

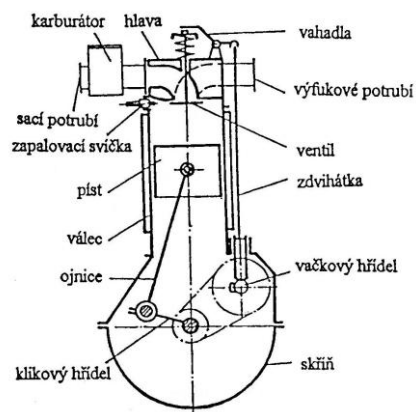
Skutečné oběhy

U skutečných oběhů nejsou splněny předpoklady oběhů teoretických:

- oběh je otevřený, dochází při něm k výměně látky s okolím
- komprese a expanze jsou polytropické
- hoření paliva neproběhne v jediném okamžiku při horní úvratí pístu, ale trvá určitou dobu; proto přívod tepla není izochorický ani izobarický
- výfuk spalin, kterým je v otevřeném oběhu uskutečněn odvod tepla, neproběhne v jediném okamžiku při dolní úvratí pístu, ale za určitou dobu; proto odvod tepla není izochorický.

Skutečný oběh čtyřdobého zážehového pístového motoru s ventilovým rozvodem

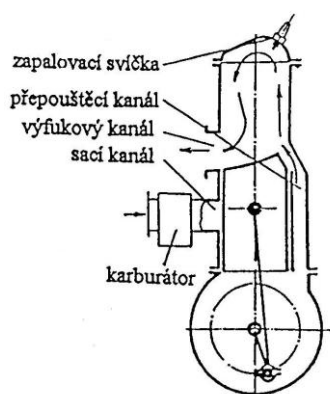
Na rozdíl od teoretického oběhu je skutečný oběh složen ze čtyř zdvihů, během nichž se uskuteční čtyři výše popsané fáze:



1. zdvih - sání; píst se pohybuje z horní úvratí (bod 2 v $p-v$ diagramu) a nasává přes karburátor směs paliva (například benzinu) se vzduchem; vzhledem k odporům působícím proti proudění vzduchu a směsi (viz proudění tekutin) v sacím potrubí, karburátoru a ventilovém sedlu je tlak ve válci motoru při sání nižší než tlak atmosférický
2. zdvih - komprese; píst se pohybuje z dolní úvratí do horní, směs vzduchu a v karburátoru rozprášeného paliva je stlačována; sací ventil se zavírá v okamžiku dosažení tlaku rovného tlaku atmosférickému, tj. v bodě označeném SZ; s určitým předstihem před dosažením horní úvratí, v bodě označeném Z, je směs zapálena elektrickou jiskrou přeskakující mezi elektrodami zapalovací svíčky; směs hoří a v důsledku toho dochází prudkému zvýšení tlaku spalin
3. zdvih - expanze; píst se pohybuje z horní do dolní úvratí; na

- počátku zdvihu ještě dohořívá směs paliva se vzduchem; před koncem expanze se v okamžiku označeném VO (výfuk otevřen) otevírá výfukový ventil, spaliny svým přetlakem unikají do výfuku, tlak prudce klesá
4. zdvih - výfuk; píst se pohybuje z dolní do horní úvratí a vytlačuje spaliny z válce do výfukového potrubí; vzhledem k odporům proti proudění spalin, které klade výfukový systém (potrubí, případně tlumič hluku výfuku) je tlak ve válci motoru větší než tlak atmosférický; před dosažením horní úvratí pístu se v bodě označeném SO otevírá sací ventil a tlak ve válci tím klesá na hodnotu tlaku atmosférického; k uzavření výfukového ventilu dochází až na začátku sacího zdvihu v bodě označeném VZ.

Skutečný oběh dvoudobého zážehového pístového motoru s rozvodem pístem



U tohoto typu dvoudobého motoru není směs paliva se vzduchem nasávána přímo do válce, ale do těsně uzavřené klikové skříně při pohybu pístu nahoru, kdy pod pístem v klikové skříně nastává podtlak.

Sací kanál je otevírán a uzavírán dolní hranou pístu, výfukový a přepouštěcí kanál horní hranou pístu.

Při pohybu pístu z horní do dolní úvratí

- směs zapálená s předstihem před horní úvratí v bodě označeném Z hoří, spaliny se rozpínají a tlačí na píst, koná se práce
- píst svou horní hranou v bodě označeném VO otevírá výfukový kanál, spaliny unikají do výfuku, tlak prudce klesá
- o něco později píst svou horní hranou na protější straně v bodě označeném PO otevírá přepouštěcí kanál a svou spodní stranou vytlačuje směs vzduchu a paliva z klikové skříně přepouštěcím kanálem nad píst do válce; přiváděná směs vyplachuje prostor válce od spalin, část z ní ale unikne se spalinami

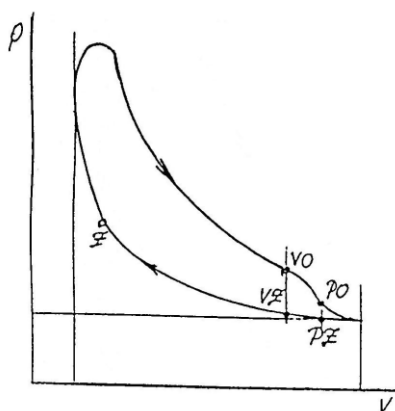
výfukem; píst se dostává do dolní úvratí.

Při pohybu pístu z dolní do horní úvratí

- píst nejdříve svou horní hranou v bodě označeném PZ uzavírá přepouštěcí kanál, potom v bodě označeném VZ i výfukový kanál, směs paliva se vzduchem je ve válci stlačována (komprese)
- spodní hrana pístu otevírá sací kanál, směs je nasávána do klikové skříně

- s určitým předstihem před horní úvratí je v bodě označeném Z směs paliva se vzduchem zapálena jiskrou elektrické svíčky.

Skutečné oběhy vznětových motorů



Zásadní rozdíl oproti funkci motorů zážehových spočívá v tom, že se u vznětových motorů do válce nasává čistý vzduch. Stlačení vzduchu při kompresi je zde tak velké, že jeho teplota převyší teplotu samovznícení paliva. Při vstřiknutí paliva do pracovního prostoru vysokotlakým čerpadlem se palivo prudce odpaří a samo vznítí. Hoření probíhá ještě po určitou část expanzního zdvihu.

Paliva pístových spalovacích motorů

U těchto motorů se užívá většiny paliv z výčtu uvedeného na začátku kapitoly o tepelných motorech. Jsou to paliva

- plynná přirozená: jako zemní a bahenní plyn
- umělá: svítiplyn, koksárenský plyn, generátorový plyn, kuchtový plyn, propan-butan
- kapalná přirozená: benzin, petrolej, motorová nafta

umělá: syntetický benzin, benzen, methanol, ethanol

- tuhá pro nepřímé spalování (například generátorový plyn vyráběný v zařízení vozidla ze dřeva nebo dřevěného uhlí).

Příprava směsi pro zážehové motory

Při užití plyných paliv probíhá příprava směsi paliva se vzduchem ve směšovači, který je konstrukčně relativně jednoduchý.

Při použití paliv kapalných se směs vytváří

- rozprášením v karburátorech
- vstřikováním.

Konstrukce karburátorů je poměrně náročná. Musí zajistit optimální poměr obou složek při nejrůznějších režimech chodu motoru. Proto se moderní karburátor skládá z většího počtu samostatně pracujících i vzájemně propojených dílčích celků.

Ke vstřikování paliva se používají speciální čerpadla.

Zapalování zážehových motorů

Směs nasátá do pracovního válce zážehových motorů musí být zapálena cizím zdrojem. K tomu účelu slouží elektrický impulzivní výboj - jiskra, která přeskóčí mezi elektrodami zapalovací svíčky zasahující do pracovního prostoru. K dosažení účinného výboje při zvýšeném tlaku vzdušiny uvnitř pracovního prostoru je nutno užít napětí na elektrodách svíčky 15000 až 20000 V. Teplota jiskry je pak asi 8000 °C. Zapalovací systémy jsou podle své konstrukce v zásadě trojího typu: dynamoelektrické, magnetoelektrické a tranzistorové.

Rozvody spalovacích motorů

Vstup směsi paliva se vzduchem u zážehových motorů nebo vstup vzduchu u vznětových motorů do pracovního válce je řízen zařízením nazývaným rozvodem motoru. Rozvody mohou být podle své konstrukce

- ventilové, uspořádané jako SV (obr.a), OHV (obr.b) nebo OHC (obr.c)
- šoupátkové s přímočaře nebo otáčivě se pohybujícími šoupátky
- pístem u dvoudobých motorů.

Chlazení spalovacích motorů

Účelem chlazení spalovacích motorů je udržení optimální provozní teploty motoru z hlediska jeho funkce, výkonu a životnosti. Podle druhu chladicí látky je možno chlazení motorů rozdělit na

- vzduchové, u kterých jsou válce motoru přímo ochlazovány proudem vzduchu, uváděným do pohybu větrákem, u vozidel také nápořem vznikajícím v důsledku jízdy
- kapalinové, u kterých je chladicí systém složený ze dvou okruhů; válce motoru jsou ochlazovány vhodnou

kapalinou (voda, glykol, Fridex atd.), která sama je pak ochlazována proudem vzduchu ve zvláštním výměníku tepla - chladiči.

Základní údaje charakterizující spalovací motory

Kompresní poměr

Kompresní poměr udává míru stlačení pracovní látky. Je dán vztahem

$$\varepsilon = \frac{V_z + V_k}{V_k}$$

kde V_z je zdvihový objem válce, tj. součin plochy díry válce a výšky zdvihu

V_k je objem kompresního prostoru, tj. prostoru, který je uzavřen mezi čelem pístu a hlavou válce při horním zdvihu.

U zážehových motorů je $\varepsilon = 4$ až 7 , u vznětových motorů je $\varepsilon = 12$ až 22 .

Teploty

Teplota stlačené směsi uvnitř pracovního prostoru nesmí u zážehových motorů přestoupit teplotu samovznícení paliva, která je asi 280°C .

U vznětových motorů naopak teplota stlačeného vzduchu teplotu samovznícení paliva překročit musí a dosahuje 550 až 600°C .

V průběhu hoření paliva je ve válci teplota 2000 až 2500°C .

Nejvyšší přípustná teplota stěn válce je určena teplotou rozkladu mazacího oleje, tj. asi 250°C .

Nejnižší přípustná teplota stěn válce je asi 75°C , protože při nižších teplotách dochází ke kondenzaci páry na stěnách válce, takže nastává nebezpečí koroze válců a znehodnocení mazacího oleje vodou.

Tlaky

Ze znázornění oběhu spalovacího motoru v p-v diagramu je zřejmé, že se tlak ve válci mění v širokém rozsahu. Pro určení výkonu je důležitý tzv. střední indikovaný tlak, tj. střední hodnota tlaku působícího na píst během pracovního oběhu. Určuje se z plochy p-v diagramu zaznamenané snímacím zařízením. Platí pro něj výraz

$$p_i = \frac{S_i}{l}$$

kde S_i je plocha uzavřená oběhem v p-v diagramu

l je základna p-v diagramu, která v měřítku odpovídá zdvihu pístu.

Působení středního indikovaného tlaku je sníženo pasivními odpory při pohybu klikového mechanismu. Proto se zavádí tzv. střední efektivní tlak, pro který platí

$$p_e = p_i \cdot \eta_m$$

kde η_m je mechanická účinnost (viz dále).

Střední indikované tlaky bývají u

- stacionárních zážehových motorů	$p = 0,3$ až $0,6$ MPa
- stacionárních vznětových motorů	$p = 0,3$ až $0,8$ MPa
- vozidlových zážehových motorů	$p = 0,4$ až $0,9$ MPa
- vozidlových vznětových motorů	$p = 0,6$ až $0,8$ MPa
- vznětových motorů s přeplňováním	$p = 1$ až $1,5$ MPa

Největší tlak působící v motoru je u zážehových motorů 1 až $1,5$ Mpa, u vznětových motorů asi 5 Mpa.

Vstříkovací tlak u vznětových motorů zpravidla bývá 20 až 100 Mpa, ale může být v rozmezí 10 až 200 Mpa.

Rychlosti

Rychlost hoření paliva po jeho zapálení je asi 20 m.s^{-1} . Pokud teplota uvnitř válce stoupne v průběhu expanze nad teplotu samovznícení paliva, shoří jeho zbytek při rychlosti až 500 m.s^{-1} , vznikne tlaková vlna (detonace), což se projeví klepáním motoru.

Střední pístová rychlost, to je průměrná rychlost pístu během jeho zdvihu, je u

- stacionárních pomaloběžných motorů	$c_s = 4$ až 6 m.s^{-1}
- stacionárních rychloběžných motorů	$c_s = 6$ až $8,5 \text{ m.s}^{-1}$
- motorů osobních automobilů	$c_s = 8$ až 15 m.s^{-1}
- motorů nákladních automobilů	$c_s = 7$ až 13 m.s^{-1}
- motorů závodních automobilů	$c_s = 18$ až 20 m.s^{-1}

- leteckých motorů $c_s = 10 \text{ až } 15 \text{ m.s}^{-1}$

Motory pracující se střední pístovou rychlostí menší než $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ jsou označovány jako pomaloběžné, s rychlostí nad $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ jako rychloběžné.

Otáčky

Otáčky spalovacích motorů mají přímý vztah k pístové rychlosti. Bývají u

- stacionárních pomaloběžných motorů	$n = 3 \text{ až } 18 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 180 až 1100 ot.min ⁻¹
- stacionárních rychloběžných motorů	$n = 15 \text{ až } 40 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 900 až 2400 ot.min ⁻¹
- motocyklových motorů	$n = 80 \text{ až } 100 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 4800 až 6000 ot.min ⁻¹
- motorů osobních automobilů	$n = 60 \text{ až } 85 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 3600 až 5100 ot.min ⁻¹
- vznětových motorů nákladních automobilů	$n = 30 \text{ až } 35 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 1800 až 2100 ot.min ⁻¹
- motorů závodních automobilů	$n = 150 \text{ až } 250 \text{ ot.s}^{-1}$	tj. 9000 až 15000 ot.min ⁻¹

Energetická bilance spalovacích motorů

Tepelná bilance pístových spalovacích motorů je vyjádřena rovnicí

$$Q = Q_{už} + Q_{ch} + Q_{výf} + Q_{ns} + Q_z$$

kde je

Q teplo přivedené v palivu

$Q_{už}$ teplo využitě k užitečné práci

Q_{ch} teplo odvedené chlazením

$Q_{výf}$ teplo odvedené výfukovými plyny

Q_{ns} teplo ztracené nedokonalým spálením paliva

Q_z teplo z ostatních ztrát (odvedené olejem, sáláním do okolí atd.)

Ztráty energie pasivními odpory (třením součástí) jsou zahrnuty v Q_{ch} .

U pístových spalovacích motorů se teplo obsažené v palivu rozdělí ve smyslu tepelné bilance následovně:

	$Q_{už}$	Q_{ch}	$Q_{výf}$	Q_{ns}	Q_z
motor zážehový	20 až 33 %	12 až 20 %	30 až 55 %	0 až 30 %	3 až 10 %
motor vznětový	25 až 45 %	15 až 35 %	25 až 45 %	2 až 5 %	2 až 5 %

Z tabulky je zřejmé, že vznětové motory mají menší celkové ztráty.

Účinnost pístových spalovacích motorů

Jak je známo z mechaniky, je celková účinnost zařízení výsledkem jeho dílčích účinností. Při provozu pístových spalovacích motorů je posuzováno několik přeměn energie a tedy také několik různých účinností.

Chemická účinnost

Chemická účinnost udává, kolik tepla je při spálení paliva relativně přivedeno do oběhu:

$$\eta_{ch} = \frac{q_p}{q_{sp}}$$

kde q_p je teplo přivedené do oběhu

q_{sp} je teplo uvolněné spálením paliva.

V praxi bývá $\eta_{ch} \cong 1$.

Tepelná účinnost

Tepelná účinnost udává, jaké relativní množství tepla z přivedeného se spotřebuje na práci teoretického oběhu:

$$\eta_t = \frac{q_t}{q_p}$$

kde q_t je teplo spotřebované pro práci teoretického oběhu. V praxi bývá $\eta_t = 0,4 \text{ až } 0,65$.

Stupeň plnosti diagramu

Stupeň plnosti diagramu má také charakter účinnosti, ale posuzuje se porovnáním ploch teoretického p-v diagramu a indikovaného (tj. měřicím a zapisovacím zařízením zaznamenaného) p-v diagramu oběhu motoru. Je definován jako poměr

$$\eta_p = \frac{q_i}{q_t}$$

kde q_i je teplo spotřebované na práci v indikovaném diagramu.

Je-li plocha teoretického diagramu S_t a plocha indikovaného diagramu S_i , platí

$$\frac{q_i}{q_t} = \frac{S_i}{S_t} \Rightarrow \eta_p = \frac{S_i}{S_t}.$$

V praxi bývá $\eta_p = 0,6$ až $0,75$.

Indikovaná účinnost

Indikovaná účinnost udává poměr tepla spotřebovaného v motoru na práci podle p-v diagramu vzhledem k teple získanému spálením paliva:

$$\eta_i = \eta_{ch} \cdot \eta_t \cdot \eta_p = \frac{q_p}{q_{sp}} \cdot \frac{q_t}{q_p} \cdot \frac{q_i}{q_t} = \frac{q_i}{q_{sp}}.$$

Mechanická účinnost

Mechanická účinnost je poměr užitečného výkonu motoru zjištěného na jeho výstupním hřídeli a indikovaného výkonu vypočteného na základě znalosti indikovaného p-v diagramu:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i}$$

kde P_e je užitečný čili efektivní výkon motoru

P_i je indikovaný výkon.

V praxi bývá $\eta_m = 0,75$ až $0,92$.

Celková účinnost pístového spalovacího motoru

Celková účinnost je dána účinností indikovanou a účinností mechanickou:

$$\eta_c = \eta_i \cdot \eta_m = \frac{q_e}{q_{sp}}$$

kde q_e je teplo spotřebované na užitečnou práci. Celkovou účinnost je také možno vyjádřit vztahem

$$\eta_c = \frac{P_e}{m \cdot q_{sp}}$$

kde m je hmotnost paliva spáleného za sekundu ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

V praxi bývá celková účinnost $\eta_c = 0,25$ až $0,4$.

Výkon motoru

Výkonnost motoru posuzujeme podobně jako jeho účinnost z několika hledisek. Proto je ve spojitosti s posuzováním výkonu motoru užíváno několik pojmů.

Indikovaný výkon motoru

Indikovaný výkon je výkon vypočtený na základě znalosti indikátorem zaznamenaného p-v diagramu. Platí pro něj

$$P_i = S \cdot p_i \cdot L \cdot \frac{n}{x} \cdot i = V_z \cdot p_i \cdot \frac{n}{x} \cdot i$$

kde S je plocha čela pístu

L je pracovní zdvih pístu

x je počet otáček hřídele motoru připadajících na jeden pracovní zdvih, tj. pro čtyřdobý motor $x = 2$, pro dvoudobý motor $x = 1$

i je počet válců motoru

V_z je zdvihový objem.

Efektivní výkon motoru

Efektivním výkonem se rozumí výkon měřený na výstupním hřídeli motoru. Platí pro něj

$$P_e = P_i \cdot \eta_m = V_z \cdot p_i \cdot \frac{n}{x} \cdot i \cdot \eta_m = V_z \cdot p_e \cdot \frac{n}{x} \cdot i$$

Měrný výkon motoru

Měrným výkonem motoru se rozumí poměrná část výkonu připadající na jednotku zdvihového objemu motoru, kterou je tradičně jeden litr, tj. jeden kubický decimetr. Platí pro něj

$$P_v = \frac{P_e}{V_{zc}} = \frac{V_z \cdot p_e \cdot \frac{n}{x} \cdot i}{i \cdot V_z} = p_e \cdot \frac{n}{x}$$

kde V_{zc} je součet zdvihových objemů motoru.

Měrný výkon bývá u motorů

stacionárních pomaloběžných	5 až 10	kW.dm ⁻³
stacionárních rychloběžných	10 až 20	kW.dm ⁻³
vozidlových dvoudobých zážehových	30 až 40	kW.dm ⁻³
vozidlových dvoudobých vznětových	25 až 35	kW.dm ⁻³
vozidlových čtyřdobých zážehových	25 až 40	kW.dm ⁻³
vozidlových čtyřdobých vznětových	10 až 15	kW.dm ⁻³

Výkonová hmotnost

Výkonová hmotnost udává poměrnou část hmotnosti motoru připadající na jednotku výkonu. Platí pro ni

$$m_v = \frac{M_m}{P_e}.$$

Udává se v kg.kW⁻¹.

V praxi bývá výkonová hmotnost u

stacionárních dvoudobých vznětových motorů	$m_v = 10$ až 12
stacionárních čtyřdobých vznětových motorů	$m_v = 12$ až 15
stacionárních čtyřdobých zážehových motorů	$m_v = 10$ až 12
vozidlových zážehových dvoudobých motorů	$m_v = 2$ až 4
vozidlových zážehových čtyřdobých motorů	$m_v = 2,5$ až $4,5$
vozidlových vznětových čtyřdobých motorů	$m_v = 5$ až 7

Měrná spotřeba paliva

Měrná spotřeba paliva udává množství paliva spotřebovaného za jednu hodinu práce motoru při přepočtu na jednotku výkonu. Platí pro ni

$$m_p = \frac{M_p}{P_e}$$

kde M_p je množství paliva spotřebovaného za hodinu. Měrná spotřeba se udává v kg.kW⁻¹.h⁻¹. V praxi bývá u motorů

stacionárních dvoudobých vznětových motorů	$m_p = 0,27$ až $0,29$
stacionárních čtyřdobých vznětových motorů	$m_p = 0,25$ až $0,28$
stacionárních čtyřdobých zážehových motorů	$m_p = 0,26$ až $0,3$
vozidlových zážehových dvoudobých motorů	$m_p = 0,49$ až $0,54$
vozidlových zážehových čtyřdobých motorů	$m_p = 0,3$ až $0,38$
vozidlových vznětových čtyřdobých motorů	$m_p = 0,26$ až $0,3$

Porovnání dvoudobých a čtyřdobých motorů

Rozdílný způsob činnosti dvoudobých a čtyřdobých motorů se projevuje jejich rozdílnými vlastnostmi. Přitom není možno některý z těchto základních typů označit jako dokonalejší, ale pro určitý účel použití je třeba vážit výhody a nevýhody každého z nich. Zde je třeba připomenout, že hodnocení dokonalosti technických zařízení vůbec je vždy záležitostí dynamickou. Technický vývoj neprobíhá rovnoměrně a nové objevy a vynálezy mohou zásadním způsobem změnit výsledky vzájemného srovnávání dokonalosti různých výrobků.

Výhody dvoudobých motorů jsou

- jednodušší konstrukce
- menší poruchovost
- menší nároky na obsluhu
- větší měrný výkon při stejném objemu pracovního prostoru a stejných otáčkách (asi o 10 %)
- rovnoměrnější průběh krouticího momentu
- snadnější startování.

Výhody čtyřdobých motorů jsou

- vyšší účinnost
- menší měrná spotřeba paliva (asi o 30 %)
- menší tepelné namáhání motoru
- lepší chlazení
- pravidelnější chod
- menší hlučnost sání a výfuku
- menší znečišťování životního prostředí.