

Бэбэлэу Дойна Евгеньевна

Менеджер сервисной группы ГК Остек

**ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ:
ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА**

Аннотация: В статье представлен комплексный обзор поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) как ключевого элемента современной транспортной и энергетической инфраструктуры. Рассмотрены термодинамические основы их работы, конструктивные особенности и основные классификационные признаки. Особое внимание уделено современным вызовам, связанным с ужесточением экологических норм, а также инновационным направлениям развития: внедрению альтернативных видов топлива, технологиям переменной степени сжатия, гомогенному воспламенению от сжатия (HCCI) и интеграции ДВС в гибридные силовые установки.

Ключевые слова: поршневой двигатель, цикл Отто, цикл Дизеля, термический КПД, степень сжатия.

Abstract: These article provide a comprehensive overview of reciprocating internal combustion engines (ICE) as a key element of modern transport and energy infrastructure. The thermodynamic foundations of their operation, design features and main classification features are considered. Special attention is paid to modern challenges related to stricter environmental regulations, as well as innovative areas of development: the introduction of alternative fuels, variable compression ratio technologies, homogeneous compression ignition (HCCI) and the integration of internal combustion engines into hybrid power plants.

Keywords: piston engine, Otto cycle, diesel cycle, thermal efficiency, compression ratio.

1. Введение

Несмотря на стремительное развитие электрических силовых установок, поршневые двигатели внутреннего сгорания остаются доминирующим источником механической энергии в мировом транспорте, авиации общего назначения, морском флоте, сельскохозяйственной и строительной технике. Более чем за 150 лет эволюции поршневой ДВС прошел путь от простейших атмосферных агрегатов до высокотехнологичных комплексов с турбонаддувом, непосредственным впрыском и интеллектуальным управлением фазами газораспределения.[1]

Современный этап развития поршневых двигателей характеризуется не столько погоней за ростом литровой мощности, сколько задачами максимизации термического КПД и минимизации токсичности отработавших газов в условиях жестких экологических стандартов (Евро-6, Евро-7, ЕРА Tier 4). Данная статья систематизирует знания о принципах работы, классификации и инновационных векторах развития поршневых двигателей.

2. Принцип работы и основные компоненты

2.1. Термодинамические циклы

Работа поршневого ДВС основана на преобразовании химической энергии топлива в тепловую, а затем в механическую работу. В зависимости от способа подготовки и воспламенения топливовоздушной смеси, выделяют два основных идеализированных термодинамических цикла[2]:

Цикл Отто (подвод теплоты при постоянном объеме) – лежит в основе работы бензиновых двигателей с искровым зажиганием.

Цикл Дизеля (подвод теплоты при постоянном давлении) или смешанный цикл Тринклера-Сабатэ – описывает работу дизельных двигателей с воспламенением от сжатия.

2.2. Кривошипно-шатунный и газораспределительный механизмы

Конструктивно поршневой двигатель состоит из двух основных механизмов и нескольких систем:

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ): преобразует возвратно-поступательное движение поршня во вращательное движение коленчатого вала. Основные элементы: блок цилиндров, поршень с кольцами, шатун, коленчатый вал, маховик. [3]

Механизм газораспределения (ГРМ): обеспечивает своевременный впуск свежей смеси (или воздуха) и выпуск отработавших газов. Включает распределительный вал, клапаны, пружины и привод (ременной или цепной).

Вспомогательные системы: система питания (впрыск топлива), система зажигания (для бензиновых ДВС), система смазки, система охлаждения и система выпуска отработавших газов (с каталитическим нейтрализатором, сажевым фильтром DPF и системой рециркуляции EGR).

2.3. Четырехтактный и двухтактный циклы

Четырехтактный двигатель: рабочий цикл совершается за четыре хода поршня (два оборота коленчатого вала): впуск, сжатие, рабочий ход (расширение), выпуск. Обеспечивает высокую экономичность и чистоту выхлопа.

Двухтактный двигатель: рабочий цикл совершается за два хода поршня (один оборот вала). Впуск и выпуск происходят через окна в гильзе цилиндра. Отличается высокой удельной мощностью, но низким КПД и высокими выбросами несгоревшего топлива, что ограничивает его применение в современном автомобилестроении (сохранился в малой мототехнике и некоторых судовых дизелях).

3. Классификация поршневых двигателей

Поршневые ДВС классифицируются по ряду ключевых признаков:

- По типу применяемого топлива: бензиновые, дизельные, газовые (метан, пропан-бутан), многотопливные, водородные.
- По способу смесеобразования и воспламенения:
- С внешним смесеобразованием и искровым зажиганием (карбюраторные, с распределенным или непосредственным впрыском бензина).
- С внутренним смесеобразованием и воспламенением от сжатия (дизельные).

По расположению цилиндров:

- Рядные (R или I);
- V-образные (V);
- Оппозитные (Boxer);
- VR- и W-образные;
- Радиальные (звездообразные, преимущественно в поршневой авиации).

По способу охлаждения: жидкостное (антифриз) или воздушное.

По наличию наддува: атмосферные (естественный забор воздуха) и с наддувом (турбокомпрессор или механический нагнетатель). [3]

4. Основные показатели эффективности

Эффективность поршневого двигателя оценивается комплексом технико-экономических показателей:

- Мощность (кВт или л.с.) и крутящий момент (Н·м): силовые показатели, определяющие динамические характеристики.
- Литровая мощность: отношение максимальной мощности к рабочему объему двигателя (л.с./л). Современные турбированные двигатели достигают 120–150 л.с./л и более.
- Степень сжатия (ϵ): отношение полного объема цилиндра к объему камеры сгорания. Повышение степени сжатия ведет к росту

термического КПД, но ограничено детонационной стойкостью топлива (для бензина ($\epsilon \approx 10 - 14$), для дизеля ($\epsilon \approx 15 - 22$)).

- Удельный расход топлива (г/кВт·ч): количество топлива, расходуемое на выработку единицы мощности.

Термический КПД: доля теплоты сгорания топлива, преобразованная в полезную механическую работу. [4]

У современных атмосферных бензиновых двигателей он составляет 35–38%, у дизельных 40–45%. В специализированных гибридных установках (с циклом Аткинсона/Миллера) термический КПД лучших образцов достигает 41–43% (например, семейство Toyota Dynamic Force или новейшие разработки Mazda Skyactiv-X).

5. Современные вызовы и экологические аспекты

Главным вызовом для поршневых ДВС является борьба с вредными выбросами при сохранении топливной экономичности. Ключевые загрязнители:

- Оксиды азота (NO_x): образуются при высоких температурах в камере сгорания.
- Твердые частицы ($PM/сажа$): характерны для дизельных и бензиновых двигателей с непосредственным впрыском.
- Углеводороды (CH) и оксид углерода (CO): продукты неполного сгорания.

Для их нейтрализации применяются сложные системы: каталитические нейтрализаторы (TWC), сажевые фильтры (DPF/GPF), системы рециркуляции отработавших газов (EGR) и селективной каталитической нейтрализации (SCR с впрыском мочевины AdBlue). Однако эти системы увеличивают стоимость, массу и сложность двигателя, а также создают противоречие между снижением NO_x (требует снижения температуры) и сажи (требует ее повышения для полного дожигания).

6. Перспективы развития и инновационные технологии

Чтобы остаться конкурентоспособными в эпоху электромобилей, поршневые двигатели проходят глубокую модернизацию, а именно:

6.1. Альтернативные виды топлива

Синтетическое топливо (e-fuels): получение жидкого углеводородного топлива из водорода (полученного электролизом на возобновляемой энергии) и улавливаемого CO₂. Позволяет использовать существующую инфраструктуру и добиться углеродной нейтральности.

Водородные ДВС (H₂-ICE): модификация традиционного ДВС для сжигания водорода. Преимущество перед водородными топливными элементами – низкая стоимость и надежность. Главная проблема – борьба с образованием NO_x и проблема водородной хрупкости материалов.

6.2. Передовые процессы сгорания

HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition): гомогенное воспламенение от сжатия. Сочетает преимущества бензинового (низкие NO_x и сажа) и дизельного (высокий КПД) двигателей. Топливовоздушная смесь воспламеняется самовоспламенением по всему объему цилиндра, как в дизеле, но является гомогенной, как в бензиновом.

Циклы Миллера и Аткинсона: реализуются за счет систем изменения фаз газораспределения (VVT). Позволяют уменьшить насосные потери и повысить эффективную степень расширения, что критически важно для гибридных автомобилей, где ДВС работает в узком, оптимальном диапазоне оборотов.

6.3. Конструктивные инновации

Переменная степень сжатия (VC-Turbo): технология (например, от Nissan), позволяющая механически изменять высоту положения поршня в зависимости от нагрузки, обеспечивая высокую мощность при низком сжатии и максимальный КПД при высоком.

Использование новых материалов: применение алюминиевых сплавов с напылением зеркального покрытия цилиндров (без гильз), композитных материалов для шатунов и поршней для снижения механических потерь на трение. [5]

6.4. Гибридизация

ДВС все чаще перестает быть единственным источником тяги. В последовательных и параллельных гибридных схемах поршневой двигатель оптимизируется исключительно для работы в качестве генератора электроэнергии или для подключения только на высоких скоростях, что позволяет радикально упростить его конструкцию и повысить средний КПД системы.

7. Заключение

Поршневой двигатель внутреннего сгорания, несмотря на прогнозы о его скорой кончине, продолжает оставаться технологически актуальным. Его эволюция сместилась от экстенсивного роста мощности к интенсивному повышению термической эффективности и экологичности.

В краткосрочной и среднесрочной перспективе поршневые ДВС сохраняют доминирующие позиции в сегментах тяжелого коммерческого транспорта, авиации, морских перевозок и спецтехники, где плотность энергии жидкого топлива пока не имеет альтернатив. В легковом сегменте будущее поршневого двигателя неразрывно связано с гибридизацией и переходом на углеродно-нейтральные виды топлива (e-fuels, водород). Таким образом, поршневой двигатель не исчезает, а трансформируется, интегрируясь в новые, более сложные и эффективные энергетические системы.

Список используемой литературы:

1. Грехов Л.В., Марков В.А., Иващенко Н.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М.: Легион-Автодата, 2019.

- 2.Камилов И.К. Теория, расчет и проектирование автомобильных двигателей. — М.: Академия, 2020.
- 3.Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. — 2nd ed. — McGraw-Hill Education, 2018. (Фундаментальный мировой труд по теории ДВС).
- 4.Zhao H. (Ed.) Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development. — Woodhead Publishing, 2010.
- 5.Материалы международных конференций SAE International (Society of Automotive Engineers) по тематике двигателестроения за 2020–2024 гг.