

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

"Транспортні енергетичні установки"

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

Частина 3 - змістовий модуль 2.

ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами.
Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок

2019

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни "Транспортні енергетичні установки" для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби") усіх форм навчання. Частина 3 - змістовий модуль 2. ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 62 с.

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

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

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

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

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

ЗМІСТ**Частина 3**

Вступ	128
Тематичний план лекційних занять	129
Лекція № 8. Газові енергетичні установки на транспортних засобах ..	132
Лекція № 9. Роторно-поршневі ДВЗ.....	153
Лекція № 10. Газотурбінні ДВЗ.....	172
Рекомендована література	184
Основна	184
Додаткова.....	184
Інформаційні ресурси	186

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 світільному газі.

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

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

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

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

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

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

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

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

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

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

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

Змістовий модуль 2. ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами.
Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок

Тема 8. Газові енергетичні установки на транспортних засобах (2 год.)

Паливо для газобалонних автомобілів. Автомобільні газобалонні установки й газові дизелі. Особливості конструкції газобалонних автомобілів і автобусів. Автомобільні газові балони. Газові редуктори й випарники. Газозмішувальні пристрої. Автомобільні газонаповнювальні станції. Автомобільні газогенераторні установки.

Тема 9. Роторно-поршневі ДВЗ (2 год.)

Конструктивні схеми роторно-поршневих двигунів. Робочий цикл двигуна Ванкеля. Кінематична схема двигуна Ванкеля. Динаміка роторного двигуна. Автомобільні варіанти двигуна Ванкеля.

Тема 10. Газотурбінні ДВЗ (2 год.)

Історія створення й принцип дії. Основні характеристики. Термодинамічні цикли. Конструктивні схеми двигунів застосовуваних на автомобілях. Матеріали для виготовлення й шляхи поліпшення характеристик газотурбінних двигунів.

Тема 11. Гібридні й електричні енергетичні установки транспортних засобів (2 год.)

Схеми гібридних силових установок автомобілів: послідовна, паралельна й послідовно-паралельна. Переваги й недоліки автомобілів з гібридними силовими установками. Електромобілі. Механічні накопичувачі енергії. Електропневматичні силові установки.

Тема 12. Двигуни внутрішнього згоряння з нетрадиційними робочими циклами (2 год.)

Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ. Двигуни з розділеними тактами. Двигуни з доданими тактами. Двигуни зі

змінюваною комбінацією тактів. Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об'ємом. Гібридні робочі процеси із samozapalюванням гомогенного заряду.

Тема 13. Водневі енергетичні установки (2 год.)

Моторні властивості водню й передумови його використання як палива для ДВЗ. Енергоекологічні показники водневого ДВЗ. Робочий процес автомобільних двигунів на водні й суміші бензину з воднем. Акумуляування водню на борту автомобіля.

Тема 14. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок (2 год.)

Екологічна безпека ДВЗ. Норми токсичності Євро. Альтернативні види палива ДВЗ. Біопаливо як засіб вирішення кліматичної проблеми. Напрямки і перспективи подальшого конструктивного вдосконалення ДВЗ.

ЛЕКЦІЯ № 8. ГАЗОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ТРАСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

План лекції. Паливо для газобалонних автомобілів. Автомобільні газобалонні установки й газові дизелі. Особливості конструкції газобалонних автомобілів і автобусів. Автомобільні газові балони. Газові редуктори й випарники. Газозмішувальні пристрої. Автомобільні газонаповнювальні станції. Автомобільні газогенераторні установки.

Література: [1], с. 152-164; [2], с. 263-282; [5], с. 49-54, 151-152; [8], с. 58-62; [18]; [35]; [36], с. 121-130.

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.

Автомобілі на природному газі.

Природний газ є самим екологічним викопним паливом. Вико-

ристання 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, поводить як звичайний автомобіль.

Розрізняють наступні **види автомобілів на природному газі**:

- серійні автомобілі (випущені серійно на заводах автовироб-

- ників);
- модифіковані автомобілі (переустановлені 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, замінюються 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 переустановлені 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 авто-

мобілі), 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

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 корпусу 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 елект-

ромагніту, 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 ряд 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 10°C 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.

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, скла-

дається 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.

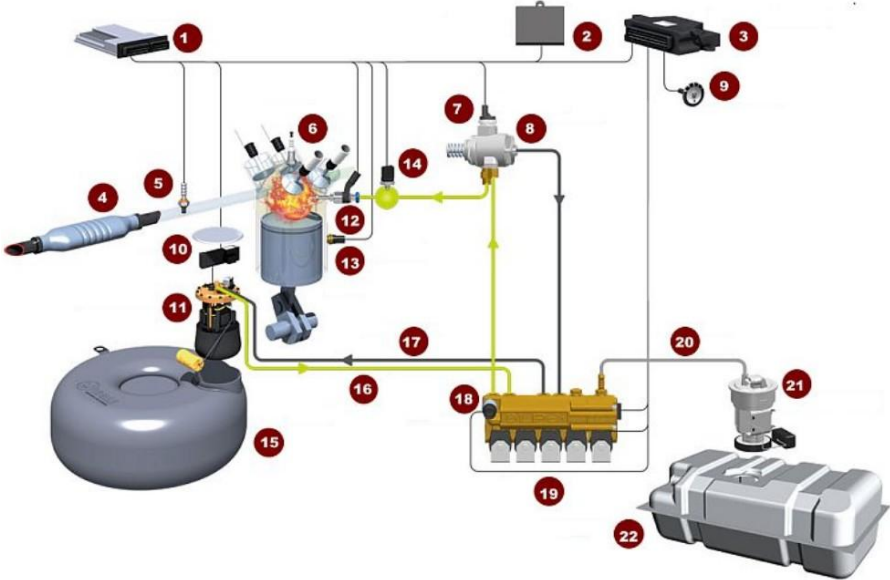
Сьогодні у світі понад 16 мільйони автомобілів працюють на зрідженому нафтовому газі, половина з них перебувають у Туреччині, Південній Кореї, Польщі, Італії й Австралії. У Росії зріджений нафтовий газ особливо широко використовується на комерційному транспорті. Виробники з Італії, Нідерландів, Польщі, 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. Безпосе-

редне упорскування рідкого газу в камеру згоряння реалізується за допомогою газобалонного 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.



- 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

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).

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 у бік 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.

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 СО; далі газ охолоджується, фільтрується й змішується з повітрям, після чого надходить у циліндри двигуна, де підпалюється свічами запалювання.

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

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

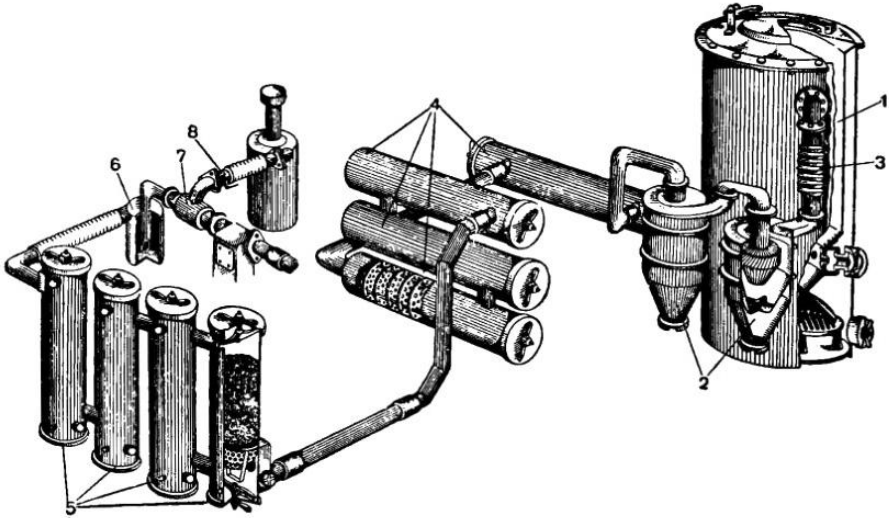
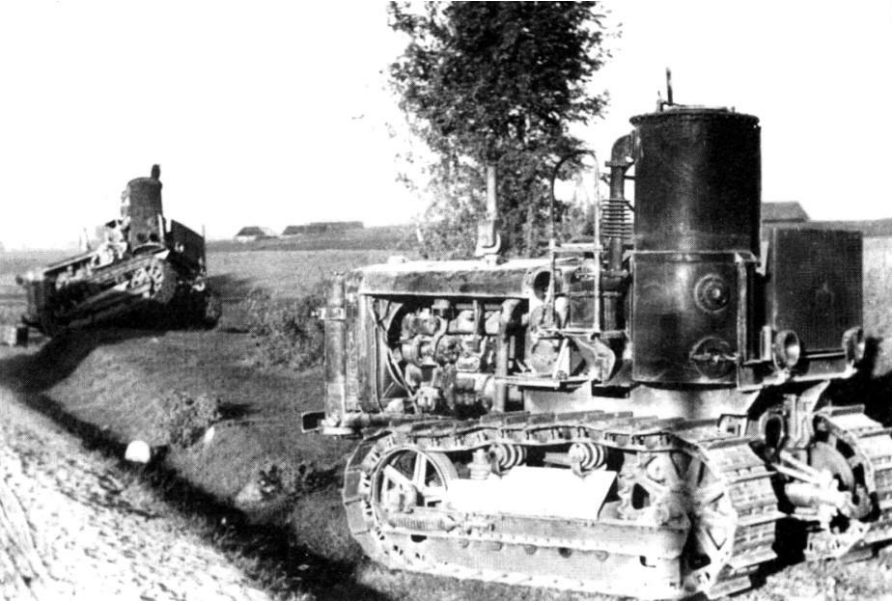
нератор радянського трактора СХТЗ-НАТИ-1ТА. Ці трактори ХТЗ (Харківський тракторний завод) серійно будував з 1937 по 1941 рр.



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



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

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.



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

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.

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.

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 ($\approx 20\%$), H_2 ($\approx 15\%$) і CH_4 ($\approx 4\%$) - складові горючої частини генераторного газу. Негорючу частину складають азот ($\approx 55\%$) і вуглекислий газ ($\approx 12\%$). Баластова частина генераторного газу становить більшу його половину, тому теплота згоряння не перевищує $1100-1300 \text{ ккал/м}^3$ ($\approx 5,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$).

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°C ;
- II - сухої перегонки, де паливо нагрівається до $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ 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 вигорання палива в активну зону надходять нові його порції під дією власної ваги.

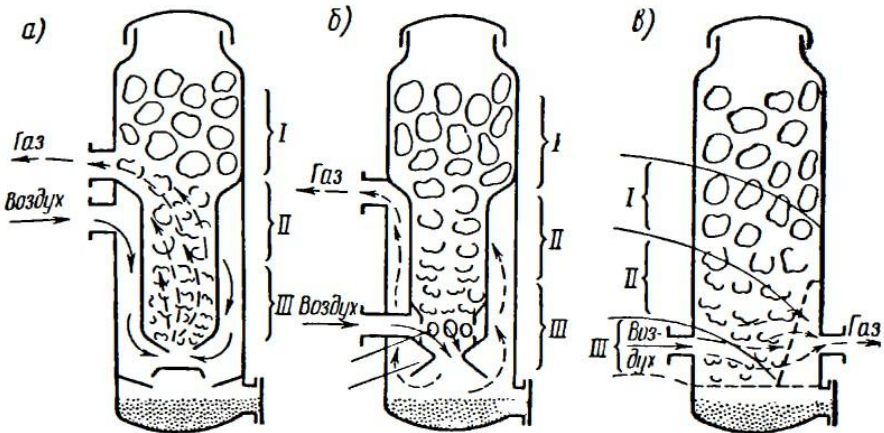


Рисунок 8.9 - Принципові схеми газогенераторів

За схемою рис. 8.9, а - із прямим процесом газифікації, повітря в зону горіння засмоктується знизу. Газу, 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°C . Щоб знизити її до $1100\text{--}1300^{\circ}\text{C}$, з потоком повітря подають воду.

За схемою (рис. 8.9, б) зі зворотним або зверненим процесом газифікації повітря надходить у зону горіння через фурменні 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. Горизонтальний процес у принципі схожий із прямим процесом газифікації.

Для автомобільних установок більш прийнятні генератори зі зворотним процесом газифікації. 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°C 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 хіміобробки, 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.



Рисунок 8.10 - Використання автомобільних газогенераторів у сучасній Північній Кореї



Рисунок 8.11 - Використання автомобільних газогенераторів у сучасній Північній Кореї

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 кабінки. 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 запірні арматура, природний газ, який на додачу легше повітря, просто випариться на відміну від повільно паркового 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. Як правило, балони авто, що вибухнули при заправленні, ніхто не оглядав від дня установки обладнання. Але ж газові балони не вічні.



Рисунок 8.12 – Наслідки розриву композитного метанового балону



Рисунок 8.13 - Розрив сталюого газового балону

Балони зношуються, метал може втомитися й піти мікротріщи-

нами. 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.

ЛЕКЦІЯ № 9. РОТОРНО-ПОРШНЕВІ ДВЗ

План лекції. Конструктивні схеми роторно-поршневих двигунів. Робочий цикл двигуна Ванкеля. Кінематична схема двигуна Ванкеля. Динаміка роторного двигуна. Автомобільні варіанти двигуна Ванкеля.

Література: [1], с. 99-115; [5], с. 253-260; [16], с. 41-43; [34], с. 80-81.

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 автомаєстерні 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 на-

лежало 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 см³, Ванкелю вдалося зняти 14 к.с. Зрозуміло, що двигун був побудований за схемою, запропонованою 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 праце-

здатність. 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 яко 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 однороторного 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.

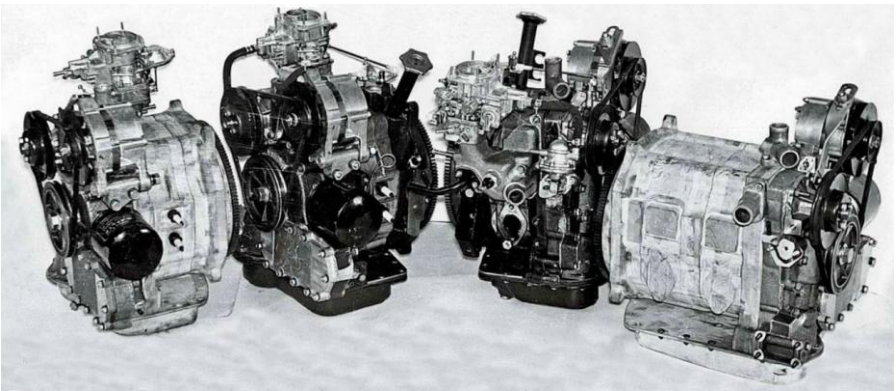


Рисунок 9.5 – Сімейство роторних двигунів ВАЗ-311 і -411 розроблених у 1970-ті роки у СРСР на заводі ВАЗ

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 різноце універсальний: їм можна було оснастити будь-який ВАЗівський 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.

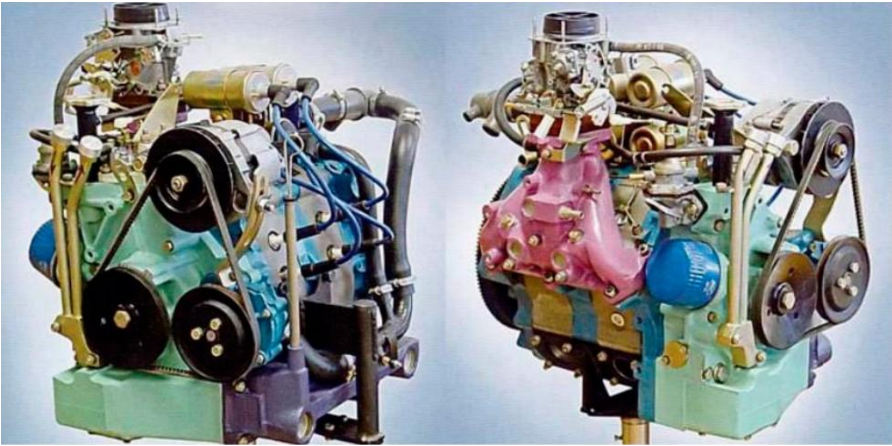


Рисунок 9.6 – Серійний двигун BA3-415

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.



Рисунок 9.7 - Mazda RX-8

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.

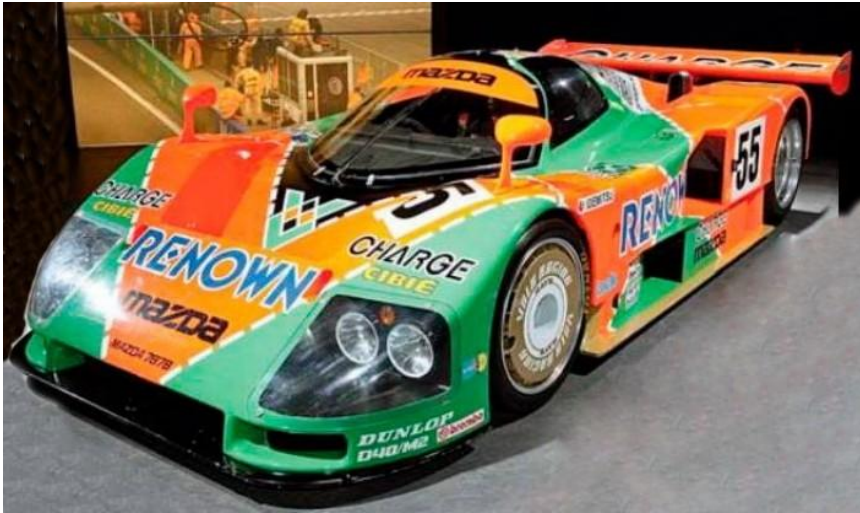


Рисунок 9.8 - Mazda 787B

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 сво-

го 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.



Рисунок 9.10 - Роторний Citroen M35 - купе

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 переважив за тисячу.

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 вала). 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.

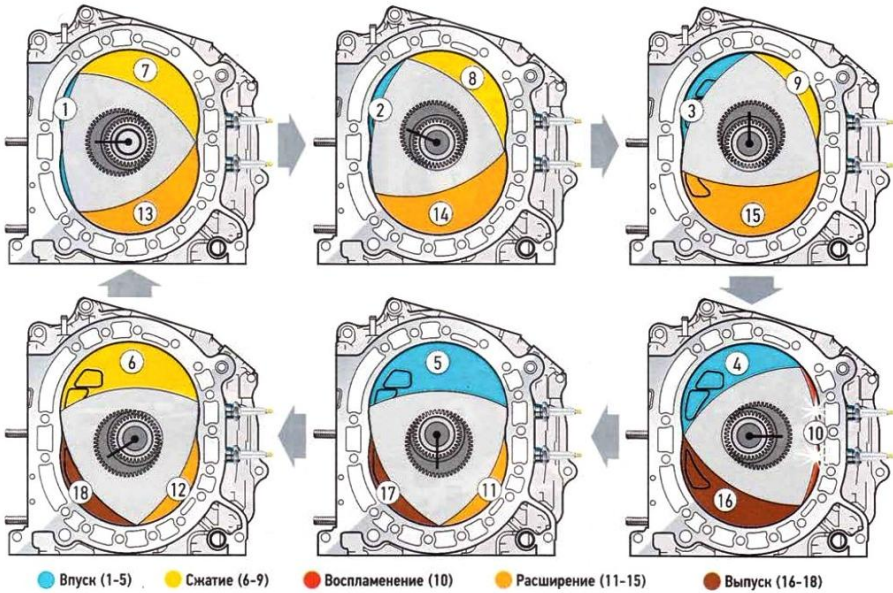


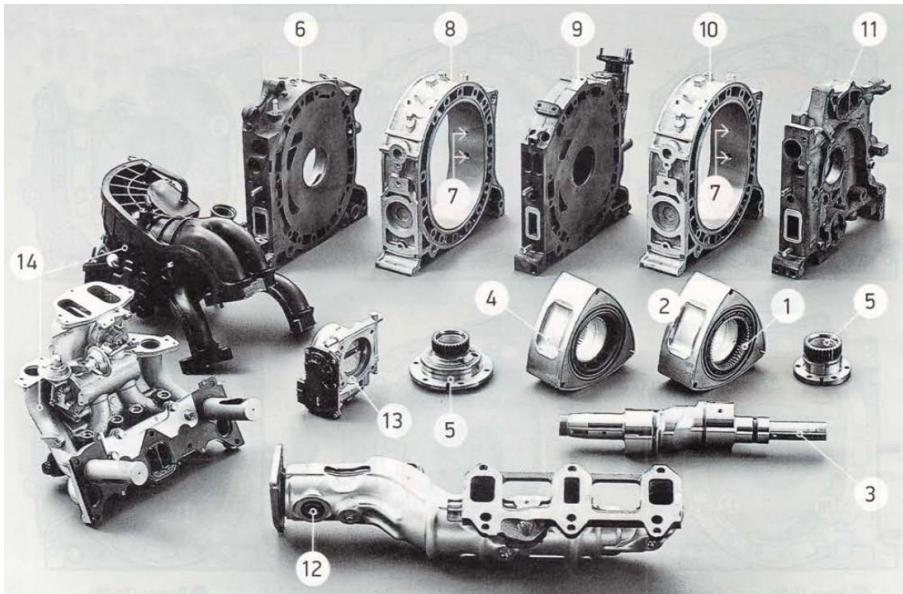
Рисунок 9.11 - Схема роботи роторного двигуна

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! 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.



- 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

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 протилежний рух 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.

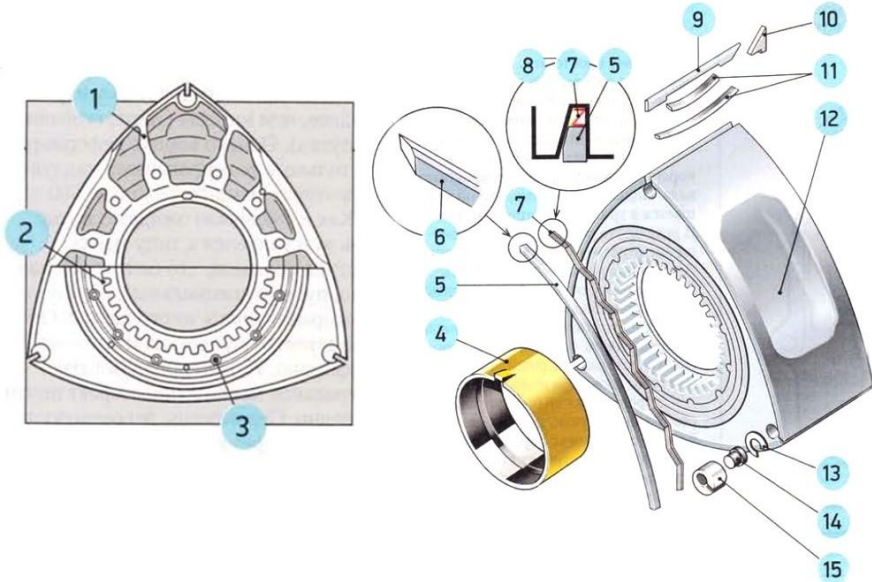
Якщо звичний поршень обходиться всього трьома кільцями (два компресійні й одне маслозйомне), то в ротора подібних елементів у кілька разів більше. Так, апекси (ущільнення вершин ротора) відіграють роль перших компресійних кілець. Вони виготовлені із чавуну з електронно-променевою обробкою - для підвищення 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.

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 наванта-

женнях 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.



- 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 і його основних ущільнень

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.

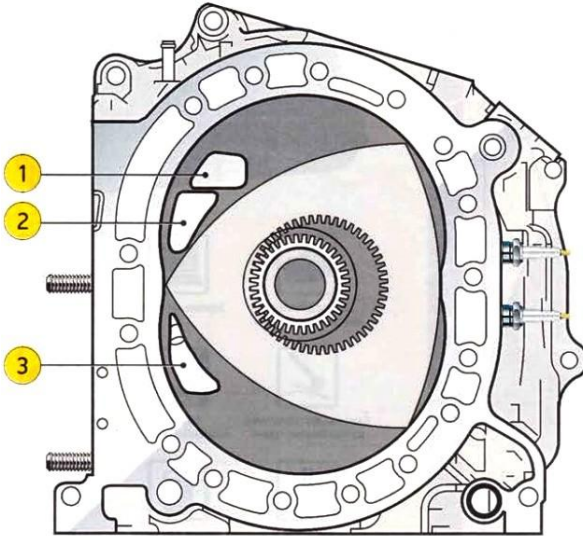
Розточення марне: по-перше, складно знайти потрібне устаткування, а по-друге, запчастин під збільшений розмір просто немає. Не підлягають ремонту й ротори при ушкодженні пазів під апекси. Як водиться, корінь лиха - у якості палива. Якісний 98-й бензин знайти не так вже й просто.

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 корпусу. Верхня частина (тут протікають такти впуску й стиску) холодніше, чим нижня (такти згоряння й випуску). Однак корпус деформується тільки у фор-

сованих наддувних моторів потужністю більш 500 к.с.



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

Рисунок 9.14 - Схема бічного корпусу ротора

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.

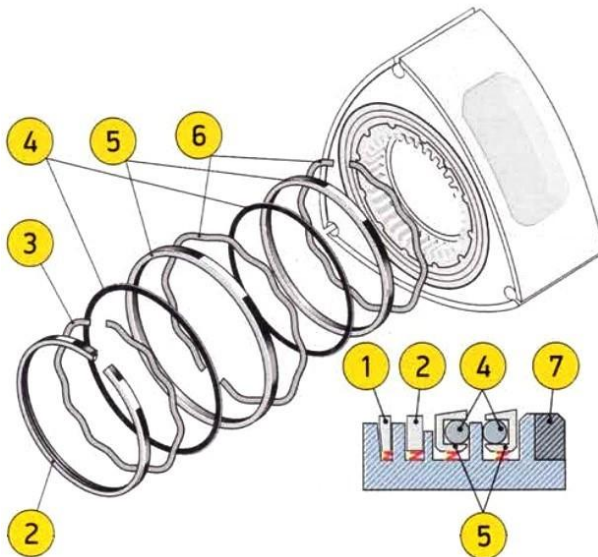
Свічок вистачає в середньому на 15 000-20 000 км.

Всупереч розхожій думці, виробник рекомендує глушити мотор як звичайно, а не на середніх обертах. "Знавці" впевнені, що при ви-

миканні 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 і ізолюючих ущільнень

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 партертя (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.

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 кожній 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 еласти-

чними), 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

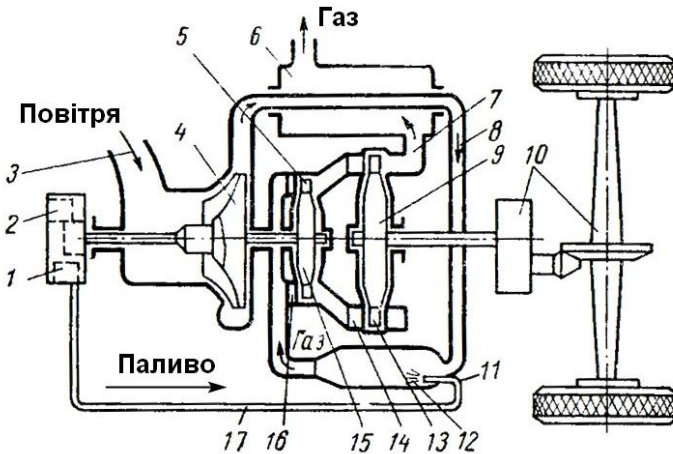
1. Назвіть розробника першого працездатного РПД.
2. В якому році було одержано перший патент на РПД?
3. Коротко розкажіть устрій РПД.
4. Який середній ресурс сучасного РПД?
5. За рахунок чого досягається спрощення, врівноваження конструкції та зменшення загальної маси РПД?
6. Які основні задачі вирішують 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?

ЛЕКЦІЯ № 10. ГАЗОТУРБІННІ ДВЗ

План лекції. Історія створення й принцип дії. Основні характеристики. Термодинамічні цикли. Конструктивні схеми двигунів застосовуваних на автомобілях. Матеріали для виготовлення й шляхи поліпшення характеристик газотурбінних двигунів.

Література: [1], с. 32-45; [20]; [21]; [22]; [34], с. 37-44, 81-84.

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 повітря, 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.

Переваги малого газотурбінного автомобільного двигуна.

1. Більш плавна робота у порівнянні з поршневими двигунами внаслідок того, що робочі елементи двигуна роблять чисто оберткові 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, оберткові 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 пе-

редачі 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 урахувувати (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 три-

ває 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 напружки, 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 ви-

трачається 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.

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 про-

блема видалення цих великих обсягів гарячого газу з автомобіля з мінімальними незручностями для навколишніх. На щастя, при згорянні палива в сучасних камерах згорання 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 використо-

увати 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 повернути 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.)

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 легкій й простій системі 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?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна

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

Додаткова

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

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

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

29. Мышинский З. Л., Рыжков-Дудонов М. А. Судовые поршневые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга). Л. : Судостроение, 1976. 76 с.
30. Осепчугов В. В., Фрумкин А. К. Автомобиль : Анализ конструкций, элементы расчета. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.
31. Прохвшат 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. Рывтинский Г. Н. Знакомьтесь – двигатель. М. : Машиностроение, 1993. 176 с.
35. Григорьев Е. Г., Колубаев Б. Д., Ерохов В. И. Газобаллонные автомобили. М. : Машиностроение, 1989. 216 с.
36. Тур Е. Я. Устройство автомобиля : Учебник для учащихся автотранспортных техникумов. М. : Машиностроение, 1991. 352 с.

Інформаційні ресурси

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