допомогою свого головного елемента – турбокомпресора. Тому його конструкція повинна бути значно простішою у порівнянні з конструкцією бензинового двигуна або двигуна Дизеля, які складаються з окремих груп циліндрів і поршнів із клапанною системою впуску й вихлопу в кожному циліндрі.

Тому що газотурбінний двигун має в основному циліндричну форму, то його складові частини можуть бути виконані більш доступними при складанні й розбиранні. Разом з тим внаслідок того, що газотурбінний двигун має значно менше число робочих елементів у своїй конструкції, його обслуговування значно простіше, чим обслуговування поршневого двигуна.

Спрощує обслуговування газотурбінного двигуна також відсутність систем запалювання й підготовки палива, тому що паливна система сучасного газотурбінного двигуна, хоча й більш складна по конструкції, вимагає дуже незначного догляду.

Обслуговування будь-якого газотурбінного двигуна, а саме догляд за його головними підшипниками, зубчастими передачами та їхніми підшипниками, є порівняно простою операцією, а її необхідно робити тільки після тривалої роботи двигуна.

Самими недовговічними елементами газотурбінного двигуна

при його роботі є:

- камери згоряння;
- соплові й робочі лопатки турбіни;
- лопатки компресора;
- диски турбіни.

У ранніх типах авіаційних газотурбінних двигунів терміни служби деяких із цих елементів становив від 50 до 100 годин. У цей час вже не потрібно здійснювати обслуговування цих елементів двигуна протягом 1000-1500 годин його роботи й навіть більше. Однак дійсний термін служби кожного елемента двигуна обмежується в цей час 2500 годинами роботи.

13. Газотурбінний двигун може цілком задовільно працювати на більш дешевих сортах палива в порівнянні з автомобільними дизельними паливами. Тому при порівнянні вартості палива, що витрачається на 1 км шляху, цей фактор певною мірою компенсує більш високі значення питомої витрати палива малих газотурбінних двигунів.

Більш того, при порівнянні з високооктановими сортами палива, які використовуються в автомобільних двигунах, вартість палива газотурбінного двигуна виявляється дуже низькою.

Крім того, якщо прийняти до уваги дуже низькі витрати масла в газотурбінному двигуні, то загальна вартість палива і масла що витрачається в ньому, не повинна значно перевищувати вартість палива й масла, що витрачаються в поршневих двигунах однакової потужності.

10.2 Деякі недоліки малого газотурбінного двигуна

1. Термічний і повний ККД. Простий газотурбінний двигун через властиві йому низькі значення термічного ККД буде мати значно більші питомі витрати палива, ніж бензиновий двигун або двигун Дизеля. Це послужило причиною більш повільної розробки малого газотурбінного двигуна для автомобіля. Однак, як було вже сказано, витрата палива в газотурбінному двигуні може бути знижена до рівня, порівнянного з витратою палива поршневих двигунів шляхом використання теплообмінників відповідної конструкції. Однак застосування теплообмінника, який дозволив би збільшити термічний ККД до бажаної величини, буде означати збільшення ваги, об’єму й вартості

двигуна, у результаті чого можуть бути втрачені основні переваги малого газотурбінного двигуна, про які вже теж говорилося.

Вплив зменшення розмірів конструкції двигуна пов'язаний зі зниженням ККД компресора й турбіни, що у свою чергу приводить до зниження повного ККД двигуна на кілька відсотків.

2. ККД при часткових навантаженнях. Простому газотурбінному двигуну властиві відносно низькі значення ККД і, отже, підвищені питомі витрати палива при роботі на часткових навантаженнях у порівнянні з бензиновими двигунами й двигунами Дизеля.

Однак значення ККД при часткових навантаженнях двигуна з теплообмінником і вільною турбіною значно вищі, ніж значення ККД простого газотурбінного двигуна.

Тому що двигуни на автомобілях більшу частину часу працюють при навантаженнях, що становлять 25-35% від повного навантаження, то в цих умовах важливим є забезпечення можливо більш високих значень повного ККД двигуна.

Тому якщо у двигуні використовується теплообмінник, то він повинен по можливості забезпечувати найвищу економічність двигуна при часткових навантаженнях, навіть за рахунок зниження величини ККД при повному навантаженні.

У випадку застосування газотурбінного двигуна з вільною турбіною й диференціальним механізмом можна ще більше поліпшити економічність силової установки автомобіля.

3. Високі числа обертів. Той факт, що компресор і турбіна повинні працювати при порівняно високих числах обертів, приводить до ускладнення зубчастих редукторів, які в цьому випадку повинні мати високі передатні відношення і в той же час забезпечувати безшумну роботу двигуна.

Зі зменшенням розмірів газотурбінного двигуна розрахункове число обертів турбокомпресора повинно збільшуватися. Так наприклад, для турбогвинтового двигуна (двигуна із силовим валом) «Дарт», який розвиває на валу 2100 к.с., число обертів вала турбокомпресора становить 15 000 об/хв.

Менш потужний двигун «Блекборн – Артоуст 610», розвиває потужність 475 к.с., має швидкість обертання 35 000 об/хв, у той час як двигун промислового призначення «Ровер 1S/60» потужністю 60 к.с. працює при швидкості обертання ротора

компресора 46 000 об/хв.

У газотурбінних двигунах для передачі потужності через вал необхідний редуктор, щоб знизити число обертів до 2000-4500 об/хв при цьому загальне передатне відношення редуктора повинне бути тим вище, чим менші розміри двигуна.

У зв'язку з такими високими значеннями чисел обертів двигунів з'являється необхідність у дуже ретельному статичному й динамічному балансуванні як окремих елементів, наприклад роторів компресора й турбіни та їхнього вала, так і ротора всього турбокомпресора в зібраному виді.

Можна відзначити, що число обертів ротора змінюється, грубо кажучи, пропорційно квадратному кореню з потужності двигуна. Тому якщо двигун потужністю 5000 к.с. має швидкість обертання ротора 8000 об/хв, те двигун потужністю 100 к.с. буде мати швидкість обертання близько 56 500 об/хв.

4. Великий обсяг вихлопних газів. Як вказувалося, газотурбінний двигун повинен мати витрату повітря, необхідну для процесу згоряння палива в камері згоряння й для охолодження гарячих газів. Тому через те, що витрата повітря через нього значно перевершує витрату повітря через бензиновий двигун або двигун Дизеля, виникає проблема видалення цих великих обсягів гарячого газу з автомобіля з мінімальними незручностями для навколишніх.

На щастя, при згорянні палива в сучасних камерах згоряння в нормальних робочих умовах ці гази не мають неприємного запаху. У майбутньому обсяг вихлопних газів і їх температура можуть бути значно знижені за рахунок використання у двигунах теплообмінників і більш ефективних компресорів і турбін.

5. Повільний розгін. Внаслідок порівняно великої інерції обертових елементів двигуна при досить швидкому відкритті паливного дросельного клапана при натисканні педалі газу, може виникнути первісне запізнювання – зазвичай порядку однієї або двох секунд – перед початком руху автомобіля. Як тільки цей період запізнювання закінчується, розгін автомобіля стає дуже швидким.

Багато уваги приділялося тому, щоб знизити до мінімуму цей період. Очевидно, можна зменшити ефект запізнювання шляхом застосування алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів для

виготовлення роторів компресорів, а також легких жароміцних матеріалів, що наприклад спікаються, для виготовлення турбінних дисків і для лопаток. У зв'язку із цим слід зазначити, що інерція самої турбіни становить 60-70 % від інерції всього ротора турбокомпресора.

Застосування на автомобілі газотурбінного двигуна з вільною турбіною й диференціальним механізмом також може значно знизити цей період запізнювання.

6. Гальмування двигуном. В автомобілі з поршневим двигуном можна (звичайно так і робиться), при сповільненні руху залишити включеною коробку передач. У результаті цього двигун, пов'язаний з передачею, створює додатковий опір руху автомобіля, збільшуючи тим самим гальмовий ефект.

В автомобілі з газотурбінним двигуном, що має вільну турбіну, таке гальмування неможливе, так само як неможливо здійснити гальмування в автомобілі, у якому колеса не пов'язані із двигуном.

У зв'язку із цим робилися спроби використовувати який-небудь елемент двигуна для одержання гальмового крутного моменту потрібної величини незалежно від гальмівного моменту на колесах. Однією з таких спроб з'явилася можливість використовувати енергію вільної турбіни, яка має певний момент інерції внаслідок руху автомобіля, для розгону двигуна.

Інший спосіб що пропонувався, полягав у тому, щоб використовувати для цієї мети повітряний компресор, застосувавши відповідну обгінну муфту. Крім того, існує метод, заснований на використанні окремого повітряного компресора для поглинання потужності, переданої від коліс автомобіля.

Усі ці пристрої повинні діяти автоматично при закритті дросельного клапана й, крім того, повинні повністю використовуватися на будь-яких скільки-небудь значних спусках для акумулювання енергії з метою гальмування автомобіля.

7. Шум від вихлопних газів. Внаслідок значно більшого обсягу вихлопних газів, що викидаються в атмосферу за хвилину, і необхідності застосування понижувальних зубчастих передач із високими передатними відносинами, шум від вихлопних газів газотурбінного двигуна звичайно значно більший, чим від багатоциліндрового автомобільного бензинового двигуна,

постаченого ефективним глушником.

Шляхом ретельного проектування вихлопної системи, використання регенерації тепла для зниження температури вихлопних газів і застосування спеціальних методів конструювання й монтажу редукторів і зубчастих передач, для привода допоміжного устаткування, можна знизити шум існуючих автомобільних газотурбінних двигунів до прийнятного рівня. Для зниження рівня високочастотного шуму, виробленого струменем вихлопних газів, необхідно застосовувати глушник нової конструкції з дуже малим протитиском.

8. Більша пускова потужність. Щоб запустити холодний поршневий двигун, необхідно тільки на кілька обертів провернути колінчатий вал. У випадку газотурбінного двигуна вал турбокомпресора повинен обертатися зі швидкістю порядку декількох тисяч обертів у хвилину, перш ніж здійсниться запуск двигуна, і він зможе працювати стійко.

Газотурбінний двигун з вільною турбіною запускається значно легше, однак і в цьому випадку компресор повинен мати мінімальне робоче число обертів перед тем, як він зможе стійко працювати самостійно.

У зв’язку із цим, для запуску газотурбінних двигунів електричний пусковий пристрій повинний розвивати значно більшу потужність протягом більш тривалого періоду часу, щоб подолати інерцію роторів компресора й турбіни й розкрутити їх до мінімального пускового числа обертів.

9. Вихлопний патрубок. Через велику кількість газів, що викидаються в атмосферу, вихлопний пристрій і глушник газотурбінного двигуна повинні займати значно більший об’єм у двигуні, в порівнянні з вихлопною системою й глушником поршневих двигунів.

Так, для автомобільного двигуна «Дженерал Моторс», вихлопний патрубок і глушник мають в 10 раз більші площі поперечного перерізу, ніж в автомобільному бензиновому двигуні.

Однак якщо глушник сконструювати як частину вихлопного патрубка теплообмінника, то більші розміри вихлопного пристрою не будуть мати такого великого значення, як у випадку окремої вихлопної системи.



Рисунок 10.3 – Останній радянський автомобіль з турбіною (1250 к.с.) і електричною трансмісією МАЗ-7907 (1985 р.)

10.3 Можливі переваги застосування газотурбінних двигунів для вантажних автомобілів

З можливих областей застосування малих газотурбінних двигунів існує одна важлива область – привод вантажних автомобілів. Це дозволяє одержати економію у вазі автомобіля, завдяки порівняно малій вазі газотурбінного двигуна, а також більш легкої й простої системи привода коліс автомобіля з таким двигуном, у порівнянні із системою привода автомобілів, що використовують бензинові двигуни або двигуни Дизеля. Ця економія у вазі, яка може становити до 2 т для вантажного автомобіля більш важкого класу, дозволяє збільшити корисне навантаження автомобіля.

Крім того, вантажні автомобілі з великим радіусом дії працюють при більш високих часткових навантаженнях, чим легкові автомобілі, забезпечуючи тим самим більш високий ККД газотурбінного двигуна, при цих більш високих потужностях, і зниження в результаті цього витрат палива.

Використання більш дешевих палив у порівнянні з бензиновими або дизельними сортами палив служить додатковим джерелом зниження вартості палива для цих більш важких вантажних автомобілів.

Кращі характеристики крутного моменту газотурбінного двигуна і його дуже рівномірна робота при мінімальному числі передавальних зубчастих механізмів є іншими сприятливими

особливостями застосування цього типу двигуна. У зв'язку із цим слід сказати, що більш ефективні типи малих газотурбінних двигунів потужністю від 150 до 250 к.с., мають перевагу встановлення не на легкових, а на вантажних автомобілях.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть принцип роботи ГТД.
2. Які термодинамічні цикли реалізують у ГТД?
3. Назвіть основні конструктивні схеми та напрямки удосконалення ГТД.
4. Чи є перспективи подальшого застосування ГТД на транспортних засобах?
5. Назвіть переваги використання газотурбінного двигуна в якості автомобільного.
6. Які недоліки малого газотурбінного двигуна?
7. Внаслідок чого газотурбінний двигун має більш плавну роботу ніж традиційний поршневий двигун?
8. Чи потрібна коробка передач на автомобілі при використанні газотурбінного двигуна?
9. За рахунок чого здійснюється охолодження ГТД?
10. Як здійснюється запуск і прогрів газотурбінного двигуна?
11. Назвіть елементи газотурбінного двигуна які мають найменший ресурс.
12. Чи можливо здійснювати гальмування автомобіля газотурбінним двигуном?

11 ГІБРИДНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Гібридним автомобілем називається транспортний засіб, що приводиться в рух за допомогою гібридної силової установки. Відмінною рисою гібридної силової установки є використання двох і більше джерел енергії й відповідних їм двигунів, що перетворюють енергію в механічну роботу. У деяких джерелах інформації використовується термін «гібридний двигун», який з технічної точки зору невірний.

Незважаючи на різноманіття джерел енергії (теплова енергія бензину або дизельного палива, електроенергія, енергія стисненого повітря, енергія стислого зрідженого газу, сонячна енергія, енергія вітру та ін.) у промисловому масштабі на гібридних автомобілях використовується комбінація двигуна внутрішнього згоряння й електродвигуна.

Головна перевага гібридного автомобіля полягає в істотному скороченні витрати палива й викидів шкідливих речовин в атмосферу, яке досягається:

- у погодженій роботі ДВЗ і електродвигуна;
- застосуванням акумуляторів великої ємності;
- використанням енергії гальмування, так зване рекуперативне гальмування, що перетворює кінетичну енергію руху в електроенергію.

Разом з тим, у гібридних автомобілях використовується безліч інших інноваційних розробок, що дозволяють заощаджувати паливо й берегти атмосферу, у тому числі: система зміни фаз газорозподілу; система стоп-старт; система рециркуляції відпрацьованих газів; система підігріву охолодної рідини відпрацьованими газами; поліпшена аеродинаміка; електропривод допоміжних пристроїв (водяного насоса, кліматичної установки, підсилювача керма та ін.); шини зі зниженим опором коченню.

Необхідно відзначити, що великий ефект від гібридних автомобілів спостерігається при русі в міському циклі, який характеризується частими зупинками, роботою в режимі холостого ходу. При русі з постійною високою швидкістю

(заміський цикл) гібриди не так ефективні. Залежно від характеру взаємодії двигуна внутрішнього згоряння й електродвигуна розрізняють наступні схеми гібридних силових установок: послідовна, паралельна, послідовно-паралельна.

11.1 Послідовна схема гібридного автомобіля

Це сама проста конфігурація. При послідовній схемі автомобіль приводиться в рух від електродвигуна. Двигун внутрішнього згоряння з'єднаний тільки з генератором, який у свою чергу живить електродвигун і заряджає акумуляторну батарею.

Свою назву послідовна схема гібридного автомобіля одержала тому, що потік потужності надходить на ведучі колеса, проходячи ряд послідовних перетворень. Від механічної енергії, вироблюваної ДВЗ, в електричну вироблювану генератором, і знову в механічну. При цьому частина енергії неминуче губиться.

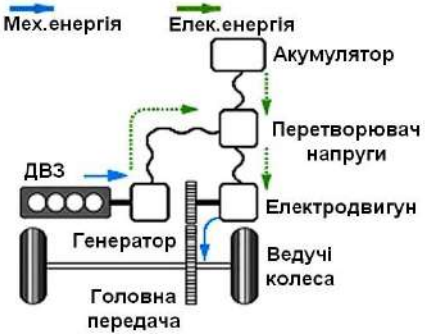


Рисунок 11.1 – Послідовна схема гібридного автомобіля

У гібридному автомобілі з послідовною схемою силової установки, як правило, передбачається можливість підключення до електричної мережі по закінченню поїздки. Такі автомобілі називають Plug-in Hybrid (дослівно – гібрид, що підключається).

Реалізація даної функції припускає використання акумуляторів збільшеної ємності (літій-іонні акумулятори), приводить до скорочення використання ДВЗ і відповідно зниженню шкідливих викидів.



Рисунок 11.2 – Конструкція Chevrolet Volt

Представниками Plug-in Hybrid є автомобілі Chevrolet Volt, Opel Ampera. Їх ще називають електромобілями зі збільшеним радіусом дії (Extended Range Electric Vehicle, EREV). Ці автомобілі мають можливість руху до 60 км на енергії акумуляторів і до 500 км на енергії генератора, що приводиться в дію ДВЗ.



Рисунок 11.3 – Opel Ampera

Оскільки ДВЗ використовується тільки для привода генератора, то відпадає необхідність у коробці передач і зчепленні. Для підзарядки акумулятора також використовується рекуперативне гальмування.

Послідовний гібрид дозволяє використовувати ДВЗ малої потужності, причому він постійно працює в діапазоні максимального ККД, або ж його можна зовсім відключити. При відключенні ДВЗ електродвигун і батарея в змозі забезпечити необхідну потужність для руху. Тому вони, на відміну від ДВЗ, повинні бути більш потужні, а отже вони мають і більшу вартість.

Найбільш ефективна послідовна схема при русі в режимі частих зупинок, гальмувань і прискорень, русі на низькій швидкості, тобто в місті. Тому використовують її в міських автобусах і інших видах міського транспорту. По такому принципу працюють також великі кар'єрні самоскиди, де необхідно передати великий крутний момент на колеса і не потрібні високі швидкості руху.

11.2 Паралельна схема гібридного автомобіля

У паралельній схемі електродвигун і двигун внутрішнього згоряння встановлюються таким чином, що можуть працювати як самостійно, так і спільно. Це досягається шляхом з'єднання ДВЗ, електродвигуна й коробки передач за допомогою автоматично

керованих муфт.

Гібридні автомобілі, що використовують паралельну схему, звуться Mild Hybrid (дослівно – помірний або м'який гібрид). У них використовується електродвигун малої потужності (порядку 20 кВт), який забезпечує, як правило, додаткову потужність при прискоренні автомобіля. У більшості конструкцій електродвигун, розташований між ДВЗ і коробкою передач, виконує також функцію стартера й генератора.

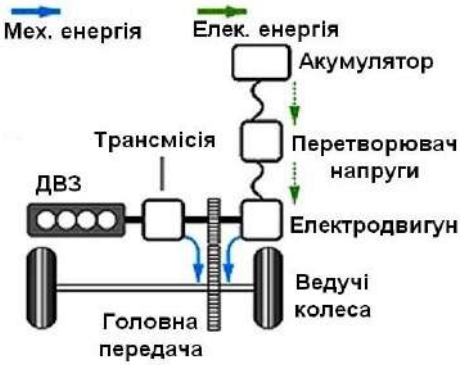


Рисунок 11.4 – Паралельна схема гібридного автомобіля

Відомими гібридними автомобілями з паралельною схемою є Honda Insight, Honda Civic Hybrid, BMW Active Hybrid 7, Volkswagen Touareg Hybrid, Hyundai Elantra Hybrid. Піонером у даній області є Honda та її система Integrated Motor Assist, IMA (дослівно – інтегрований помічник двигуна).

При роботі системи IMA можна виділити наступні характерні режими:

- робота від електродвигуна;
- спільна робота ДВЗ і електродвигуна;
- робота від ДВЗ із одночасною зарядкою акумулятора від електродвигуна в режимі генератора;
- зарядка акумуляторної батареї в режимі рекуперативного гальмування.

Отже ведучі колеса при паралельній схемі гібридного автомобіля приводяться в рух і ДВЗ, і електродвигуном (який

повинен бути оборотним, тобто може працювати в якості генератора). Для їхньої погодженої паралельної роботи використовується комп'ютерне управління.



Рисунок 11.5 – Розміщення батареї за спинкою сидіння у Honda Civic Hybrid

При цьому зберігається необхідність у звичайній трансмісії, а тому двигуну доводиться працювати в неефективних перехідних режимах. Крутний момент, що надходить від двох джерел, розподіляється залежно від умов руху: у перехідних режимах (старт, прискорення) у допомогу ДВЗ підключається електродвигун, а в устояних режимах і при гальмуванні він працює як генератор, заряджаючи акумулятор.

Таким чином, у паралельних гібридах більшу частину часу працює ДВЗ, а електродвигун використовується для допомоги йому. Тому паралельні гібриди можуть використовувати меншу акумуляторну батарею, у порівнянні з послідовними. А раз ДВЗ безпосередньо пов'язаний з колесами, то й втрати потужності значно менші, чим у послідовному гібриді.

Подібна конструкція досить проста, але її недоліком є те, що оборотна машина паралельного гібрида не може одночасно

приводити в рух колеса й заряджати батарею. Паралельні гібриди ефективні на шосе, але малоефективні в місті. Незважаючи на простоту реалізації цієї схеми, вона не дозволяє значно поліпшити як екологічні параметри, так і ефективність використання ДВЗ.

Прихильником такої схеми гібридів є компанія «Хонда». Їхня гібридна система одержала назву Integrated Motor Assist (Інтегрований помічник двигуна). Вона передбачає, насамперед, створення бензинового двигуна зі збільшеним ККД. І тільки тоді, коли двигуну стає важко, на допомогу йому повинен приходити електричний мотор.



Рисунок 11.6 – Двигун Honda Civic Hybrid із системою Integrated Motor Assist, IMA (інтегрований помічник двигуна)

У цьому випадку система не вимагає складного й дорогого силового блоку керування, і, отже, собівартість такого автомобіля виявляється нижчою. Система IMA складається з бензинового двигуна (який надає основний ресурс потужності), електромотора, який надає додаткову потужність і додаткової

батареї для електромотора.

Коли автомобіль зі звичайним бензиновим двигуном уповільнюється, його кінетична енергія гаситься опором мотора (гальмування двигуном) або розсіюється у вигляді тепла при нагріванні гальмових дисків і барабанів. Автомобіль із системою IMA починає гальмувати електромотором.

Таким чином, електромотор працює як генератор, виробляючи електрику. Збережена при гальмуванні енергія запасається в батареї. І коли автомобіль знову почне прискорюватися, батарея віддасть усю накопичену енергію на розкручування електромотора, який знову перейде на свої тягові функції. А витрата бензину зменшується рівно настільки, скільки енергії було запасено при попередніх гальмуваннях.

Загалом, у компанії Honda уважають, що гібридна система повинна бути максимально простою, тому електричний мотор виконує лише одну функцію – допомагає двигуну внутрішнього згоряння заощадити якнайбільше пального. Honda випускає дві гібридні моделі: Insight і Civic.

11.3 Послідовно-паралельна схема гібридного автомобіля

При послідовно-паралельній схемі двигун внутрішнього згоряння й електродвигун з'єднані через планетарний редуктор.

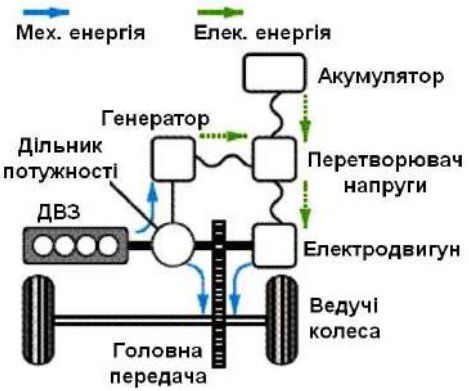


Рисунок 11.7 – Послідовно-паралельна схема гібридного автомобіля

При цьому потужність кожного із двигунів може передаватися на ведучі колеса одночасно у співвідношенні від 0 до 100 % від номінальної потужності. На відміну від паралельної схеми в послідовно-паралельну схему доданий генератор, що забезпечує енергією роботу електродвигуна.



Рисунок 11.8 – Послідовно-паралельна схема
гібрида BMW Active Hybrid X6

Гібридні автомобілі, що використовують послідовно-паралельну схему, називають Full Hybrid (дослівно – повний гібрид). Відомими повними гібридами є автомобілі Toyota Prius, Lexus RX 450h, Ford Escape Hybrid.

У цьому сегменті ринку гібридних автомобілів панує компанія Toyota та її система Hybrid Synergy Drive, HSD. Силова установка системи HSD являє собою двигун внутрішнього згоряння (з'єднаний з водило планетарного редуктора), електродвигун (з'єднаний з коронною шестірнею планетарного редуктора), генератор (з'єднаний із сонячною шестірнею планетарного редуктора).

Двигун внутрішнього згоряння працює по циклу Аткінсона, при якому реалізуються посередні показники потужності на низьких обертах, відповідно досягається більша паливна економічність і менші шкідливі викиди.

У роботі системи Hybrid Synergy Drive можна виділити наступні режими:

- режим електромобіля, при якому ДВЗ виключений, а акумуляторна батарея живить електродвигун;
- режим руху з постійною (крейсерською) швидкістю, при якому потужність від ДВЗ розподіляється між ведучими колесами й генератором. Генератор у свою чергу живить електродвигун, потужність якого поєднується з потужністю ДВЗ. При необхідності проводиться зарядка акумуляторної батареї;
- форсований режим, при якому до ДВЗ приєднується електродвигун, що живиться від акумуляторної батареї, забезпечуючи імпульс потужності;
- економічний режим, при якому акумуляторна батарея живить генератор. Генератор перетворює електричну енергію в механічну, сповільнюючи обертання ДВЗ. При цьому крутний момент двигуна не зменшується, а досягається паливна економічність;
- режим гальмування, при якому електродвигун працює як генератор, а електроенергія використовується для обертання сонячної шестірні в протилежну сторону, сповільнюючи швидкість руху автомобіля;
- режим зарядки акумулятора, що здійснюється за

допомогою ДВЗ і генератора.

Розглянемо більш детально конструктивні особливості послідовно-паралельної схеми. Так розроблена компанією Тойота система Hybrid Synergy Drive (HSD) поєднує в собі особливості двох попередніх типів. У схему паралельного гібрида додається окремий генератор і дільник потужності (планетарний механізм).

У результаті гібрид здобуває риси послідовного гібрида: автомобіль рушає й рухається на малих швидкостях тільки на електротязі. На високих швидкостях і при русі з постійною швидкістю підключається ДВЗ.

При високих навантаженнях (прискорення, рух у гору й т.п.) електродвигун додатково підживлюється від акумулятора – тобто гібрид працює як паралельний. Завдяки наявності окремого генератора, що заряджає батарею, електродвигун використовується тільки для привода коліс і при рекуперативному гальмуванні.

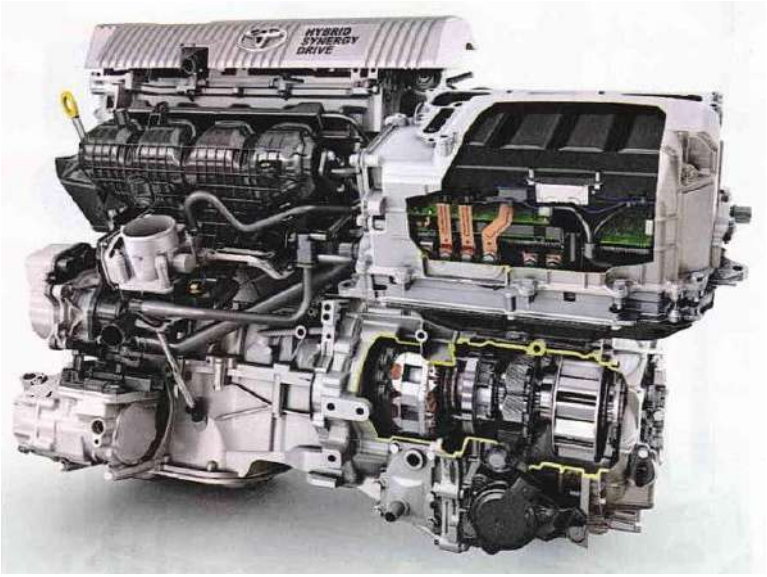


Рисунок 11.9 – Силовий агрегат Toyota Prius

Планетарний механізм передає частину потужності ДВЗ на колеса, а іншу частину на генератор, який або живить

електродвигун, або заряджає батарею. Комп'ютерна система постійно регулює подачу потужності від обох джерел енергії для оптимальної експлуатації при будь-яких умовах руху.

У цьому типі гібрида більшу частину часу працює електродвигун, а ДВЗ використовується тільки в найбільш ефективних режимах. Тому його потужність може бути нижче, чим у паралельному гібриді.

Важливою особливістю ДВЗ також є те, що він працює по циклу Аткінсона, а не по циклу Отто, як звичайні двигуни. Тобто якщо робота двигуна організована по циклу Отто, то на такті впуску поршень, рухаючись униз, створює в циліндрі розрідження, завдяки якому відбувається усмоктування в нього повітря й палива.

При цьому в режимі малих обертів, коли дросельна заслінка майже закрита, з'являються так звані «насосні втрати». Щоб краще зрозуміти, що це таке, спробуйте, наприклад, втягти повітря через затиснуті ніздрі.

Крім того, при цьому погіршується наповнення циліндрів свіжим зарядом і відповідно підвищується витрата палива й викиди шкідливих речовин в атмосферу. Коли поршень досягає нижньої мертвої точки (НМТ), впускний клапан закривається. У ході такту випуску, коли відкривається випускний клапан, відпрацьовані гази ще перебувають під тиском, а їхня енергія безповоротно губиться – це так звані «втрати випуску».

У двигуні Аткінсона на такті впуску впускний клапан закривається не поблизу НМТ, а значно пізніше. Це дає цілий ряд переваг. По-перше, знижуються насосні втрати, тому що частина суміші, коли поршень пройшов НМТ і початків рух нагору, виштовхується назад у впускний колектор (і використовується потім в іншому циліндрі), що знижує в ньому розрідження. Горюча суміш, що виштовхується із циліндра, також несе із собою частину тепла з його стінок.

Тому що тривалість такту стиску стосовно такту робочого ходу зменшується, то двигун працює по циклу зі збільшеним ступенем розширення, при якому енергія відпрацьованих газів використовується більш тривалий час, тобто зі зменшенням втрат випуску. Таким чином,одержуємо кращі екологічні показники, економічність і більший ККД, але меншу потужність. Але в тому-

то й суть, що мотор гібрида Тойоти функціонує в режимах малих навантажень, при яких цей недолік циклу Аткінсона не відіграє великої ролі.

До недоліків послідовно-паралельного гібрида слід віднести більш високу вартість, у вигляді того, що він потребує окремого генератора, більшого блоку батарей, і більш продуктивну і складну комп'ютерну систему управління.

Система HSD установлюється на хетчбеку Toyota Prius, седані бізнес-класу Camry, позашляховику Lexus RX400h, Toyota Highlander Hybrid, Harrier Hybrid, спортивному седані Lexus GS 450h і автомобілі люкс-класу – Lexus LS 600h.

Ноу-хау компанії Тойота вже куплене компаніями Форд і Ніссан і використане при створенні Ford Escape Hybrid і Nissan Altima Hybrid. Toyota Prius лідирує по продажах серед усіх гібридів. Витрата бензину в місті становить 4 л на 100 км пробігу. Це перший автомобіль, у якого витрата палива при русі в місті менше, чим на шосе.

11.4 Переваги автомобілів з гібридною силовою установкою

Ощадлива експлуатація **–** головна перевага гібридів. Щоб досягти її, необхідно було шукати баланс, тобто зрівноважити всі технічні показники машини, але при цьому зберегти всі корисні параметри звичайного автомобіля: його потужність, швидкість, здатність до швидкого розгону, і безліч інших, досить важливих характеристик, закладених у сучасних автомобілях.

Мало того, здатність накопичувати енергію, у тому числі й не втрачати понапрасну кінетичну енергію руху під час гальмування, а заряджати акумуляторні батареї, крім основних явних переваг, привнесло деякі побічні «дрібні радості», наприклад, менше зношування гальмових колодок.

Як була досягнута економія:

- зниженням обсягу й потужності двигуна;
- за рахунок роботи двигуна в оптимальному й рівномірному режимі, у набагато меншій залежності від умов їзди;
- повною зупинкою роботи двигуна, коли це необхідно;
- можливістю руху тільки на електродвигунах;

- рекуперативним гальмуванням із зарядкою акумулятора.

Уся ця система настільки складна, що стала можлива повною мірою тільки в сучасних умовах, із застосуванням досить непростих алгоритмів роботи бортового комп'ютера. Навіть правильне й ефективне (з погляду безпеки) гальмування управляється бортовим комп'ютером.

Екологічна чистота. Зниження витрати вуглецевого палива, негайно позначилося на екологічній чистоті. Повна зупинка роботи двигунів у місцях скупчення автомобілів на дорогах міст, і насамперед у пробках, має саму першорядну роль. Застосування ж акумуляторних батарей, набагато меншої ємності, чим в електромобілях, знизило проблему утилізації використаних акумуляторів. Розвиток гібридної технології в суспільному транспорті, і для вантажних автомобілів, ще більше поліпшить екологічну обстановку міст.

Гарні ходові характеристики. Тепер немає необхідності встановлювати двигун з розрахунку пікових навантажень експлуатації. У момент, коли необхідно різке посилення тягового навантаження, у роботу включаються одночасно як електро-, так і звичайний двигун (а в деяких моделях і додатковий електродвигун).

Це дозволяє заощадити на установці менш потужного двигуна внутрішнього згоряння, що працює основний час у найбільш сприятливому для себе режимі. Такий рівномірний перерозподіл і накопичення потужності, з наступним швидким використанням, дозволяє використовувати гібридні установки в автомобілях спортивного класу й позашляховиках.

Незважаючи на те, що електродвигуни мають досить сильний крутний момент у перерахуванні на масу й габарити двигуна, у порівнянні з іншими двигунами, розроблювачі все-таки в ряді моделей установлюють не занадто потужні електродвигуни, зменшуючи їх габарити. При цьому, з метою підсумовування потужностей, застосовуються комбіновані схеми передачі крутного моменту, із прямою передачею механічного крутного моменту, безпосередньо від двигуна. Така схема називається «гібридно-спільний привод».

Збільшення дальності пробігу автомобіля. Час – це самий коштовний ресурс для людини. Виключення половини заїздів на

заправні станції, і навіть більшої кількості таких заїздів, при їзді по місту, вивільняє у автовласника деяку кількість часу для інших більш важливих справ.

Збереження й повторне використання енергії. Усунутий головний недолік двигуна на вуглецевому паливі – неможливість повернення енергії назад у вуглецеве паливо. Інженери давно намагалися зберегти енергію руху при гальмуванні, щоб її повторно використовувати. Наприклад, застосовувалися спеціальні конструкції з більшим маховиком. Але тільки електричну енергію вдається зберегти із самими мінімальними втратами й максимально дешево. У якості накопичувача застосовуються як акумулятори, так і спеціальні конденсатори.

Звичайне заправлення паливом. В електромобілів поки є один великий недолік – необхідність зарядки акумулятора. Процес довгий, і вимагає деякого спеціально обладнаного пункту зарядки. У такий спосіб він стає непридатним для тривалих і далеких поїздок. Але вже розроблені технології, що дозволяють заряджати літій-іонні акумулятори з електродами з наноматеріалів до 80 % ємності за 5-15 хвилин.

У гібридного автомобіля цей недолік усунутий. Заправлення здійснюється за звичною схемою, звичайним вуглецевим паливом, тоді, коли це необхідно, і подальший рух можна негайно продовжити. У міському циклі експлуатації гібридний автомобіль 80 % часу працює в режимі електромобіля.

11.5 Загальні недоліки гібридів

Гібридні автомобілі складніші й дорожчі традиційних автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння. Акумуляторні батареї мають невеликий діапазон робочих температур, не люблять морозів, піддані саморозряду, термін їхньої служби обмежений декількома роками. А «ощадливість» гібрида прямо пов’язана зі станом акумуляторної батареї.

Гібриди дорожчі в ремонті,. Досвід автоіндустрії США говорить про те, що автомеханіки беруться за ремонт гібридних автомобілів з великим небажанням, та й за сам ремонт візьметься далеко не кожний. Тому у США намагаються розв’язати проблему дорожнечі володіння гібридним авто податковими пільгами.

Далеко не всі великі автовиробники змогли створити власну гібридну систему. Компанія Porsche взагалі відмовилася від спроб самостійного виробництва гібридного автомобіля. Компанія Mitsubishi споконвічно не намагалася створити гібридний автомобіль, а сконцентрувала всі свої зусилля на розробці електромобілів. Найбільш вдала на сьогодні серійна розробка – Hybrid Synergy Drive компанії Toyota.

Гібридні автомобілі, як і електромобілі, хоч і меншою мірою, піддані проблемі утилізації відпрацьованих акумуляторів. Вплив викинутих акумуляторів на навколишнє середовище, очевидно, ніхто не досліджував. Але ж він може бути небезпечним.

Природна складність і «нетрадиційність» створення деяких моделей спричиняє збільшення ціни на автомобілі, тобто відразу виникає такий істотний недолік як висока вартість деяких гібридних моделей автомобілів.

І на останок, високу екологічність і економічність гібридів багато фахівців ставлять під сумнів. Так, ряд тестів, проведених авторитетними автомобільними виданнями, показав, що гібриди дають помітну економію палива тільки в місті, при русі ж у змішаному циклі незначно, а за містом суттєво програють сучасним дизелям.

Із усього сказаного вище, можна зробити висновок, що напевно, нема рації вважати гібридні автомобілі вирішенням усіх проблем. Це скоріше проміжний етап на шляху до майбутньої машини з нульовим викидом шкідливих речовин. Гібридні технології дають можливість відробити її ключові технічні компоненти – ємні компактні акумулятори, оптимізовані системи «повторного використання» енергії, технологію швидкої зарядки від зовнішніх джерел, нові електродвигуни, полегшені кузови.

Тільки масове виробництво цих вузлів зможе наблизити той час, коли замість поїздки на заправлення досить буде підключити автомобіль на 5-10 хвилин до звичайної домашньої електромережі, або до електрозаправної станції десь у місті – а потім їздити цілий день без підзарядки.

Питання для самоперевірки

1. Який транспортний засіб (автомобіль) називається «гібридом»?

2. В чому полягає головна перевага гібридного автомобіля?
3. Які з інноваційних розробок використовуються у гібридних автомобілях?
4. Поясніть послідовну схема гібридного автомобіля.
5. Які переваги й недоліки послідовної схеми гібридного автомобіля?
6. Поясніть паралельну схему гібридного автомобіля.
7. Які переваги й недоліки паралельної схеми гібридів?
8. Поясніть послідовно-паралельну схема гібридного автомобіля.
9. В чому полягають переваги й недоліки послідовно-паралельних схем гібридних автомобілів?
10. Які режими роботи можна виділити у роботі системи Hybrid Synergy Drive?
11. Розкажіть про конструктивні особливості послідовно-паралельної схеми гібридів на прикладі Toyota Prius.
12. Назвіть загальні переваги автомобілів з гібридною силовою установкою.
13. Які загальні недоліки притаманні всім гібридним силовим установкам транспортних засобів?
14. Розкажіть про використання механічних накопичувачів енергії на сучасному автомобільному транспорті.
15. Розкажіть принцип дії пневматичного двигуна автомобіля.
16. Які переваги і недоліки властиві електропневматичним силовим установкам транспортних засобів?

12 ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З НЕТРАДИЦІЙНИМИ РОБОЧИМИ ЦИКЛАМИ

Аналіз перспектив розвитку двигунобудування свідчить про те, що в недалекому майбутньому поршневі двигуни внутрішнього згоряння збережуть своє домінуюче положення в традиційних галузях їх застосування (автомобільний і залізничний транспорт, сільськогосподарське машинобудування, суднобудування) при одночасному розширенні їх використання в транспортних засобах спеціального призначення.

Поршневі двигуни постійно удосконалюються в першу чергу по екологічних і економічних показниках, обумовленою досконалістю робочого процесу. Однак в останні роки намітилася тенденція до зниження темпів поліпшення цих показників.

Поліпшення показників робочого процесу ДВЗ здійснюється за рахунок розвитку гнучко керованих систем паливоподачі й повітропостачання. При цьому схема реалізації робочого процесу базується на традиційних дво- або чотиритактних циклах, що практично не перетерпіли змін, за більш ніж столітню історію розвитку ДВЗ. Удосконалювання традиційних циклів уже виявляється недостатньо ефективним і можуть бути затребувані нетрадиційні модифіковані робочі цикли ДВЗ.

12.1 Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ

При описі циклів використовуються наступні терміни й визначення.

Робочим циклом ДВЗ називають періодично повторюваний ряд послідовних процесів, що протікають у циліндрі двигуна, що й обумовлюють перетворення теплової (хімічної) енергії в механічну роботу.

Такт (хід поршня) – частина робочого циклу (сукупність процесів), що відбувається в циліндрі, здійснювана в інтервалі переміщення поршня між двома суміжними мертвими точками (ВМТ і НМТ).

Свіжий заряд – суміш палива й окиснювача, що надійшла в циліндр.

Робоче тіло – гази, за допомогою яких у циліндрі

здійснюється перетворення теплової енергії в механічну роботу.

Випускні гази – гази, що віддаляються із циліндра ДВЗ після завершення робочого циклу.

У традиційному циклі присутні наступні такти: впуск; стиск; робочий хід, що складається із процесів згоряння й розширення робочого тіла; випуск – видалення випускних газів із циліндра в атмосферу, або в турбіну турбокомпресора.

З метою вдосконалювання робочих процесів і одержання нових якостей пропонувалися й пропонуються відмінні від класичних модифіковані цикли ДВЗ.

Модифіковані робочі цикли можуть складатися з комбінації декількох елементарних циклів, які відрізняються тактами, або використовуваним робочим тілом. Елементарний цикл починається з такту впуску й завершується тактом випуску. Комбінований цикл, наприклад, що складається з чотиритактного і двотактного циклів позначається як 4+2.

У двигунах з модифікованим робочим циклом такти можуть спільно здійснюватися не в одному, а у двох, або більше циліндрах. Тому тактом будемо називати частину робочого циклу при зміні об'єму модуля від мінімального до максимального значення. Такти можуть бути рівної й нерівної довжини.

У двигунах з модифікованим циклом, робочим тілом, крім продуктів згоряння, також можуть бути пара, суміш пари із продуктами згоряння, стиснене повітря.

У модифікованому циклі можуть бути присутні процеси й такти, відмінні від традиційних, або такі, що є їхнім різновидом.

Витиснення – видалення випускних газів або повітря з одного циліндра в інший циліндр двигуна з метою додаткового розширення.

Розширення – робочий хід, у якому є процес розширення, але відсутній процес згорання.

Згоряння – так будемо називати традиційний робочий хід із процесами згоряння й розширення, тобто щоб відрізнити його від такту ***Розширення***.

Ізохорне згоряння – згоряння в камері постійного об'єму.

Нагнітання – стиск робочого тіла (як правило повітря) в одному циліндрі та його переміщення в повітряний ресивер, або використання для наддування іншого циліндра.

Розглянемо більш докладно приклади модифікації циклу ДВЗ при поділі тактів між його робочими об'ємами – двигуни з розділеним циклом і двигуни з доданими тактами.

12.2 Двигуни з розділеними тактами

Двигунами з розділеними тактами будемо називати такі, у яких такти робочого циклу (впуск – стиск – розширення – випуск) здійснюються в різних циліндрах, як правило, у двох. При цьому двигун складається із двоциліндрових модулів. Повний робочий цикл відбувається, як правило, за один оберт колінчатого вала, хоча двигун є чотиритактним.

У традиційному чотиритактному двигуні робочий цикл здійснюється в одному циліндрі за два оберти колінчатого вала, а у двигуні з розділеним у просторі циклом, робочий процес здійснюється у двох циліндрах за один оберт колінчатого вала. Тому за інших рівних умов, літрова потужність двигунів із традиційним і розділеним циклами однакова.

При реалізації робочого циклу за класичною схемою, процеси згоряння й розширення здійснюються протягом одного такту – робочий хід. Вони не розділені в просторі (відбуваються в одному циліндрі) і слабко розділені в часі.

Паливноповітряній суміші бракує часу для повноцінного згоряння. Для якісного сумішоутворення в дизелі часу так само недостатньо. При частоті обертання колінчатого валу 4800 $хв^{-1}$ (80 $с^{-1}$), характерної для високооборотних дизелів легкових автомобілів, чотири такти (два оберти колінчатого вала) відбуваються за 2/80=0,025 с (25 мс). Сумішоутворення здійснюється приблизно за 20° повороту колінчатого вала, або за 20/360х80 = 0,0007 с = 0,7 мс.

При частоті обертання колінчатого валу 350...550 $хв^{-1}$, характерної для средньоборотних суднових дизелів, на сумішоутворення приділяється на порядок більше часу 6...10 мс, що визначає суттєво більш високий рівень індикаторного ККД у дизелів цього класу.

Іншою обставиною, що негативно впливає на процес згоряння, є зменшення обсягу надпоршневого простору при русі поршня вниз після проходження ВМТ. При цьому в міру поширення фронту полум'я, тиск і температура робочого тіла

зменшуються, а площі охолодних поверхонь і, відповідно, втрати теплоти збільшуються. Це приводить до зниження ефективності процесу згоряння й збільшенню утвору продуктів неповного згоряння CO і CH.

Для усунення зазначених недоліків запропонований ряд конструктивних рішень, у яких передбачено повний або частковий поділ робочого ходу на такти згоряння й розширення.

Крім того, поділ тактів по різних циліндрах додає традиційному циклу ДВЗ додаткові позитивні якості. Наприклад, збільшивши розміри одного із циліндрів, можна забезпечити продовжене розширення робочого тіла.

Концепція розділеного циклу не нова. Ще в 1891 г. американська компанія Backus Water Motor Company випускала такі двигуни малими серіями, але вони не одержали поширення.

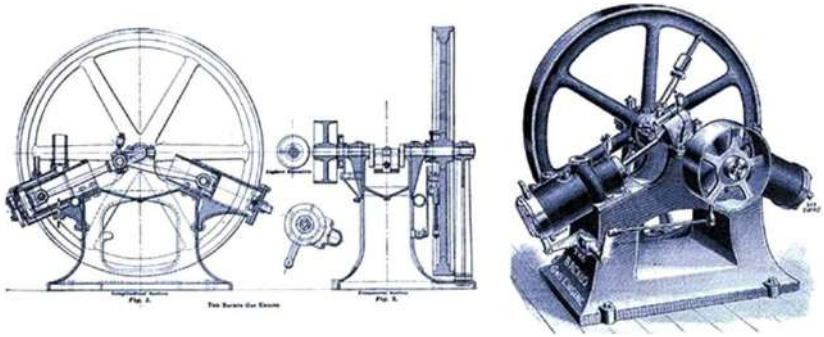


Рисунок 12.1 – Двигун Backus Water Motor Company

12.2.1 Двигун Кушуля

В 60-х роках XX сторіччя, професор Ленінградського інституту авіаційного приладобудування В.М. Кушуль, запропонував двигун, у якому попарно розташовані циліндри, сполучені між собою через короткий тангенціальний канал, виконаний у головці блоку.

Рух поршнів відбувається з деяким зрушенням по фазі. Поршень другого циліндра відстає на 22-24° по куту повороту колінчатого вала від поршня першого, що досягається особливим розташуванням цапфи причіпного шатуна.

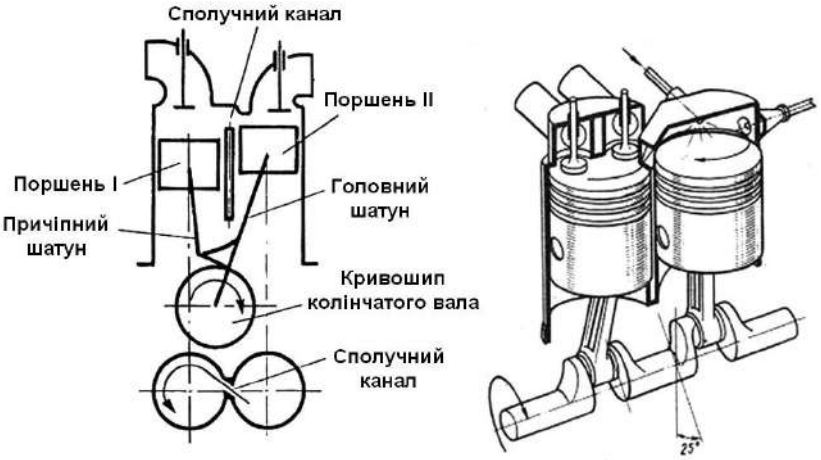


Рисунок 12.2 – Двигун В.М. Кушуля

Ступінь стиску в першому циліндрі дорівнює 7, як у двигунах з іскровим запаленням, а в другому – 21. При цьому загальна для блоку із двох циліндрів ступінь стиску дорівнює 10.

Двигун працює в таким чином. На такті впуску перший циліндр через відповідний канал із клапаном заповнюється збагаченою паливноповітряною сумішшю, а в другий через свій впускний клапан надходить чисте повітря. На такті стиску, значна частина повітряного заряду із другого циліндра перетікає в перший циліндр.

Запалення суміші в першому циліндрі здійснюється від електричної іскри за 10-12° до ВМТ. Після запалення й початку першої фази згоряння заряду в першому циліндрі, поршень у другому циліндрі ще продовжує рух до ВМТ. Кут відставання в русі поршня другого циліндра обраний таким, що за першу фазу процесу згоряння – до приходу поршня першого циліндра у ВМТ – підвищення тиску від стиску в другому циліндрі, дорівнювало би збільшенню тиску від згоряння в першому циліндрі, або незначно перевершувало його.

Отже, у першій фазі процесу згоряння, незважаючи на те, що циліндри сполучені між собою, у кожному з них незалежно відбуваються різні процеси: у першому – згоряння, а в другому – стиск (з можливим незначним перетіканням стисненого повітря в

перший циліндр). Коли ж поршень першого циліндра проходить ВМТ і згоряння за участю власного повітряного заряду в основному закінчується, тиск стиску в другому циліндрі починає перевищувати тиск згоряння й наступає друга фаза процесу згоряння, із надходженням стислого до високого тиску повітря, із другого, в перший циліндр.

До моменту закінчення перетікання стисненого повітря, коли другий поршень досягає ВМТ, процес згоряння повністю закінчується й починається одночасне розширення в першому й другому циліндрах. Наприкінці процесу розширення в обох циліндрах відкриваються випускні канали, й при наступному такті гази виштовхуються із циліндрів. Не дивлячись на досить успішні випробування дослідних зразків, двигун В.М. Кушуля не знайшов промислового застосування внаслідок значного ускладнення конструкції.

12.2.2 Двигун Скудері

В останні роки найбільш активно розробляє концепцію розділеного циклу фірма Scuderi Group (США), винахідника К. Скудері, який запропонував термін Split-Cycle Combustion (SCC). В 2009 р. на Всесвітньому конгресі SAE у Детройті, був представлений діючий прототип двигуна Скудері.

У двигуні Скудері один циліндр призначений для впуску й стиску, а інший – для розширення (робочого ходу) і випуску відпрацьованих газів. Циліндри з'єднуються між собою пропускним каналом із клапанним механізмом, по якому стисла паливноповітряна суміш надходить у робочий циліндр.

Поршні в паралельних циліндрах рухаються з невеликим зсувом по фазі (орієнтовно, близько 30°), забезпечуючи послідовне, але майже одночасне протікання двох тактів. Коли в першому циліндрі (компресорному) здійснюється впуск або стиск, у другому циліндрі, відповідно, відбувається розширення або випуск. Двигун Скудері може складатися з декількох пар циліндрів. Запалення суміші відбувається після ВМТ. При цьому поршень у першому циліндрі рухається нагору, а поршень у другому (робітнику) циліндрі – униз. Процес згоряння здійснюється при слабко мінливому обсязі циліндрів, що повинне сприяти підвищенню індикаторного ККД.

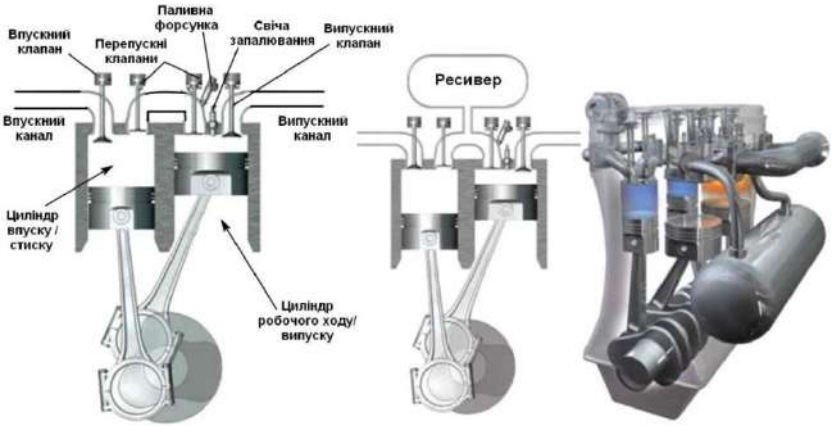


Рисунок 12.3 – Двигун Скудері

Двигун Скудері може бути доповнений повітряним ресивером. У цьому випадку можливі кілька режимів роботи двигуна. Звичайний режим, при якому в компресорному циліндрі здійснюються такти впуску й стиску, а в робочому циліндрі – робочий хід і випуск. Повітряний ресивер відключений.

Режим компресора. Робочий циліндр відключений, а компресорний циліндр нагнітає повітря в ресивер, акумулюючи енергію гальмування автомобіля, яка використовується згодом для здійснення корисної роботи.

Економічний режим. Компресорний циліндр відключений. Стиснене повітря з ресивера надходить у робочий циліндр, у який також подається паливо. Підвищення ККД циклу відбувається через відсутність витрат енергії на стиск робочого тіла.

Еспандерний режим. Компресорний циліндр відключений. Подача палива в робочий циліндр відсутня. Стиснене повітря з ресивера надходить у робочий циліндр, розширюючись у якому, робить корисну роботу за рахунок рекуперації енергії гальмування.

12.2.3 Двигун Zajacmotors

В інжиніринговій фірмі Zajac Motors (США) розроблений двигун з розділеним робочим циклом, принцип роботи якого також досить близький до організації робочого процесу у двигуні

Скудері. Стиск повітряного заряду проводиться в одному циліндрі, а розширення – в іншому (рис. 12.4).

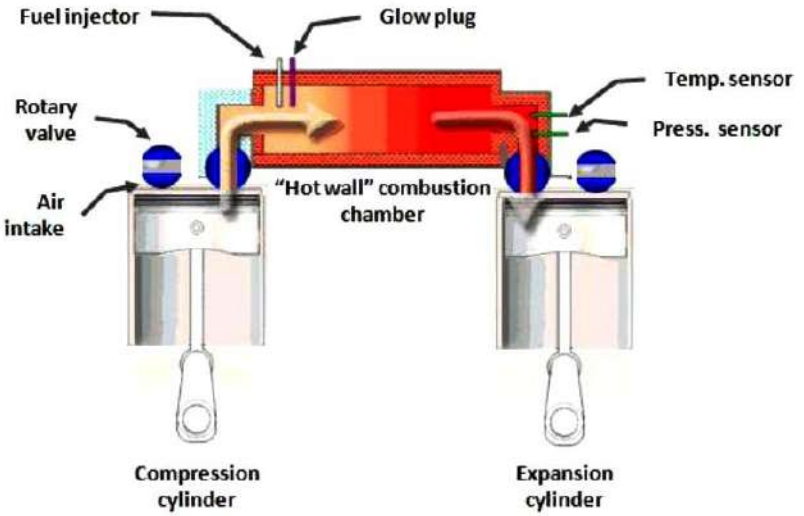


Рисунок 12.4 – Схема двигуна ZajacMotors

Двигун оснащений зовнішньою камерою згоряння, що працює за принципом, названому розроблювачами «гаряча стінка», у яку надходять паливо й повітря, стислі у першому циліндрі. Форма камери згоряння, принцип роботи, дизайн і матеріали для виготовлення захищені патентами. Конструкція двигуна передбачає використання елементів газорозподілу обертового типу.

12.2.4 Двигун TourEngine

Схема двигуна, розробленого Х. Туром (Tourengineinc., США), близька до схеми двигуна Скудері. Модуль двигуна Tourengine складається з двох опозитно розташованих циліндрів зі зміщеними осями й двох колінчатих валів. Внутрішні порожнини компресорного циліндра, називаного «холодним» і робочого циліндра, називаного «гарячим», сполучені один з одним коротким сполучним каналом, що перекривається клапаном (рис. 12.5).

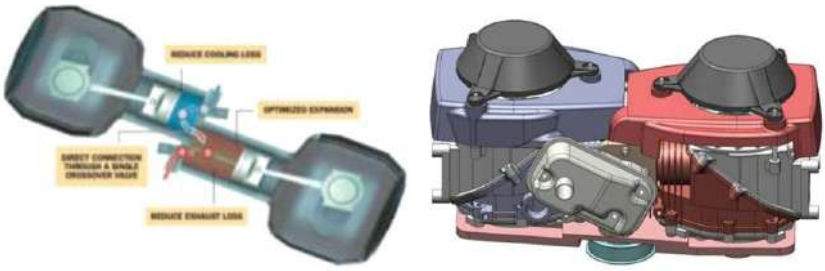


Рисунок 12.5 – Двигун TourEngine

Робочий об’єм «холодного» циліндра 95 см^3 у два рази менше, чим в «гарячого» циліндра 190 см^3. Відповідно ступінь стиску в «холодному» циліндрі, дорівнює 8, у два рази менше ступеня розширення в «гарячому» циліндрі, дорівнюючої 16, що дозволяє забезпечити продовжене розширення робочого тіла. У 2011 р. дослідний зразок двигуна TourEngine експонувався на різних автомобільних виставках і конференціях.

12.3 Розділений цикл із робочим процесом HCPC

Група вчених з університетів Піза (Італія) і Медісон (США) на базі двигуна з розділеним циклом розробляють концепцію Homogenous Charge Progressive Combustion (HCPC), що є різновидом робочого процесу із самозапалюванням гомогенної суміші (рис. 12.6). Як і в інших двигунах з розділеними тактами, у двигуні, що реалізує процес HCPC, є два циліндри, в одному з яких (компресорному) здійснюються впуск і стиск, а в іншому (робочому) – згоряння, розширення й випуск.

Циліндри з’єднані пропускним каналом, у який проводиться упорскування палива трохи пізніше ВМТ поршня робочого циліндра. У цей час поршень компресорного циліндра рухається до своєї ВМТ, переміщаючи повітряний заряд через пропускний канал у робочий циліндр.

12.4 Двигуни з доданими тактами

Додаткові такти додають до чотирьох тактів традиційного циклу з метою реалізувати продовжене розширення робочого тіла, або забезпечити додатковий відвід і рекуперацію теплоти від деталей циліндропоршневої групи.

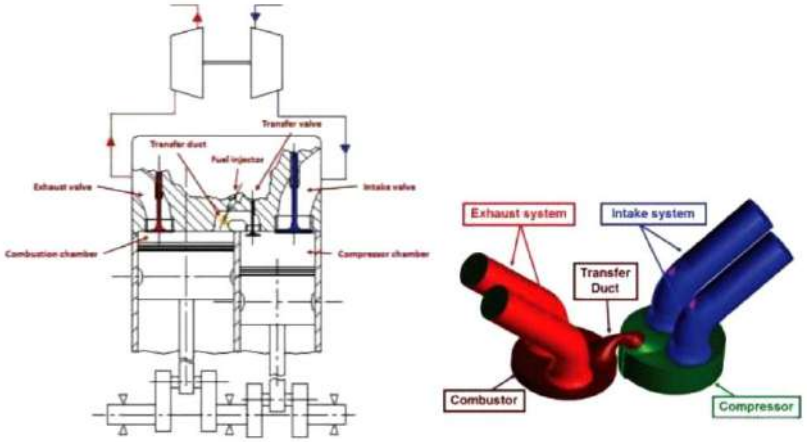


Рисунок 12.6 – Двигун із процесом HCPC

Модифіковані робочі цикли можуть складатися з комбінації декількох елементарних циклів, що відрізняються тактами, або використовуваним робочим тілом. Елементарний цикл починається з такту впуску й завершується тактом випуску.

Комбінований цикл, наприклад, що складається із чотиритактного й двотактного циклів позначається як 4+2. У двигунах з модифікованим циклом, робочим тілом, крім продуктів згоряння, також можуть бути пара, суміш пари із продуктами згоряння або стиснене повітря.

12.4.1 П’ятитактний двигун ILMOR.

Англійська компанія Ilmor Engineering, відома своїми двигунами для гоночних автомобілів, представила на виставці EXPO 2009 у Штутгарті двигун, названий п’ятитактним. За основу конструкції двигуна прийняті технічні рішення патенту 2003 р. бельгійського винахідника Герхарда Шмітца (Gerhard Schmitz).

Двигун має доданий такт робочого циклу й забезпечує продовжене розширення. Головним завданням проекту було створення бензинового двигуна з високою питомою потужністю, що не уступає по паливній економічності дизелям, але позбавленого властивого останнім недоліку, у вигляді підвищеної

емісії оксидів азоту й сажі.

Три циліндри п’ятитактного ДВЗ мають різний діаметр. Зовнішні циліндри високого тиску (ВТ) малого діаметра, працюють по звичайному чотиритактному циклу. У середньому циліндрі низького тиску (НТ) великого діаметра відбувається продовжене розширення газів, яке розроблювачі й назвали п’ятим тактом.



Рисунок 12.7 – Двигун ILMOREngineering

Робочий об’єм циліндра низького тиску становить 350 $см^3$, а робочий об’єм циліндра низького тиску дорівнює 778 $см^3$. Геометричний ступінь стиску, він же ступінь розширення, у циліндрах високого тиску є 8, а ступінь розширення в циліндрі низького тиску є 30. Загальний ступінь розширення у двигуні становить 30.

Дослідний зразок двигуна має максимальні потужність і крутний момент відповідно 96 кВт/7000 $хв^{-1}$ і 166 Нм/ 5000 $хв^{-1}$. При цьому мінімальна величина питомої ефективної витрати палива дорівнює 226 г/кВт год, що значно нижче, чим у кращих сучасних аналогів. Тиск наддування становить 0,5 МПа.

Двигун має два розподільні вали. Перший вал, що обслуговує циліндри високого тиску, робить один оберт за два оберти

колінчатого вала так, як це здійснюється в традиційних чотиритактних ДВЗ. Другий розподільний вал, що обслуговує циліндр низького тиску, обертається із частотою, дорівнюючій частоті обертання колінчатого вала.

Робочий процес п'ятитактного двигуна складається із чотирьох фаз (рис. 12.8).

Фаза А. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від ВМТ до НМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від НМТ до ВМТ. У першому циліндрі ВТ здійснюється впуск свіжого заряду, а в другому циліндрі ВТ – робочий хід (згоряння й попереднє розширення). У циліндрі НТ здійснюється випуск газів.

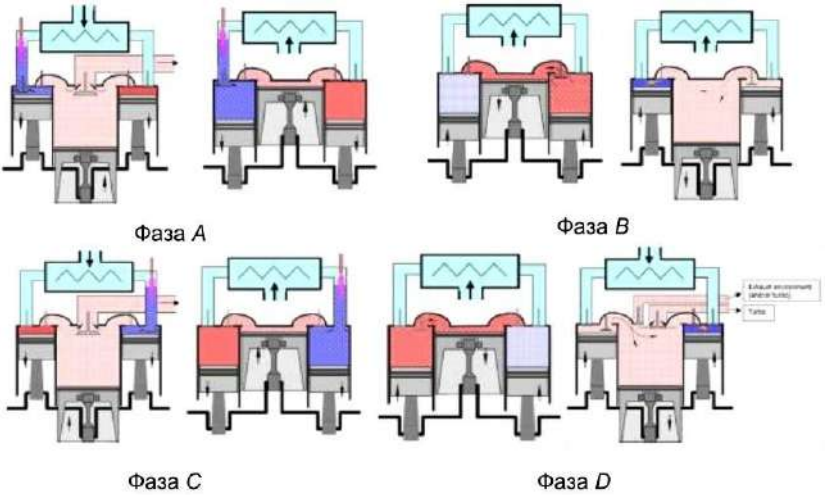


Рисунок 12.8 – Фази робочого процесу
п'ятитактного двигуна

Фаза В. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від НМТ до ВМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від ВМТ до НМТ. У першому циліндрі ВТ здійснюється стиск свіжого заряду, а в другому циліндрі ВТ – витиснення випускних газів у циліндр НТ. У циліндрі НТ здійснюється процес додаткового розширення випускних газів із другого циліндра ВТ.

Фаза С. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від ВМТ до НМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від НМТ до ВМТ. У першому циліндрі ВТ здійснюється робочий хід (згоряння й попереднє

розширення), а в другому циліндрі ВТ – впуск свіжого заряду. У циліндрі НТ здійснюється випуск газів.

Фаза D аналогічна Фазі В, у якій перший і другий циліндри ВТ міняються місцями.

Таким чином, робочий цикл п'ятитактного двигуна здійснюється за два оберти колінчатого вала й складається із двох процесів. Перша група включає процеси впуску, згоряння й попереднього розширення в першому або другому циліндрах ВТ і випуск газів із циліндра НТ.

Друга група включає процеси стиску й витиснення випускних газів у першому або другому циліндрах ВТ і додаткове розширення випускних газів у циліндрі НТ.

Необхідно відзначити, що перші зразки триціліндрових двигунів із зовнішніми циліндрами малого діаметра, що працюють по чотиритактному циклу, і внутрішнім циліндром великого діаметра, що працюють по двотактному циклу, були виготовлені ще Н. Отто й Р. Дизелем

12.5 Реалізація п'ятитактного циклу у двигунах традиційної конструкції

Істотним недоліком концепції ILMOR Engineering є необхідність створення двигунів нової конструкції без уніфікації із серійними моделями й неможливість побудови типорозмірних рядів двигунів.

Продовжене розширення робочого тіла може бути організоване й у серійних двигунах традиційної конструкції з форсуванням двигуна за допомогою наддування при скороченні числа працюючих циліндрів. При цьому середній ефективний тиск і, отже, механічний ККД на характерних режимах експлуатації автомобіля, можуть бути суттєво підвищені зі збереженням вихідної номінальної потужності двигуна.

У виключених циліндрах припиняється здійснення традиційного робочого процесу ДВЗ, і вони переводяться в режим продовженого розширення (еспандерний режим). У сучасних комбінованих двигунах внутрішнього згоряння продовжене розширення продуктів згоряння палива звичайно здійснюють у газовій турбіні, потужність якої використовують тільки для привода нагнітача. Додаткове розширення продуктів

згоряння в циліндрах буде сприяти підвищенню ефективності утилізації енергії випускних газів ДВЗ.

Розглянемо реалізацію робочого циклу з розділеними тактами й продовженим розширенням на прикладі двигуна ВАЗ-11194 з робочим об'ємом 1,4 л, хоча цей цикл може бути реалізований у будь-якому чотиритактному чотирициліндровому двигуні з порядком роботи 1-3-4-2. При цьому поставимо завдання звести до мінімуму конструктивні зміни деталей і вузлів базового двигуна.

Два зовнішні (робочі) циліндри чотирициліндрового двигуна працюють по звичайному чотиритактному циклу. У двох внутрішніх (еспандерних) циліндрах відбувається продовжене розширення газів, яке може бути назване п'ятим тактом. Таким чином, в еспандерних циліндрах здійснюються тільки такти розширення й випуску відпрацьованих газів.

Двигун має два розподільні вали. Обидва вали обслуговують як зовнішні робочі циліндри, так і внутрішні еспандерні циліндри, роблячи один оберт за два оберти колінчатого вала так, як це відбувається в традиційних чотиритактних ДВЗ. Кулачки, що обслуговують еспандерні циліндри, мають двосторонній профіль (рис. 12.9). Завдяки цьому в еспандерних циліндрах здійснюється двотактний цикл розширення й випуску.

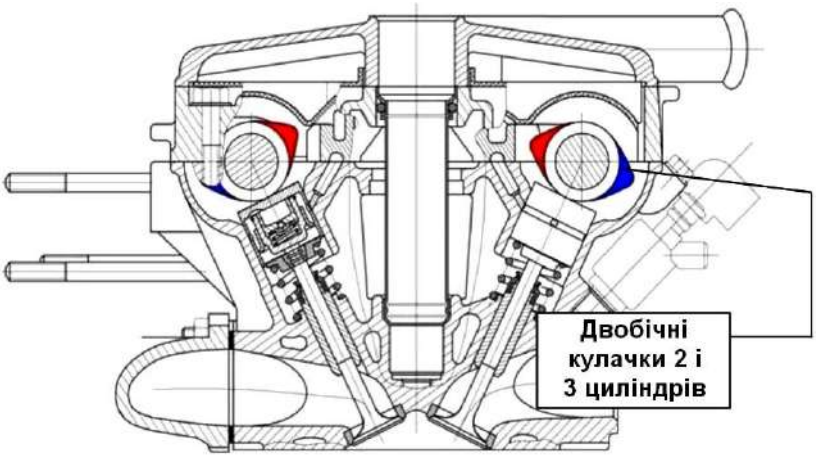


Рисунок 12.9 – Змінена головка циліндрів двигуна ВАЗ

Робочий цикл двигуна складається із чотирьох фаз.

Фаза А. Поршні в робочих циліндрах рухаються від ВМТ до НМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється впуск свіжого заряду, а в другому робочому циліндрі – згоряння (попереднє розширення). В еспандерних циліндрах здійснюється випуск газів.

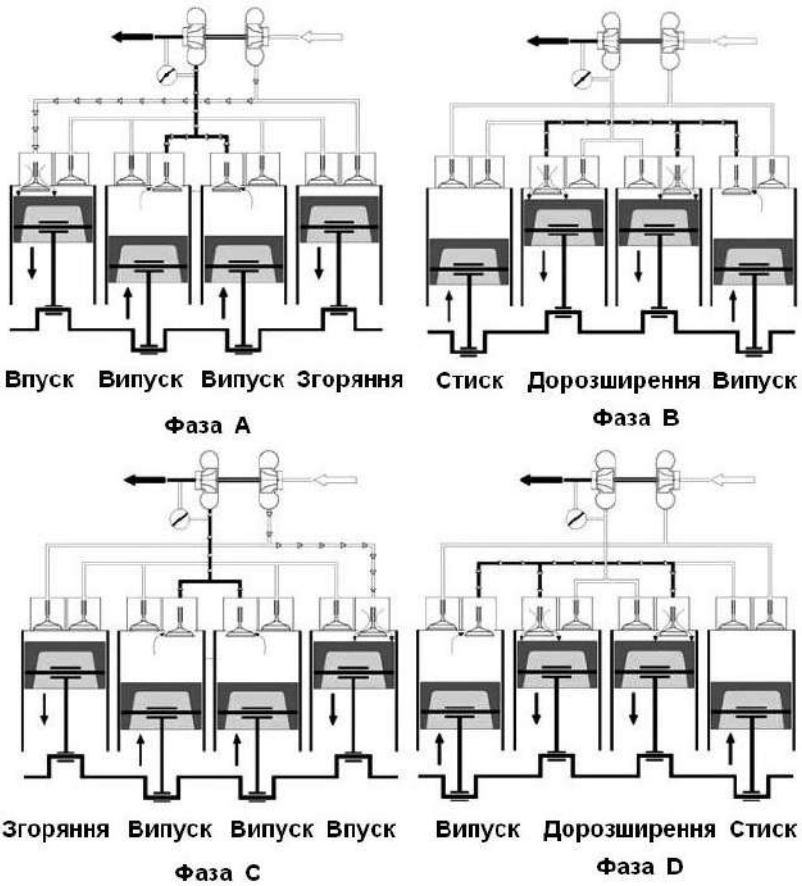


Рисунок 12.10 – Фази робочого циклу

Фаза В. Поршні в робочих циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від ВМТ до

НМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється стиск свіжого заряду, а в другому робочому циліндрі – витиснення випускних газів в еспандерні циліндри. В еспандерних циліндрах здійснюється процес продовженого розширення випускних газів із другого робочого циліндра.

Фаза С. Поршні в робочих циліндрах рухаються від ВМТ до НМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється згоряння (попереднє розширення), а в другому робочому циліндрі – впуск свіжого заряду. В еспандерних циліндрах здійснюється випуск газів.

Фаза D аналогічна Фазі В, у якій перший і другий циліндри ВТ міняються місцями.

Таким чином, робочий цикл двигуна із продовженим розширенням здійснюється за два оберти колінчатого вала й складається із двох груп процесів. Перша група включає процеси впуску й попереднього розширення в першому або другому робочих циліндрах і випуск газів з еспандерних циліндрів. Друга група включає процеси стиску й витиснення випускних газів в першому або другому робочих циліндрах і додаткове розширення випускних газів в еспандерних циліндрах.

12.6 Шеститактні двигуни

Шеститактним двигуном називають ДВЗ, у якого до чотирьох тактів традиційного циклу додано два додаткові такти. Шеститактні двигуни, як правило, є однооб'ємними зі здійсненням усіх тактів циклу в одному циліндрі. Під час додаткових тактів до робочого тіла підводиться теплота від нагрітих поверхонь камери згоряння, яка утилізується на такті розширення.

Одним з перших шеститактних двигунів був двигун Гріффіна (S. Griffin), виготовлений в Англії у 1883 р. У цьому двигуні після завершення такту випуску відпрацьованих газів, відбувався такт впуску повітря без подачі палива, а потім здійснювався такт випуску повітря.

Додаткові такти забезпечували зниження температури елементів камери згоряння й поліпшення очищення циліндрів від залишкових газів, сприяючи підвищенню наповнення.

Існує значна кількість конструкцій шеститактних двигунів. Розглянемо найбільш характерні з них.

12.6.1 Двигун Кроуера

Американським інженером Б. Кроуером (Bruce Crower) розроблена конструкція й виготовлені зразки двигунів, у циліндри яких після завершення такту випуску подається вода під тиском 15 МПа. Відбираючи теплоту від нагрітих поверхонь камери згоряння, вода випаровується. При ході поршня від ВМТ до НМТ водяна пара, розширюючись, робить корисну роботу (п'ятий такт – паровий робочий хід).

При ході поршня від НМТ до ВМТ (шостий такт) здійснюється випуск відпрацьованої пари, далі ця пара надходить у конденсатор, де охолоджується й знову перетворюється у воду. Послідовність тактів двигуна Кроуера показана на рис. 12.11.

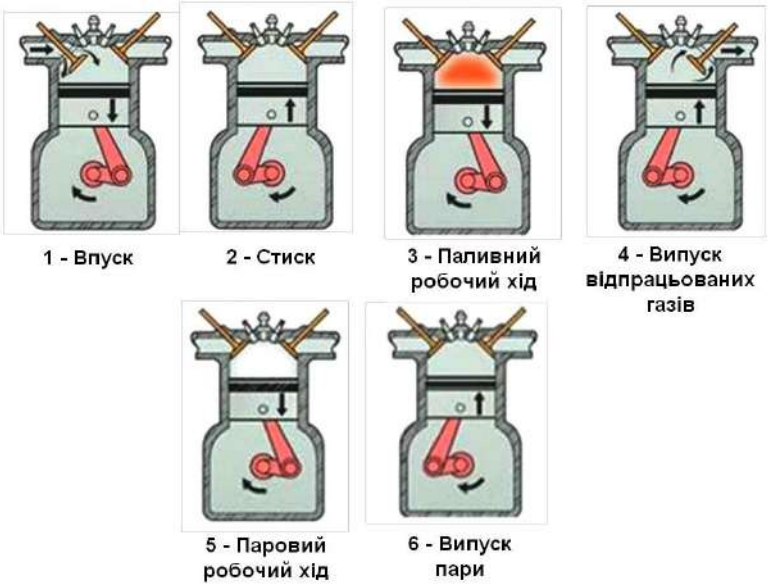


Рисунок 12.11 – Послідовність тактів двигуна Кроуера

Строго говорячи, цикл двигуна Кроуера складається із чотиритактного й двотактного циклів (4+2). Цикл двигуна Кроуера відрізняється від традиційного циклу Отто не тільки

кількістю тактів, але й відношенням кількості робочих тактів до їхнього загального числа. Так, у циклу Отто це відношення становить 1:4, а в циклі Кроуера – 1:3.

Перевагами двигуна Кроуера є висока паливна економічність за рахунок утилізації теплоти від стінок камери згоряння й можливість зменшити габарити елементів системи охолодження, або взагалі від неї відмовитися. Крім того, внутрішнє охолодження дозволяє суттєво підвищити ступінь стиску двигуна з іскровим запалюванням, що також позитивно позначиться на паливній економічності.

Серед недоліків двигуна Кроуера слід зазначити необхідність установки на автомобілі додаткового устаткування для зберігання й конденсації води. Серйозною проблемою є необхідність запобігання замерзання води в зимових умовах експлуатації. Для виготовлення клапанів, поршня й гільзи циліндра, швидше за все, будуть потрібні спеціальні нержавіючі матеріали.

Технологія подачі води широко застосовувалася під час Другої світової війни в авіаційних двигунах американських і німецьких літаків для їхнього форсування. Системою упорскування води оснащувалися авіамотори Daimler Benz серії 605 і BMW 801D для Messerschmitt Bf 109, Junkers Jumo 213 A1 для Fockewulf 190D, Pratt&Whitney J57 для американського B-29 Stratofortress і багато інших.

Вода додавалася у вже готову суміш, прохолоджуючи її, і попадала разом з нею в камеру згоряння. Від контакту з розпеченою поверхнею поршня й стінок циліндра вода миттєво перетворювалася в пару, яка розширюючись збільшувала потужність двигуна.

Попереднє охолодження паливоповітряної суміші дозволяло збільшити її обсяг на упорскуванні й підвищувало ефективність згоряння палива. Згодом воду замінили спеціальною сумішшю, що складалася з рівних частин води й метанолу, тим самим збільшивши потужність двигунів на 25-30 %.

12.6.2 Двигун Баюласа

Двигун Баюласа розроблений у компанії Bajulaz S. A. (Швейцарія). У двигуні Баюласа реалізований робочий процес із запаленням від стиску. У головці циліндра розміщені камера

згоряння і камера нагрівання, а також чотири клапани, два з яких управляють процесами впуски й випуску, а два інших розташовані в каналах, що з'єднують циліндр (надпоршневий простір) з камерами згоряння й нагрівання.

Утилізація теплоти відпрацьованих газів, сприяє підвищенню паливної економічності двигуна Баюласа. Однак, він також має недоліки, властиві дизелям з розділеними камерами згоряння, такі як втрати теплоти через збільшені поверхні камери згоряння й невисокі пускові якості. Крім того, наявність додаткових камер і клапанів з індивідуальними законами керування значно ускладнює конструкцію головки циліндрів двигуна.

12.6.3 Двигун Revelation Power

У канадській компанії Revelation Power Technology розроблена конструкція й виготовлені зразки восьмитактного двигуна, у двоциліндровому модулі якого поршень другого (правого) циліндра рухається із запізнюванням на 90° щодо поршня першого (лівого) циліндра.

Перший циліндр оснащений впускним клапаном для подачі паливно-повітряної суміші й пропускним клапаном, що з'єднують перший і другий циліндри. Другий циліндр має впускний клапан для подачі повітря й випускний клапан, для видалення відпрацьованих газів. Робочий цикл двигуна здійснюється за два оберти колінчатого вала.

Двигуни з доданими тактами мають потенціал істотного поліпшення паливної економічності, як за рахунок продовженого розширення робочого тіла, так і утилізації теплоти, відведеної від нагрітих поверхонь камери згоряння.

Однак, збільшення тактності сполучене з появою певних проблем, які необхідно вирішувати, або, принаймні, враховувати. Додавання додаткових тактів за інших рівних умов неминуче приводить до зниження літрової потужності двигуна.

Зазначена обставина може бути частково компенсована за рахунок наддування. Додаткові такти вимагають внесення змін у систему газообміну, що ускладнюють конструкцію двигуна.

Використання у двигуні нетрадиційних компонентів робочого тіла, таких як вода, вимагає зміни номенклатури матеріалів і, можливо, конструкції деталей, що обмежують

камеру згоряння.

Тому, для прийняття рішень про створення двигунів з додатковими тактами необхідний зважений аналіз поліпшення паливної економічності, з одного боку, і можливими витратами, пов'язаними з ускладненням конструкції, що супроводжують це поліпшення. У кожному разі, плата за зниження витрат палива й поліпшення екологічних показників двигуна, що забезпечують економічну доцільність його виробництва, не повинна бути надмірно високою.

12.7 Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об'ємом

Реалізовані в сучасних двигунах нововведення відносяться до вдосконалювання їхніх систем і агрегатів, у першу чергу елементів паливної апаратури, з метою поліпшення протікання робочих процесів. При цьому закони руху поршнів залишаються жорстко заданими й залежними тільки від незмінних параметрів кривошипно-шатунного механізму.

Зазначена обставина не дозволяє використовувати такі потужні резерви оптимізації показників робочих процесів двигуна у всьому діапазоні режимів його роботи, як регулювання ступеня стиску й робочого об'єму.

До останнього часу вважалося аксіомою, що ступінь стиску є незмінним конструктивним параметром двигуна, таким як, наприклад, діаметр циліндра. Дійсно, у традиційних двигунах величина ступеня стиску однозначно визначається розмірами кривошипно-шатунного механізму, висотою поршня, а також розташуванням головки циліндра щодо осі колінчатого вала.

Як відомо, потужність і паливна економічність двигуна зростають при збільшенні ступеня стиску внаслідок підвищення індикаторного ККД. При досягненні величин ступеня стиску 13-14, поліпшення показників двигуна припиняється через неминучий ріст механічних втрат. Тому зазначені величини ступеня стиску є оптимальними.

У той же час закладена в конструкцію двигунів величина ступеня стиску відрізняється від оптимальної. У бензинових двигунах ступінь стиску менша оптимальної й обмежується детонацією. У дизелях ступінь стиску більша оптимальної й

вибирається з урахуванням забезпечення надійного самозапалювання палива при пуску холодного двигуна.

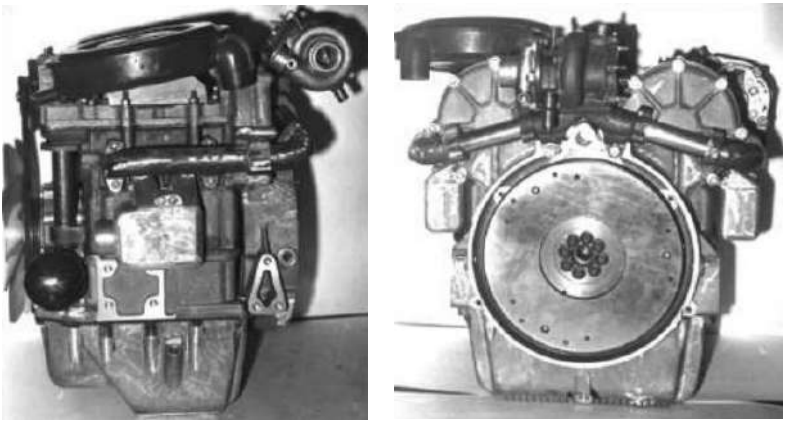


Рисунок 12.12 – Траверсний дизель ТБ-48 (iV_h = 1,9 л) на базі двигуна Elko 3.82.92T фірми Elsbett-Konstruktion (Австрія)

Численні розрахунки й експериментальні дослідження показали, що й для бензинового двигуна, і для дизеля регулювання ступеня стиску здатне забезпечити приблизно однакове поліпшення паливної економічності на 20 %, хоча причини цього й алгоритм регулювання ступеня стиску для бензинового двигуна й для дизеля, різні.

У дизелі з регулюванням ступеня стиску можна значно збільшити тиск наддування, підвищивши за рахунок цього потужність. А можна, зберігши колишній рівень потужності, знизити робочий об’єм (кількість циліндрів), поліпшивши при цьому паливну економічність, зменшивши масу й вартість двигуна.

У бензиновому двигуні при зниженні ступеня стиску можна збільшити тиск наддування без детонації, підвищивши при цьому літрову потужність із усіма супутніми позитивними ефектами, у тому числі поліпшенням паливної економічності на режимах великих навантажень.

При підвищенні ступеня стиску паливна економічність буде поліпшуватися на режимах малих навантажень. Можливість регулювання робочого обсягу ще більш витратна для показників

двигуна, ніж регулювання ступеня стиску. Великий робочий об'єм існуючих двигунів потрібний тільки для руху автомобіля зі швидкостями, близькими до максимальної швидкості. Ці режими не перевищують 10 % загального часу руху автомобіля.

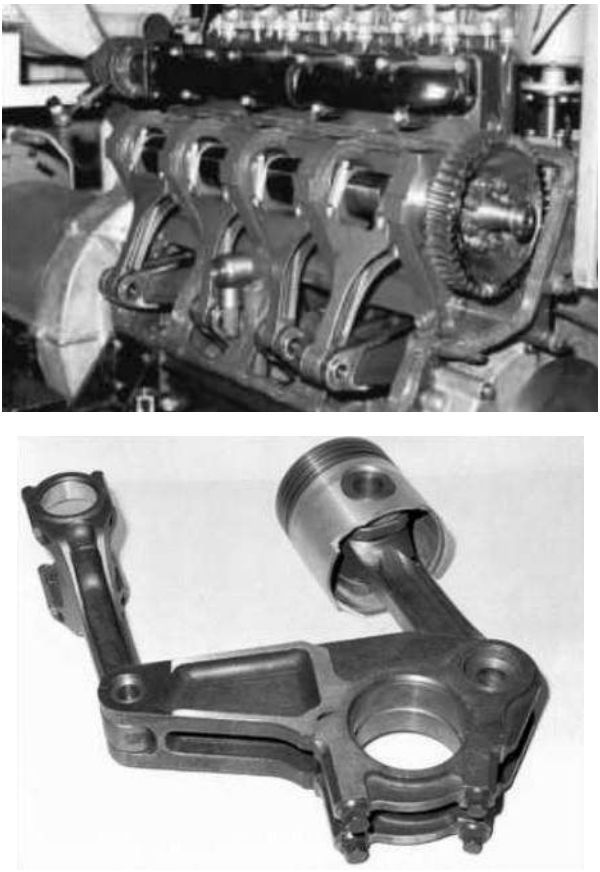


Рисунок 12.13 – Траверсний дизель Т-01 (iV_h = 9,1 л) та його деталі руху на базі двигуна ЯМЗ-8424

Найбільшу частину часу, наприклад, при русі в місті – потрібен економічний двигун з малим робочим об'ємом. Спільне регулювання ступеня стиску й робочого об'єму відкриває широкі перспективи створення двигуна нового типу з керованим рухом

поршнів. Це – «еластичний» двигун, який гнучко пристосовує свої об'єм і ступінь стиску до умов руху автомобіля.

Наприклад, коли потрібна більша потужність, цей двигун еквівалентний 6-циліндровому двигуну. Якщо більша потужність не потрібна (міський режим руху), він буде відповідати 4-циліндровому й навіть 3-циліндровому двигуну звичайного типу. При цьому може бути забезпечене значне зниження витрати палива.

На теперішній час відома досить велика кількість способів регулювання ступеня стиску ε і робочого об'єму. Кількість запропонованих конструкцій, що дозволяють регулювати ступінь стиску й робочий об'єм двигуна дужа велика.

Однак, переважна більшість із них, дозволяючи вирішувати поставлені завдання по управлінню ε й V_h, виявилися не придатними для практичної реалізації, через неможливість забезпечити прийнятну працездатність двигуна, або по технологічних причинах. Тому тільки обмежене число двигунів було реалізовано в металі й лише одиничні конструкції вироблялися серійно.

На початку 90-х років XX ст. у ГНЦ ФГУП «НАМИ» був запропонований перетворюючий механізм, названий траверсним, що дозволяє управляти рухом поршнів, змінюючи ступінь стиску й робочий об'єм двигуна. Технічні рішення по траверсному механізму НАМИ захищені патентами різних країн.

З початку XXI ст. роботи із двигунів із траверсними перетворюючими механізмами активно проводять фірми Peugeot, Nissan і HONDA. У ГНЦ «НАМИ» було виготовлено більш десятка зразків траверсних двигунів з керованим рухом поршнів на базі серійних моторів ВАЗ, ЯМЗ і DaimlerChrysler. Траверсні двигуни Т-01 і VE111 пройшли випробування на безвідмовність в обсязі 1500 годин.

Траверсний механізм НАМИ працює таким чином (рис. 12.14). Вісь колінчатого вала 1 зміщена щодо осі циліндрів. Шатунна шийка 2 колінчатого вала пов'язана із траверсою 3, що має ще два циліндричні шарніри: один з'єднаний із шатуном 4, а другий – з коромислом 5.

Верхній кінець коромисла з'єднаний з розміщеним у корпусі дизеля ексцентриковим валом 6, а верхній кінець шатуна 4 – з

поршнем 7. При обертанні колінчатого вала поршень робить зворотно-поступальний рух. Відстань від площини головки циліндра до днища поршня, при знаходженні останнього у ВМТ, що визначає ступінь стиску, залежить від координати осі хитання коромисла.

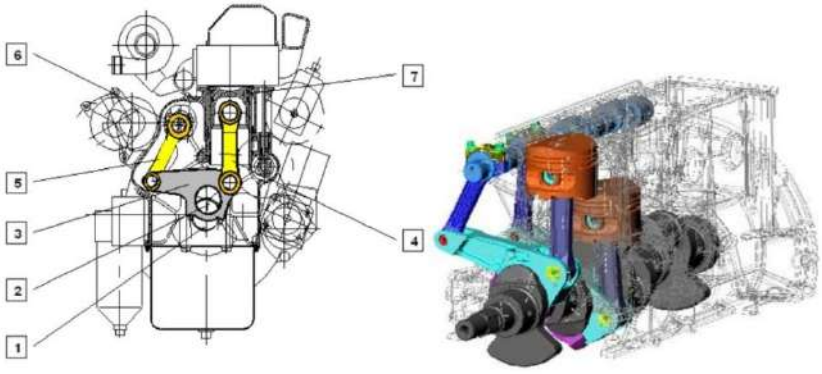


Рисунок 12.14 – Траверсний механізм
двигунів НАМИ (Росія)

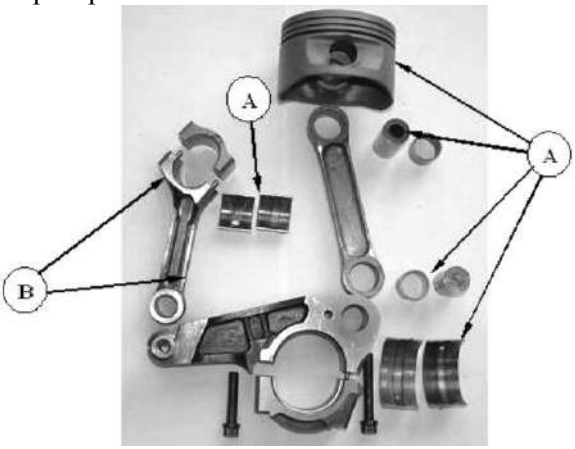
Ця координата, а отже, й ступінь стиску двигуна, регулюються за допомогою повороту ексцентрикового вала. При пуску й роботі на режимах холостого ходу й малих навантажень, ступінь стиску у двигуні максимальна. У міру росту навантаження й, отже, збільшення тиску наддування, ступінь стиску плавно знижується при повороті ексцентрикового валу.

При цьому максимальний тиск згоряння обмежується постійним рівнем, гранично припустимим за умовами забезпечення роботоздатності підшипників силового механізму в дизелі, або відсутності детонації в бензиновому двигуні.

Одним з головних завдань, поставлених при створенні траверсних двигунів, було забезпечення максимальної конструктивної, технологічної наступності й уніфікації з базовим двигуном. Деталі, вузли й агрегати двигуна з керованим рухом поршнів можна підрозділити на три групи: стандартні, змінювані й додаткові (рис. 12.15).

До групи стандартних відносяться наступні вироби базового серійного двигуна: головка циліндрів, впускний і випускний

колектори, маховик, картер маховика, масляний піддон, кришки й вкладиші корінних опор колінчатого вала, масляний і водяний насоси, опори двигуна, системи живлення й запалювання, стартер, генератор.



А – стандартні, В – додаткові (виготовлені по стандартних технологіях та із традиційних матеріалів)

Рисунок 12.15 – Деталі перетворюючого механізму траверсного двигуна

Основною змінюваною деталлю є блок циліндрів, що має конструктивну й технологічну наступність із блоком циліндрів базового двигуна (рис. 12.16). У зв'язку з тим, що міжциліндрова відстань не міняється, обробка блоку циліндрів може проводитися на технологічному устаткуванні серійного виробництва.

Колінчатий вал по конструкції й технології виготовлення уніфікований з колінчатим валом базового двигуна й відрізняється від останнього тільки зменшеним радіусом кривошипа. Його обробка проводиться так само на стандартному устаткуванні. Збережені довжина вала, розміри корінних шийок, діаметр шатунних шийок, їх координати в поздовжньому перетині. Збережена також конструкція передньої частини вала й вузла кріплення маховика. Матеріал колінчатого вала такий же, як і в базового двигуна.

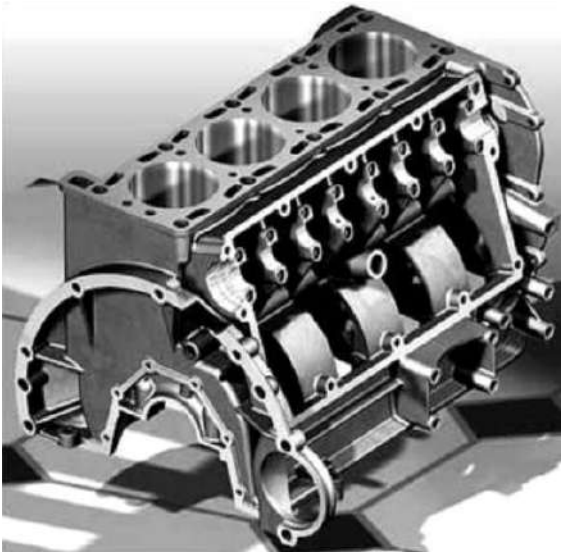


Рисунок 12.16 – Блок циліндрів
траверсного двигуна

Додатковими деталями траверсного двигуна є елементи перетворюючого механізму – траверси, коромисла й ексцентриковий вал (рис. 12.5). Конструкція траверси близька конструкції шатунів авіаційних двигунів. Підшипник шатунної шийки колінчатого вала виконаний за аналогією з базовим двигуном.

По конструктивному виконанню й застосовуваним матеріалам, коромисло достатньо близьке до шатунів традиційних двигунів. Верхня й нижня головки виготовлених шатунів ідентичні верхній головці шатуна базового двигуна.

Шатуни двигуна з керованим рухом поршнів не мають рознімання в нижніх головках і, тому, простіше серійних. Технологія виготовлення ексцентрикового валу аналогічна технології виготовлення розподільного вала звичайного двигуна.

Конструкція траверсних двигунів дозволяє їх виготовляти паралельно із серійними двигунами в умовах діючого виробництва при частковій зміні стандартного устаткування.

Питання для самоперевірки

1. Чи мають взагалі перспективи поршневі двигуни внутрішнього згоряння у найближчому майбутньому?
2. Які напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ ви можете назвати?
3. Що таке робочий цикл ДВЗ?
4. Що таке такт (хід поршня)?
5. Поясніть що таке свіжий заряд.
6. Що таке робоче тіло?
7. Поясніть в чому полягає модифікація робочих циклів ДВЗ.
8. Що розуміють під згорянням?
9. Що таке нагнітання?
10. Які двигуни називаються двигунами з розділеними тактами?
11. Коли вперше з'явилася концепція розділеного циклу?
12. Назвіть переваги й недоліки двигунів з розділеними тактами.
13. Розкажіть принцип роботи двигуна Кушуля.
14. Які конструктивні особливості двигуна Скудері?
15. Які конструктивні особливості у двигунів із доданими тактами?
16. Назвіть переваги й недоліки двигунів з доданими тактами.
17. Як здійснюють п'ятитактний цикл у двигунах традиційної конструкції?
18. Як здійснюють динамічне регулювання ступеня стиску й робочого об'єму у сучасних ДВЗ?

13 ВОДНЕВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

13.1 Моторні властивості водню й передумови його використання як палива для ДВЗ

Традиційний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) має ряд істотних недоліків, що змушує вчених шукати йому гідну заміну. Самим популярним варіантом подібної альтернативи є електродвигун, однак він не єдиний, хто може скласти конкуренцію ДВЗ. Водневий мотор вважається одним з варіантів майбутнього автомобілебудування й може розв'язати проблему зі шкідливими викидами й дорожнечею палива.

Використання водню як енергоносія дозволить як суттєво скоротити споживання копалин вуглеводневих палив, так і значно просунутися у вирішенні екологічної проблеми зниження забруднення атмосфери міст шкідливими для здоров'я людини складовими вихлопних газів автомобілів і тепловозів.

В 2018 році приблизно 25 % викидів вуглекислого газу в атмосферу Землі відбувалося в результаті роботи різного роду транспорту. За різними оцінками до 2050 року це число подвоїться й продовжить рости в міру того, як у країнах що розвиваються буде збільшуватися кількість особистих автомобілів. Крім вуглекислого газу в атмосферу викидаються оксиди азоту, відповідальні за збільшення захворюваності астмою, оксиди сірки, відповідальні за кислотні дощі тощо.

У морському транспорті найчастіше використовуються низькоякісні дешеві сорти палива. Морський транспорт викидає оксидів сірки в 700 раз більше, ніж автомобільний транспорт. По даним International Maritime Organization викиди морським торговельним флотом досягли 1,12 млрд. тонн у рік.

Іншою причиною підвищення інтересу до водневого транспорту є ріст цін на енергоносії (у цей час гнітюча їхня більшість – вугілля, нафта і їх похідні), дефіцит палива, прагнення різних країн знайти енергетичну незалежність.

Так у Німеччині з вересня 2018 року запущені в експлуатацію перші водневі поїзди – Coradia ilint компанії Alstom, по маршруту в Нижній Саксонії. Двовагонний состав Coradia ilint на паливних елементах випущений французькою

компанією Alstom, має запас ходу 1 тис. км і здатний перевозити 200 пасажирів зі швидкістю до 140 км/год.

Пробний запуск відбувся ще осінню 2017-го, тепер вже розпочата комерційна експлуатація. Це самий свіжий приклад використання водню в транспорті, але як і раніше один з деяких.

Передбачається, що в підсумку водневі поїзди замінять 4 тис. дизельних регіональних поїздів, що діють у Німеччині на неелектрофікованих ділянках залізниць. Інтерес до таких поїздів також виразили Нідерланди, Данія й Норвегія.



Рисунок 13.1 – Водневий поїзд Coradia iLint

Незважаючи на те, що схоронність навколишнього середовища тільки зараз стала масовою проблемою, про зміну стандартного двигуна внутрішнього згоряння вчені замислювалися й раніше.

Так, мотор, що працює на водні, побачив світ ще в 1806 році, чому посприяв французький винахідник Франсуа Ісак де Ріваз (він робив водень за допомогою електролізу води).

Пройшло кілька десятків років, і в Англії видали перший патент на водневий двигун (1841 рік), а в 1852 році німецькі вчені сконструювали ДВЗ, який міг працювати на повітряно-водневій суміші. Водневий двигун трохи пізніше, у часи блокади Ленінграду, коли бензин був дефіцитним продуктом, а водень був у досить великій кількості, технік Борис Шелищ запропонував

використовувати для роботи загороджувальних аеростатів повітряно-водневу суміш.

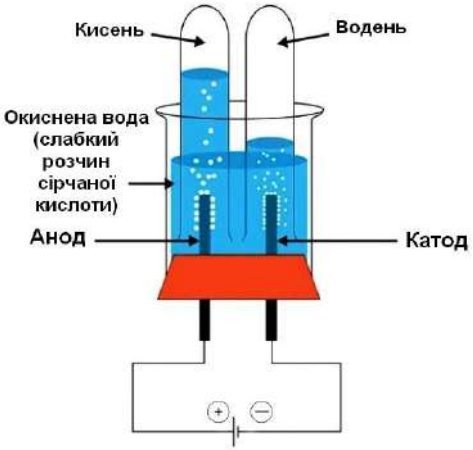


Рисунок 13.2 – Схема одержання водню шляхом електролізу води

Після цього на водневе живлення перевели всі ДВЗ лебідок аеростатів, а загальне число працюючих на водні машин досягало 600 одиниць. У першій половині XX століття інтерес громадськості до водневих двигунів був невеликий, але із приходом паливно-енергетичної кризи 70-х років ситуація різко змінилася. Зокрема, в 1979 році компанія BMW випустила перший автомобіль, який цілком успішно їздив на водні (без вибухів і водяної пари, що виривається з вихлопної труби).

Слідом за BMW, у цьому напрямку почали працювати інші великі автовиробники, і до кінця минулого сторіччя кожна провідна автокомпанія світу вже мала концепцію розробки машини на водневому паливі.

Проте, із закінченням нафтової кризи зник і інтерес громадськості до альтернативних джерел палива, хоча в наш час він знову починає пробуджуватися, оскільки підігрівається захисниками екології, які борються за зниження токсичності вихлопних газів автомобілів.

Більше того, ціни на енергоносії й бажання знайти паливну незалежність тільки сприяють проведенню теоретичних і

практичних досліджень ученими багатьох країн світу. Самими активними є компанії BMW, General Motors, Honda Motor, Ford Motor.

13.2 Принцип роботи й типи водневого двигуна

Основною відмінністю водневої установки від традиційних двигунів є спосіб подачі паливної рідини й наступне запалення робочої суміші. При цьому принцип трансформації зворотно-поступальних рухів кривошипно-шатунного механізму в корисну роботу залишається незмінним.

Враховуючи, що горіння нафтового палива відбувається досить повільно, паливно-повітряна суміш наповнює камеру згоряння раніше, чим поршень займе своє крайнє верхнє положення (так звану верхню мертву точку).

Стрімка реакція водню дає можливість зрушити час упорскування ближче до того моменту, коли поршень починає вертатися до нижньої мертвої точки. Потрібно відзначити, що тиск у паливній системі не обов'язково буде високим.

Якщо водневому двигуну створити ідеальні робочі умови, то він може мати паливну систему живлення закритого типу, коли процес сумішоутворення буде проходити без участі атмосферних повітряних потоків.

У такому випадку після такту стиску в камері згоряння залишається водяна пара, яка, проходячи через радіатор, конденсується й знову перетворюється у звичайну воду.

Однак застосування такого виду пристрою можливо тільки тоді, коли на транспортному засобі є електролізер, що відокремлює водень від води для його повторної реакції з киснем. На даний момент добитися таких результатів украй складно.

Для стабільної роботи двигунів застосовується моторне масло, а його випари є частиною вихлопних газів. Тому безпроблемний запуск силової установки і її усталена робота на гримучому газі без використання атмосферного повітря – поки що нездійсненне завдання.

Розрізняють два варіанти автомобільних водневих установок: агрегати, що функціонують на основі водневих паливних елементів, і водневі двигуни внутрішнього згоряння.

13.3 Силові установки на основі водневих паливних елементів

В основі принципу роботи паливних елементів лежать фізико-хімічні реакції. По суті, це ті ж свинцеві акумуляторні батареї (АКБ), от тільки коефіцієнт корисної дії паливного елемента трохи вищий, ніж АКБ, і становить близько 45% (іноді більше).

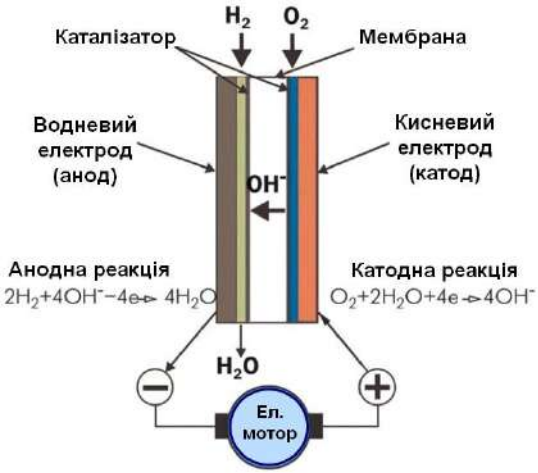


Рисунок 13.3 – Схема водневого паливного елемента

У корпус воднево-кисневого паливного елемента поміщена мембрана (проводить тільки протони), що розділяє камеру з анодом і камеру з катодом. У камеру з анодом надходить водень, а в камеру катода – кисень. Кожний електрод заздалегідь покривають шаром каталізатора, у ролі якого нерідко виступає платина. При його впливі молекулярний водень починає втрачати електрони.

У цей же час протони проходять через мембрану до катода й під впливом того ж каталізатора з'єднуються з електронами, що надходять зовні.

У результаті реакції утворюється вода, а електрони з камери анода переміщаються в електричний ланцюг, приєднаний до мотора. Простіше говорячи, ми одержуємо електричний струм, який і живить двигун.

13.4 Водневі двигуни внутрішнього згоряння

У більшості дослідних і предсерійних автомобілів водень використовували як паливо у звичайному ДВЗ: у цьому випадку потужність у порівнянні з бензиновим еквівалентом знижувалася до рівня 65-82 %. Теоретично потужність можна й наростити (були випадки її збільшення до 117%), якщо внести зміни в систему запалювання.

Але виникає цілий ряд проблем. По-перше, висока температура стиску «змусить» водень вступити в реакцію з металевими елементами двигуна або навіть моторним маслом.

По-друге, навіть невеликий витік водню при контакті з розпеченим випускним колектором точно приведе до загоряння (вибуху). По-третє, через зросту температуру запалення суміші, сильно збільшуються викиди окислів азоту й підвищується зношування деталей двигуна, сильно знижуючи його ресурс.

Із цієї причини для створення двопаливних бензо-водневих конструкцій ідеально підходять силові агрегати роторного типу, тому що їхня конструкція дозволяє зменшити ризик загоряння за рахунок відстані між впускним і випускним колектором.

Отже горюча суміш надходить у відносно холодну камеру мотора, де неконтрольоване самозапалювання практично виключене.

Із серійними роторними моторами в останні роки мала справу тільки в Mazda, де також експериментували з водневим паливом. Але особливим успіхом цей досвід так і не увінчався: проблема утвору окислів азоту у цьому випадку не вирішується, а підвищених витрат масла, яке, по суті, викидається в атмосферу, уникнути не виходить.

Саме тому більш перспективним способом перетворення водо-роду в електроенергію стали паливні елементи. І якщо у випадку автомобілів із ДВЗ водень використовується як заміну звичному паливу, то транспортні засоби з паливними елементами – це зовсім інший клас. Останні можна почасти вважати гібридними електромобілями з водневою міні-електростанцією.

13.5 Конструктивні схеми водневих силових установок на транспортних засобах

Провідні компанії світу які сьогодні роблять автомобілі на водневому паливі це Toyota, Honda і Hyundai. Розробкою автомобілів на водневому паливі займаються також Mazda, Daimler, Audi, BMW, Ford, Nissan.

Спалювання водню у звичайному двигуні внутрішнього згоряння видається найпростішим і логічним способом застосування газу, адже водень легко запалюється й згоряє без залишку. Однак через різницю у властивостях бензину й водню, практично перевести ДВЗ на новий вид палива виявилося не так вже й просто.

Складності виникли саме із довгостроковою експлуатацією двигунів: водень викликав перегрів клапанів, поршневої групи й масла, через утроє більшу, ніж у бензину, теплоту згоряння (141 Мдж/кг проти 44 Мдж/кг).

Водень непогано показував себе на низьких оборотах двигуна, але при рості навантаження виникала детонація. Можливим вирішенням проблеми була заміна водню на бензиново-водневу суміш, концентрація газу в якій динамічно зменшувалася в міру росту оборотів двигуна.

Одним з серійних автомобілів, де водень спалювався у ДВЗ подібно іншому паливу, був BMW Hydrogen 7, вироблений усього в 100 екземплярах в 2006-2008 роках. Модифікований шестилітровий ДВЗ V12 працював на бензині або водні, перемикання між видами палива відбувалося автоматично.

У систему впуску вмонтували додаткову газову магістраль, доробили програму керування клапанами й фазами газорозподілу «Дабл Ванос» і «Велвтронік».

Щоб добитися на одному заправленні 700-кілометрового запасу ходу, 74-літровий бензобак доповнили резервуаром з подвійними стінками, що вміщали 8 кг рідкого водню (теплоізоляція балона дозволяла зберігати його при температурі -250ºС). Незважаючи на успішне вирішення проблеми перегріву клапанів, на цьому проекті все-таки поставили хрест. По-перше, при спалюванні водню потужність двигуна падала приблизно на 20 % – з 260 к.с. на бензині до 228 к.с.

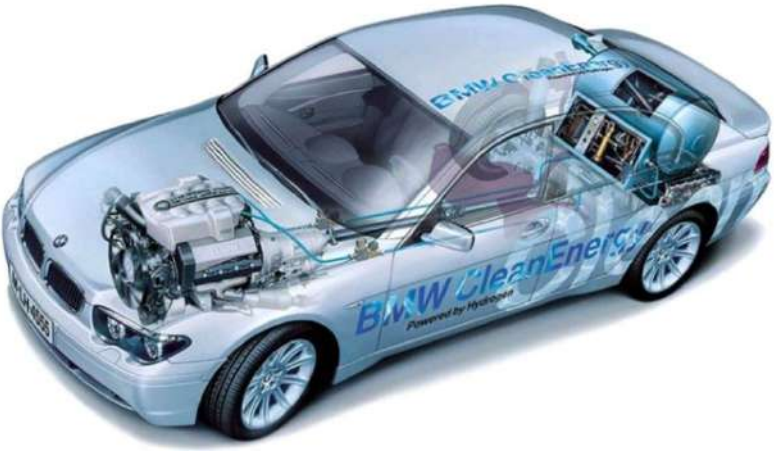


Рисунок 13.4 – BMW Hydrogen 7 у кузові E65

По-друге, 8 кг водню вистачало всього на 200 км пробігу, що було в рази менше, ніж у традиційного двигуна.

По-третє, Hydrogen 7 з'явився занадто рано – коли «зелені» автомобілі ще не були так актуальні. По-четверте, ходили завзяті слухи, що Агентство по охороні навколишнього середовища США не дозволило називати Hydrogen 7 автомобілем без шкідливого вихлопу саме через особливості роботи ДВЗ: частки моторного масла попадали в камеру згоряння й там запалювалися разом з воднем.

13.6 Особливості конструкції Mazda RX-8 Hydrogen RE

Воднева Mazda RX-8 Hydrogen RE не тільки зовні, але й під капотом мало відрізняється від стандартної. Там встановлено відомий роторно-поршневий двигун «Ренезіс», здатний працювати як на бензині, так і на водні. Для поліпшення наповнення камери згоряння, водень впорскують у камеру згоряння через окрему форсунку.

Японські конструктори стверджували, що саме роторний двигун краще, ніж поршневий, придатний для водневого живлення. Оскільки впуск і згоряння в цьому двигуні, відбуваються в різних камерах – паливо попадає в менш нагріту камеру, що в цілому поліпшує подальше згоряння.



а б в

а – процес заправлення воднем через окрему горловину (тиск у балоні 35 МПа); б – багажника в Mazda RX-8 фактично немає, оскільки в ньому встановлений балон з воднем; в – на панелі, ліворуч від тахометра традиційний датчик рівня бензину, праворуч – покажчик рівня водню

Рисунок 13.5 – Воднева Mazda RX-8 Hydrogen RE

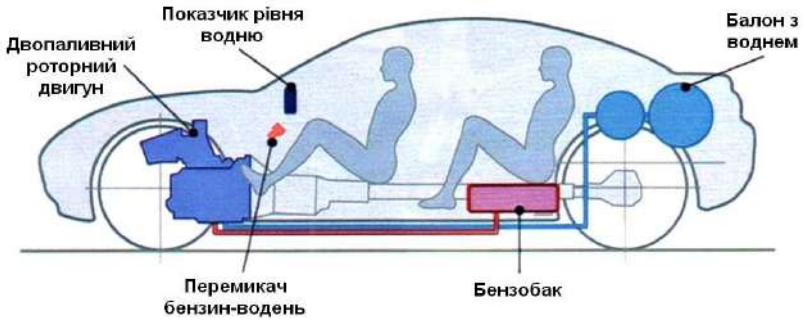


Рисунок 13.6 – Принципова схема Mazda RX-8 Hydrogen RE

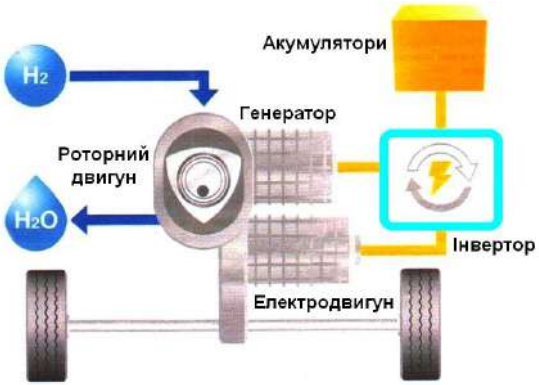


Рисунок 13.7 – Принципова схема
Mazda Primacy Hydrogen RE Hybrid

З бензину на водень можна переходити прямо на ходу, нажавши кнопку секунди на дві. Потужність двопаливного двигуна помітно знизилася – до 107 к.с, при тому що сама слабка версія звичайного «Ренезіса» розвиває 206 к.с. Зате з вихлопної труби йде нешкідлива водяна пара.

Mazda Primacy Hydrogen RE Hybrid (у Європі це «Мазда-5») ще цікавіша за своєю конструкцією. Під капотом в неї стоїть той самий двопаливний роторний двигун, але механічного зв'язку між мотором і колесами немає. Колеса крутить електродвигун, що одержує енергію від роторного агрегату, а на малих швидкостях – тільки від акумуляторної батареї.

Як і в інших гібридомобілях, ДВЗ включається не відразу, а лише при наборі швидкості. При необхідності включається під час інтенсивного розгону або обгону, електромотор живлять ротор і акумулятори разом. А при відпущеній педалі акселератора акумуляторні батареї підзаряджаються.

Не дивлячись на наявні успіхи, раціонально мислячі японці відверто заявляють, що ці автомобілі всього лише концепти, і призначенні лише для дослідження і вдосконалення водневих технологій.

Отже Mazda RX-8 Hydrogen RE – це той випадок, коли водень загубив усю динаміку роторного двигуна. При переході на водень від потужності легендарного роторного RX-8 не

залишалося й сліду – потужність двигуна падала вдвічі: з 206 до 107 к.с., а максимальна швидкість автомобіля – до 170 км/год.

Тому головний конструктор Акіхіро Кашивагі стверджує: «-В ідеалі потрібно проектувати новий, суто водневий автомобіль. Тобто який буде первісно розрахований на це паливо.

І навіть через 10 років частка водневих автомобілів на дорогах буде невелика, хоча й виросте. До речі, без податкових і інших пільг, думаю, не обійтися. А ще треба вдосконалювати устаткування, створювати інфраструктуру, у першу чергу заправлення.» BMW Hydrogen 7 і Mazda RX-8 Hydrogen RE були лебединою піснею водневих ДВЗ: до моменту появи цих автомобілів стало остаточно ясно, що куди ефективніше використовувати водень у давно відомих паливних елементах, ніж просто палити у двигуні.

Першим успішним експериментом по створенню транспортного засобу на водневому паливному елементі можна вважати трактор Гаррі Карла, побудований в 1959 році. Правда, заміна дизеля на паливний елемент знизила потужність трактора до 20 к.с.

В останні піввіку водневий транспорт випускався в штучних екземплярах. Наприклад, в 2001 році в США з'явився автобус Generation II, водень для якого вироблявся з метанолу. Паливні елементи створювали потужність до 100 кВт, тобто близько 136 к.с. У 2001 році російський ВАЗ представив «Ниву» на водневих елементах, відому під іменем «Антэл-1».

Електродвигун видавав потужність до 25 кВт (34 к.с.), розганяв авто максимум до 85 км/год і на одному заправленні працював 200 км. Єдиний зроблений автомобіль так і залишився «лабораторією на колесах». Потім була «Лада 111» з агрегатом «Антел-2», розроблена уральськими інженерами, в якої одного заряду вистачало вже на 350 км.

13.7 Особливості конструкції водневих Toyota та Honda

В 2013 році Toyota представила модель Mirai на водневих паливних елементах. Унікальність ситуації була в тому, що автомобіль Toyota Mirai був не концепт-каром, а автомобілем готовим до серійного виробництва, продаж якого почався вже через рік.



Рисунок 13.8 – Російський автомобіль на
водневих паливних елементах

На відміну від електромобілів на акумуляторах, Mirai сама виробляла електрику для себе. Електродвигун передньоприводної Mirai має максимальну потужність 154 к.с., що небагато для сучасного електромобіля, але досить непогано в порівнянні з водневими авто минулого.

Оскільки у водня низька об'ємна щільність, він зберігається на борті автомобіля у вигляді стисненого газу в балонах високого тиску. Два водневі балони у сумі вміщають 5 кг водню. Робочий тиск усередині балона 700 атм.

Водень, що зберігається у двох баках високого тиску ємністю 60 л (передній балон) і 62,4 літра (задній балон), направляється в блок паливних елементів FC stack. Там він вступає в реакцію з киснем з повітря, що надходить через величезні повітрозабірники в передній частині автомобіля.

У блоці паливних елементів FC stack, у результаті хімічної реакції взаємодії водню й кисню, виробляється звичайна вода й електроенергія. Далі постійний електричний струм, вироблений у паливних елементах, проходить через підвищуючий перетворювач FC Boost Converter, у якому він перетворюється в змінний струм, а напруга збільшується до 650 В.



Рисунок 13.9 – Загальний вигляд
та принцип роботи Toyota Mirai

Потім змінний струм подається в електродвигун, який і передає високий крутний момент, що становить значні 335 Нм на передні ведучі колеса. Особливість схеми Toyota Mirai, характерна для електромобілів – тяговий електродвигун працює так само як генератор, регенеруючи енергію при гальмуванні у вторинний акумулятор – нікель-метал-гідридний, з максимальною вихідною потужністю 21 кВт.



Рисунок 13.10 – Силова установка Toyota Mirai:
попереду розташований електродвигун, водневі баки жовтого
кольору на 60 і 62,4 л, додаткова батарея поза спинкою сидіння,
блок паливних водневих елементів розміщений
у середині автомобіля

Акумулятор є більше допоміжним – його енергія буде задіяна при різкому прискоренні. Величезний плюс водневої схеми подібного типу – украй високий ККД, який становить 83 % (для порівняння, 1,3-літровий тойотовський двигун VVT-iE, який з'явився в 2014 році, на сьогодні має найвищий серед бензинових моторів максимальний ККД 38 %).

Теоретичний запас ходу на 5 кг водню становить 500 км, фактичний – близько 350 км. Для порівняння: Tesla Model S по

паспорту може пройти 540 км. От тільки на заправлення повного бака водню йде 3 хвилини, а батарея Tesla заряджається до 100 % за 75 хвилин на станціях Tesla Supercharger і до 30 годин від звичайної розетки на 220 В.



Рисунок 13.11 – Моторний відсік Toyota Mirai:
Fuel cell – це блок управління паливними елементами,
а також зарядкою акумуляторної батареї

Постійний струм 370 В з водневих паливних елементів Mirai перетворюється у змінний, а напруга збільшується до 650 В. Максимальна швидкість машини досягає 175 км/год – небагато в порівнянні з вуглеводним паливом, але цілком достатньо для повсякденної їзди.

Для запасу енергії використовується нікель-метал-гідридний акумулятор на 21 квт·год, у який передається надлишок від паливних елементів і енергія рекуперативного гальмування.

Враховуючи японські реалії, при яких населені пункти можуть у будь-який момент постраждати від землетрусу, у багажнику Mirai 2016-го модельного року було встановлене спеціальний роз'єм, через який можна організувати електропостачання невеликої частки будинку, що робить автомобіль генератором на колесах із граничною ємністю 150 квт·год. До речі, усього за кілька років Toyota вдалося значно зменшити масу генератора: якщо на початку століття в прототипах він важив 108 кг і видавав 122 к.с., то в Mirai

паливний елемент удвічі компактніше (об'єм 37 літрів) і важить 56 кг. Справедливо буде додати до цього 87 кг паливних баків.

Для порівняння, популярний сучасний турбомотор Volkswagen 1.4 TSI, зі схожої з Mirai потужністю 140-160 к.с. славиться своєю «легкістю» завдяки алюмінієвій конструкції – він важить 106 кг плюс 38-45 кг бензину в баку. До речі, батарея Tesla Model S важить 540 кг.

За 4 км пробігу Mirai виробляє тільки 240 мл дистильованої, безпечної щодо питва води – ентузіасти, які спробували «вихлоп» Mirai, повідомляли тільки про легкий присмак пластику.

Toyota розробляє й робить водневі баки самостійно от уже 18 років. Бак Mirai зроблений з декількох шарів пластику з вуглеволокном і склотканиною. Використання таких матеріалів, по-перше, підвищило стійкість сховищ до деформації й пробиттю, а, по-друге, розв'язало проблему наводнення металу, через який сталеві баки втрачали свої властивості, гнучкість і покривалися мікротріщинами.

Аналогічна Toyota Mirai, схема водневої силової установки застосована на автомобілі Honda Clarity – заявлений запас ходу в неї досягає 700 км. Зараз Honda Clarity випускається досить обмеженою партією, і офіційно придбати автомобіль можна лише в Японії, Західній Європі й Америці.



Рисунок 13.12 – Воднева Honda Clarity

Серед інших моделей легкових автомобілів, помітними представниками водневих транспортних засобів на сьогодні також є автомобілі Hyundai (Tucson FCEV), Mercedes-Benz GLC

F-Cell, в яких є можливість підзарядки від звичайної побутової мережі, а сумарний запас ходу становить близько 500 км).

13.8 Виробництво водню

Зараз відомо близько десятка методів одержання водню з різних вихідних матеріалів. Найвідоміший – електроліз води, її розкладання при пропущенні електричного струму, але він вимагає великих витрат енергії. Головним напрямком зниження енерговитрат при електролізі води є пошук нових матеріалів для електродів і електролітів.

Розробляються методи одержання водню з води з використанням неорганічних відновлювачів – електронегативних металів та їхніх сплавів з додаванням металів-активаторів. Такі сплави названі енергоакумулюючими речовинами. Вони дозволяють одержувати з води будь-яку кількість водню. Ще одним способом виділення водню з води може стати її фотоелектрохімічне розкладання під дією сонячного світла. До розповсюджених методів відносяться парофазна переробка метану (природного газу) і термічний метод розкладання вугілля й іншого біоматеріалу.

Перспективні термохімічні цикли виробництва водню, парофазні методи конверсії водню з кам'яного й бурого вугілля, торфу, а також метод підземної газифікації вугілля з одержанням водню.

Окрема тема – розробка каталізаторів для одержання водню з органічної сировини – продукту переробки біомаси. Але при цьому поряд з воднем утворюється значна кількість окису вуглецю (С), який необхідно утилізувати.

Ще один перспективний метод – процес каталітичної парової переробки етанолу. Також усе більшу увагу залучає сірководень. Це обумовлено низькими витратами енергії на електролітичне виділення водню із сірководню й великими запасами цього з'єднання в природі – у воді морів і океанів, у природному газі. Сірководень також виходить у якості побічного продукту нафтопереробної, хімічної, металургійної промисловості.

Водень можна одержувати з використанням плазмових технологій. З їхньою допомогою можна газифікувати навіть саму низькоякісну вуглецеву сировину, наприклад тверді побутові

відходи. У якості джерела термічної плазми використовуються плазмотрони – пристрої, що генерують плазмовий струмінь.

13.9 Зберігання водню

Для зберігання водню безпосередньо в автомобілі існують наступні способи: газобалонний, криогенний, металогідридний.

У першому випадку водень зберігається в стислому виді при тиску близько 700 атм. При цьому маса водню становить усього близько 3 % від маси балона й для зберігання скільки-небудь помітної кількості газу потрібні досить важкі й об'ємні балони. Це не говорячи вже про те, що виготовлення, зарядка й експлуатація таких балонів вимагають особливих запобіжних заходів через небезпеку вибуху.

Криогенний спосіб має на увазі скраплення водню й зберігання його в теплоізольованих посудинах при температурі -235ºС. Це досить енерговитратний процес – скраплення обходиться у 30-40 % тієї енергії, яка вийде при використанні отриманого водню. Але, якою б не була досконала теплоізоляція, водень у баку нагрівається, тиск збільшується й газ стравлюється в атмосферу через запобіжний клапан. Усього кілька днів – і баки порожні!

Самими перспективними є тверді накопичувачі, так звані металогідриди. Ці з'єднання вміють убирати в себе водень наче губка, при одних умовах, і віддавати при інших, наприклад при нагріванні. Щоб це було економічно вигідно, такий металогідрид повинен «усмоктувати» не менш 6 % водню. Увесь світ зараз шукає подібні матеріали. Як тільки матеріал буде знайдений – його підхоплять технологи, і процес «воднезації» транспорту піде значно швидше.

13.10 Тенденція створення заправних водневих станцій в різних країнах світу

Північна Америка, Канада. П'ять станцій побудовані в Британській Колумбії (західна провінція Канади) у 2005 року. Більше станцій будувати в Канаді не будуть, проект завершився в березні 2011 року.

Сполучені Штати. Арізона: прототип водневої заправної станції побудований за всіма правилами безпеки для

навколишнього середовища у Фініксі, щоб довести можливість будівництва таких заправних станцій у міських районах.

Каліфорнія: В 2013 році губернатор Браун підписав законопроект про фінансування $20 мільйонів у рік протягом 10 років на 100 станцій. Комісія з енергетики Каліфорнії виділила $46,6 млн. на 28 станцій, які були завершені в 2016 році. За станом на серпень 2018 року в Каліфорнії відкрито 35 станцій і ще 29 очікується до 2020 року.

Гавайї відкрили першу водневу станцію в Хикамі в 2009 році. В 2012 році компанія Aloha Motor Company відкрила водневу станцію в Гонолулу.

Массачусетс: французька компанія Air Liquide завершила будівництво нової водневої заправної станції в Менсфілді в жовтні 2018 року. Єдина воднева заправна станція в штаті Массачусетс розташована м. Білеріка (40 243 жителів), у штаб-квартирі компанії Nuvera Fuel Cells, що виготовляє водневі паливні елементи.

Мічиган: В 2000 році Ford і Air Products відкрили першу водневу станцію в Північній Америці в Дірборні, штат Мічиган.

Огайо: В 2007 році в кампусі Державного університету штату Огайо, в Центрі автомобільних досліджень, відкрилася воднева заправна станція. Єдина на весь штат Огайо.

Вермонт: воднева станція побудована в 2004 році в місті Берлінгтон. Проект частково профінансований через Програму водневого водопостачання Міністерства енергетики Сполучених Штатів.

Азія

Японія: У період з 2002 по 2010 рік, у Японії по проекту JHFC було введено кілька заправних станцій з воднем для тестування технологій виробництва водню. Наприкінці 2012 року було встановлено 17 водневих станцій, в 2015 році встановлено 19. Уряд розраховує створити до 100 водневих станцій. У бюджеті для цього виділено $460 млн., що покриває тільки 50% витрат інвесторів. JX Energy встановило 40 станцій до 2015 року й ще 60 у період 2016-2018 років. Toho Gas і Iwatani Corp установили 20 станцій в 2015 році. Тойота й Air Liquide створили спільне підприємство для будівництва 2 водневих станцій, які побудували в 2015 році. Осака-Газ побудували 2 станції за 2014-

2015 роки.

Південна Корея: В 2014 році введена в експлуатацію лише одна воднева станція, ще 10 станцій заплановані на 2020 рік.

Європа.

За станом на 2019 рік у Європі вже працюють більше 30 станцій, здатних заповнювати 4-5 автомобілів у день.

Данія: В 2015 році в мережі водневих мереж було 6 суспільних станцій. H2 Logic, що входить в NEL ASA, будує завод у Хернінзі для випуску 300 станцій у рік, кожна з яких може видавати 200 кг водню в день і 100 кг за 3 години.

Фінляндія: В 2016 році працюють суспільні станції, одна з них рухлива. Станція заправляє автомобіль 5 кг водню за три хвилини. Завод по створенню водню працює в місті Коккола.

Німеччина: За станом на вересень 2018 року працює 15 загальнодоступних водневих станцій. Більшість, але не всі із цих станцій експлуатуються партнерами Clean Energy Partnership (CEP). З ініціативи H2 Mobility число станцій у Німеччині повинне зрости до 400 станцій в 2023 році. Ціна проекту 350 мільйонів євро.



Рисунок 13.13 – Сучасна воднева заправна станція в Німеччині: коштує $2-3 млн. і здатна заправити лише 30 автомобілів за добу

Ісландія: Перша комерційна воднева станція відкрита в 2003 році в рамках ініціативи країни по рухові убік «водневої економіки».

Італія: У 2015 році в Больцано відкрита перша комерційна воднева станція.

Нідерланди: Першу суспільну автозаправну станцію відкрили 3 вересня 2014 року в Роуні біля Роттердама. Станція використовує водень із трубопроводу з Роттердама в Бельгію.

Норвегія: У лютому 2007 року відкрита перша в Норвегії воднева заправна станція Hynor. Uno-X у партнерстві з NEL ASA планує побудувати до 20 станцій до 2020 року, включаючи станцію з виробництвом водню на місці з надлишкової сонячної енергії.

Об'єднане Королівство.

В 2011 році відкрилася перша суспільна станція в Суіндоні. В 2014 році Hytec відкрив станцію London Hatton Cross. 11 березня 2015 року проект по розширенню мережі водневих мереж у Лондоні відкрив перший супермаркет, розташований на заправній станції для водню в Sensbury's Hendon (північно-західний пригород Лондона).

Каліфорнія попереду планети всієї в області фінансування й будівництва водневих заправних станцій. За станом на середину 2018 року в Каліфорнії було відкрито 35 роздрібних водневих станцій, а ще 22 – на різних етапах будівництва або планування.

Каліфорнія продовжує фінансувати будівництво інфраструктури, а Енергетична комісія має право виділяти до $20 млн. на рік до 2024 року, поки не запрацює 100 станцій. Для північно-східних штатів планують побудувати 12 роздрібних станцій. Перші відкриються до кінця 2019 року. Некомерційні станції в Каліфорнії й станції побудовані в інших штатах США обслуговують водневі легкові авто, автобуси, а також використовують для дослідницьких і демонстраційних цілей.

13.11 Витрати на утримання водневих станцій

Водневим заправленням не так просто замінити велику мережу бензозаправних станцій (в 2004 році у Європі й США було 168 000 точок). Заміна бензинових станцій на водневі коштує $1,5 трильйона. При цьому ціна облаштованості водневої паливної мережі в Європі може бути в 5 разів нижчою ніж ціна заправної мережі для електромобілів. Ціна одної водневої станції $2-3 мільйони.

При цьому, воднева мережа буде однаково дешевше мережі станцій для електромобілів по окупності. Причина у швидкому заправленні водневих автомобілів (від 3 до 5 хвилин). На мільйон автомобілів на паливних водневих елементах потрібно менше водневих станцій, ніж зарядних станцій на мільйон акумуляторних електромобілів.

У майбутньому питання заправлення воднем буде вирішуватися для людини залежно від його місця проживання. АЗС будуть заправляти автомобілі воднем, доставленим на танкерах з великих паливних підприємств. Поставки з таких підприємств нічим не будуть уступати поставкам бензину з нафтоперегінних заводів. У перспективі, місцеві водневі заводи навчаться мати користь із місцевих ресурсів і з поновлюваних джерел енергії.

13.12 Фактори, що стримують широке впровадження водневих технологій

Підсумовуючи «водневу тему», можна виділити наступні фактори, що стримують широке впровадження водневих технологій:

- відсутність водневої інфраструктури (частково цю проблему можна вирішити зокрема побудовою домашніх заправлень при приватних житлових будинках);
- недосконалі технології зберігання водню;
- відсутність стандартів безпеки, зберігання, транспортування, застосування і т.п.;
- розповсюджені сучасні способи безпечного зберігання водню вимагають більшого обсягу паливних баків, ніж для бензину. Тому в розроблених на сьогоднішній день автомобілях заміна палива на водень приводить до значного зменшення обсягу багажника. Можливо в майбутньому ця проблема буде переборена, але швидше за все, за рахунок деякого збільшення габаритів легкових авто. (Для інших класів автомобілів (автобусів, вантажних автомобілів, різноманітних спеціальних автомашин) проблема збільшення габаритів транспортного засобу не настільки гостра. Зокрема, на

автобусах паливні елементи можуть розміщатися на даху кузова, подібно тому, як це робиться, наприклад, із тролейбусним електроустаткуванням.

13.13 Небезпека водневого палива

Небезпека використання водню як палива пов'язана із двома факторами: високою летючістю водню, через яку він проникає через дуже невеликі зазори, і легкість запалення. З іншого боку, при пробої паливного бака бензин розливається калюжею по поверхні, тоді як водень випаровується у вигляді спрямованого струменя. Однак є небезпека заповнення замкненого простору салону автомобіля воднем.

Ключові фактори які обмежують використання водню на транспорті:

- суміш водню з повітрям вибухонебезпечна. Водень більш небезпечний, ніж бензин, тому що горить у суміші з повітрям у більш широкому діапазоні концентрацій. Бензин не горить при лямбда менш 0,5 і більш 2, водень при таких співвідношеннях горить чудово. Але водень, що зберігається в баках при високому тиску, у випадку пробою бака дуже швидко випаровується. Для транспорту розробляються спеціальні безпечні системи зберігання водню – баки з багатошаровими стінками, зі спеціальних матеріалів і т.п. (приклад – бак з нанотрубок, заповнених воднем.) Але однаково це в цілому здорожує весь цикл експлуатації транспортного засобу, лягаючи витратами на плечі споживача;
- воднева силова установка на базі традиційного ДВЗ значно складніша й дорожча в обслуговуванні, чим звичайний ДВЗ (особливо дизельний). По даним Массачусетського технологічного інституту, експлуатація водневого автомобіля на даному етапі розвитку водневих технологій обходиться в сто разів дорожче, чим бензинового;
- поки немає достатнього досвіду тривалої експлуатації водневого транспорту;
- немає можливості швидкого дозаправлення в шляху з каністри або від іншого автомобіля;

- для заправлення воднем потрібно побудувати розгалужену мережу заправних станцій. Для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким воднем, вартість устаткування вища, чим для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким паливом (бензином, етанолом і дизельним паливом). (Згідно GM, у США, будівництво 12 тисяч водневих заправних станцій в 2005 році оцінювалося в $12 млрд., тобто $1 млн. на одну заправну станцію, у той час як комплект устаткування для бензинових заправних станцій коштує від $40 тис., у середньому $100-200 тис.);
- ціна водню приблизно 8 євро за літр;
- летючість водню найвища серед газів. Водень важко зберегти в рідкому виді, це утрудняє зберігання водню, транспортування й використання в баку, тому що паливо повністю випарується з бака за короткий час. За дев'ять днів випаровується півбаку палива BMW Hydrogen;
- у даний час водень виробляється шляхом витрат значної кількості електроенергії.

Питання для самоперевірки

1. Розкажіть про використання водню, як джерела енергії для транспортних засобів.
2. Поясніть можливість застосування паливних елементів, як способу отримування електричної енергії на борту автомобіля.
3. Які фактори стримують впровадження водневих технологій?
4. Які можливі конструктивні схеми використання водню у існуючих ДВЗ?
5. Чому недоцільно використовувати водень у якості палива для традиційних ДВЗ?
6. Розкажіть про принцип роботи водневого паливного елемента.
7. З яких основних конструктивних елементів складається воднева силова установка Toyota Mirai?
8. Розкажіть принцип роботи силової установки Toyota Mirai.
9. З яких основних конструктивних елементів складається воднева силова установка Honda Clarity?

10. Назвіть методи одержання водню.
11. Поясніть схему одержання водню шляхом електролізу води.
12. Які існують способи зберігання водню?
13. Що стримує розвиток мережі водневих заправних станцій?
14. Які ключові фактори що обмежують використання водню на транспорті?
15. В чому полягає основна небезпека використання водню?

14 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Ера двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) ще далека від занепаду – такої думки дотримується досить велика кількість фахівців провідних автоконцернів світу, і навіть простих автолюбителів. І для такого твердження в них є всі підстави.

По великому рахункові, існує тільки дві серйозні претензії до ДВЗ – значні витрати палива і шкідливий вихлоп. Звісно, запаси нафти не безмежні, але ж автомобілі є одними з основних її споживачів. Вихлопні гази отруюють природу й людей і, накопичуючись в атмосфері, створюють парниковий ефект. Парниковий ефект приводить до зміни клімату й далі до інших екологічних лих.

Зі вказаними обома недоліками конструктори й інженери за останні десятиліття навчилися досить ефективно боротися, переконливо довівши усім скептикам, що у ДВЗ є ще невикористані резерви для подальшого розвитку й удосконалювання.

Так істотне зниження витрати палива було досягнуто завдяки впровадженню в конструкцію двигуна ряду технічних нововведень. Першим кроком став перехід від карбюраторних двигунів до систем впорску палива. Сучасні системи упорскування забезпечують подачу палива в циліндри під високим тиском, у результаті чого відбувається його тонке розпилення й гарне змішування з повітрям.

У ході такту стиску паливо впорскується в камеру згоряння точно дозованими порціями до 5-7 раз. Використання наддування, збільшення числа клапанів, підвищення ступеня стиску також дозволили більш повно спалювати робочу суміш.

Оптимізація форми камери згоряння, днища поршнів, застосування систем з регульованими фазами газорозподілу сприяли поліпшенню процесів сумішоутворення.

У результаті двигун може працювати на більш бідних сумішах, заощаджуючи паливо й знижуючи викид шкідливих речовин. Отже подальші дослідницькі роботи в цьому напрямку будуть вестись і надалі.



Рисунок 14.1 – Сучасний шведський сміттєвоз Volvo
на гібридній тязі

На сьогодні у сучасних автомобілях все більш широко застосовується система старт-стоп, що дає помітну економію палива в міському режимі руху. Ця система автоматично виключає двигун при зупинці автомобіля.

Запуск проводиться при натисканні на педаль зчеплення (в автомобілях з механічною коробкою передач) або при відпусканні педалі гальма (в автомобілях з автоматичною коробкою).

Це технічне рішення у найближчий час має законодавчо стати обов'язковим до використання на всій нових автомобілях. Система рекуперації енергії гальмування, що вперше з'явився на гібридних автомобілях, поступово перекочувала й на звичайні.

Кінетична енергія автомобіля, що вповільнюється, яка раніше розтрачувалася на нагрівання деталей гальмової системи, тепер перетворюється в електричну й використовується для підзарядки

акумулятора. Витрата палива при цьому знижується до 3 %. Дуже важливою обставиною є те, що поліпшення технічних характеристик двигунів відбувається при неухильному зниженні їхнього об'єму.



Рисунок 14.2 – Американська компанія кур'єрської служби UPS, крім натурального газу вже сьогодні широко використовує інші альтернативні палива для своїх автопарків: пропан, етанол, поновлюване дизельне паливо (RLNG) та електроенергію

Наприклад, фольксвагеновський мотор 1,4 TSI, визнаний кращим двигуном 2010 року, при обсязі 1390 $см^3$ розвиває потужність до 178 к.с. Тобто, з кожного літра знімається 127 к.с.! Отже питома витрата палива за минулі 20-30 років була знижена майже у два рази. А раз знижується витрата палива, відповідно знижується й викид шкідливих речовин, та й запаси нафти можна розтягти на більший строк.

Усі перераховані вище заходи знижують шкідливі викиди, так би мовити побічно, за рахунок поліпшення технічних характеристик. Але вже є ряд систем, призначення яких – безпосередньо зменшувати кількість шкідливих речовин у вихлопних газах.

Насамперед це, звичайно ж, каталітичний нейтралізатор і система рециркуляції вихлопних газів EGR. У нейтралізаторі шкідливі речовини, що містяться у вихлопних газах, вступають у хімічну реакцію з речовинами, нанесеними на його щільник. У результаті реакції шкідливі речовини розкладають на нешкідливі складові.



Рисунок 14.3 – Процес зарядки електромобіля
у сучасному західноєвропейському місті

Система EGR (Exhaust Gas Recirculation) має більш «вузьку» спрямованість. Вона призначена для зниження вмісту оксидів азоту у вихлопних газах на режимах прогріву й різкого прискорення, коли двигун працює на збагаченій суміші. Принцип роботи системи полягає в перенапрямку частини вихлопних газів назад у циліндри. Це викликає зниження температури горіння й,

відповідно, концентрації оксидів азоту. При роботі двигуна не всі вихлопні гази попадають у випускну систему. Частина їх прориває́ться в картер. Для запобігання їхнього потрапляння в атмосферу використовується система вентиляції картера. Пари бензину так само, як і вихлопні гази, містять шкідливі для людини речовини. Тому на сучасних автомобілях вже встановлюється система поглинання пар бензину. Використання таких систем на всіх нових та розроблюваних автомобілях у найближчий час теж має стати обов'язковим для всіх автовиробників.

Усі перераховані вище системи універсальні, тобто використовуються як на бензинових моторах, так і на дизельних. Однак вихлопні гази дизеля відрізняються підвищеною концентрацією оксидів азоту й сажі. Тому у випускній системі дизелів додатково встановлюється сажевий фільтр.



Рисунок 14.4 – Електровантажівка Scania під час руху
по «e-highway» на сході центральної Швеції

У деяких конструкціях може використовуватися **система SCR (Selective catalytic reduction)** або, у вільному перекладі – упорскування сечовини. Принцип роботи цієї системи: водяний

розчин сечовини впорскується у вихлопну систему перед каталізатором. У результаті хімічної реакції майже половина високотоксичних оксидів азоту перетворюється у звичайний нешкідливий азот.

Вибір підходящого типу двигуна залежить від класу автомобіля. Згідно досліджень проведених компанією Bosch, сучасний дизельний двигун споживає до 25 % менше палива й менше забруднює навколишнє середовище, проте бензиновий має меншу вартість, його страхування й експлуатація обходяться дешевше. Однак якщо річний пробіг перевищує 15 000 кілометрів, купувати дизель вигідніше.

Сучасні бензинові силові агрегати досить ефективні в компактних автомобілях, а нинішні дизелі дозволяють досягати низької витрати палива й дають задоволення від водіння в більших універсалах. Бензинові мотори забезпечують чудову динаміку «гарячим» спортивним автомобілям, а високий крутний момент дизелів як не можна до речі пасує позашляховикам та великим вантажівкам.

Підсумовуючи сказане можна стверджувати, що в найближчі десятиліття ми будемо і надалі співіснувати із двигунами внутрішнього згоряння. Для цього є вагомі технічні й економічні причини. Налагодженість технології виробництва ДВЗ забезпечує їх порівняно низьку вартість. Удосконалювання робочого процесу дозволило одержати високі характеристики й знизити шкідливі викиди.

Ріст продажів «зелених» автомобілів – електрокарів, багато в чому стимульований урядовою підтримкою. А тому як тільки держава згортає програму знижок на такі «екологічні автомобілі», попит на них стрімко падає.

Отже об’єктивний факт – на сьогоднішній день, всі численні спроби створити гідну альтернативу ДВЗ поки що так і не увінчалися успіхом. Якщо ж навіть принципово новий двигун незабаром і з’явиться, то для його впровадження в серійне виробництво знадобляться величезні капіталовкладення й тривалий проміжок часу.

А у нинішній нестабільній економічній ситуації у світі, коли існує переконлива загроза настання довготривалої економічної рецесії у провідних західних економіках, жоден провідний

автоконцерн не ризикує йти на такі колосальні фінансові витрати.

Ще одним переконливим доказом того що традиційні ДВЗ ще далекі від занепаду є щорічний звіт про перспективи енергетичних ринків Міністерства енергетики США – Annual Energy Outlook (EIA). Так згідно їхніх розрахунків, на основі урахування усіх сучасних технологій, однозначно стверджується, що електромобілі не будуть користуватися масовим попитом навіть у 2040 році.

Тобто фахівці з міністерства енергетики США переконливо, з цифрами, доводять що навіть у віддаленому майбутньому електромобілі не зможуть потіснити автомобілі із традиційними двигунами внутрішнього згоряння, і майже 80 % автомобілів на дорогах будуть працювати за рахунок горючого палива. Фахівці порахували і довели, що автовиробники віддадуть перевагу створенню ефективних двигунів внутрішнього згоряння радикальним змінам свого модельного ряду.

Міністерство енергетики США зокрема дослідило питання про тип автомобілів, який буде домінувати в майбутньому. За даними експертів, в 2040 році 78 % автомобілів на дорогах США будуть оснащені двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на горючому паливі природнього походження.

При цьому min 42 % усіх автомобілів із ДВЗ будуть оснащені системами – «старт-стоп» і рекуперативними гальмами, які дозволяють зберігати отриману від затримки машини енергію. Гібриди й «чисті» електромобілі що заряджаються від електромережі, складуть лише по 1 % автопарку відповідно. Традиційні гібриди, які користуються й ДВЗ, і електромотором, складуть близько 5 % автомобілів на дорогах.

У 2015 році топ-менеджери декількох найбільших у світі автомобільних корпорацій вже висловлювалися про те, що автомобілі, які повністю працюють на електротязі, позбавлені майбутнього. Гібриди із ДВЗ і електромоторами, навпаки, мають велике майбутнє, вважають автомобільні менеджери. У подібному ключі, зокрема, висловилися глави Toyota, Volvo і Renault-Nissan.

Раніше кількаразові маркетингові дослідження встановили, що великому попиту на електромобілі заважає висока вартість таких машин. Крім того, американське агентство JD Power

установило, що майже половина нинішніх покупців електромобілів обирають таку машину тільки з іміджевих міркувань, а не керуючись турботою про екологію або прагненням заощаджувати.

Разом з тим, середня витрата палива автомобілів у США повинна скласти в 2040 році 6,3 л на 100 км шляху проти нинішніх 11 л. Проте, даний результат все-таки відстає від завдання, поставленою ще адміністрацією президента США Барака Обами на 2025 рік. На думку глави держави, на цей термін усі нові автомобілі на ринку США повинні споживати не більш 4,3 л на 100 км шляху.

За даними міністерства енергетики, з урахуванням постійного росту видобутку нафти, в 2040 році літр бензину буде коштувати у США близько $1,03. Такий же об'єм дизельного палива буде коштувати в 2040 році вже $1,3. Варто відзначити, що легкові автомобілі з дизельними двигунами рідко зустрічаються в США: за прогнозом EIA їхня частка до 2040 року зросте лише до 4% з нинішніх 2%. Разом з тим, у міністерстві припускають, що кількість автомобільних поїздок до 2040 року збільшиться на 30%.

Отже у той час як світові лідери автопрому відмовляються від двигунів на електротязі, влади ряду європейських країн, навпаки, бачать в електромобілях певний потенціал і обнулюють мита на електромобілі. Стимулюючи таким чином автовиробників крупно вкладатися не тільки у виробництво електромобілів але й вести подальші наукові дослідження в цьому напрямку.

Питання для самоперевірки

1. Які суттєві недоліки властиві сучасним ДВЗ?
2. Які напрями розвитку силових установок вважають перспективними у вирішенні проблем економічного споживання палив нафтового походження і дотримування екологічних вимог?
3. Розгляньте можливі варіанти об'єднання різних видів двигунів в єдину силову установку.
4. Обґрунтуйте можливість застосування як моторного палива енергоносіїв з поновлювальних джерел.

5. Коротко розкажіть про екологічні стандарти Євро.
6. В чому полягає суть відповідності автомобільного палива екологічним стандартам Євро?
7. Що таке біопаливо?
8. Чи є на ваш погляд конструктивні резерви у традиційних ДВЗ для їхнього подальшого розвитку?

ЛІТЕРАТУРА

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.
6. Гроэ 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, Експресс-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-Мкртичьян 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-Мкртичьян Г. Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. М. : Металлургиздат, 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 обш. 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-Мкртичьян 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 3. Л., Рыжков-Дудонов М. А. Судовые поршневые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлннга). Л. : Судостроение, 1976. 76 с.
30. Осепчугов В. В., Фрумкин А. К. Автомобиль : Анализ конструкций, элементы расчета. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.
31. Пройкшат 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. Рытвинский Г. Н. Знакомьтесь – двигатель. М. : Машиностроение, 1993. 176 с.
35. Григорьев Е. Г., Колубаев Б. Д., Ерохов В. И. Газобалонные 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: 12.04.2021)
38. Platform for Complete Combustion http://www.zajacmotors.com/technology.phtml (дата звернення: 12.04.2021)
39. Tour Engine Technology URL: http://www.tourengine.com/technology (дата звернення: 12.04.2021)
40. Alternative Motorentechnik bei Verbrennungsmotoren URL: http://www.mein-werkstattwagen.de/wissen/alternative-

motorentechnik-bei-verbrennungsmotoren/ (дата звернення: 12.04.2021)
41. Six-stroke engine high level of efficiency URL: http://bajulazsa.com/Site/sixstroke.html (дата звернення: 12.04.2021)

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

АРТЮХ Олександр Миколайович
ДУДАРЕНКО Ольга Василівна
КУЗЬМІН Віктор Володимрович
СОСИК Андрій Юрійович
ЩЕРБИНА Андрій Васильович

ТРАНСПОРТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

Навчальний посібник

Технічні редактори: Білостоцька А. О., Желізний О. І.,
Пругло А. М., Решетняк О. В.
Комп'ютерний набір: Білостоцька А. О., Желізний О. І.,
Пругло А. М., Решетняк О. В.
Комп'ютерна верстка: Білостоцька А. О., Желізний О. І.,
Пругло А. М., Решетняк О. В.

Підписано до друку 30.12.2021. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 15,34.
Тираж 100 прим. Зам. № 1029.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.