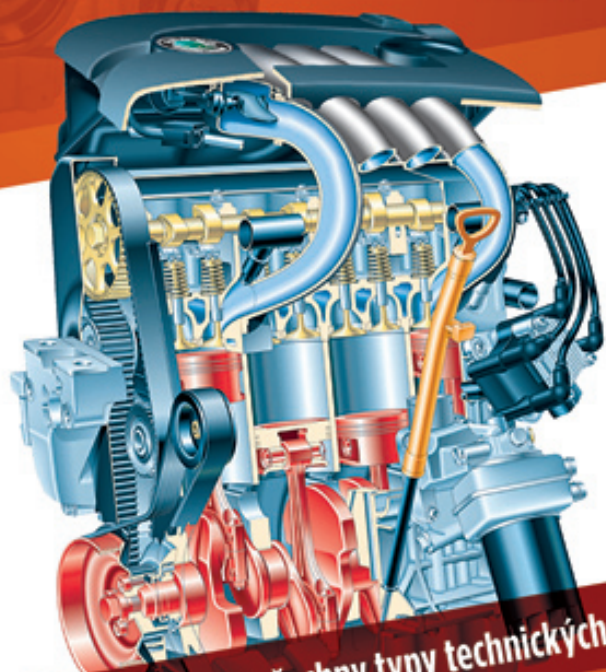
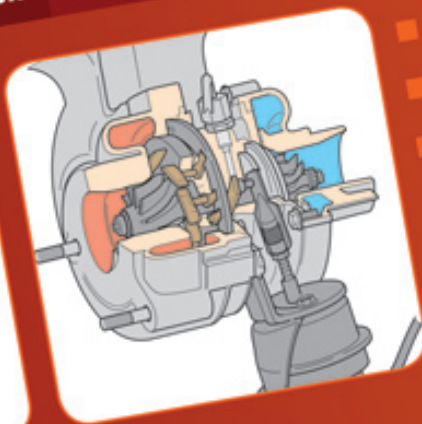


Jan Hromádko, Jiří Hromádko, Vladimír Hönig, Petr Miler

Spalovací motory



Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol



- Zážehové a vznětové motory
- Teorie, kinematika, konstrukce
- Palivové soustavy
- Emise
- Charakteristiky, regulace, měření
- Přepřínování



Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Používání elektronické verze knihy je umožněno jen osobě, která ji legálně nabyla a jen pro její osobní a vnitřní potřeby v rozsahu stanoveném autorským zákonem. Elektronická kniha je datový soubor, který lze užívat pouze v takové formě, v jaké jej lze stáhnout s portálu. Jakékoliv neoprávněné užití elektronické knihy nebo její části, spočívající např. v kopírování, úpravách, prodeji, pronajímání, půjčování, sdělování veřejnosti nebo jakémkoliv druhu obchodování nebo neobchodního šíření je zakázáno! Zejména je zakázána jakákoliv konverze datového souboru nebo extrakce části nebo celého textu, umísťování textu na servery, ze kterých je možno tento soubor dále stahovat, přitom není rozhodující, kdo takovéto sdílení umožnil. Je zakázáno sdělování údajů o uživatelském účtu jiným osobám, zasahování do technických prostředků, které chrání elektronickou knihu, případně omezují rozsah jejího užití. Uživatel také není oprávněn jakkoliv testovat, zkoušet či obcházet technické zabezpečení elektronické knihy.





Copyright © Grada Publishing, a.s.



Ing. Jan Hromádko, Ph.D.,
Ing. Jiří Hromádko, Ph.D., Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. AMRSC, Ing. Petr Miler, Ph.D.

Spalovací motory

Komplexní přehled problematiky
pro všechny typy technických automobilních škol

Vydala Grada Publishing, a.s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, **www.grada.cz**
tel.: +420 234 264 401, fax: +420 234 264 400
jako svou 4274. publikaci

Odpovědná redaktorka Ing. Šárka Němečková
Grafická úprava a sazba Antonín Plicka
Počet stran 296
První vydání, Praha 2011
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

Recenzovali:
doc. RNDr. Antonín Tuzar, CSc.
Ing. Pavel Štěrbá

© Grada Publishing, a.s., 2011
Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2011

*Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami
nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.*

ISBN 978-80-247-3475-0 (tištěná verze)
ISBN 978-80-247-7478-7 (elektronická verze ve formátu PDF)
© Grada Publishing, a.s. 2012

Obsah

Předmluva	9
1. Úvod	11
1.1 Definice spalovacího motoru	11
1.2 Historický vývoj	11
1.2.1 Parní stroj	11
1.2.2 Zážehový motor	14
1.2.3 Vznětový motor	17
1.3 Základní rozdělení spalovacích motorů	18
1.4 Rozdělení pístových spalovacích motorů	20
1.5 Porovnání pístových spalovacích motorů s jinými druhy motorů	24
1.5.1 Základní výhody pístových spalovacích motorů	24
1.5.2 Základní nevýhody pístových spalovacích motorů	25
2. Paliva pro pístové spalovací motory	27
2.1 Fosilní uhlovodíková paliva	27
2.1.1 Kapalná uhlovodíková paliva	28
2.1.2 Plynná uhlovodíková paliva	32
2.2 Paliva získávaná zpracováním biomasy	33
2.2.1 Bioethanol	34
2.2.2 Rostlinné oleje a jejich estery	35
2.2.3 Bioplyn	37
2.3 Vodík	37
2.4 Spalování uhlovodíkových paliv a základy termochemie paliv	38
2.4.1 Základní chemické rovnice při spalování	39
2.4.2 Množství kyslíku a vzduchu potřebné pro spalování	40
2.4.3 Součinitel přebytku vzduchu	41
2.4.4 Množství čerstvé náplně	42
2.4.5 Množství spalin	43
2.4.6 Množství zbytků spalin	43
2.4.7 Skutečná množství náplně	44
3. Pracovní oběhy pístových spalovacích motorů a jejich diagramy	45
3.1 Charakteristika pracovních oběhů	45
3.1.1 Ideální pracovní oběh	45
3.1.2 Teoretický pracovní oběh	46
3.1.3 Skutečný pracovní oběh	46
3.2 Diagramy pracovních oběhů	46
3.3 Diagramy ideálních pracovních oběhů	47
3.3.1 Diagramy ideálního oběhu zážehového motoru	47
3.3.2 Diagramy ideálního oběhu vznětového motoru	51

3.4	Teoretické oběhy nepřepřlňovaných motorů	53
3.4.1	Výpočet tlaků a teplot u teoretických p - V diagramů	54
3.4.2	Výpočet středního tlaku na píst	60
3.4.3	Skutečné diagramy pracovního oběhu	61
4.	Tepelná bilance a účinnost spalovacího motoru	63
4.1	Tepelná bilance motoru	63
4.2	Účinnosti spalovacího motoru	64
4.2.1	Chemická účinnost spalování	64
4.2.2	Tepelná účinnost	66
4.2.3	Stupeň plnosti diagramu	69
4.2.4	Indikovaná účinnost	69
4.2.5	Mechanická účinnost	70
4.2.6	Celková účinnost	71
4.2.7	Objemová a plnicí účinnost	71
5.	Kinematika a dynamika klikového ústrojí	75
5.1	Kinematika klikového ústrojí	75
5.1.1	Dráha pístu	75
5.1.2	Rychlost pístu	76
5.1.3	Zrychlení pístu	77
5.2	Dynamika klikového ústrojí	77
5.2.1	Základní síly	77
5.2.2	Základní hmotnosti	78
5.2.3	Rozklad sil v klikovém ústrojí	80
5.3	Nerovnoměrnost chodu motoru	81
5.4	Vyvažování motoru	84
6.	Základy konstrukce pístových spalovacích motorů	89
6.1	Pístní skupina	89
6.1.1	Píst	89
6.1.2	Pístní kroužky	90
6.1.3	Pístní čep	92
6.2	Kliková skupina	92
6.2.1	Ojnice	93
6.2.2	Klikový hřídel	95
6.3	Kliková skříň a blok válců	98
6.3.1	Kliková skříň a blok motoru dvoudobých motorů	99
6.3.2	Kliková skříň a blok motoru čtyřdobých motorů	99
6.4	Hlava válců	100
6.4.1	Hlava válců dvoudobých motorů	101
6.4.2	Hlava válců čtyřdobých motorů	101
6.5	Rozvodové mechanismy	103
6.5.1	Rozvodové mechanismy dvoudobých motorů	103
6.5.2	Rozvodové mechanismy čtyřdobých motorů	103

7. Palivová ústrojí zážehových motorů	107
7.1 Karburátory	107
7.1.1 Jednoduchý karburátor	108
7.1.2 Karburátor typ zenith	108
7.1.3 Karburátor typ solex	109
7.1.4 Pomocná zařízení karburátorů	110
7.1.5 Dvoustupňové karburátory	113
7.2 Vstřikování paliva	113
7.2.1 Nepřímé vstřikování paliva	115
7.2.2 Přímé vstřikování paliva	137
8. Palivová ústrojí vznětových motorů	149
8.1 Tvorba směsi paliva se vzduchem	149
8.1.1 Porovnání vznětových motorů s děleným a neděleným spalovacím prostorem	150
8.2 Palivová soustava	151
8.3 Systémy vstřikování paliva	152
8.3.1 Řadová vstřikovací čerpadla	153
8.3.2 Rotační čerpadla	158
8.3.3 Sdružená vstřikovací jednotka – UIS Unit Injektor System	163
8.3.4 Sdružený vstřikovací systém – UPS Unit Pump System	166
8.3.5 Vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem – Systém Common Rail	166
9. Emise výfukových plynů spalovacích motorů	177
9.1 Popis výfukových plynů	178
9.2 Mechanismus vzniku škodlivin	179
9.3 Opatření ke snížení škodlivin u zážehových motorů	182
9.3.1 Opatření před motorem	182
9.3.2 Opatření u motoru	183
9.3.3 Opatření za motorem	185
9.4 Opatření ke snížení škodlivin u vznětových motorů	188
9.4.1 Opatření před motorem	188
9.4.2 Opatření u motoru	188
9.4.3 Opatření za motorem	190
9.5 Měření produkce emisí	192
9.5.1 Emisní testy při homologaci vozidel v ČR a EU	193
9.5.2 Emisní testy při homologaci vozidel v USA	197
9.5.3 Emisní kontroly vozidel v ČR a EU	201
9.5.4 Emisní kontroly vozidel v USA	203
10. Charakteristiky, regulace a měření spalovacích motorů	209
10.1 Charakteristiky spalovacích motorů	209
10.1.1 Otáčkové charakteristiky	209
10.1.2 Zatěžovací charakteristiky	211
10.1.3 Celkové (úplné) charakteristiky	212
10.2 Regulace spalovacích motorů	213
10.3 Měření spalovacích motorů	214

10.3.1	Měření výkonových parametrů	214
10.3.2	Měření spotřeby paliva	220
11.	Zapalování	225
11.1	Konvenční cívkové zapalování	226
11.1.1	Prvky konvenčního cívkového zapalování	228
11.2	Tranzistorové zapalování	232
11.2.1	Kontakty řízené tranzistorové zapalování	232
11.2.2	Tranzistorové zapalování s Hallovým snímačem	235
11.2.3	Tranzistorové zapalování s induktivním snímačem	237
11.3	Elektronické zapalování	239
11.4	Plně elektronické zapalování	243
12.	Elektrická příslušenství spalovacích motorů	247
12.1	Olověný akumulátor	247
12.1.1	Bezúdržbový akumulátor	248
12.2	Alternátor	251
12.2.1	Usměrnění střídavého proudu	252
12.2.2	Proudové obvody alternátoru	252
12.2.3	Chlazení alternátorů	254
12.3	Regulátor napětí	255
12.3.1	Princip činnosti regulátoru	255
12.3.2	Polovodičový regulátor napětí	256
12.4	Spouštěč	259
12.4.1	Charakteristika a konstrukce spouštěče	259
12.4.2	Druhy spouštěčů	262
13.	Chladicí a mazací soustavy spalovacích motorů	267
13.1	Chladicí soustava spalovacích motorů	267
13.1.1	Chlazení vzduchem	267
13.1.2	Chlazení kapalinou	269
13.2	Mazací soustava spalovacích motorů	273
13.2.1	Ztrátové mazání	275
13.2.2	Cirkulační mazání	276
13.2.3	Základní prvky mazací soustavy	277
14.	Přepřívání spalovacích motorů	283
14.1	Způsoby přepřívání spalovacích motorů	283
14.1.1	Přepřívání turbodmychadlem	284
14.1.2	Mechanicky poháněná dmychadla	285
14.1.3	Dynamické plnění válce motoru	286
14.1.4	Přepřívání tlakovzdušným výměníkem comprex	287
14.2	Chlazení stlačeného vzduchu	288
14.3	Kombinace mechanického dmychadla s turbodmychadlem	290
	Seznam zkratk	291
	Použitá literatura	295



Předmluva

Odborná knižní publikace je určena všem vysokoškolským studentům technických oborů se zaměřením na automobilovou techniku, studentům středních a vyšších odborných škol se stejným zaměřením a dále široké odborné veřejnosti zajímající se problematikou spalovacích motorů. Publikace jasně a srozumitelně podává ucelený přehled problematiky z oboru pístových spalovacích motorů.

Kniha vychází z rozsáhlých publikací soustředěných na Katedře vozidel a pozemní dopravy Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze, kde autor vyučuje předměty Spalovací motory, Automobilové motory a Speciální spalovací motory. Podstatný zdroj informací také tvoří materiály získané od významných firem působících v oboru spalovacích motorů.

Publikace seznamuje čtenáře s historickým vývojem a základním rozdělením spalovacích motorů. Hlubší rozbor je věnován teorii pístových spalovacích motorů. Rozsáhlá část je zaměřena na palivové soustavy zážehových a vznětových spalovacích motorů. Literatura dále seznamuje čtenáře s ekologickými aspekty provozu spalovacích motorů. Závěrečné kapitoly jsou věnovány elektrickému příslušenství spalovacích motorů, chladícím a mazacím soustavám a přeplňování spalovacích motorů.

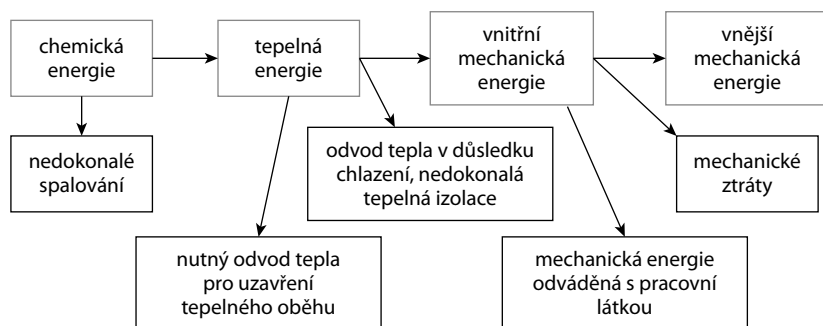
Závěrem by autor rád poděkoval firmě Bosch za poskytnuté technické příručky, které se staly podkladem pro kapitoly o palivových soustavách a zapalování spalovacích motorů.

Autoři

I : Úvod

1.1 Definice spalovacího motoru

Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním paliva získává tepelnou energii a využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci. Energie plynného média je využívána buď jako energie potenciální (tlak spalin) u pístových spalovacích motorů, nebo energie kinetická (rychlost proudu spalin) u spalovacích turbín. Na **obr. 1.1** je znázorněn obecný postup transformace chemické energie, obsažené v palivu na mechanickou práci spalovacího motoru.



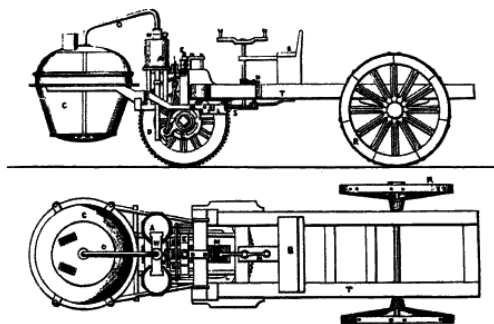
Obr. 1.1 Schéma přeměny energie ve spalovacím motoru

1.2 Historický vývoj

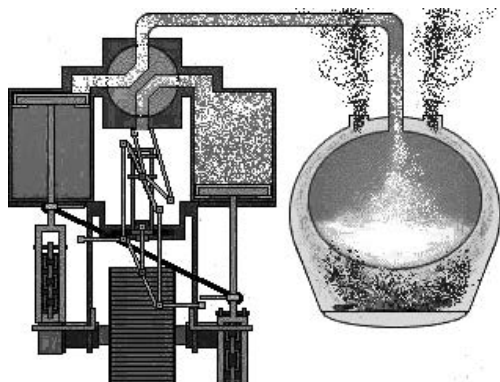
1.2.1 Parní stroj

Za autora prvního funkčního vozidla s vlastním pohonem je pokládán Nicolas Joseph Cugnot (1725–1804). Kapitán francouzské armády Cugnot byl nadaným vynálezcem, ale na pokusy s parním strojem mu chyběly finance. To se změnilo v roce 1764, kdy se mu podařilo pro svůj projekt „mechanického koně“ získat ministra války, markýze de Choiseul. Ten Cugnota pověřil zhotovením parního traktoru pro dělostřelectvo. V roce 1769 předvedl Cugnot svůj vynález (**obr. 1.2**) v Paříži.

Vůz dosahoval rychlosti $4,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a jel 12 minut. Pak bylo potřeba naplnit kotel, rozdělát na zemi oheň a počkat, až se vytvoří pára na dalších 12 minut jízdy. Poháněno bylo přední kolo na principu rohatky a západky (při pohybu dolů jedna pístní tyč zabrala za široké ozuby kovového kotouče, zpět se pohybovala volně –



Obr. 1.2 Cugnotův dělostřelecký vůz



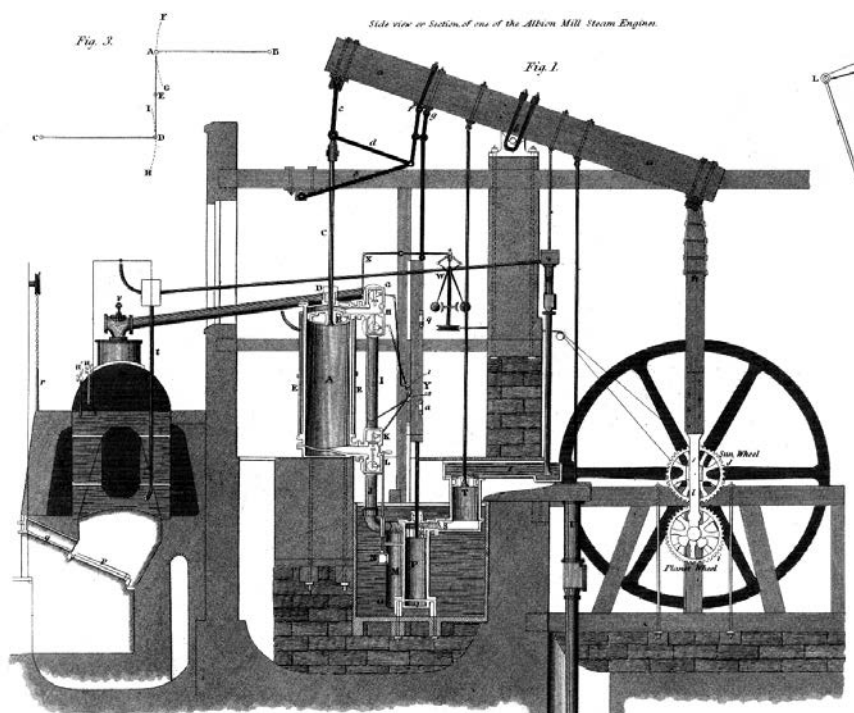
Obr. 1.3 Princip rohatkového pohonu

pracoval druhý píst (**obr. 1.3**). Ministr války byl tímto strojem nadšen a pověřil Cugnota stavbou většího vozidla.

Na přelomu let 1770–71 byl nový vůz hotov. Pětistunový stroj nepřekročil rychlost $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a nebylo již nutné rozdělovat oheň na zemi, protože vůz měl vlastní ohniště. Při předvádění došlo k poruše řízení a vůz narazil do zdi. Zeď byla rozmetána na kostky a stroj zůstal nepoškozen, čímž se osvědčil jako dokonalý válečný prostředek. Pokusy talentovaného inženýra i přes tento úspěch bohužel brzy skončily – ministr války upadl v nemilost u dvora a Cugnot přišel o finanční podporu. Cugnatův

dělostřelecký vůz je dodnes vystaven v budově pařížského Muzea umění a řemesel. I když Cugnotovy práce spadají do období, kdy James Watt (1736–1819) v roce 1769 dostal patent na parní stroj, není možno předpokládat, že by se tito vynálezci znali.

Označení vynálezce parního stroje právem patří Watovi, nejen pro patent, který získal, ale obzvláště pro jeho zásluhy o rozšíření používání parního stroje (**obr. 1.4**) a jeho další zdokonalování. Jeho nejznámější zdokonalení spočívalo v zavedení dvojčinného parního stroje, kde pomocí šoupátka byla tlaková pára střídavě přiváděna před píst i za píst pracovního válce. Bylo tak možné, aby píst vyvíjel tah, či tlak na ojnici při pohybu oběma směry. Stroj se tak choval jako jednočinný



Obr. 1.4 Wattova parní transmise (1787)

stroj o dvojnásobném počtu válců. Proti jednorázovému stroji bylo sice třeba zajistit utěsnění pístové tyče pomocí ucpávky a složitějšího šoupátka, ale za to byl získán dvojnásobný výkon na stejný objem válce a pravidelnější chod.

Další zlepšení spočívalo ve vynálezu odstředivého regulátoru (**obr. 1.5**), který se používal ke stabilizaci otáček parního stroje. Byl zaveden v roce 1782 Jamesem Watem. Skládal se ze dvou závaží, která rotovala a byla poháněna strojem, jehož otáčky měly být regulovány. Čím rychleji se tato závaží otáčela, tím větší byla vlivem odstředivé síly jejich výchylka od svislé osy rotace. Uvedené vychýlení bylo převedeno na svislý pohyb nad jejich ukotvením, který byl dále pákou a táhlem převeden k ventilu přivádějícímu páru ke stroji. Byla tak realizována mechanická záporná zpětná vazba, která dovolovala působením poměrně malých sil regulovat velmi výkonný stroj.

Setkání s parními stroji inspirovalo i další vynálezce, a tak se vozidla s parním pohonem objevila i v jiných zemích:

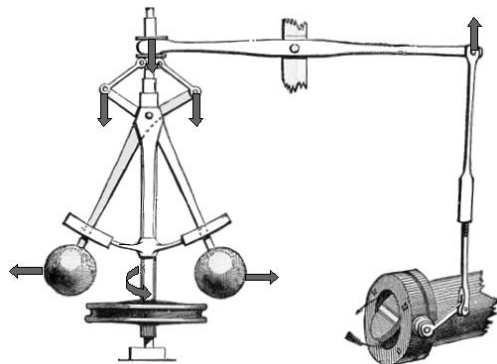
Richard Trevithick (1771–1833, Anglie) po úspěšných pokusech s modely a aplikací na nepohyblivých strojích v dolech zkonstruoval v roce 1801 první parní stroj, schopný samostatného pohybu. Pojmenoval ho „The Puffing Devil“ (Bafající ďábel) a úspěšně ho otestoval v Camborne v Cornwallu. V roce 1802 si pak nechal tento vysokotlaký parní stroj patentovat.

Oliver Evans (1755–1819, USA) v roce 1804 vynalezl parní vozidlo, které bylo schopné pohybu jak po vodě, tak po souši. Toto vozidlo bylo první samohybné vozidlo v USA.

Josef Božek (1782–1835, Rakousko Uhersko) v roce 1815 předvedl první parou poháněný automobil na našem území. Při opakovaném předvádění v roce 1817, kdy ukazoval i parník vlastní konstrukce, mu byla ukradena pokladna s vybraným vstupným. Zadlužený Božek rozbil svůj vůz a zanevřel do konce života na experimenty s parním strojem. Dále se věnoval konstrukci čerpadel a později i vagonů pro koněspřežnou železnici. Konstrukteři se stali i jeho synové František Božek a Romuald Božek. Známy je i konstrukce přesných hodin, sestavených v roce 1812 pro hvězdárnu Klementinum, které byly používány až do roku 1984.

V roce 1815 začíná George Stephenson konat pokusné jízdy s první lokomotivou a v roce 1830 otevřel pravidelný provoz na trati Liverpool–Manchester. Železniční doprava se rozšířila natolik, že po zavedení tzv. praporkového zákona (Locomotive Act) v roce 1861, prakticky zlikvidovala konkurenci silniční dopravy. Parní vozy se později objevují v nákladní dopravě. Naše Škodovka vyráběla před druhou světovou válkou parní vůz značky Sentinel (**obr. 1.6**), který v komunální dopravě hl. města Prahy sloužil ještě v padesátých letech minulého století.

Bez zajímavosti není ani skutečnost, že hranici 200 km·h⁻¹ překonal v roce 1906 jako první parní vůz vyrobený v Americe bratry Stanleyovými.



Obr. 1.5 Wattův odstředivý regulátor se znázorněním působících sil



Obr. 1.6 Škoda Sentinel 1924–1935

1.2.2 Zážehový motor

O první patent na motor poháněný svítiplynem požádal v roce 1786 francouzský vynálezce Philippe Lebon (1769–1804), který experimentoval s plynem získávaným koksováním dříví. Není však známo, že by takovýto motor sestrojil.

Švýcarský vojenský vysloužilce Issac de Rivaz (1803–1883) získal v roce 1807 patent na vozidlo poháněné výbušným motorem (**obr. 1.7**). Vůz dokonce postavil a veřejně zkoušel. Jeho motor měl válec, v němž elektricky zapaloval směs svítiplynu a vzduchu. Píst, který byl výbuchem vytlačen vzhůru, byl pak svojí vahou a atmosférickým tlakem vzduchu tlačén dolů, přičemž ozubeným hřbetem poháněl soukolí, z něhož se pohyb přenášel na kola vozu. Po udělení patentu však v dalším vývoji nepokračoval, a tak se jeho práce stala pouze historickou epizodou.

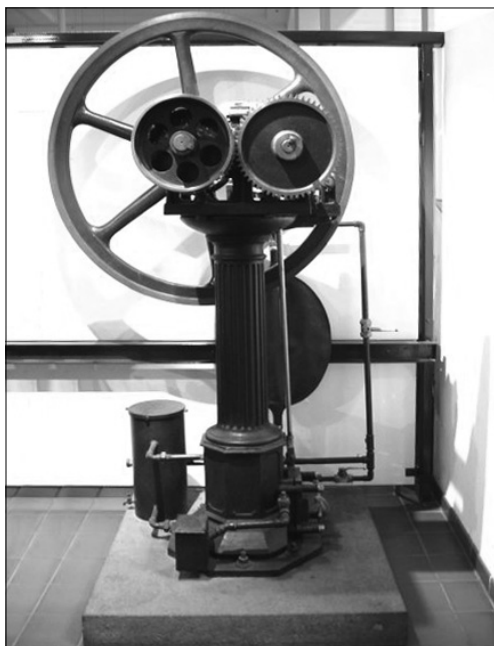
Opravdového úspěchu ale dosáhl až Francouz belgického původu Jean Joseph Etienne Lenoir (1822–1900), kterého lze považovat za vlastního tvůrce výbušných motorů, neboť je přivedl k takovému stavu dokonalosti, že je bylo možno opravdu prakticky využít. Dne 10. 11. 1859 získal patent na motor poháněný svítiplynem a již v roce 1860 začal stavět vůz s plynovým motorem. Plyn byl stlačený v nádržce umístěné ve vozidle. V roce 1863 vykonal Lenoir s tímto vozidlem první jízdu z Paříže do jejího předměstí Joinville le Pont a zpět rychlostí $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Celá trať měřila 18 km.

S plynovými motory začíná také německý vynálezce N. A. Otto, který společně se zámožným inženýrem E. Langenem v roce 1864 v Kolíně založil první továrnu na motory na světě, N. A. Otto & Cie, od roku 1869 Gasmotorenfabrik Deutz, dnešní DEUTZ AG. Společně rozvíjeli koncepci čtyřtákního motoru, na jehož princip Otto přišel.

Na pařížské světové výstavě v roce 1867 (**obr. 1.8**) představili svou verzi jednoválcového motoru poprvé veřejnosti. Byl sice hlučnější a méně konkurenceschopný po stránce konstrukce i spolehlivosti, zato měl ve srovnání s předchozími až třetinovou spotřebu plynu. Nakonec byl oceněn Zlatou medailí výstavy. Od roku 1872 byl tento typ motoru sériově vyráběn. Výkon se



Obr. 1.7 Issac de Rivaz 1807



Obr. 1.8 N. A. Otto 1867

pohyboval od čtvrtiny do 3 koňských sil (dle velikosti motoru) při 60 otáčkách za minutu. Zapalování bylo řešeno pomocí plynového plamínku, odkrývaného ve vhodný okamžik šoupátkem. Za sériovou výrobu tohoto motoru byl zodpovědný hlavní konstruktér Gottlieb Daimler (1834–1900). V té době ve firmě působil i Wilhelm Maybach. Otto jako obchodní ředitel měl s Daimlerem neustálé neshody v technických otázkách, což bylo o deset let později důvodem k Daimlerově i Maybachově odchodu a založení samostatné firmy.

V roce 1876 vyrobil Otto čtyřtákní motor se zvýšeným kompresním poměrem a 25. května 1877 si jej nechal patentovat. Tento typ motoru se stal základem pro stavbu pozdějších spalovacích motorů. Zážehový motor tohoto principu je dodnes označován jako „Ottův motor“.

V roce 1884 Otto zdokonalil elektrické zapalování pro své motory, a tak znovu revolučně vylepšil fungování tohoto typu motoru. Do té doby byly motory, vzhledem k používání plynu a potřebě zapálení směsi plamenem, stacionárními stroji. Otto zavedl nízkonapěťové magneto. Díky této inovaci bylo možno přejít na spalování kapalných paliv, a tak se motory mohly stát mobilními. V roce 1882 mu Filosofická fakulta Univerzity ve Würzburgu udělila čestný doktorát.

Čtyřdobý spalovací motor však nebyl ještě dokonalý. Sám Otto se snažil vynalézt motor dvoudobý, což se mu nepovedlo. Do své závěti trpce poznamenal: „A tak mi zůstává pouze sláva, že jsem sestrojil první motor s kompresí.“

Dvoudobý plynový spalovací motor konstruuje v roce 1879 K. Benz (1844–1929). Proslavil se však až svými automobily se spalovacími motory vlastní konstrukce. První tříkolové vozidlo (*obr. 1.9*) vyjelo z Benzovy dílny na jaře roku 1885. Poprvé ujel Benzův vůz 100 metrů, po několika týdnech ujel již trať dlouhou jeden kilometr a dosáhl rychlosti 11 km za hodinu. Teprve třetí model mu přinesl pronikavější úspěch. Patent na toto vozidlo obdržel v lednu 1886.

Vozidlo bylo poháněno čtyřdobým motorem (čtyřdobý motor byl stále lepší než dvoudobý motor, který sám vynalezl) o výkonu 0,75 koně při 450 otáčkách za minutu. Tento motor měl již zapalování elektrickou jiskrou. I když v patentním spise je uveden „vůz na pohon plynem“, byl pohonnou látkou ligroin, což je velmi starý název pro lehký benzín, v té době odpad při výrobě petroleje. Benzínové páry se získávaly zahříváním nádržky s benzinem výfukovými plyny a směšovány se vzduchem byly tak, že vzduch nasávaný do válce motoru byl prosáván přes nádržku s benzinem. Chlazení válce motoru bylo zabezpečeno odpařováním vody.

K první delší jízdě Benzova vozidla se vztahuje známá historka. Benzovu manželku Berthu zlobilo, že její muž se i přes úspěšnou konstrukci vozidla stále nemůže zbavit své ostýchavosti a nechce vozidlo veřejně předvést. A tak se rozhodla vydat se svými syny Eugenem a Richardem jednoho srpnového dne roku 1888 brzy ráno bez vědomí svého muže na první „dálkovou jízdu“ v dějinách automobilu. Celá trojice zamířila z Mannheimu s několika oklikami přes Wenheim, Heidelberg, Wiesloch a Durlach do Pforzheimu k babičce. Vůz bez koní dokázal to, o co jeho konstruktér usiloval. Cestou musela paní Berta čistit ucpaný karburátor jehlicí z klobouku a izolovat holý elektrický kabel pryžovým podvazkem. Ve stoupání bylo nutno vůz tlačit, protože výkon 1,5 koně stále nedostačoval. Rychle se opotřebovávající špalíky brzd několikrát potahovala



Obr. 1.9 Tříkolka K. Benz 1885

novou kůží a v lékárně u Wieslochu musela doplnit zásobu ligroinu, jak byl tehdy nazýván benzín. Celkem ujela přes 120 kilometrů. Z místa cíle poslala manželovi telegram, že jsou v pořádku. Benz se rozčílil a dalším telegramem jí nařídil, aby mu okamžitě poštou poslala zpátky pohonné řetězy, aby tak už s vozem nemohla pokračovat v jízdě. Bertha to poslušně učinila. Teprve po pěti dnech se Benz uklidnil a poslal jí zpět náhradní řetězy, a tak se mohla vrátit domů. Její výkon se stal mezníkem v dějinách automobilové dopravy.

Nevýhodou Ottových motorů byl malý výkon a vysoká hmotnost. Další z německých vynálezců Gottlieb Daimler (1834–1900) se snažil o zvýšení výkonu motorů zvýšením otáček motoru. Poznal, že základním omezením je nízkonapěťové elektrické zapalování. Řešení našel v zapalování pomocí žhavicí trubičky. Žhavicí trubička procházející stěnou hlavy válce byla zahřívána zvenku malým plamínkem. V průběhu komprese byla čerstvá směs zatlačena do trubičky a tam se od žhavé stěny vznítila. Spolehlivost tohoto zapalování vedla ke zvýšení otáček motoru až na 900 min^{-1} .

Roku 1885 motor zabudoval do stroje dřevěné konstrukce (**obr. 1.10**), který byl defakto čtyřkolový, ale dvě malá stabilizační kolečka historie pomíjí a prohlašuje tento stroj za první motocykl.

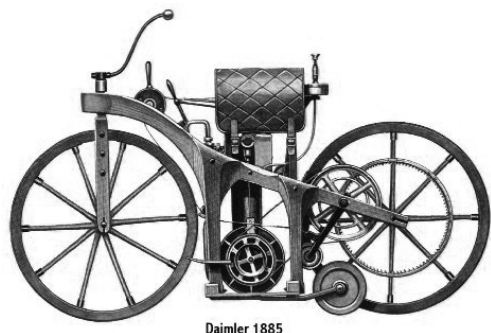
Motor byl umístěn vertikálně uprostřed stroje. Zadní kolo bylo poháněno řemenicí přes předloňový hřídel a odtud ozubeným kolem. Zadní brzda byla ovládána otočnou rukojetí na řídicích. Výfukový ventil se ovládal mechanicky, kdežto vstup směsi do válce otevíralo sání pístu. Vzduchem chlazený motor Daimler měl povrchový karburátor a zapalování rozžhavenou trubičkou. Daimlerův syn Paul ujel 10. listopadu 1885 9,5 km, a stal se tak prvním motocyklistou na světě.

Dalšího zvýšení otáček zážehových motorů bylo dosaženo v roce 1894 pomocí bateriového odtrhovacího zapalování, jehož vynálezcem je francouzský hrabě de Dion (1856–1946). Jeho pokusný jednoválcový motor dosahoval 3000 otáček za minutu.

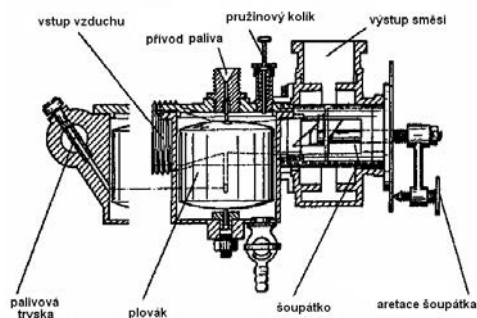
Na zlepšení chodu motoru se v roce 1893 podíli i němec Wilhelm Maybach (1846–1929), vynálezem prvního karburátoru (**obr. 1.11**) využívajícího na tvorbu směsi paliva se vzduchem podtlaku, vytvořeného v zúženém místě sacího potrubí, odsávajícího kapalné palivo z odměřovací trysky, tedy principu novodobých karburátorů.

Na území České republiky byl prvním vyrobeným automobilem v roce 1897 Tatra Präsident (**obr. 1.12**). Podvozek vycházel z osvědčeného kopřivnického kočáru „Mylord“.

Pod sedadlem v zadní části, v prostoru, který u kočárů sloužil pro zavazadla, byl umístěn dvouválcový ležatý motor Benz (**obr. 1.13**) o obsahu 2,714 l a výkonu přibližně 5 koní při 600 min^{-1} (vrtání i zdvih 120 mm). Motor měl automatický sací ventil, výfukový ventil byl ovládán od vačkového hřídele. Směs paliva a vzduchu byla vytvářena v povrchovém odpařovacím karburátoru, do jehož odpařovacích nádob, zahříváných výfukem, přitékal benzín ze spádové nádrže.

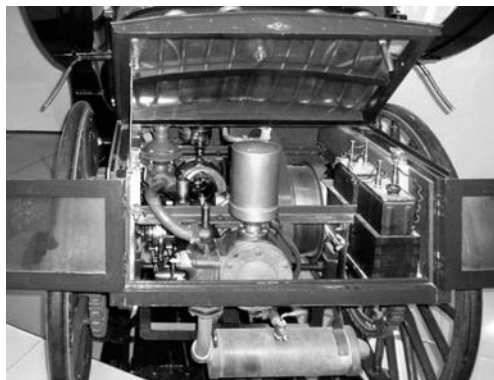


Daimler 1885

Obr. 1.10 Motocykl G. Daimler 1885**Obr. 1.11** Maybachův karburátor 1893



Obr. 1.12 Tatra Präsident 1897



Obr. 1.13 Ležatý motor Benz

Zapalování tvořil vysokonapěťový transformátor s přerušovačem primárního okruhu a napájením z dynamu (později bylo dynamo nahrazeno baterií). Jiskřiště pro zapálení směsi tvořily dva hroty z platinového drátu. Mazání motoru zabezpečoval vícebodový kapací přístroj. Chlazení motoru bylo odpařovací s kondenzačním chladičem. Spotřeba chladicí vody byla asi desetkrát větší než spotřeba benzínu.

Převodovka byla dvoustupňová, řemenová. Převodové stupně se řadily naklápěním sloupku řízení buď k sobě, nebo od sebe. Zadní hnací náprava byla poháněna dvěma nezávislými řetězy z předlokové hřídele, která už měla diferenciál. Vozidlo využívalo dva brzdové systémy – nožní pásovou převodovou brzdu a ručně ovládanou třetí brzdu působící na pryžové obložení kol. Přední kola se natáčela okolo svislých čepů, tento pohyb se přenášel řetězem na přední nápravu.

Ve dnech 21.–22. května roku 1898 uskutečnil první vyrobený automobil propagační jízdu se čtyřmi pasažéry po vlastní ose z Kopřivnice do Vídně na výstavu konanou k výročí 50 let vlády Františka Josefa I. Trasu dlouhou 328 km absolvoval za 24,5 hodiny, z čehož bylo 14,5 hodiny čisté jízdy s průměrnou rychlostí $22,62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

1.2.3 Vznětový motor

Rudolf Diesel (1858–1913) obdržel 28. února 1892 německý patent číslo 67 207 s názvem „Způsob práce a druh provedení spalovacího motoru“ (**obr. 1.14**). Diesel předpokládal, že jeho motor bude pracovat s účinností 70 až 80 % a s tlakem od 25 do 35 MPa. To také popsal ve své knize z roku 1893 *Teorie a konstrukce racionálního tepelného motoru*. Později neuváženého publikačního činu litoval a ověřil si, že je potřeba nejdříve usilovně pracovat, a až poté psát články.

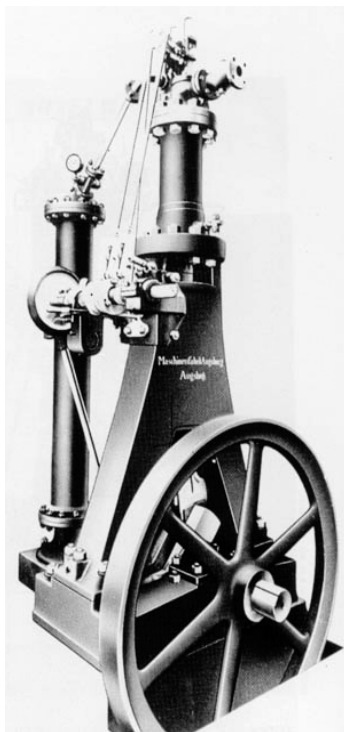
První prototyp ze srpna 1893 poháněl uhelný prach. V druhém pololetí roku 1896 byl postaven druhý pokusný motor s vodním chlazením a vstřikováním benzínu. Po krátké době experimentů byl benzín nahrazen čistěným (lampovým) petrolejem, s nímž motor pracoval podstatně klidněji. Zatímco v laboratoři pracoval ještě první motor, Diesel již pracoval na dalším prototypu s úkolem snížit spotřebu paliva.

Třetí prototyp (**obr. 1.15**) byl hotový v prosinci 1896 a odzkoušený v roce 1897. Tento motor již plnil všechny požadavky, vznikl tak klasický vznětový čtyřdobý motor. Rok 1897 je právem považován za rok vzniku vznětového motoru.

Motor měl výkon 14,7 kW při otáčkách 170 min^{-1} . Motor prokázal vysokou ekonomičnost (celková účinnost byla 26 %), ale pro značné rozměry, hmotnost a složitost vysokotlakého kom-



Obr. 1.14 Patent 67204



Obr. 1.15 R. Diesel 1897

presoru, který u prvních Dieselových motorů zabezpečoval dopravu paliva do válce v proudě stlačeného vzduchu, byly tyto motory používány jako motory stacionární nebo motory lodní.

Teprve náhrada kompresoru vstřikovacím čerpadlem umožnila zmenšení rozměrů a snížení celkové hmotnosti motoru tak, aby byl použitelný i ve vozidle. V roce 1910 James Kechni, ředitel anglické továrny Vickers, podává patent na hydraulické vstřikování vznětových motorů. S hydraulickým vstřikováním přichází i Robert Bosch (1861–1942), který s ním začíná experimentovat v roce 1921. V letech 1923 až 1924 již byly k dispozici plně funkční prototypy. V březnu roku 1927 začíná sériová výroba těchto vstřikovacích čerpadel, která přináší další průlom v rozmachu vznětových motorů.

1.3 Základní rozdělení spalovacích motorů

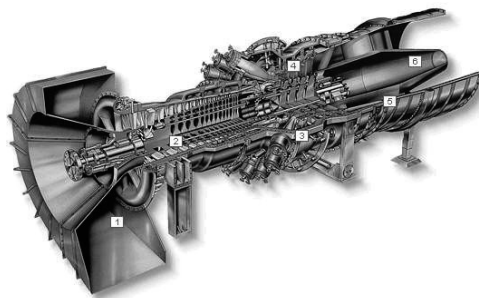
Podle způsobu přeměny tepelné energie v mechanickou práci je možno spalovací motory rozdělit na tři druhy:

✧ Pístové spalovací motory

U těchto motorů se energie přenáší na píst klikového nebo obdobného mechanismu. Pístovými spalovacími motory se budeme zabývat podrobněji, jejich rozdělení bude provedeno v následující kapitole 1.4.

❖ Turbínové spalovací motory

U nich se získává mechanická energie z dynamické energie spalín. Spalování probíhá ve zvláštní spalovací komoře, do které se dopravuje potřebný vzduch, zpravidla rotačním kompresorem poháněným turbínou. Kapalné palivo se do spalovací komory vstříkuje tryskami. Spalování probíhá plynule a nepřerušovaně. Na **obr. 1.16** je znázorněna spalovací turbína s označením základních částí.

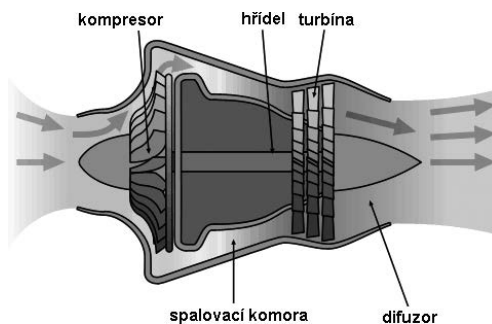


Obr. 1.16 Spalovací turbína

(1-vstup vzduchu, 2-kompresní sekce, 3-spalovací prostor, 4-turbínová sekce, 5-výfuková sekce, 6-výfukový difuzor). Spalovací turbíny budou podrobněji popsány v připravované publikaci Speciální spalovací motory a vozidla.

❖ Proudové spalovací motory

U proudových motorů se využívá reakční síly vytékajících spalín, které proudí vysokou rychlostí z výstupní trysky motoru. V přední části motoru se nachází vstupní ústrojí, do kterého vstupuje vzduch, ten je dále nasáván kompresorem, který vzduch stlačuje, ten se tím zahřívá a následně putuje do spalovací komory. Zde se do vzduchu vstříkuje palivo. Zažehnutím směsi se uvolní tepelná energie a horké plyny, vycházející ze spalovací komory, roztáčí turbínu v zadní části motoru, která přes hřídel vedoucí podélnou osou motoru pohání kompresor. Za turbínou je ve výstupní trysce vysoký tlak a tepelná energie se mění na kinetickou, tím vzniká tah motoru. Schéma proudového motoru je znázorněno na **obr. 1.17**.



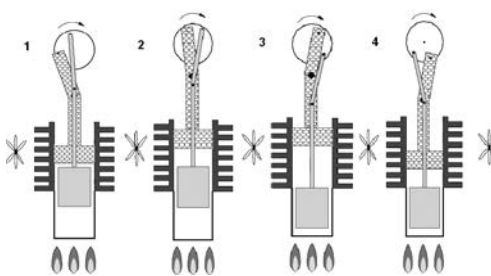
Obr. 1.17 Schéma proudového motoru

Podle způsobu přívodu tepelné energie je možno spalovací motory rozdělit na dva druhy:

❖ Motory s vnějším spalováním

Spalovací proces probíhá mimo pracovní válec. Médium pro přenos energie je vodní pára, vzduch a některé plyny, např. helium. Mezi nejznámějšími motory s vnějším spalováním patří parní motor, který byl již výše částečně popsán a Stirlingův motor.

Stirlingův motor má dva pracovní prostory, mezi nimiž může volně proudit plyn (je v nich prakticky stejný tlak). Jeden z prostorů je studený, druhý horký. Toho je docíleno buď přímým ohříváním a chlazením komor (viz pracovní cyklus), nebo, a to častěji, vnějším ohřívatelem a chladičem. Mezi ohřívatelem a chladičem je obvykle zařazen ještě regenerátor, akumulující teplo plynu procházejícího z ohříváče do chladiče, nebo naopak. Princip činnosti je znázorněn na **obr. 1.18**.



Obr. 1.18 Princip činnosti Stirlingova motoru

Podrobnější popis činnosti Stirlingova motoru bude uveden v připravované publikaci s názvem Speciální spalovací motory a vozidla.

- Oba písty se pohybují společně, expandující zahřátý plyn v horkém prostoru koná práci.
- Řídící píst začíná vytlačovat plyn z horkého prostoru do studeného. Celkový objem se nemění, není tedy konána práce.
- Pracovní píst začíná stlačovat plyn ve studeném prostoru. Tlak ochlazením klesl, proto je vykonávaná práce menší než při expanzi.
- Stlačený studený plyn proniká do horkého prostoru, aby tam po zahřátí začal expandovat.

※ **Motory s vnitřním spalováním**

Spalovací proces probíhá uvnitř pracovního válce. Pracovní látkou v těchto motorech jsou přímo produkty spalování (pístový spalovací motor a spalovací turbína).

1.4 Rozdělení pístových spalovacích motorů

Podle skupenství použitého paliva lze motory rozdělit na:

※ **Plynové motory**

Jako palivo je převážně použit propan-butan (nejčastěji ve zkapalněné formě LPG – Liquefied petroleum gas), zemní plyn (nejčastěji ve stlačené formě CNG – compressed natural gas, případně ve zkapalněné formě LNG – Liquefied Natural Gas), dále pak kychtový plyn, generátorový plyn, kalový plyn a bioplyn.

※ **Motory na kapalná paliva:**

- ropná lehko odpařitelná paliva (benzín, petrolej),
- ropná těžko odpařitelná paliva (nafta, mazut),
- kapalná paliva neropného původu (methanol, ethanol, methylester řepkového oleje),
- směsná paliva (lihobenzinová paliva např. E85, nafta + methylester řepkového oleje např. SMN30).

※ **Vícepalivové motory**

Provoz většinou na plynná paliva s možností záměny s palivem kapalným (propan-butan + benzín, zemní plyn + benzín, zemní plyn + nafta, bioplyn + benzín).

※ **Motory na tuhá paliva**

U těchto motorů je do ústrojí pro přípravu směsi přiváděno palivo v tuhém práškovitém stavu, např. uhelný prach.

Podle způsobu dopravy čerstvé náplně do válce motoru lze pístové spalovací motory rozdělit na:

※ **Motory s přirozeným sáním**

Motory čtyřdobé nasávají čerstvou náplň (vzduch, směs paliva se vzduchem) do válce motoru podtlakem, který vzniká pohybem pístu ve válci.

❖ Motory s vyplachováním

Motory dvoudobé, u nichž je k dopravě čerstvé náplně do válce motoru využíván přetlak vyvolaný dmýchadlem nebo spodní kompresí u malých motorů, tj. stlačením vzduchu nebo směsi paliva se vzduchem pístem motoru v klikové skříní motoru při jeho pohybu do dolní úvratí. Přičemž vstupující čerstvá náplň vyplachuje vnitřní objem válce od zbylých spalín. Hodnota přetlaku je malá, přibližně 15 až 20 kPa.

❖ Motory přeplňované

Čtyřdobé i dvoudobé motory, u nichž je k dopravě čerstvé náplně do válce použito dmýchadlo vyvolávající přetlak 0,1 až 0,2 MPa.

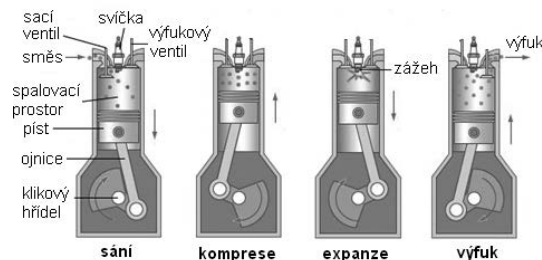
Podle počtu dob pracovního cyklu lze motory rozdělit na:

❖ Motory čtyřdobé

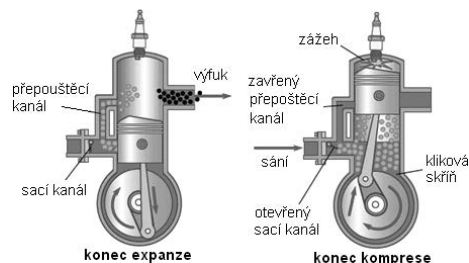
Na **obr. 1.19** jsou znázorněny čtyři pracovní doby čtyřdobého motoru. První doba je nazývána sání. Píst se pohybuje z horní úvratě do dolní a při otevřeném sacím ventilu je nad píst nasávána výbušná směs u zážehových motorů, respektive čistý vzduch u vznětových motorů (čistý vzduch je do válce nasáván také u zážehových motorů s přímým vstřikem paliva). V druhé době se píst pohybuje od dolní úvratí k horní, oba ventily jsou uzavřeny. Tímto pohybem je směs paliva se vzduchem, respektive vzduch, stlačován. Před horní úvratí dojde k zážehu směsi, respektive ke vstřiku paliva, nastává hoření směsi a píst se pohybuje od horní úvratí do dolní. V této třetí době píst koná užitečnou práci. Po třetí době následuje výfuk. Píst se pohybuje od dolní úvratí k horní a při otevřeném výfukovém ventilu jsou z válce vytlačovány zplodiny hoření. Po této době následuje doba první a celý cyklus se opakuje.

❖ Motory dvoudobé

Na **obr. 1.20** je znázorněna činnost dvoudobého motoru. Píst je v dolní úvratí a jeho horní hrana odkrývá přepouštěcí kanál, kterým vstupuje předběžně stlačená směs paliva a vzduchu, respektive vzduch, z klikové skříně do prostoru nad píst. Dalším pohybem pístu z dolní úvratí do horní se zakryje přepouštěcí a výfukový kanál a směs, respektive vzduch, je ve válci stlačován. Při tomto pohybu vzniká v klikové skříní podtlak, po odkrytí sacího kanálu dolní hranou pístu je do prostoru klikové skříně nasávána směs, respektive vzduch. Před horní úvratí dojde k zážehu směsi jiskrou, respektive ke vstřiku a vznícení paliva, vlivem hoření narůstá ve válci tlak, píst je tlačěn k dolní úvratí. Při tomto pohybu nejdříve spodní hrana pístu zakrývá sací kanál, čímž dochází ke stlačování směsi, respektive vzduchu, v klikové skříní. Dalším pohybem horní hrana pístu odkrývá výfukový



Obr. 1.19 Činnost čtyřdobého motoru



Obr. 1.20 Činnost dvoudobého motoru

kanál, zplodiny opouští válec, pak následuje odkrytí přepouštěcího kanálu, směs, respektive vzduch, stlačený v klikové skříně vstupuje nad píst a svým pohybem vytlačuje zbytky hoření do výfukového kanálu. Píst postupně zakryje výfukový i přepouštěcí kanál a celý cyklus se opakuje.

Podle způsobu zapálení směsi paliva se vzduchem rozdělujeme motory na:

❖ **Motory zážehové**

Směs paliva se vzduchem je zážehována energií vnějšího zdroje, nejčastěji elektrickou jiskrou. Používá se u motorů na plynná paliva, benzín, líh, případně dříve petrolej. Kompresní poměr ϵ je omezen teplotou vznícení směsi paliva se vzduchem, a tedy vznikem detonačního hoření ($\epsilon_{\max} = 11,5$). Tlak na konci komprese je 0,8 až 1,5 MPa. Teplota na konci komprese je 400 až 600 °C. Motory mohou být jak čtyřdobé, tak dvoudobé.

❖ **Motory vznětové**

Palivo, které je vstřikováno do válce motoru, případně komůrky, se v důsledku vysoké teploty vyvolané stlačením vzduchu vznítí. Pro dosažení potřebné teploty vznícení je nutno použít velký kompresní poměr ($\epsilon_{\min} = 12$). Běžně používaný kompresní poměr u motorů s přímým vstřikem $\epsilon = 17$ a u motorů komůrkových $\epsilon = 22$. Tlak na konci komprese je 3,0 až 5,5 MPa. Teplota na konci komprese je 700 až 900 °C.

Z konstrukčního hlediska existují další možnosti rozdělení pístových spalovacích motorů.

Podle způsobu přenosu síly od pístu:

❖ **Motory s přímým přenosem**

Síla od pístu je přenášena ojnicí na klikový hřídel. Zachycení axiální síly klikového mechanismu zajišťuje plášť pístu.

❖ **Křížákové motory**

Síla od pístu je přenášena pístní tyčí a ojnicí na klikový hřídel. Zachycení axiální síly klikového mechanismu zabezpečuje křížák, přičemž kluzák křížáku je pevně spojen s pístem pístní tyčí. Používá se pouze u pomaloběžných motorů o velkém výkonu (nejčastěji lodní, případně lokomotivní motory, pracující v dvoudobém taktu a spalující naftu, případně mazut, účinnost těchto motorů přesahuje 50 %).

❖ **Motory bez klikového mechanismu**

Motory speciálních konstrukcí (motory rotační např. Wankel, motory se šikmou deskou, např. Stirling, motory s volnými písty, např. lineární spalovací motor).

Podle způsobu činnosti:

❖ **Motory jednočinné**

Pracovní oběh je uskutečňován pouze na jedné straně pístu.

❖ **Motory dvojitě činné**

Pracovní oběh probíhá na obou stranách pístu.

Podle počtu a uspořádání válců motoru:❖ **Motory jednoválcové**❖ **Motory víceválcové**

Válce víceválcových motorů mohou být jednořadové, dvouřadové (nejčastěji do V, případně proti sobě „box motory“), víceřadové (např. do W, X nebo u letadel hvězdíkové motory).

Podle rychloběžnosti pohybu pístu:❖ **Pomaloběžné motory**

Střední pístová rychlost je menší než $6,5 \text{ m.s}^{-1}$.

❖ **Rychloběžné motory**

Střední pístová rychlost je větší než $6,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Podle způsobu chlazení motoru:❖ **Kapalinou chlazené motory**❖ **Vzduchem chlazené motory**❖ **S kombinovaným chlazením****Podle konstrukce rozvodového mechanismu:**❖ **Motory ventilové (SV, OHV, OHC, DOHC, SOHC, desmodromické)**❖ **Motory šoupátkové**❖ **Motory s kanálovým rozvodem**❖ **Motory se smíšeným typem rozvodu**

U těchto motorů je použita kombinace předchozích způsobů konstrukce rozvodového mechanismu. Např. sání je řízeno pomocí kanálů, výfuk je řízen ventilem.

Podle zdvihového poměru Z/D :❖ **$Z/D < 1$ – motory krátko zdvihové (pod čtvercové)**❖ **$Z/D = 1$ – motory čtvercové**❖ **$Z/D > 1$ – motory dlouho zdvihové (nad čtvercové)**

1.5 Porovnání pístových spalovacích motorů s jinými druhy motorů

Pístové spalovací motory mají proti ostatním druhům motorů celou řadu výhod, ale i některé nevýhody. Hodnocení se musí provádět společně s požadavky na použití motorů, na jejich provozní vlastnosti a s ohledem na druh a cenu paliva.

1.5.1 Základní výhody pístových spalovacích motorů

Relativně vysoká celková účinnost (tj. účinnost charakterizující transformaci energie obsažené v palivu na mechanickou práci).

Vysoká celková účinnost pístových spalovacích motorů je důsledkem velmi dobré tepelné účinnosti jejich pracovních oběhů, vysoké chemické účinnosti spalování a vysoké mechanické účinnosti. Čtyřdobé motory zážehové (benzinové, plynové) mají celkovou účinnost 25–35 %. V důsledku menší tepelné účinnosti pracovního oběhu je nižší než u motorů vznětových. Čtyřdobé motory vznětové (naftové) mají celkovou účinnost v rozmezí 35–45 %. Vyšší hodnoty jsou dosahovány u motorů přeplňovaných. Dvoudobé motory benzinové mají celkovou účinnost kolem 10–15 %, jejich účinnost však rychle stoupá se zaváděním přímého vstřikování benzínu. Dvoudobé motory naftové, které se používají převážně k pohonu lodí, případně lokomotiv, dosahují celkové účinnosti přes 50 %.

Při srovnání pístových spalovacích motorů s jinými druhy zjistíme, že např. parní stroj má účinnost 5–10 %, parní turbíny, podle velikosti, 25–35 %, spalovací turbíny, v závislosti na teplotě spalin před turbínou, velikosti, použití výměníků a regulačních orgánů na vstupu plynů, dosahují celkové účinnosti v rozmezí 10–30 %. Na druhou stranu elektrické pohony dosahují 90 % účinnosti, vystává zde však problém se získáváním elektrické energie. Např. účinnost atomové elektrárny se pohybuje kolem 17 % a ostatní druhy elektráren na tom nejsou o mnoho lépe. Tato účinnost musí být brána v potaz při hodnocení účinnosti různých druhů pohonů. V současnosti preferované palivové články mají účinnost 60 %, problematické je však získávání vodíku jako nosiče elektrické energie. Vyřešit tento problém by mohl palivový článek přímo spalující methanol.

※ Jednoduchost konstrukce a kompaktnost

Pístové spalovací motory jsou jednoduché, kompaktní, mají malé rozměry i hmotnost. Vývojem těchto motorů se měrné rozměry i hmotnosti zmenšují. Při porovnávání je vždy nutno uvážit i velikost a rozměry zásobníků energie a velikost obslužných zařízení nutných pro provoz. Například elektromotor + akumulátorové baterie, parní turbína + příslušenství (kotel, kondenzátor, palivová nádrž...).

Malá měrná hmotnost vyjádřená v kg hmotnosti motoru připadajících na 1 kW výkonu. Hodnoty tohoto parametru neustále klesají. Přispívá k tomu zvyšování otáček motorů, používání přeplňování motorů, nové konstrukční materiály (hliníkové slitiny, plasty, keramika), jakož i dokonalejší výpočtové a experimentální metody, používané při konstrukci a zkoušení motorů. V **tabulce 1.1** jsou uvedeny měrné hmotnosti jednotlivých typů motorů.

Nejnižší měrnou hmotnost mají spalovací turbíny v jednohřídelovém provedení s otevřeným oběhem a bez výměníků. Současné letadlové spalovací turbíny mají měrnou hmotnost od 0,2 do 0,35 kg·kW⁻¹. U spalovacích turbín s krátkou životností, např. turbínové motory tzv. „křídlatých raket“, byly dosaženy hodnoty až 0,1 kg·kW⁻¹.

Tab. 1.1 Měrné hmotnosti jednotlivých typů motorů

typ motoru	otáčky motoru [min^{-1}]	výkonová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$]
volnoběžné lodní motory	100–125	40–60
průmyslové	$n < 600$	20–40
průmyslové	$n > 600$	12–18
lokomotivní	$n = 1500$	3–7
automobilové – zážehové	5000–6000	2–4
automobilové – vznětové	2000–5000	3–6
motocyklové	10000–18000	1–2

❖ Možnost rychlého spuštění a rychlého zatížení

Pístové spalovací motory lze snadno a rychle spouštět a zatěžovat. Lze využívat krátkých přestávek v provozu, na rozdíl od tepelných motorů s vnějším spalováním (např. spalovací turbíny). Poznámka: Při extrémně nízkých teplotách je však spouštění spalovacích turbín snazší.

❖ Používání paliv s vysokým energetickým obsahem

Kapalná paliva používaná u pístových spalovacích motorů mají malý objem a hmotnost při velkém energetickém obsahu. To má velký význam zvláště u motorů dopravních prostředků, které požadují velký jízdní dosah při přijatelných rozměrech palivových nádrží.

❖ Možnost provedení motorů jako vícepalivových

Většinu druhů pístových spalovacích motorů lze upravit tak, aby je bylo možno použít na více druhů paliva, např. MEŘO a nafta, zemní plyn a benzín, ethanol a benzín. Poznámka: To platí i pro spalovací turbínu, kde lze použít téměř jakékoliv palivo.

1.5.2 Základní nevýhody pístových spalovacích motorů

❖ Nutnost spouštět odlehčený motor cizím zdrojem energie

Vzhledem k principu práce pístového spalovacího motoru je nutnost použití cizího zdroje ke spuštění zřejmá. Méně zřejmá je skutečnost, že pístový spalovací motor je nutno spouštět buď úplně nezatížený, anebo jen s malým zatížením. Vyplývá to ze skutečnosti, že pístový spalovací motor vyvíjí při nízkých otáčkách jen malý točivý moment. Proto je možno zatížit motor až po dosažení poměrně vysokých otáček. U zařízeních, která není možno při spouštění motoru odlehčit, musí být mezi motorem a strojem zařazena spojka.

❖ Nevýhodný průběh točivého momentu

Při konstantním množství přiváděného paliva dochází při nárůstu zatížení motoru k poklesu otáček klikového hřídele motoru. Narůst točivého momentu při poklesu otáček je poměrně malý a vede např. u vozidlových motorů k požadavku na zástavbu mnohastupňových převodovek. Nárůst točivého momentu motoru při poklesu otáček je charakterizován převýšením točivého momentu (tzv. záloha točivého momentu), který u současných přeplňovaných vznětových motorů dosahuje hodnoty kolem 50 %, v některých případech i více.

❖ **Malá přetížitelnost pístových spalovacích motorů**

Přetížení motoru nad hodnotu maximálního momentu je u běžných motorů nemožné. Maximální výkon motoru je omezen množstvím vzduchu, které je do válce motoru přiváděno. Tomuto množství odpovídá i množství paliva, které lze v pracovním prostoru válce motoru spálit.

❖ **Negativní vlivy provozu pístových spalovacích motorů na okolní prostředí:**

- hluk
 - výfuk a sání motoru
 - spalováním
 - mechanickým hlukem motoru a příslušenství
- vibrace
 - v důsledku obtíží při vyvažování posuvného pohybu
 - v důsledku obtíží s přerušením přenosu vibrací na stroj
- exhalace
 - CO_2 , CO, HC, NO_x , PM

2 : Paliva pro pístové spalovací motory

Určení paliva pro pohon spalovacího motoru je jedním z prvních kroků, který se provádí při návrhu motoru. Je nutné zhodnotit cenu jednotlivých paliv, dostupnost na trhu (zejména u paliv vyráběných z biomasy), škodlivé emise jednotlivých druhů paliv, skladovatelnost atd.

Podle zdroje, ze kterého jsou získávány je možné paliva pro pístové spalovací motory rozdělit na:

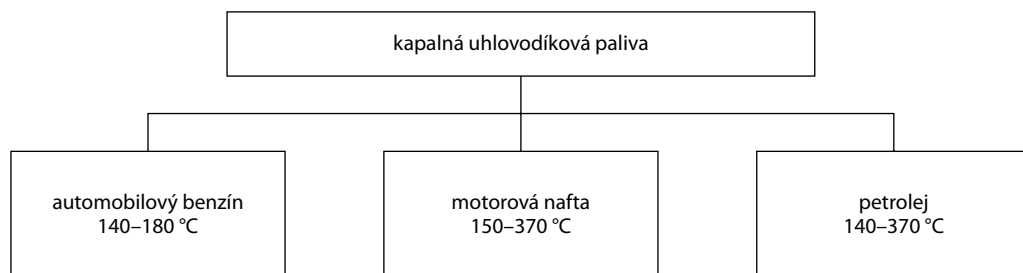
- fosilní uhlovodíková paliva (získávána převážně z ropy)
 - kapalná (benzín, nafta, petrolej)
 - plynná (propan - butan, zemní plyn)
- paliva získaná zpracováním biomasy
 - bioethanol
 - rostlinné oleje a jejich estery
 - bioplyn
- vodík (pravděpodobně palivo budoucnosti, pokud se odstraní problémy s jeho výrobou a distribucí)

2.1 Fosilní uhlovodíková paliva

Kapalná uhlovodíková paliva jsou získávána frakční destilací ropy. Frakční destilace je založena na tom, že s rostoucí velikostí molekul jednotlivých uhlovodíků roste i bod jejich varu. Odpařením a následnou kondenzací pak získáme jednotlivé druhy kapalných paliv (**obr. 2.1**).

Při nižších teplotách získáváme při destilaci ropy propan-butan a při vyšších teplotách těžké topné oleje, mazut a asfalty. Pro zvýšení podílu benzínu a nafty se používají složitější postupy výroby, např. krakování nebo reformační procesy.

Kapalná uhlovodíková paliva se dále získávají zpracováním olejnatých břidlic. Zemní plyn získáváme přímou těžbou. Takzvaný syntetický benzín se vyrábí zkapalňováním černého uhlí.



Obr. 2.1 Kapalná uhlovodíková paliva

2.1.1 Kapalná uhlovodíková paliva

Na **obr. 2.1** je znázorněno rozdělení uhlovodíkových paliv podle teploty jejich odpaření. Automobilový benzín je určen pro zážehové motory, motorová nafta pro vznětové motory a petrolej se dříve používal u zážehových motorů převážně ve 20. letech minulého století.

2.1.1.1 Automobilový benzín

Základní požadavky, které jsou kladeny na automobilový benzín jsou:

- požadavek na dobré antidetonační vlastnosti,
- požadavek na dobrou odpařivost za nízkých teplot pro zajištění startovatelnosti,
- nesmí obsahovat těžší frakční podíly (nad 210 °C), aby nedocházelo ke smývání olejového filmu na stěně válce a ředění oleje v motorové skříni,
- malý obsah síry, která způsobuje korozi palivového systému, způsobuje pokles oktanového čísla benzínu a zvyšuje obsah škodlivin ve výfukových plynech motoru,
- nesmí obsahovat pryskyřice, které způsobují zanášení trysek a usazují se v sacím potrubí a na sacím ventilu,
- dlouhodobá stabilita zabezpečující nízké ztráty při skladování.

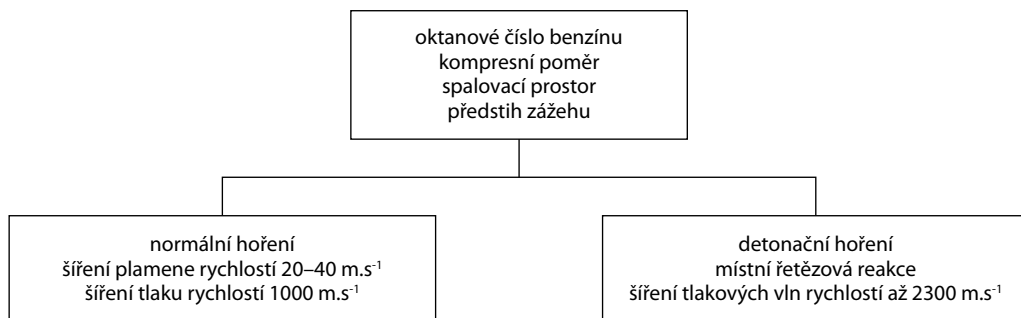
Z výše uvedeného vyplývá, že na automobilový benzín jsou kladeny vysoké požadavky, lze jej hodnotit z pohledu motorářského, palivářského, tak i chemického. Dále se budeme zabývat převážně motorářskými a palivářskými vlastnostmi.

Z pohledu motorářského a palivářského je dominantním kritériem prvořadého významu oktanové číslo. Druhým dominantním parametrem je karburační schopnost a odpařivost benzínu, která je hodnocena zejména destilační zkouškou, dále pak tlakem par dle Riedla a výparným teplem.

2.1.1.1.1 Oktanové číslo

Oktanové číslo (OČ) charakterizuje antidetonační vlastnost automobilového benzínu, tj odolnost proti detonačnímu hoření.

Detonační spalování (**obr. 2.2**) je charakterizováno místním vzplanutím části směsi paliva se vzduchem, které má charakter detonace. Tlaková vlna, vyvolaná detonačním spalováním, se šíří spalovacím prostorem rychlostí zvuku a při dopadu na stěny spalovacího prostoru a dno pístu vyvolává rázy v pístní skupině a klikovém mechanismu. Navenek se projevuje detonační spalování hlukem, tzv. „klepáním motoru“. V důsledku zvyšování hustoty spalin u stěn spalovacího prostoru dochází ke zvýšenému přestupu tepla do stěn a následnému přehřívání motoru. Současně klesá i výkon motoru. Dlouhodobější provoz za těchto podmínek vede k havárii motoru.



Obr. 2.2 Normální a detonační spalování

Kromě oktanového čísla automobilového benzínu ovlivňuje vznik detonačního spalování při maximálním zatížení motoru tvar a uspořádání spalovacího prostoru (motory SV, OHV), velikost kompresního poměru, předstih zážehu, jakož i zakarbonování spalovacího prostoru.

Oktanové číslo vyjadřuje procentuální objemový podíl isooktanu (oktanové číslo 100) a n-heptanu (oktanové číslo 0) ve směsi, která má stejnou odolnost proti vzniku detonací při spalování jako zkoušené palivo.

Hodnoty oktanového čísla paliva získáváme měřením na zkušebním jednoválcovém motoru s proměnným kompresním poměrem. Pro definovaný režim práce zkušebního motoru (VM – výzkumná metoda, MM – motorová metoda; metody se liší v předepsaných měřících otáčkách motoru, nastaveném úhlu předstihu atd.) určíme při postupném zvyšování kompresního poměru počátek klepání u hodnoceného benzínu. Ponecháme kompresní poměr a změnou objemového poměru isooktanu a n-heptanu v porovnávacím palivu vyhledáme takovou směs, která má z hlediska klepání stejné vlastnosti.

Benzín vzniklý frakční destilací ropy má sám o sobě velmi nízké oktanové číslo. To se zvyšuje rafinérskými postupy a přidáváním antidetonátorů.

Základní rafinérské postupy jsou:

- **Reformování**

Principem procesu je přeměna uhlovodíků s malým oktanovým číslem na vysokooktanové aromáty. Již dlouhou dobu je považováno za základní proces (tzv. reforming) při výrobě vysokooktanových benzinů.

- **Katalytické krakování**

Podstatou je tepelné štěpení výševroucích ropných frakcí za vzniku převážně nenasycených a aromatických uhlovodíků. Benzín z tohoto procesu je podstatně vyváženější po stránce rozložení OČ než směs primárního destilátu a reformátu. Produktem je benzín s poměrně vysokým OČ podél celé destilační křivky.

- **Izomerace**

Podstatou je katalytický proces, při kterém vznikají z nízkooktanových n-alkanů s pěti a šesti uhlíky rozvětvené izomery s vysokým oktanovým číslem. Tento proces musely zavést v posledních letech všechny rafinérie, aby mohly vyrábět kvalitní benzíny.

- **Alkylace**

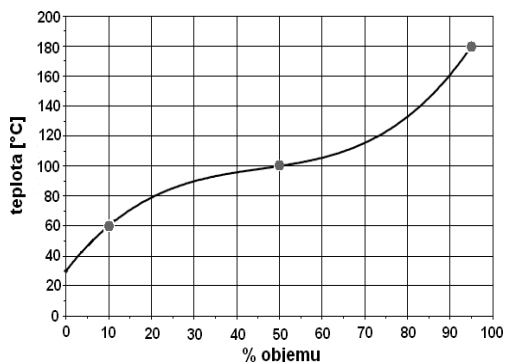
Podstatou je syntéza vysokooktanových izo-alkanů, tzv. alkylátů. Alkylát se vyrábí reakcí alkanů s alkeny. V praxi se vychází z uhlovodíků C₄, tzn. z izobutanu a buténu. Tato technologie je z výše uvedených nejdražší a není ještě ve všech rafinériích zavedena.

Základní používané antidetonátory:

Dříve byly používány sloučeniny na bázi olova (tetraethylolovo či tetramethylolovo), které se kvůli zákazu olova již delší dobu nepoužívají. V současné době se používají tercamaylmethylether (TAME), methyltercbuthylether (MTBE) nebo ethyltercbuthylether (ETBE).

2.1.1.1.2 Destilační zkouška

Destilační zkouškou je zjišťováno požadované frakční složení automobilového benzínu, při této zkoušce získáme destilační křivku (*obr. 2.3*). Nejmenší teplota počátku destilační křivky je určována požadavky na minimální ztráty odparem při skladování a hledisky požární bezpečnosti. V severských zemích bývá tato teplota 20 °C, v tropických 40–45 °C a v našich podmínkách 30–35 °C.



Obr. 2.3 Destilační křivka automobilového benzínu

Pracovní část benzínových frakcí je charakterizována teplotou, při níž se předestiluje 50 % vzorku. Čím vyšší je tato teplota, tím pomaleji se při akceleraci zvyšují otáčky motoru a také spotřeba při jízdě na delších trasách je vyšší. Důvodem je skutečnost, že tato část benzínu se pomaleji odpařuje a dostává se nespálená do výfukového potrubí. U moderních benzínů se hodnota 50% bodu pohybuje v okolí 100 °C.

Teplota 50% bodu ovlivňuje i rychlost ohřevu studeného motoru po nastartování. Při vysoké teplotě tohoto bodu se značná část paliva neodpaří a ve formě kapiček se dostává na studenou stěnu válce, kde smývá olejový film. To vede k značnému nárůstu opotřebení pístních kroužků a stěn válce.

Aby za provozu motoru nenastávalo trvalé ředění olejové náplně motoru, kontroluje se teplota, při níž se předestiluje 95 % paliva, a teplota, při níž se předestiluje všechen benzín. Devadesátipěti-procentní bod nemá být vyšší než 180 °C a konec destilace 210 °C.

Nebezpečné ředění olejové náplně motoru nastává, jestliže benzín obsahuje větší množství frakcí s příliš vysokým bodem varu. I u motoru zahřátého na provozní teplotu neshoří uhlovodíky s bodem varu vyšším než 200 °C. Uhlovodíky se nestačí v průběhu kompresního zdvihu úplně odpařit. Jejich kapičky jsou zasaženy plamenem, na povrchu částečně zkrakují a vírem jsou vyneseny na stěnu válce, mísí se s olejovou vrstvou a dostávají se do klikové skříně motoru. Vzhledem k vysoké teplotě bodu varu se z oleje již neodpaří a způsobují trvalé snížení viskozity oleje. Částečně krakované kapičky paliva způsobují černé zbarvení motorového oleje.

2.1.1.2 Motorová nafta

Motorová nafta je směs uhlovodíků vroucích v rozmezí 150 až 360 °C. Vyrábí se míšením petroleje s ještě těžším destilačním produktem, který se nazývá plynový olej. Obsah lehkých podílů je dán požadavkem na bod vzplanutí, obsah těžkých podílů je omezen vznikem úsad ve spalovacím prostoru.

V současné době jsou u nás dodávány dva druhy motorové nafty. Nafta letní a zimní. Pro použití nafty při nízkých teplotách je rozhodující teplota vylučování parafinů, jejichž krystalky ucpávají palivové filtry, a přerušují tak dodávku paliva do motoru.

Podle jakostního třídění dle ČSN EN 590 je pro mírné klimatické zóny používána nafta motorová třídy B. Jedná se o letní druh nafty dodávaný v období od 1. 4. do 31. 10. se zaručenou filtrovatelností do 0 °C. Dále pak nafta motorová třídy E. Je to zimní druh nafty dodávaný v období od 1. 11. do 31. 3. se zaručenou filtrovatelností do -15 °C.