

Vysoká škola: VŠST Liberec ..... Fakulta: strojní .....

Katedra: stroje přím. dopravy ..... Školní rok: 1982/83 .....

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro ..... Bohuslav Hamousek .....

obor 23-20-8 stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu .....

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Adiabatický vznětový motor .....

### Zásady pro vypracování:

Proveďte průzkum současného stavu vývoje tzv. adiabatického vznětového motoru. Posuďte tepelnou bilanci motoru a otázky spojené s přípravou a hořením směsi a tepelným namáháním dílů motoru. Podle možností proveďte ověření některých konstrukčních opatření na jednoválcovém zkušebním motoru.

V 1967 / 35 B

Autorské právo se řídí směrnicemi  
MŠK pro státní záv. zkoušky č.j. 31  
727/62-III/2 ze dne 13. července  
1962. Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze  
dne 31. 8. 1962 § 19 aut. z. č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací: grafické práce v rozsahu potřebném k doplnění textové části

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran textu

Seznam odborné literatury: Elsbett, L.: Entwicklung eines Dieselmotors mit warmedichtem Verbrennungsraum-MFZ 3/81  
Heil, B.: Das Sparwunder - Der Auto Zeitschrift  
Kamo, R.; Bryzik, W.: Adiabatic turbocompound engine performance prediction - SAE Preprint, 1978 č. 780 068  
Elsbett, L.: Der Elsbett-Motor, MFZ 17 (1956)  
Domina, T.: Nutzfahrzeug 9/1980

Vedoucí diplomové práce: Ing. Stanislav Beroun, CSc.


Konzultant: Ing. Miroslav Gruš, CSc.

Ing. Cyril Scholz, Liaz n.p. Jablonec n/N

Datum zadání diplomové práce: 1.12.1981

Termín odevzdání diplomové práce: 6.6.1983

L. S.

  
Doc. Ing. O. Červinka, CSc.

Vedoucí katedry

  
Doc. RNDr. B. Štříz, CSc.

Děkan

v Liberci dne 28.11.1981 10

Vysoká škola strojí a textilní v Liberci

nositelka Řádu práce

Fakulta strojí

Obor 23 - 20 - 8

stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu

zaměření

stroje a zařízení pro průmyslovou dopravu

Katedra strojů průmyslové dopravy

ADIABATICKÝ VZNĚTOVÝ MOTOR

KDS - 038

Bohuslav H A N O U S E K

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Beroun, CSc, KSD VŠST Liberec

Konzultant : Ing. Miroslav Hruš, CSc, KSD VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran : 62

Počet tabulek : 5

Počet obrázků : 28

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci  
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 27. května 1983

*Kanousek.....*

OBSAH

1.0	POUŽITÁ OZNAČENÍ	5
2.0	ÚVOD	6
3.0	TEPELNÁ BILANCE KONVENČNÍCH PÍSTOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORU	10
4.0	TEPELNĚ IZOLOVANÉ MOTORY	13
4.1	Pístový spalovací motor s připojenou turbínou na výfukové plyny	24
4.2	Pístový spalovací motor s připojenou parní turbínou	28
4.3	Jiná konstrukce tepelně izolovaného pístového spalovacího motoru	31
5.0	VLIV ZVÝŠENÉ TEPLOTNÍ ÚROVNĚ MOTORU NA PŘÍPRAVU A HOŘENÍ SMĚSI	35
5.1	Vypařování a spalování osamělé kapky na stěně	35
5.2	Vypařování palivového filmu	37
5.3	Hoření směsi	49
6.0	TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ DÍLU MOTORU A POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	50
7.0	NÁVRH EXPERIMENTU	55
8.0	ZÁVĚR	58
	LITERATURA	61

1.0 POUŽITÁ OZNAČENÍ

$m_{pe}$	- spotřeba paliva	[ $gkW^{-1}$ ]
$P_m$	- výkon motoru	[ kW ]
$P_T$	- výkon plynové turbíny	[ kW ]
$P_{TR}$	- výkon parní turbíny	[ kW ]
$P_c$	- celkový výkon	[ kW ]
$\eta_o$	- dopravní účinnost	[ l ]
$\eta_t$	- tepelná účinnost	[ l ]
$\gamma$	- stupeň stlačení	[ l ]
$\varepsilon$	- kompresní poměr	[ l ]
$\eta_i$	- indikovaná účinnost	[ l ]
$\alpha$	- součinitel přestupu tepla	[ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$t_v$	- teplota výfuku	[ °C ]
$t_s$	- teplota stěny	[ °C ]
$c_s$	- střední pístová rychlost	[ $m \cdot s^{-1}$ ]
$n$	- otáčky motoru	[ $min^{-1}$ ]
$u$	- rychlost víření	[ $ms^{-1}$ ]
$\lambda$	- součinitel přebytku vzduchu	[ l ]

2. 0 ÚVOD

Rozvoj národního hospodářství je úzce spjat s četnými podmiňujícími činiteli, mezi nimiž vystupuje stále naléhavěji dopředí palivoenergetická bilance. V posledních letech je v naší zemi velmi citlivým místem, jež vyžaduje zodpovědný přístup jak v zabezpečování nutných zdrojů, tak především zásadní obrat ve zhodnocování paliv a všech druhů energie hlavně v dopravě. Všechny státy hledají nová řešení v zabezpečování potřebných zdrojů paliv a energie. Situace se navíc zhoršila vlivem prohlubující se hospodářské krize v kapitalistických státech v průběhu 80. let. Jsou prosazována východiska pro další léta a přijímána opatření k optimálnějšímu zhodnocování tradičních i k zvýšenému využívání netradičních energetických paliv.

Ani Československo nemůže být v tomto směru výjimkou. Vzhledem k omezeným domácím surovinovým a palivoenergetickým zdrojům a nutnosti podstatnou část paliv a energie získávat dovozem ze zahraničí, musíme řešení palivoenergetické základny věnovat zcela mimořádnou pozornost. Na tom, jak rychle se vypořádáme se stávajícími problémy palivové základny, závisí v největší míře dynamika celého národního hospodářství.

Jedním z odvětví, které může přispět ke zlepšení energetické bilance, je automobilový průmysl. Zlepšenou konstrukcí a nižší energetickou náročností nových pohonných jednotek by bylo možné dosáhnout výrazného snížení spotřeby kapalných paliv, zejména nafty.

Pohonné jednotky provozované ať na benzín nebo na naftu se staly neodmyslitelnou součástí naší dopravy a techniky. Přes velké úsilí vyvinout jiný druh pohonu, budou ještě dlouhou dobu základním aprevládajícím typem motorů, hlavně v mobilním použití.

Z těchto důvodů je proto věnována velká pozornost zlepšování klasického pístového spalovacího motoru, a to jak jeho provozních vlastností, tak i jeho vlivu na okolí. Stále se zmenšující zásoby ropy ve světě, vedou výrobce auto-

mobilitě k tomu, aby jejich motory měly co možná nejnižší spotřebu a provozní náklady, ale aby vyhověly i stále se zpřísňujícím limitům škodlivých emisí.

Snahy konstruktérů vedou k jednomu cíli: zvýšit tepelnou účinnost motorů, kde je ještě určitý prostor pro zdokonalování /jednak ve tvaru nebo umístění spalovacího prostoru, umístění vstřikovací trysky, v ovlivnění proudění ve spalovacím prostoru nebo ve zlepšení vlastního termodynamického cyklu spalovacího motoru/. Jednou z metod, jak zvýšit tepelnou účinnost oběhu motoru je dokonale izolovat spalovací prostor a pak zvýšenou tepelnou energii výfukových plynů využít buď přímo ve válci motoru nebo v turbíně mechanicky spojené s klikovým hřídelem.

Vznětový motor je právem považován za tepelný stroj s nejvyšší celkovou účinností, která je dána vysokou energetickou a teplotní hladinou pracovního média.

V tab. I jsou pro přehled uvedeny teoretické účinnosti ideálních pracovních oběhů tepelných motorů pro poměry odpovídající vznětovému provedení. Tyto idealizované oběhy nepřepřehledovaných motorů neuvažují proces výměny náplně, chemickou účinnost spalování, reálný čas jednotlivých dějů, mechanickou účinnost apod. Z prvního náhledu by se tedy dalo předpokládat, že existuje rezerva pro zvýšení tepelné účinnosti cca 9 % u adiabatického motoru. Skutečností však je, že oběh spalovacího procesu bez sdílení tepla by bylo možno realizovat pouze kdyby se teploty stěn spalovacího prostoru plynule měnily dle teploty pracovního média, což je technicky neuskutečnitelné. Ve skutečnosti existují motory tepelně izolované, kde dochází k omezení přestupu tepla do chladícího média. Teploty stěn spalovacího prostoru se ustálí na vyšší teplotní hladině a přestup tepla do a z pracovního média je zachován. Tepelná izolace se neprojeví podstatným zvýšením tepelné účinnosti, která by vlastně vyplynula z tab. I., ale zvýšením teploty výfukových plynů. Snahy tepelně izolovat motor byly už známy dříve, avšak narážely na nedostatečný výběr vhodných materiálů odolávajících jak tepelnému, tak i mechanickému namáhání. V dnešní době existuje již řada funkčních vzorků, avšak jejich životnost



Carnotův oběh	$\eta_t$
	0,87
Teoretický oběh spal. motoru bez sdílení tepla $k = 1,4$ /adiabatický/ a/ s přívodem tepla za stálého tlaku b/ s přívodem tepla za stálého objemu c/ s přívodem tepla za stálého objemu s maximálním spalovacím tlakem 12 MPa	0,674 0,57 0,66
Teoretický oběh spal. motoru s přívodem tepla za stálého tlaku a objemu se sdílením tepla / $k = 1,3$ / s max. spalovacím tlakem 12 MPa	0,57

Tab. I      Hodnoty teoretické účinnosti ideálních pracovních oběhů tepelných motorů pro teplotu prac. média  $T_1 = 2273^\circ\text{C}$  a  $\varepsilon = 16,5$

je zatím omezena /dosahuje maximálně dvou nebo tří stovek hodin/.

Dosažitelný výkon z jednoho válce u klasického motoru je dán vlastnostmi konstrukčních materiálů za provozních teplot, schopností maziva účinně oddělovat pracovní kluzné plochy za těchto teplot a možností udržet přijatelné teploty konstrukčních materiálů a maziva. Zvyšování výkonových parametrů je proto podmíněno zlepšením chlazení okolí spalovacího prostoru, použitím materiálu o vyšší tepelné vodivosti a konstrukčními řešeními, které usnadňují odvádění tepla do chladícího média.

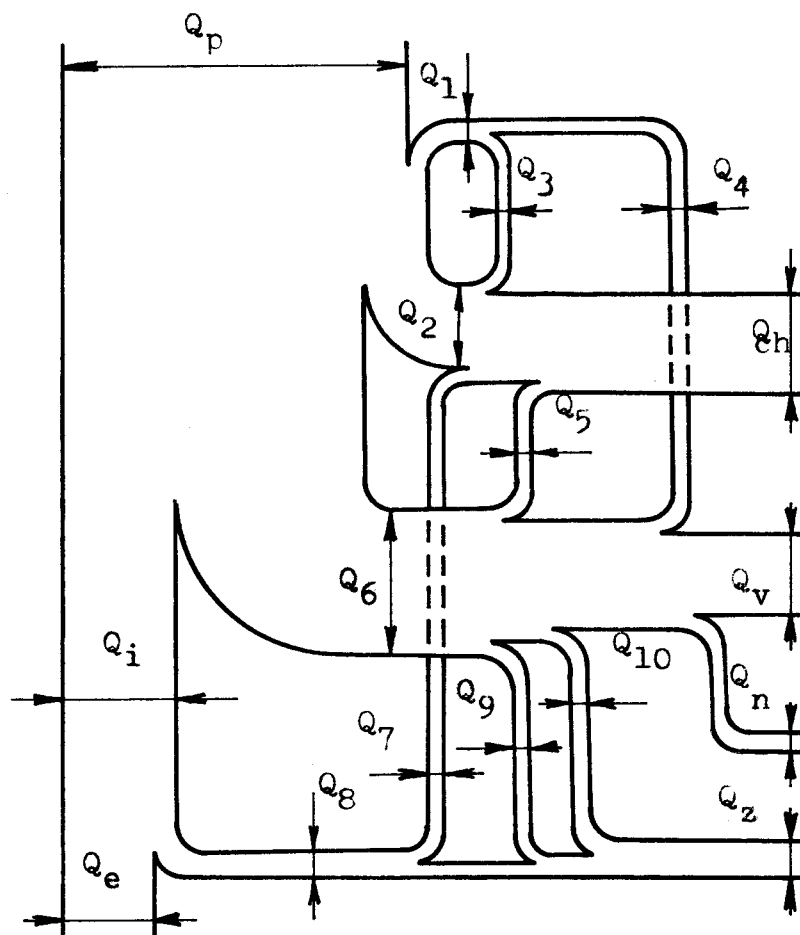
U běžně používaných materiálů prudce klesají mechanické vlastnosti materiálu za tepla a provozní teplota ropných olejů je omezena rozkladem uhlovodíkových vazeb. Běžný materiál je citlivý i na překročení únavové pevnosti při nízkocyklickém namáhání vznikajícím tepelnou roztažností. Za tepelnou bariéru je považováno např. dosažení teploty 380°C u šedé litiny, 240°C u slitin hliníku, 225 - 250°C na 1. pístním kroužku, 180 - 220°C teplota válce, zatížení pístu 0,35 kW cm<sup>-2</sup> apod. Vyzrálé konstrukce konvenčních motorů uvedené bariéry respektují a uspořádáním chladicího okruhu snižují i kolísání teplot součástí v kritických místech. Kvalitativního skoku je možné docílit pouze využitím energie výfukových plynů.

### 3. 0 TEPELNÁ BILANCE KLASICKÝCH PÍSTOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ

Protože při hoření paliva vznikají teploty, které mohou podle měření být i vyšší než  $2000^{\circ}\text{C}$ , musí se pracovní prostor chladit, aby motor byl schopen praktického provozu. Tím se ztrácí část tepla přivedeného palivem. Toto teplo se předává chlazeným stěnám jednak sáláním, jednak vedením a prouděním a to hlavně v době hoření a během expanze a výfuku, tj. při vysokých teplotách prac. látky. Při zdvihu nasávacím a plnicím se naopak obsah náplně stěnami ohřívá.

Znamé pravidlo, že jedna třetina tepla se ztrácí odvodem horkých splodin, jedna třetina se odvádí chlazením a jedna třetina se přemění v indikovanou práci, vyhovuje dobře u motorů s přirozeným nasáváním, zvláště pro maximální točivý moment /pro maximální užitečný tlak/. Samozřejmě každé odchýlení od tohoto optimálního režimu způsobuje nové přerozdělení tepla. Vlastní úsudek o podílu jednotlivých tepla v pracovním procesu pístového spalovacího motoru nám umožňuje vytvořit diagram tepelné bilance obr. 1.

V uvedeném diagramu je vhodné si povšimnout zejména složek tepla  $Q_2$  a  $Q_6$ , které tvoří značnou část z celkového přivedeného tepla do motoru. Uvážíme-li, že z celkového tepla  $Q_p$ , které při plném zatížení motoru přivádíme palivem, se přemění v užitečnou práci asi z 25 - 30 % u motorů s přirozeným nasáváním, a z 28 - 35 % u přeplňovaných motorů. Zbývající část tepla se odvádí z 28 - 40 % výfukovými plyny a sáláním, odvod tepla chlazením činí asi 25 - 40 % a zůstatek 4 - 10 % tepla přísluší mechanickým ztrátám. Tyto hodnoty jsou průměrné a jsou závislé především na typu motoru, rychloběžnosti, zatížení, způsobu chlazení, kvalitě paliva a dalších okolnostech. Tak např. množství tepla přecházejícího do stěn válce  $/Q_2/$  se pozvolna zmenšuje s rostoucím počtem otáček motoru. Při expanzním zdvihu přecházejí do stěn válce bez zřetele na počet otáček asi dvě třetiny všeho tepla odvedeného chlazením. Porovnáme-li toto množství tepla s teplem  $Q_p$ , lze konstatovat, že se zmenšuje s rostoucím počtem otáček. Je to jistě proto, že stěna válce je odkryta kratší dobu.



Obr. 1 Diagram tepelné bilance pístového spalovacího motoru

- $Q_p$  - teplo skutečně uvolněné z přivedeného paliva
- $Q_i$  - teplo přeměněné v indikátorový výkon
- $Q_e$  - teplo odpovídající užitečnému výkonu
- $Q_{ch}$  - teplo odváděné chladicí vodou,
- $Q_v$  - teplo odvedené výfukovými plyny,
- $Q_n$  - teplo odcházející v nespáleném palivu,
- $Q_z$  - zbytkové teplo
- $Q_1$  - teplo potřebné na ohřev vstupního systému
- $Q_2$  - teplo odváděné stěnami válce
- $Q_3$  - teplo předávané vstupnímu systému chladicí vodou,
- $Q_4$  - teplo předávané vstupnímu systému výfukovými plyny,
- $Q_5$  - teplo předávané chladicí vodě výfukem
- $Q_6$  - teplo odpovídající celkové energii výfukových plynů

- $Q_7$  - teplo vyvinuté třením pístu
- $Q_8$  - teplo odpovídající mechanickým ztrátám
- $Q_9$  - teplo ekvivalentní kinetické energii výfukových plynů
- $Q_{10}$  - teplo, odpovídající ztrátám způsobeným netěsností pístu, rozvodových orgánů

Samozřejmě existují snahy, abychom co možná dosáhli nejlepšího využití paliva v motoru /zvýšili  $Q_e$ /. U stacionárních motorů se to řeší provozem v optimálním režimu, kdy motor dosahuje minimální spotřeby. U mobilních motorů je situace složitější z toho důvodu, že proměnnost otáček a zatížení je velká. Ale jisté řešení nám skýtá dodatečné využití tepla  $Q_6$  /viz obr. 1/, k pohonu turbíny pohánějící dmyhadlo nebo mechanicky spojené s klikovým hřídelem. V případě turbíny pohánějící dmyhadlo je tepelná bilance odlišná. Při přeplňování válců a účinném vyplachování spalovacího prostoru působí ochlazování kompresního prostoru čerstvou chladnou náplní a snížení zbytků spalin ve válci tak příznivě, že teplo přecházející do stěn válce zůstává přibližně stejné jako u motorů s nasáváním. Přitom se expanze i stlačení přenáší do oblasti vyšších tlaků a dosahuje se vyššího středního užitečného tlaku a tím zvýšení tepla  $Q_e$ . Jinou možností je i omezení tepla  $Q_2$  dokonalou izolací spal. prostoru /je uvedeno v další kapitole/.

#### 4. O TEPELNĚ IZOLOVANÉ MOTORY

V současné době je právem středem pozornosti tepelně izolovaný motor mající určité přednosti před klasickým provedením. Podstata tepelně izolovaného motoru spočívá v zásadní změně funkcí součástí obklopujících spalovací prostor. Dominantní vlastností součástí tvořících povrch spalovacího prostoru je jejich schopnost izolace, tj. nízká tepelná vodivost a vysoká stálost za tepla. Jejich mechanické namáhání má být přenášeno sousedními díly motoru. Zpravidla je nezbytná i zvláštní izolace mezi tepelně a mechanicky namáhanými díly. Oddělení funkcí součástí na převážně tepelně a převážně mechanicky namáhané, vytváří předpoklady pro uspokojivou práci kritických míst, které u klasického motoru vyžadují intenzivní chlazení. V případech, že obě funkce nelze úspěšně oddělit, je nutno používat kovových materiálů s vysokou pevností za tepla.

Rozsáhlé seriózní výzkumné práce uskutečnila firma Cummins ve spolupráci s armádním výzkumným střediskem TARADCOM v souvislosti s vývojem pohonných jednotek pro speciální použití.

Izolovaná spalovací komora má za následek snížení nebo úplné vyloučení tepla odváděného při vlastním spalování, expanzi, ale i v průběhu komprese. V případě úplného vyloučení odváděného tepla mluvíme o adiabatickém motoru. V této souvislosti adiabatický tedy znamená, že teplo není ani dodáváno ani odnímáno z procesů probíhajících ve spalovacím motoru, což ve svém důsledku znamená úplnou eliminaci chladicího systému. Abychom mohli dosáhnout adiabatických pochodů ve spalovacím motoru, je nutné zabránit přestupu tepla z pracovního média do stěny spalovacího prostoru. Aby neexistoval žádný přestup tepla mezi dvěma prostředím, je nutné udržet mezi nimi nulový tepelný spád. Z toho vyplývá podmínka, že teploty pracovního média a povrchu spalovacího prostoru musí být v každém okamžiku stejné. Když vezmeme v úvahu proměnnost teploty pracovního média v rozmezí zhruba  $80^{\circ}\text{C}$  při sání až  $2000^{\circ}\text{C}$  při hoření /i více/, je tohoto dosáhnout prakticky nemožné.

Adiabatický motor by vyžadoval teoreticky nekonečně tenkou stěnu spalovacího prostoru, aby se její teplota mohla periodicky měnit s teplotou pracovní náplně.

V technické praxi se můžeme pouze adiabatickému motoru přiblížit. Nejsme schopni u motoru úplně zamezit výměně tepla s okolím, ale můžeme ji značně omezit. Vhodnou izolací zamezíme přestupu tepla ze spalovacího prostoru. Tím dosáhneme zvýšení teploty povrchu spalovacího prostoru. Tato izolace se projeví nejen malým vzrůstem tepelné účinnosti motoru, ale hlavně růstem entalpie výfukových plynů. Zvýšení celkové účinnosti dané využitím energie ve válci motoru /počítána z indikované měrné spotřeby/ je v případě izolovaného motoru s přirozeným nasáváním 0,5 % a v případě izolovaného motoru s přeplňováním 25 % [dle 1] .

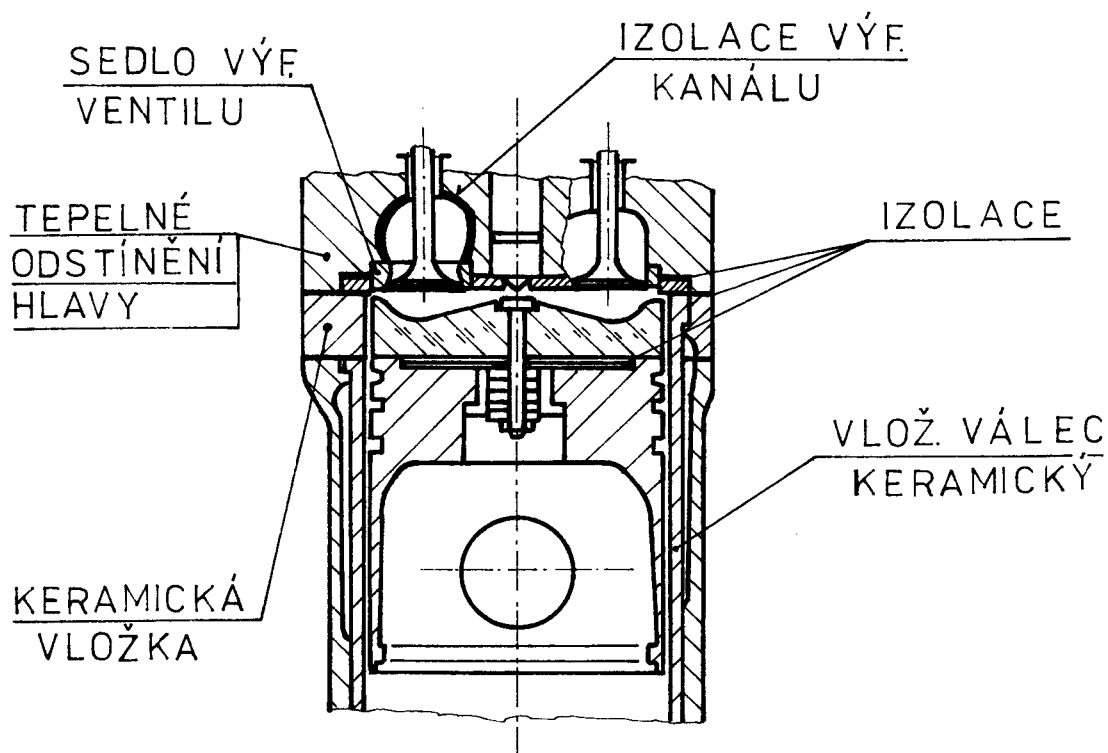
Je patrné, že izolace se podílí na zvýšení celkové účinnosti, ale takto by byla nákladná izolace nevyužita.

Základní provedení tepelně izolovaného motoru se skládá z těchto nekonvenčních dílů a soustav:

- 1/ tepelně izolovaná koruna pístu oddělená od vlastního pístu
- 2/ izolace stěny spalovacího prostoru
- 3/ izolace spodní desky hlavy válců
- 4/ izolace výfukového kanálu nebo potrubí
- 5/ izolace vstříkovací trysky
- 6/ izolace čel a sedel ventilů
- 7/ mazací soustava umožňující práci při vysokých teplotách

Koncepce provedené izolace je zachycena na obr. 2. Nejdůležitější částí izolovaného motoru je píst. Ve vývojových dílnách firmy Cummins byly navrhovány různé koncepce izolace dna pístu. Ze všech těchto návrhů vyšly dvě konečná provedení, z nichž jedno našlo své uplatnění i ve zkušebním vzorku postaveném na bázi motoru Cummins. Jedna z variant návrhu izolovaného pístu spočívala v oddělení obou částí a to na část vodičí z hliníkových slitin a část těsnicí (izolační), viz obr. 3.

Druhá koncepce spočívala v nástřihu keramického materiálu na dno pístu, aby bylo zamezeno přestupu tepla. Varianta zobrazená na obr. 3 má své přednosti. Jak vodičí část pístu, tak i těsnicí se mohou plně optimalizovat. Obě části mohou volně



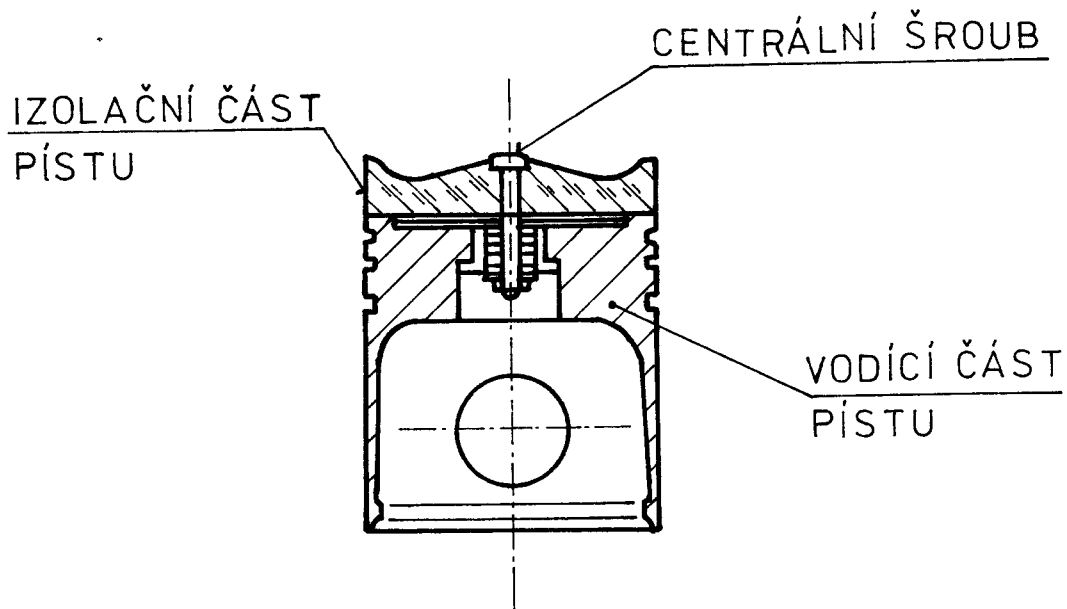
Obr. 2 Provedení izolace spalovacího motoru;  
dle [1]

dilatovat a tím nevzniká žádné přidavné namáhání. Navíc má keramika podstatně nižší součinitel tepelné roztažnosti /u některých materiálů blížíci se nule/ a tím si můžeme dovolit menší vůle těsnící části za studena. To má za následek snížení profuku spalin do klikové skříně. Nesmíme ani opomenout dobré kluzné vlastnosti keramických materiálů a jejich odolnost vůči opotřebení. Dělená konstrukce umožní podstatně snížit teplotu vedící části pístu a tím i vysoké nároky kladené na mazací olej.

Optimalizovaný tvar koruny pístu je zobrazen na obr. 4, u něhož příslušná tabulka zachycuje velikosti označených rozměrů pro různé materiály. Z tabulky vyplývá, že nejmenší vůle si můžeme dovolit jen u keramických materiálů.

Zkoušení a vyhodnocování izolovaného motoru, pak i porovnání s klasickým provedli F. J. Wallace a Way. Navrhli program, který aplikovali na čtyřdobý šestiválcový motor ve vznětovém provedení. Výsledkem jejich práce je projev izolace na ostatní sledované parametry motoru jako je tepelná účinnost, dopravní účin-





Obr. 3 Izolace dna pístu spalovacího motoru;  
dle [ 1 ]

nost, teplota výfuku, procentuální odvod tepla do chladiva atd. Pro tepelně izolovaný motor předpokládali tepelnou vodivost keramického materiálu  $\lambda_m = 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ve srovnání s běžnými hodnotami, kdy  $\lambda_k = 50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Tloušťku izolační vrstvy uvažovali 2 mm, a tloušťku stěny válce 12,7 mm. Přestup tepla z plynu do stěny uvažovali podle Eichelberga

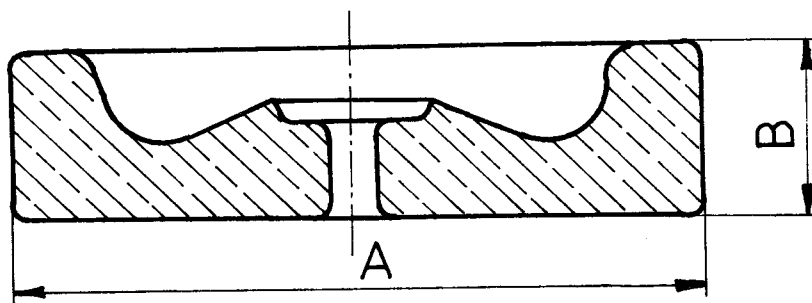
$$\alpha_s = \frac{230}{\bar{c}_s^{1/3} \sqrt{\mu \cdot T}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$$

a součinitel přestupu tepla ze stěny do chladiva  $88^\circ\text{C}$  teplého uvažovali konstantní  $\alpha_{ch} = 10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

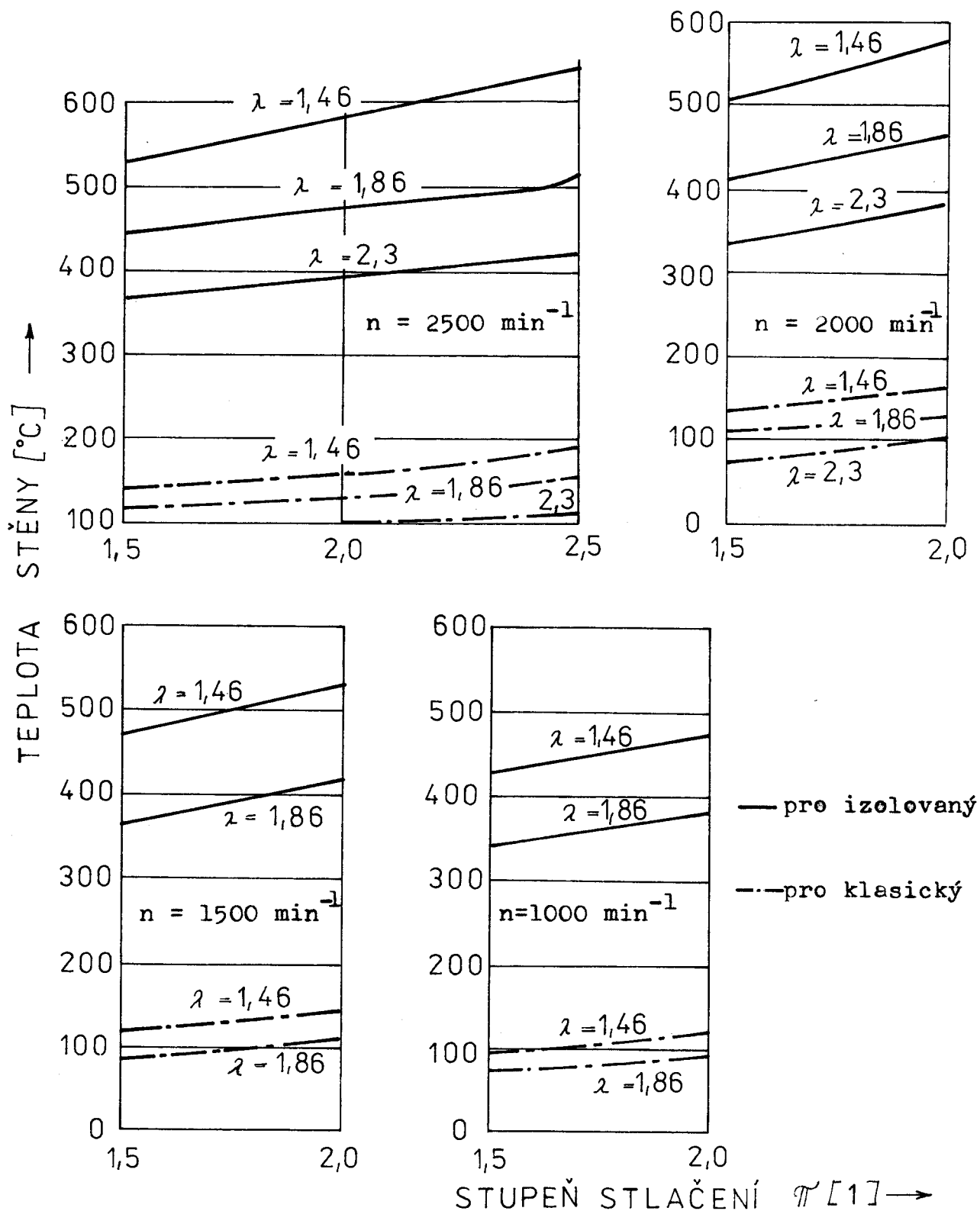
Předpokládali existenci dvou modelů izolací motoru. Jednak stěnou, která má velkou tepelnou kapacitu a pracuje v motoru za konstantní teploty /izotermální stěna/. Adibatizace dosáhli stěnou stejného účinku, která má ovšem nulovou tepelnou kapacitu. Sledovali projevy a ve svých výsledcích dospěli k následujícím závěrům:

V případě teploty stěny, která je součástí spalovacího prostoru je to jednoznačné. Nárůst teploty dosahuje, v podmínkách maximálního zatížení, hodnoty až  $450^{\circ}\text{C}$ . Teplota izolované stěny silně závisí na otáčkách a stupni stlačení, obdobně tomu je i u klasických motorů. Na obr. 5 je tato závislost teploty zachycena. Extrémní hodnoty bylo dosaženo při  $N_E = 2500 \text{ min}^{-1}$ ,  $\lambda = 1,46$ ,  $\pi = 2,5$  /při maximálním zatížení motoru/. Izolace se výrazně projeví v odvodu tepla do chladiva. To způsobí výrazné zvýšení teplotní úrovně spalovacího prostoru. Procentuální odvod tepla do chladiva je značně omezen, viz obr. 6. Když uvážíme, že u klasického motoru se odvede chlazením až 40 % přivedeného tepla, pak v izolovaném provedení se odvede zhruba 20 %, což představuje redukci odváděného tepla v průměru o 50 %. Samozřejmě se dá najít provoz motoru, při kterém dochází k většímu omezení tepla a to až o 62 %, ale i takový, kde dochází pouze 30 % nímu omezení tepla.

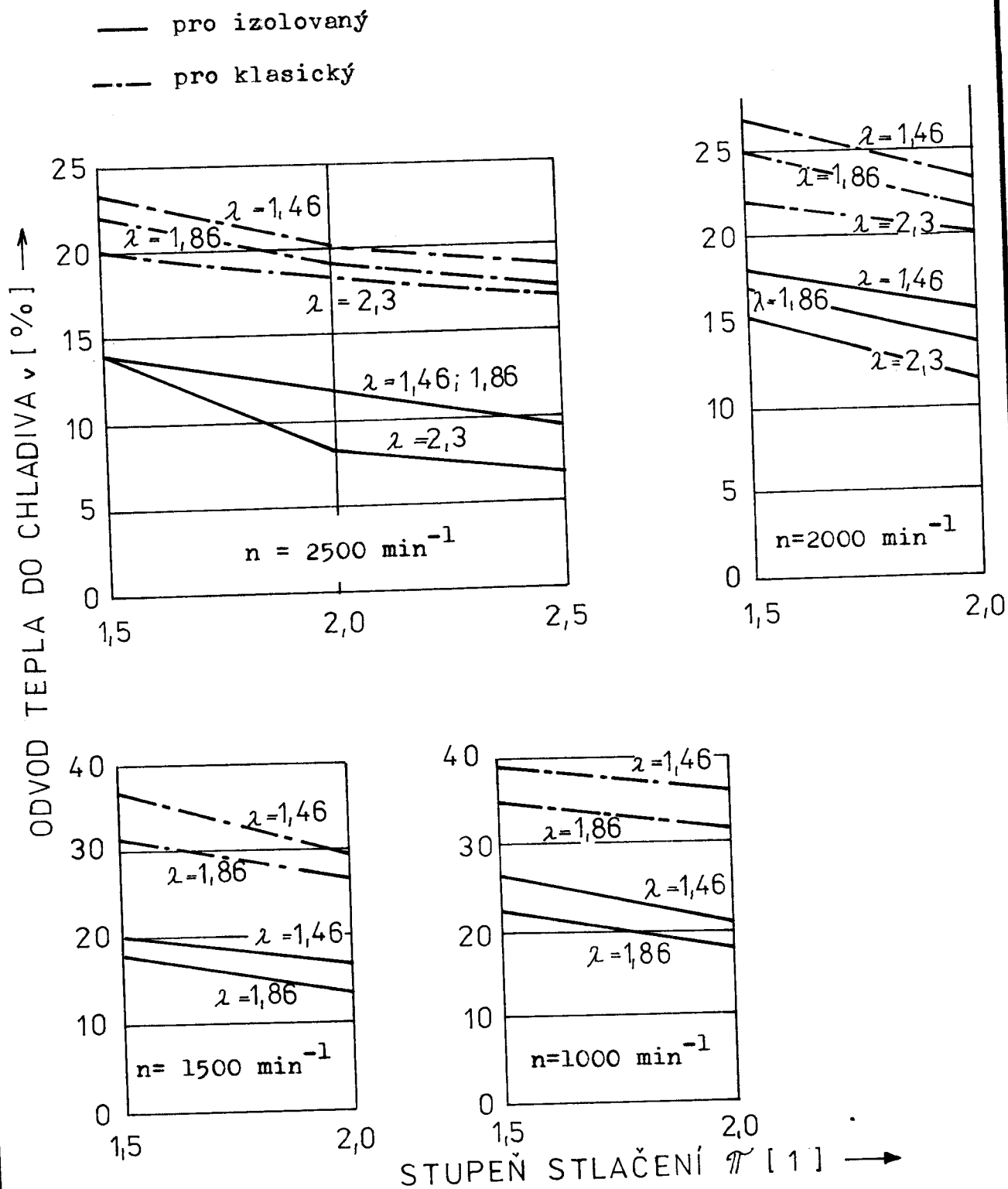
Materiál	Rozměr A [mm]	Rozměr B [mm]
$\text{Si}_3\text{N}_4$ za tepla lisovaný	138,7 / 138,6	31,7 / 31,4
$\text{Si}_3\text{N}_4$	138,7 / 138,6	31,7 / 31,4
LAS	138,9 / 138,8	31,7 / 31,4
ocel	136,85 / 136,8	25,5 / 25,3



Obr. 4 Těsnicí část pístu; dle [13]



•br. 5 Teplota stěny v závislosti na stupni stlačení a součiniteli přebytku vzduchu pro různé otáčky motoru; dle [ 11 ]



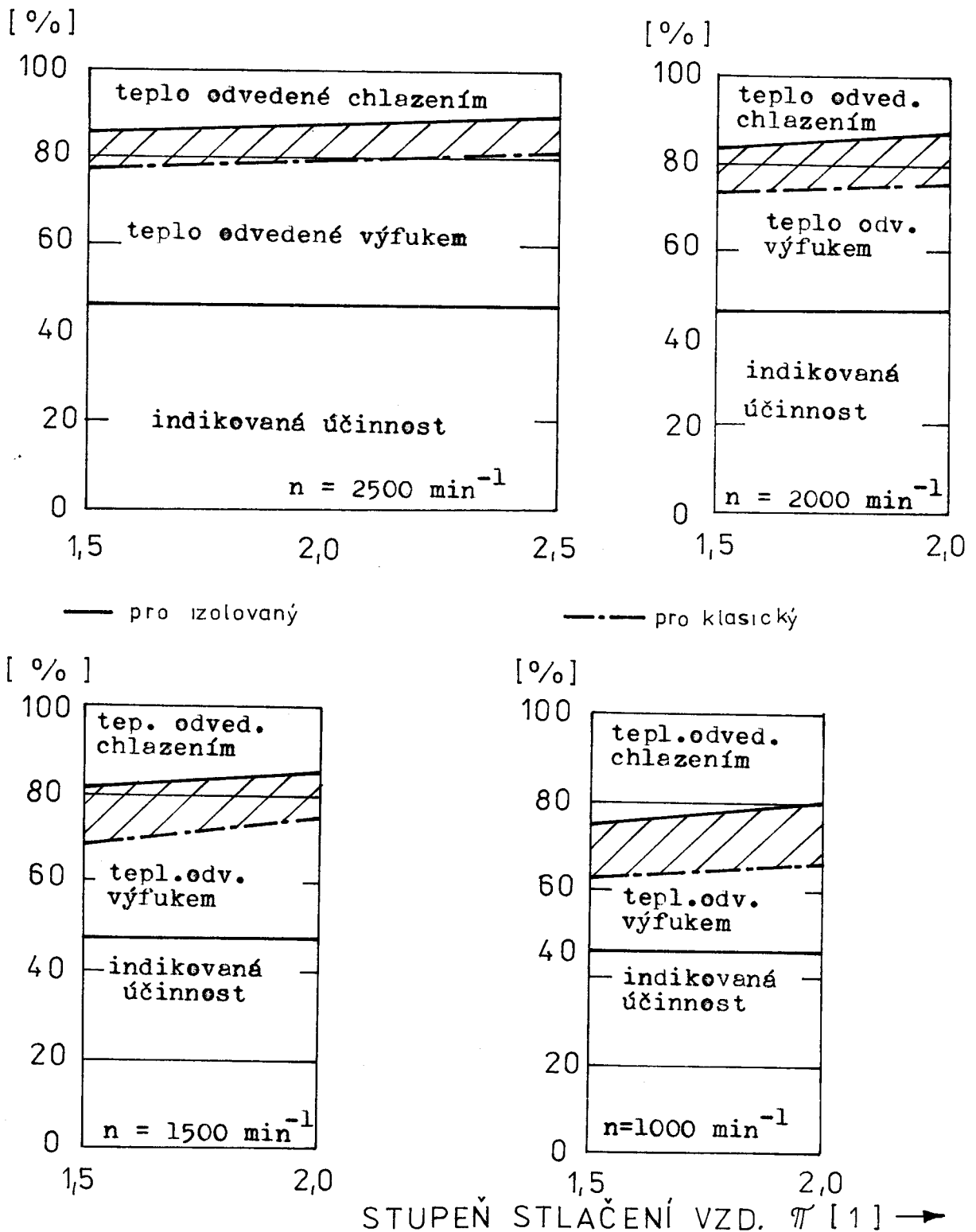
Obr. 6 Odvedené teplo do chladiva; dle [ 11 ]

otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1500		2000		2500	
	adiabat.	izoterm.	adiabat.	izoterm.	adiabat.	izoterm.
$\eta_{id}$ [%]	53,04	46,26	52,3	47,52	51,38	47,7
$p_e$ [bar]	13,83	11,47	17,24	15,20	20,71	18,78
$t_v$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	586	439	615	508	639	552
teplo odvedené výfukem $v$ [%]	46,96	34,64	47,7	39,7	48,62	42,40
teplo odvedené do chladiva $v$ [%]	0	19,1	0	12,78	0	9,9
dopravní účinnost $\eta_p$ [1]	0,957	0,927	0,952	0,922	0,944	0,917

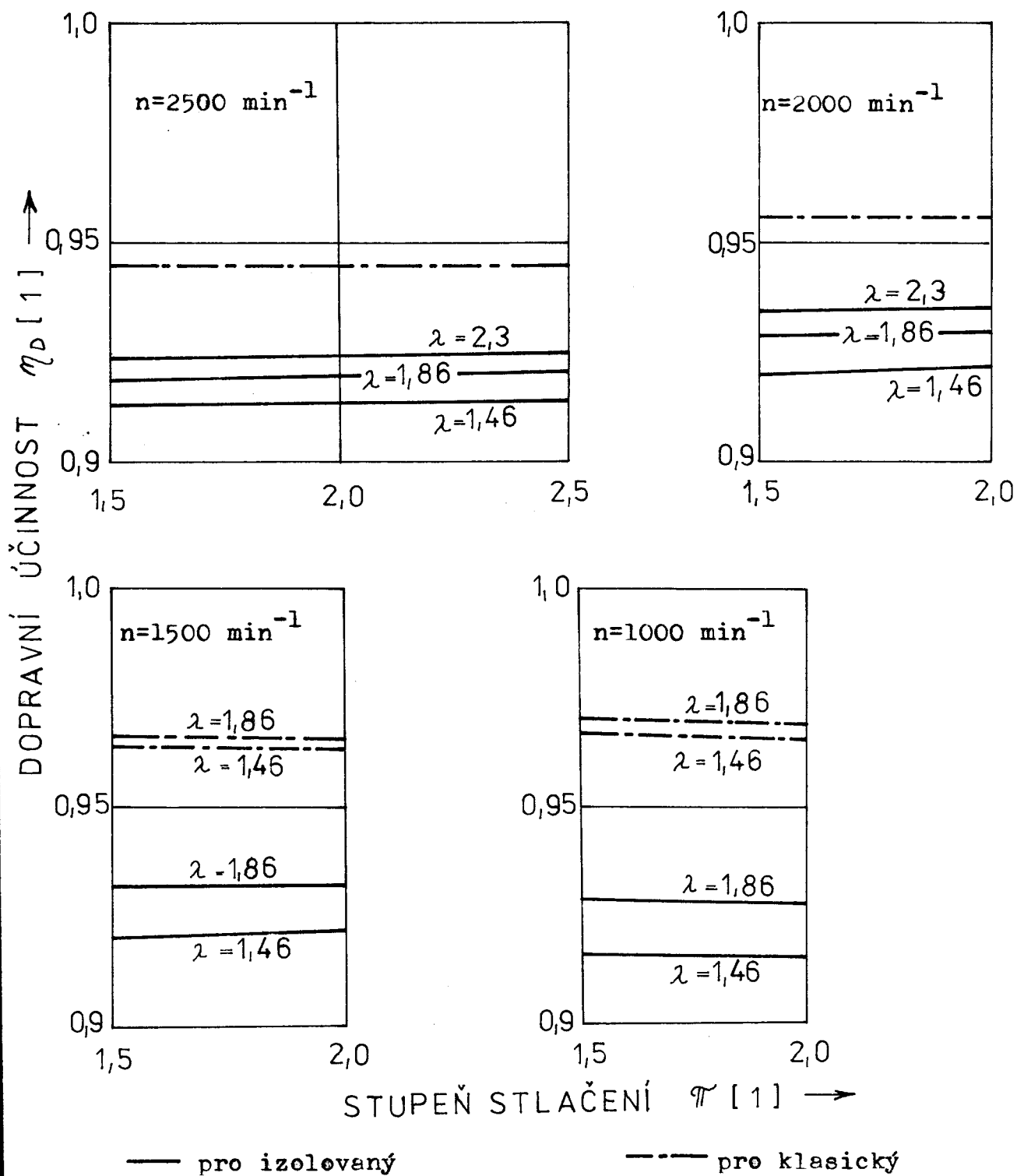
Tab. II Hodnoty některých parametrů motoru s izotermální a s adiabatickou stěnou pro  $\lambda = 1,46$ . Z ní také vyplývá zlepšení realizované adiabatickou stěnou. dle [11]

Nejvýznamnější bylo konstatování, zda se izolace motoru podstatně projeví v nárůstu indikované účinnosti. Z obr. 7 je na první pohled zřejmé, že izolovaná stěna spalovacího prostoru má zanedbatelný vliv na zvýšení indikované účinnosti. To se mění v závislosti na stupni stlačení, ale změna je nepatrná. Ze zobrazených závislostí můžeme udělat závěr, že kromě zvýšení výfukové entalpie a takřka nepatrného zvýšení indikované účinnosti, nepřináší izolace spalovacího prostoru mnoho pozitivního. Ba naopak, v některých případech i zhoršení, jako je tomu u dopravní účinnosti.

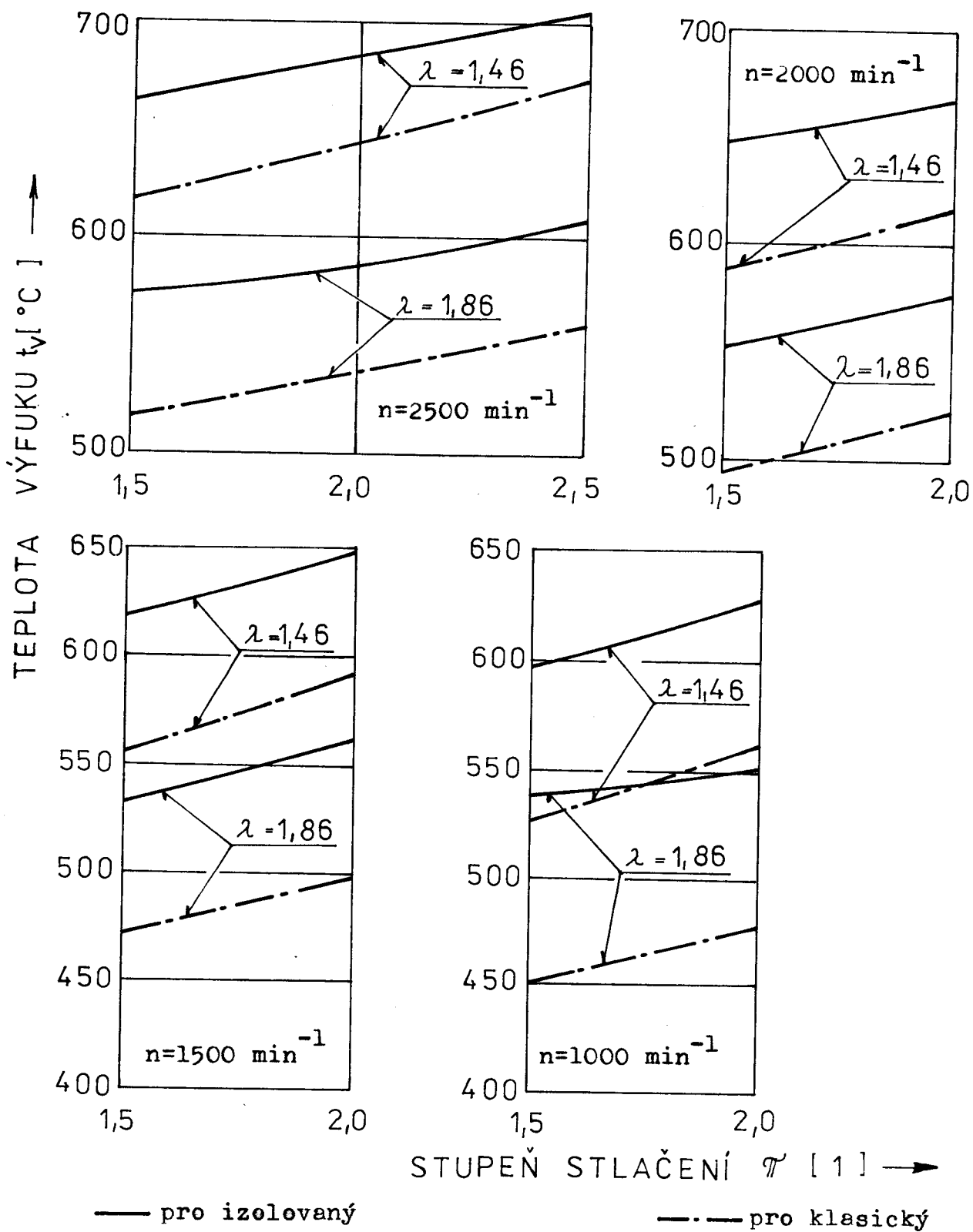
Plyne to zřejmě z toho, že měrná hmotnost vzduchu klesá s rostoucí teplotou, vzduchová náplň se více ohřeje od stěn a hmotnostní náplň bude menší. Hodnoty dopravní účinnosti udává obr. 8. Jediný významný přínos izolované stěny je ve zvýšení teploty výfukových plynů, která dosahuje dle obr. 9 hodnot až  $700^{\circ}\text{C}$ . Ve skutečnosti je nárůst teploty ještě vyšší než tento zobrazený.



Obr. 7 Tepelná bilance izolovaného motoru pro součinitel přebytku vzduchu  $\lambda = 1,46$ ; dle [11]



Obr. 8 Depřavní účinnost v závislosti na stupni stlačení a součiniteli přebytku vzduchu; dle [11]



Obr. 9 Teplota výfuku; dle [ 11 ]



Pro případ izolované stěny adiabatické se dosahuje pozitivních výsledků ve všech sledovaných parametrech. Pro nás nejvýznamnější je pozitivní změna indikované účinnosti. Ta dosahuje v průměru 9 % nárůstu. Největší zisk indikované účinnosti se realizuje při nižších zatíženích a otáčkách. Porovnání motorů pracujících s adiabatickou stěnou a stěnou izotermální je v tab. II.

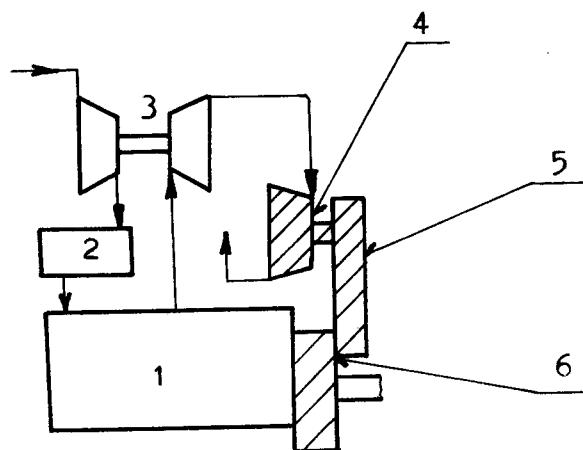
#### 4. 1 Pístový spalovací motor s připojenou plynovou turbínou

Jedním ze způsobů využití tepla, které se nevyužije ve válci motoru a je odváděno ve formě spalin, je spojení klikového hřídele motoru s turbínou mechanickým převodem. Samozřejmě pro tento způsob jsou výhodnější motory velkoobjemové, disponující velkými výkony a dostatečným hmotnostním průtokem vzduchu. Všeobecný přístup přijatý firmou Cummins je v maximální míře využít odpadního výfukového tepla použitím turbíny mechanicky spojené s hřídelem. Toto spojení je prvním stupněm k dosažení vyšší tepelné účinnosti, než kterou mají stávající pístové spalovací motory.

Převodový sled, jímž se realizuje spojení, se skládá z radiální nízkotlaké nebo pulsní turbíny, v které dochází k využití energie výfukových plynů. Turbína společně se svým ložiskovým nábojem vytváří jednu ze tří samostatných částí. Druhá část se skládá z vysokorychlostní převodovky.

Zde jeden pár ozubených kol je použit k dosažení části nutné redukce rychlosti turbíny na klikový hřídel. Třetí část je nízkorychlostní převodovka, která vytváří požadovanou redukci rychlosti. Kapalinná spojka je součástí třetí části zabezpečující oddělovací funkci vysokorychlostní převodovky od klikového hřídele. Zajišťuje také zkrutnou izolaci a ochranu proti zanášení kmitů do soukolí vlivem proměnnosti krouticího momentu motoru. Oddělená koncepce zajišťuje snadnou údržbu a sestavení.

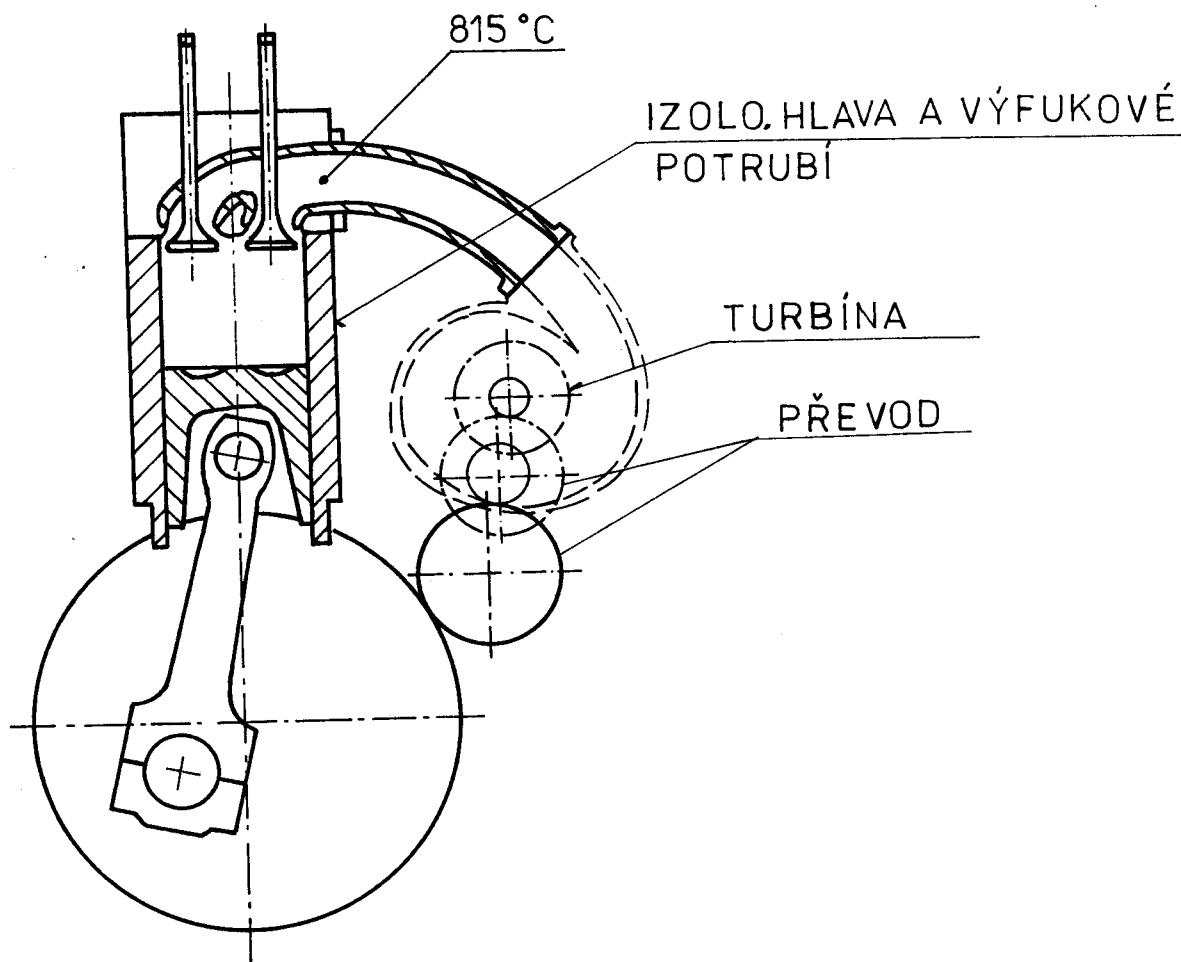
Zkoušky s turbosdružením proběhly namotoru Cummins NTC-400 opatřeném turbodmychadlem a mezichladičem plnicího vzduchu. Blokové schéma uvádí obr. 10.



Obr. 10 Blokové schéma turbosdruženého motoru dle [13]

- 1 - motor spalovací
- 2 - mezichladič plnicího vzduchu
- 3 - turbodmychadlo
- 4 - nízkotlaká turbína /silová/
- 5,6-realizace příslušného převodu

Úpravy motoru byly provedeny ke zlepšení výkonu při turbo-sdružených podmínkách. Zahrnovaly změnu vačkového hřídele, časování ventilů, výfukového potrubí. Všechny tyto úpravy měly za cíl omezení ztrát energie během výfuku a zlepšit přenosovou účinnost výfukových plynů z válce do prvního stupně tur-



Obr. 11 Izolovaný motor s připojenou plynovou turbínou

bíny. Prototyp turbosdruženého motoru dosáhl zlepšení provozních parametrů proti původnímu provedení, které jsou uvedeny v tab. III.

	klasický motor	motor s přip. turbínou	tepelně izolovaný motor s přip. turbínou
vrtání/zdvih [mm]	Ø 140/152	Ø 140/152	Ø 140/152
objem [l]	14	14	14
výkon [kW min <sup>-1</sup> ]	298/2100	336/1900	368/1900
spotřeba [gkWh <sup>-1</sup> ]	215	192	172

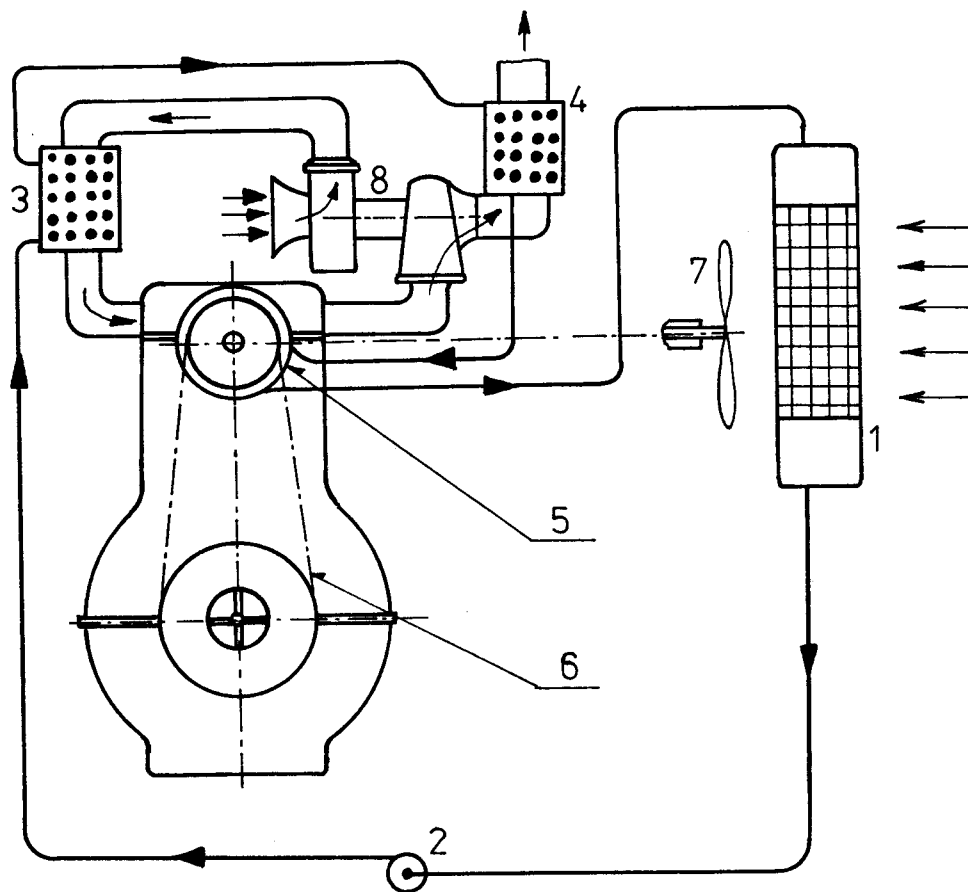
Tab. III Hodnoty dosažených provozních parametrů motoru Cummins dle [1].

Z tabulky je patrný přírůstek výkonu motoru vyvozený nízkotlakou turbínou, dosažený při nižších otáčkách. Mechanickým spojením turbíny bylo docíleno 15 % růstu točivého momentu při 1300 min<sup>-1</sup> a zlepšila se nízkorychlostní momentová charakteristika. Spojení silové turbíny s tepelně izolovaným motorem dosáhlo ještě lepších výsledků. Celková účinnost dosáhla hodnoty 50 %. Schéma spojení izolovaného motoru s plynovou turbínou je na obr. 11.

#### 4. 2 Pístový spalovací motor s připojenou parní turbínou

Existuje více způsobů jak využít teplo odcházející výfukovými plyny a přeměnit ho v užitečnou práci. Jednou z cest, schopných realizace je právě spojení dieslova motoru s parní turbínou. Zvyšujeme tak celkovou účinnost za cenu dalších velmi podstatných komplikací, které se vyplatí pouze u vysokovýkonných motorů. Někteří autoři tvrdí, že se dosáhne tímto způsobem hranice 60 % celkové účinnosti. Schéma uspořádání prvků v případě Rankinova cyklu je na obr. 12. Skládá se z výměníku tepla, přehříváku, chladiče, pracovní parní turbíny mechanicky spojené s klikovým hřídelem /jako v předešlém případě/, čerpadla a ventilátoru. Pracovní látkou je buď voda nebo látka zvaná fluorinol-50 dle [16]. Okruh silové turbíny pracuje následujícím způsobem. Je-li pracovní látkou sytá pára, pak je možno realizovat Carnotův cyklus. Lze ho uskutečnit i proto, že izobarickým přívodem a odvodem tepla. Carnotova cyklu se však neužívá, protože v něm probíhá neúplná kondenzace. Páry je nutno komprimovat na tlak ve výměníku. Ty mají velký měrný objem, takže čerpadlo by vyžadovalo značných rozměrů a vyžadovalo by velký příkon. Ve skutečnosti provádíme úplnou kondenzaci páry a do výměníku čerpáme sytou kapalinu. Měrný objem syté kapaliny je menší, čerpadlo je rozměrově také menší a vyžaduje nižší příkon. Takovýto cyklus pracující s úplnou kondenzací páry se nazývá Rankin-Clausiov a je i použit v našem případě.

Sytá kapalina o teplotě cca 80°C je vedena k čerpadlu, kde dochází ke stlačení. Takto stlačená kapalina vstupuje do výměníku, který je součástí plnicího potrubí. Výměníkem se ohřívá kapalina až na 100°C a snižuje se teplota plnicího vzduchu, což výrazně ovlivní hmotnostní náplň válce. Takto ohřátá kapalina přichází do přehříváku, jež je součástí výfukového potrubí. Kapalina zde dosáhne teploty až 426°C. Podle odborníků tato hodnota teploty není konečná a dá se ještě zvýšit novou konstrukcí přehříváku. Přehřátá pára expanduje v turbíně, kterou se přivádí dodatečný užitečný výkon na klikový hřídel motoru.



Obr. 12 Schéma uspořádání izolovaného motoru s parní turbínou; dle [16]

1 - chladič , 2 - čerpadlo , 3 - výměník na sacím potrubí,  
4 - přehřívák, 5 - parní turbína , 6 - převod na klikový  
hřídel, 7 - ventilátor , 8 - turbodmychadlo

Úplná kondenzace expandujících par je zajištěna chladičem. V závěru této kapitoly je uvedena tabulka IV., která srovnává dosažitelné výkony motorů využívajících v plné míře energie výfukových plynů.

	motor s připoje nou turbínou	tep.izolov.mot. s připoj.tur.	tep.izolov.mot. s Rankinovým obě- hem
$P_m$ výkon motoru [kW]	296,47	295,4	305,2
$P_T$ výkon turbíny [kW]	30	80,58	-
$P_{TR}$ [kW] Rankinův oběh	-	-	50
$P_c$ celk.výkon [kW]	326,47	375,98	355,2
emise [gkWh <sup>-1</sup> ]	6,8	6,8	7,48

Tab. IV. Hodnoty dosažené v případě spojení motoru s turbínou;  
dle [6]

#### 4. 3 Jiná konstrukce tepelně izolovaných motorů

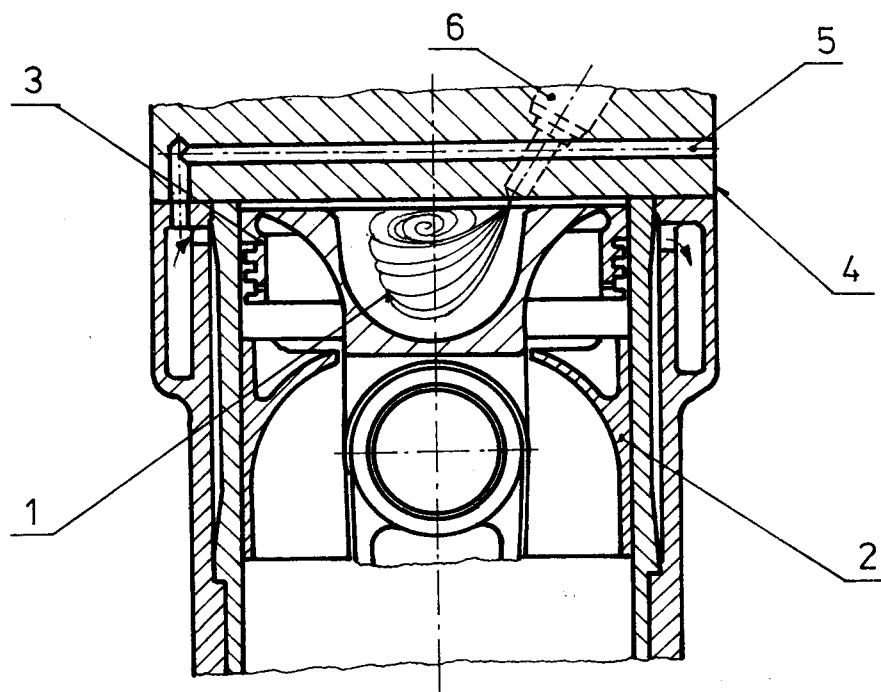
Podstata tepelně izolovaného motoru, který vznikl v soukromém vývojovém ústavu L. ELSBETTA je poněkud odlišná. Hlavní důraz se klade na odstranění konvenčního chladicího systému, ušetření jeho příkonu a na zlepšení spalovacího procesu.

Spalovací prostor tohoto tepelně izolovaného motoru je obdobný spalovacímu prostoru M, ale s otevřeným, mírně rozvěřeným hrdlem a s vysokým stupněm radiálního víření. Palivo se vstřikuje přímo, jednotvorovou tryskou umístěnou na obvodu spalovacího prostoru. Paprsek vstřikovaného paliva směřuje do středu prostoru a prochází rotujícím vzduchovým vírem. Specificky lehčí spálená a hořící směs se vlivem odstředivé síly přemisťuje dovnitř a nespálený vzduch, který je relativně těžší, vytváří vrstvu v blízkosti stěny. Tato druhotná funkce odstředivé síly víru ovlivňuje plamen do středu spalovacího prostoru, jehož stěna pak přejímá méně tepla. Vzduch, který je těžší vlivem odstředivé síly vytvoří izolační vrstvičku určující pak přestup tepla do stěny. Tato izolační vzduchová vrstvička je ale ovlivňována množstvím vstřiknutého paliva. S rostoucím množstvím vstřiknutého paliva se zmenšuje a z tohoto důvodu tento způsob izolace dosahuje lepší výsledky v oblasti nižších zatížení motoru.

Protože spalovací prostor je ve dně pístu, doznal rozsáhlejší úpravy zejména píst, který je řešen jako dělený. Dno tepelně velmi zatíženého pístu je ocelové nebo litinové, plášť je z lehké slitiny. Vzájemné spojení obou částí pístu i přenos sil na ojnici zprostředkovává pístní čep. Horní část pístu má v partii nad kroužky ve válci velmi malou vůli, umožněnou malým rozdílem v tepelné roztažnosti válce a pístu. Tato vůle je zhruba stejná jako v kluzném ložisku téhož průměru. Vrchní část pístu přejímá těsnicí funkci, takže stačí jen dva kroužky, jejichž úkolem je především vytváření dostatečné mazací vrstvy. Přenos tepla z pístu na stěnu válce je záměrně omezen tím, že dno pístu je ze špatně vodivého materiálu. S chladnou stěnou válce je ve styku jen malá plocha horní části pístu, k níž se



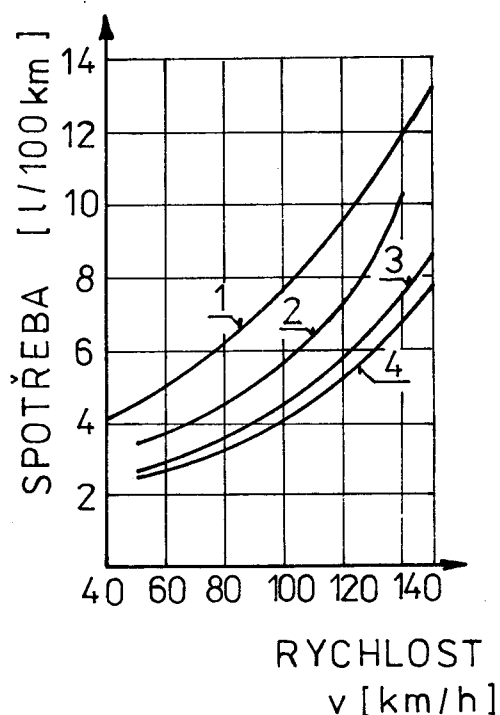
přivádí teplo ze dna pístu jen malým průřezem. Za zmínku stojí i hmotnost takového pístu. Od průměru 80 mm výše vychází lehčí než soudobé používané písty. Ve dně pístu je centrální spalovací prostor, jehož tvar je zřejmý z obr. 13.



Obr. 13 Elsbettův dělený píst se spalovacím prostorem

1 - vstřikovaný paprsek paliva, 2 - vodící /kluzná/ část pístu, 3 - těsnicí část pístu, 4 - hlava válců, 5 - kanál pro chlazení nejnepříjemnějších míst a vstřikovací trysky, 6 - vstřikovací tryska

Na snížení tepelných ztrát se podílí i hlava motoru, ve které odpadly kanály vodního chlazení a celkově se její konstrukce zjednodušila. V hlavě je rozveden olejový systém, zabezpečující nejnutnější chlazení vstřikovací trysky a ventilových sedel. Tím se ovšem nesnížila absolutní teplota hlavy válců, ale teplotní rozdíly, které jsou příčinou vzniku trhlinek, způsobených pnutí. Také vedení výfukového ventilu je chlazené olejovým systémem a po provedených zkouškách v motoru, se ukázalo jako dostačující bez vážných známek zvýšeného opotřebení. Tento způsob izolace využívá velmi dobře vzduchu, promísení je rychlé a hoření měkké. Podle subjektivního hodnocení hluč-



- 1-původní zážehový motor
  - 2-původní vznětový komůrkový motor
  - 3-upravený nepřepřlňovaný motor
  - 4-upravený přepřlňovaný tříválec
- dle ELSBETTA

Obr. 14 Spotřeby paliva při konstantních rychlostech vozu VW Golf vybaveného postupně různými motory; dle [2]

nosti, provedených úprav autorem, je motor při zatížení sotva k rozeznání od motoru zážehového a klepání studeného motoru je zřetelně menší než u jiných naftových motorů, včetně komůrkových.

Omezený přestup tepla snižuje nároky na chladicí soustavu. Obvyklý chladič není nutný, odpadní teplo se stačí odvést

výměníkem teplovodního topení. Cílem všech těchto úprav je rozšíření pracovního pole motoru se spotřebou do  $220 \text{ gkWh}^{-1}$ . Výhodou tohoto způsobu izolace je možnost aplikace i na malobjemové motory.

Tyto úpravy byly aplikovány na osobní i nákladní automobily a spočívaly ve zvýšení obsahu válců cca o 16 %, dosáhlo se zvýšení výkonu cca o 12%. Upravené motory pracují buď s přirozeným nasáváním nebo přeplňováním.

Při dlouhodobých zkouškách bylo dosaženo 14 % úspory paliva. Z obr. 14 je vidět, že bylo sníženo spotřeby dosaženo.

## 5. 0 VLIV ZVÝŠENÉ TEPLOTNÍ ÚROVNĚ MOTORU NA PŘÍPRAVU A HOŘENÍ SMĚSI

Příprava kapalného paliva k tvoření směsi začíná u naftových motorů vstřikem paliva do spalovacího prostoru. Palivo se musí co nejjemněji rozpráší a co nejúčelněji rozvést do spalovacího prostoru. Rozprášením paliva se může dosáhnout toho, že počáteční dvoufázová směs paliva a vzduchu se v určité části prostoru chová jako koloidní soustava tzv. mlhovina. Tento počáteční produkt ve tvaru dvoufázového prostředí /kapiček a mlhoviny/ má velmi krátkou dobu existence.

Vypařuje se a vytváří tak primární směs, která vstupuje do difúzního pochodu hoření. Z hlediska koloidní soustavy může být rozprášení hrubší, avšak nejvýše takového stupně, aby nedocházelo k nadměrnému vynesení paliva z proudícího vzduchu. Pro vytváření hořlavé směsi difúzí má tedy značný význam jakost rozprášení paliva, jeho rozvedení do prostoru a rychlost, jakou se kapky rozprášeného paliva vypařují, i rychlost a dráhy kapek nebo palivových par v proudu vzduchu.

Značným dílem pro přípravu směsi přispívá vypařování paliva, které je ovlivněno vyšší teplotní úrovní spalovacího prostoru izolovaného motoru.

### 5. 1 Vypařování a spalování osamělé kapky na stěně

Podkladem pro studium spalování paliva na stěně spalovacího prostoru jsou poznatky o chování osamělé kapky na stěně. Při různých teplotách stěny. Základní poznatky v tomto směru získali Tamura a Tanasawa [10]. Filmovým záznamem sledovali chování různě velikých kapek při dopadu na ohřátou destičku /buď křemenovou nebo ocelovou/. Teplotu destičky mohli v rozmezí od 50 až 1000°C, průměry kapek od 1 do 3 mm, použili při pokusech různých paliv, čistých uhlovodíků i směsí.

Průběh celkové doby existence kapky, od dopadu na stěnu až do úplného odpaření závisí především na teplotě. Při teplotách stěny nižších, než je bod varu kapaliny, vytváří kapa-

lina na stěně čoučkovitou vrstvou, která se postupně vypařuje. V okamžiku, kdy se dosáhne bodu varu kapaliny, vzniká ve středu kapky bublinka, dojde k varu a rychlost změny vypařování kapky mírně stoupne. Při dosažení teploty stěny 40 až 50°C nad bodem varu kapaliny, vytváří kapalina film, v jehož celé vrstvě dochází k bouřlivému varu a vypařování probíhá velkou rychlostí. Při ještě vyšší teplotě se kapka rozpadá ve větší a menší kapky, které se nepravidelně pohybují po povrchu destičky. U takto rozpadnutých kapiček se doba vypařování prodlužuje a dosahuje se stavu, kdy odpařovaná kapka spočívá na tenké vrstvě par. Vrstva par kapku z části izoluje a tím prodlužuje dobu existence. Při dalším zvyšování teploty se rychlost vypařování opět pomalu s teplotou zvýší. Jakmile povrch stěny dosáhne určité teploty, dojde k zapálení a tím se doba existence doněkud zkrátí. I za těchto podmínek zůstává charakter odpařování kulové kapky na stěně zachován, ale projevují se vertikální vibrace a tvoření páry má pulsující charakter.

Sledování průběhu velikosti kapky v závislosti na čase při vypařování a při spalování desti dobře prokazuje platnost vztahu

$$\frac{d(D^2)}{dt} = C_{\text{vyp}}$$

pro vypařování, a pro spalování, tj. stejných závislostí,

$$\frac{d(D^2)}{dt} = C_{\text{spal}}$$

jaké platí pro volnou, popř. zavěšenou kapku. Pro dobu odpařování např. benzenu lze vyvodit v oblasti nízkých teplot až do bodu varu vztah

$$t = K_L \cdot D_0^{1,5} \left( \frac{t_b - t_f}{t_s - t_f} \right)^m = 2,1 \cdot D_0^{1,5} \left( \frac{t_b - t_f}{t_s - t_f} \right)^{2,3}$$

resp. pro benzen mezi bodem varu a bodem maximální rychlosti odpařování vztah dle [10]

$$t = k_m D_o^{1,5} \left( \frac{t_m - t_f}{t_s - t_f} \right)^n = 0,13 D_o^{1,5} \left( \frac{t_m - t_f}{t_s - t_f} \right)^{6,9}$$

kde značí

- $D_o$  - počáteční průměr kapky
  - $k_L$  - dobu existence kapky o počátečním průměru 1 mm při bodu varu
  - $t_f$  - teplotu příslušející bodu tuhnutí kapaliny
  - $t_s$  - teplotu povrchu
  - $t_b$  - teplotu příslušející bodu varu kapaliny
  - $k_m$  - dobu existence kapky o počátečním průměru 1 mm při bodu odpovídajícímu maximální rychlosti odpařování
  - $t_m$  - teplotu příslušející maximální rychlosti odpařování udanou ve °C a definovou vztahem
- $$t_m = t_b + /30 - 70/$$

Nestabilní poměry mezi maximem rychlosti odpařování a bodem, kdy kapka spočívá na tenké vrstvě par nedovolují formulovat spolehlivě platný vztah pro tuto oblast. Těkavé látky se prudce v této oblasti rozpadají v kapky různých velikostí, ale zase méně těkavé látky se nerozpadají a vykazují tuto oblast ve velmi úzkém rozmezí.

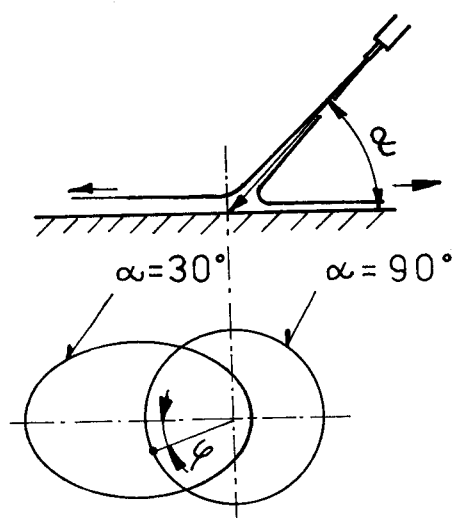
Poměry při vypařování kulové kapky na stěně, resp. poměry při spalování kapky lze zachytit pomocí konstant  $C_{vyp}$ , resp.  $C_{spal.}$ , ovšem závislých na teplotě. Hodnoty, kterých nabývají tyto konstanty pro kapku spočívající na stěně, jsou vyšší v porovnání s hodnotami příslušející kapce na volném plynném prostře-  
dí.

## 5. 2 Vypařování palivového filmu

Donedávna byl za správný považován názor, že optimální podmínky vytváření směsi jsou do té doby, dokud palivo zůstane rovnoměrně rozptýleno ve spalovacím prostoru. Výzkumy však uká-

zaly, že část vstříkovaného paliva se zachytí na stěně. Experimentální studium vypařování vrstvy paliva na stěně pokusného prostoru, obdobného spalovacím motorům s přímým vstříkem, prováděl Flatz [4]. Při svém pokusu pořídil v odraženém světle při frekvenci 3000 snímků ze sekundu, paprsek vstříkovaného paliva nechal dopadat na stěnu pod úhlem  $+ 15$  stupňů,  $- 15$  stupňů /i proti směru víru vzduchu/ a  $90$  stupňů, pracoval s klidným vzduchem, ale i s vírem o rychlosti až  $90 \text{ m s}^{-1}$ , se vzduchem o tlaku  $0,2 \text{ MPa}$  až  $1,6 \text{ MPa}$  a teplotou až  $350^\circ\text{C}$ .

Při vstříku do nízkého tlaku a rychlosti paliva okolo  $100 \text{ m s}^{-1}$  je paprsek kompaktní a na stěně se vytváří skvrna paliva. Jestli dochází ke vstříkovaní dávky kolmo na stěnu, utvořený povlak má přibližně kruhový tvar. V případě, že dochází k odchylení od kolmosti ke stěně, tvar rozptylu paliva je přibližně shodný s tvarem vstříkovaní a tím se povlak prodlužuje. Viz obr. 15. Při dopadu paliva na stěnu se začíná palivo vypařovat. Vypařování se z počátku děje varem, povrch paliva je neklidný, obr. 16 a. Pak následuje odpařování těžších frakcí paliva, při kterém je povrch buď hladký obr. 16 b /což se projevuje zejména při tangencialním nástřiku na stěnu bez víření/.



Obr. 15 Tvar povlaku utvořeného na stěně při různých úhlech vstříkovaní paliva; dle [12]



a

b

c

Obr.16 Charakter povrchu palivového filmu  
při odpařování ze stěny; dle [4]



Sledujeme-li rozlévání paprsků po stěně, vedou výsledky k závěrům, že s rostoucí teplotou stěny vzrůstá délka smočené plochy při stejném čase. Vysvětluje se to tím, že při vyšší teplotě /přes 360°C/ ztrácí vytvořený palivový film bezprostřední styk se stěnou. Pohybuje se vlastně na vrstvičce par, které působí izolačním účinkem, jakoby nadlehčovala souvislé palivo. Vše vede k tomu, že páry zamezí přestupu tepla do palivového filmu /jen částečně/ a tím se prodlouží doba odpařování.

Při teplotě nad 360°C se u stěny přímo vypařují i nejtěžší frakce paliva a tato změna proběhne skokově. Abychom mohli odhadnout rozložení paliva na stěně, velký význam má rychlost rozplavování palivového filmu v různých směrech od místa styku paprsku paliva se stěnou. Jako parametr zde zavádíme podle [12] intenzitu poměrného rozptylu  $G_{rw}$  vzhledem k úhlu  $\varphi$  zachyceného na obr. 15, definovaný vztahem

$$G_{rw} = \frac{1}{2\pi} \frac{k_0 \cdot \sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha \cdot \cos a \cdot \varphi}$$

$\alpha$  - úhel mezi paprkem a stěnou

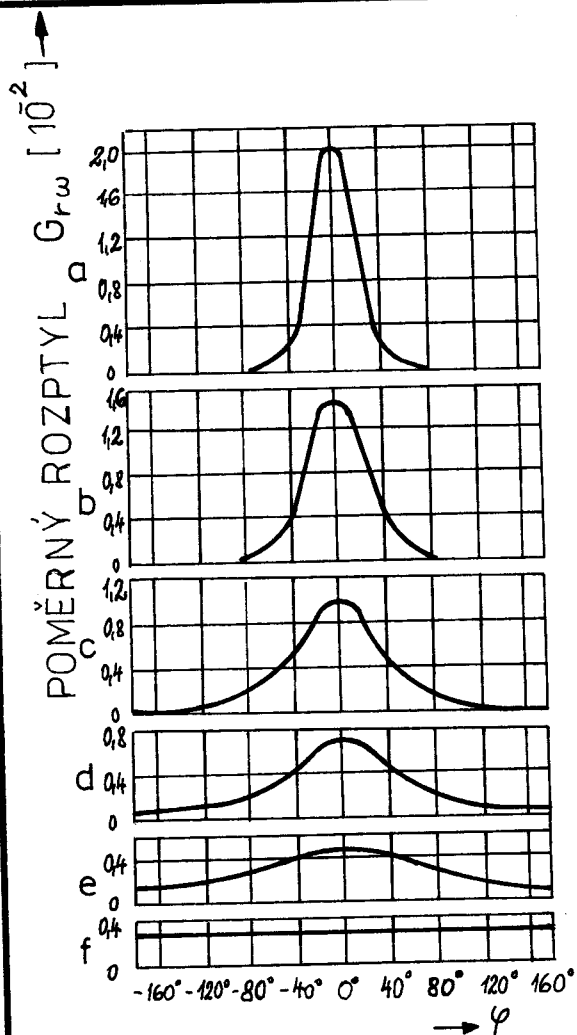
$a$ ,  $k_0$  - konstanty zahrnující vliv ztráty třením paliva a také ztráty energie při nárazu na stěnu

Pro olej je možné psát

$$k_0 = \sin^{1,5} \alpha$$

$$a = \sin^{3,7} \alpha + \frac{1 - \sin^{3,7} \alpha}{\pi} \cdot \varphi$$

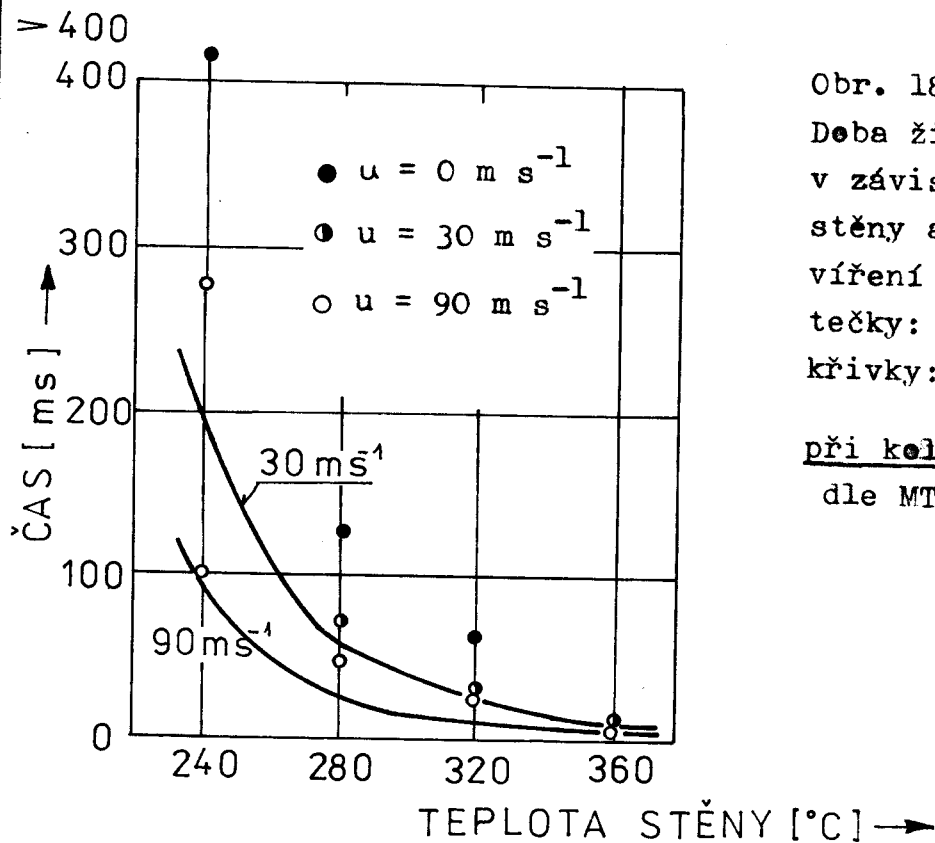
Na obrázku 17 je zachycena intenzita poměrného rozptylu. Z něj také vyplývá, že při kolmém nástřiku /případ f/ je rozptyl paliva symetrický. A právě symetrický rozptyl paliva snižuje dobu odpařování. Experiment zkoumající odpařování ukázal, že se bez víření vzduchu a při nižších teplotách stěny /240 - 320°C/ film rozpadá v samostatné větší kapky /obr. 16c/ ulpívající na stěně. Povrch kapek je menší než u filmu a tím i doba odpařování delší. Doba odpařování se prodlužuje u bočního nástřiku v porovnání s kolmým, kdy se film lépe rozlévá /symetricky/ a vznikají jemnější kapičky dle obr. 17 f. Počáteční fáze



Obr. 17 Změny pom. rozptylu povlaku paliva při různých úhlech dopadu paprsku; dle [12]

- a —  $\alpha = 20^\circ$
- b —  $\alpha = 30^\circ$
- c —  $\alpha = 45^\circ$
- d —  $\alpha = 60^\circ$
- e —  $\alpha = 75^\circ$
- f —  $\alpha = 90^\circ$

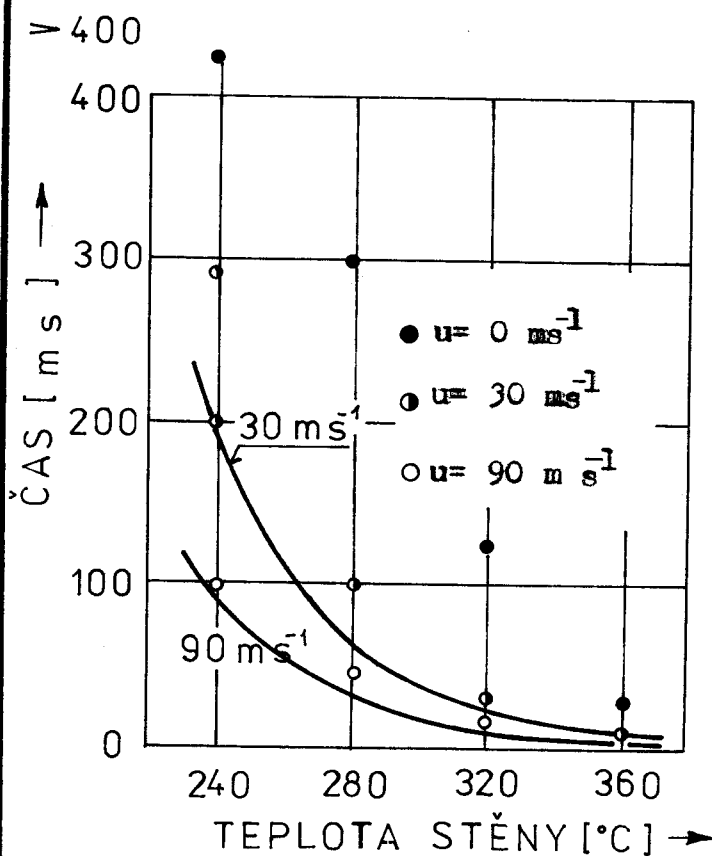
odpařování je značně urychlena v případě kolmého nástřiku zdůvodněného těsného kontaktu paliva se stěnou. K tomu nedochází při tangenciálním nástřiku, kdy se palivo sklouzne po vytvořené vrstvě par. Přehled o době trvání palivového filmu na stěně při kolmém nebo tangenciálním vstřikování pro různé rychlosti víření udává obrázek 18 a obr. 19. Při rychlostech víření  $30 \text{ m s}^{-1}$  a tangenciálním nástřiku ve smyslu víru viz obr. 20; 21



Obr. 18

Doba životnosti tekutiny  
v závislosti na teplotě  
stěny a pro různé rychlosti  
víření  
tečky: měřeny  
křivky: vypočteny

při kolmém nástřiku  
dle MTZ 1/1965



Obr. 19

Doba životnosti tekutiny  
v závislosti na teplotě  
stěny pro různé rychlosti  
víření  
tečky: měřeny  
křivky: vypočteny

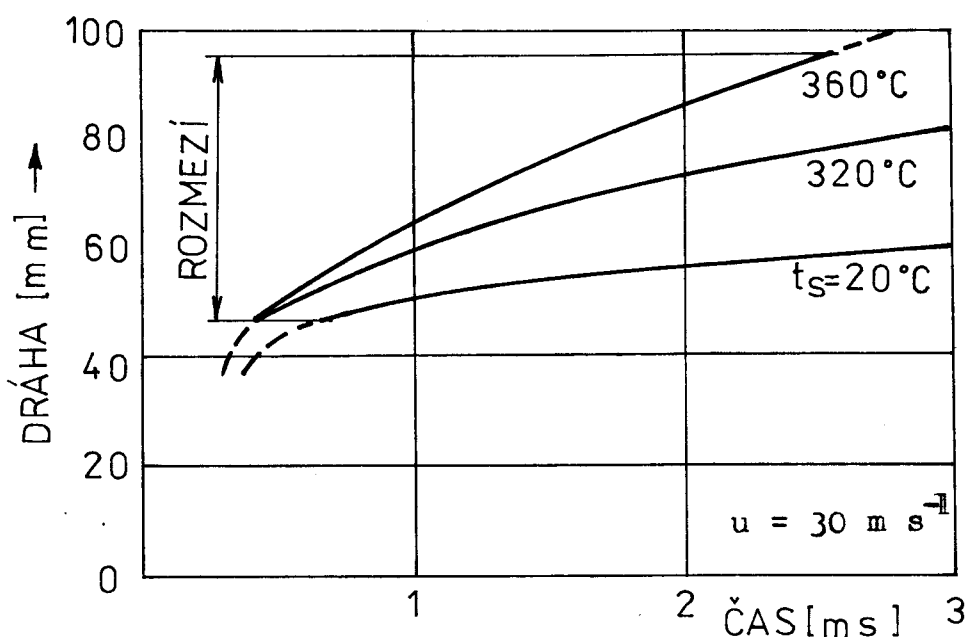
při tangenciálním nástřiku  
dle MTZ 1/1965

potlačuje víření vytváření kapek a zlepší se styk paliva se stěnou, což má za následek zlepšený přestup tepla a zkrácení doby vypařování. Tento efekt nastává i při nižších rychlostech víření. Toto lze konstatovat při rychlostech víření  $90 \text{ m s}^{-1}$ , kdy dochází ke zkrácení doby vypařování a to i při nižších teplotách stěny.

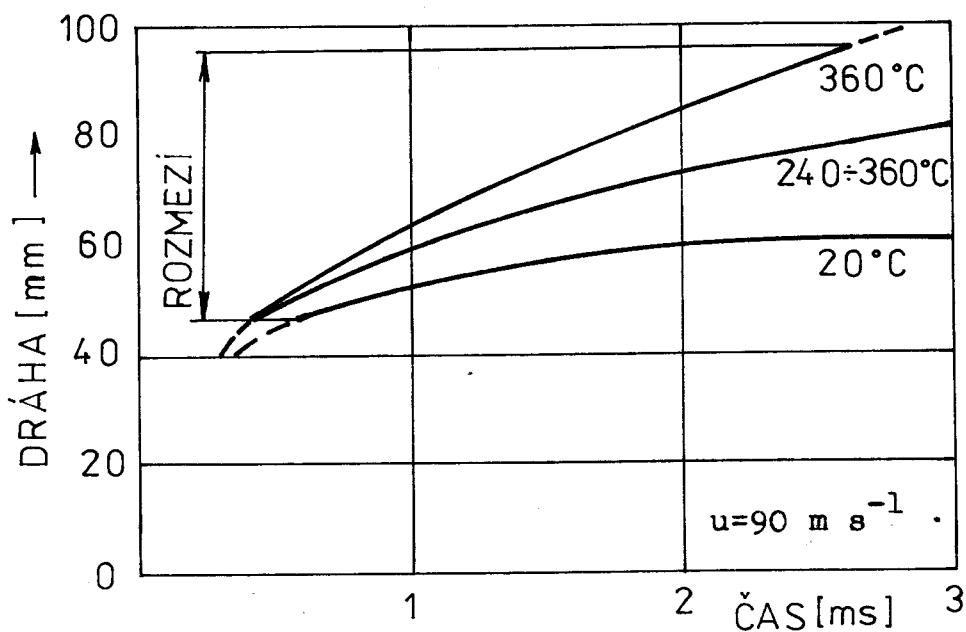
Při kolmém nástřiku, vír posouvá a rozlévá film po stěně a v první fázi není patrný rozdíl oproti poměrům bez víření. Při tangenciálním nástřiku, proti směru víření, jak ukazuje obr. 22, není při rychlosti vzduchu  $30 \text{ m s}^{-1}$  patrný rozdíl proti poměrům, bez víření, a to i pokud jde o dobu vypařování a dráhu paliva po stěně. Poměry bez víření jsou zachyceny na obr. 23. Při rychlostech víru  $90 \text{ m s}^{-1}$  se doba poněkud zkracuje tím, že působí velká relativní rychlost na počátku a je větší smočená plocha se stěnou. špička paprsku se na stěně silně zbrzdí a dokonce se obrací. Při zkouškách s vyšší teplotou vzduchu /až  $350^\circ\text{C}$ / nebyly patrné žádné podstatné rozdíly proti zkouškám s teplotou nižší. Pokusy s vyšším tlakem až  $1,6 \text{ MPa}$ , teplotou stěny  $280^\circ\text{C}$  a rychlosti víření  $20 \text{ m s}^{-1}$ , ukazují, že nedochází k varu paliva, protože tlak přesáhl kritickou tlakovou hodnotu většiny složek paliva. Doba vypařování je obdobná jako při nižších tlacích, paprsek se po určité době zastaví / $2 \text{ ms}$ / a pak je urychlován vířícím vzduchem v podobě filmu. Na obr. 20 až 23 je zachyceno i rozmezí viditelnosti palivové skvrny. V počáteční fázi dráhy je skvrna skryta v palivových parách.

Podle [12] dosahuje množství paliva zachyceného na stěně až 40 % celkové vstřikované dávky. Ulpívání paliva na stěně spalovacího prostoru způsobuje větší zmenšení povrchu odpařovaného paliva a tím se opozdí proces vytváření zápané směsi. Navíc dochází ke změně parametrů palivového filmu. Nutno ještě dodat, že množství paliva ulpělého na stěně a rozvoj filmu paliva je závislý na otáčkách motoru. Obvykle to bývá tak, že s poklesem otáček paliva na stěně ulpívá méně.

Zjednodušený výpočet k posouzení výsledků prováděných Flatzem vychází z úvahy pro nejméně těkavou složku paliva

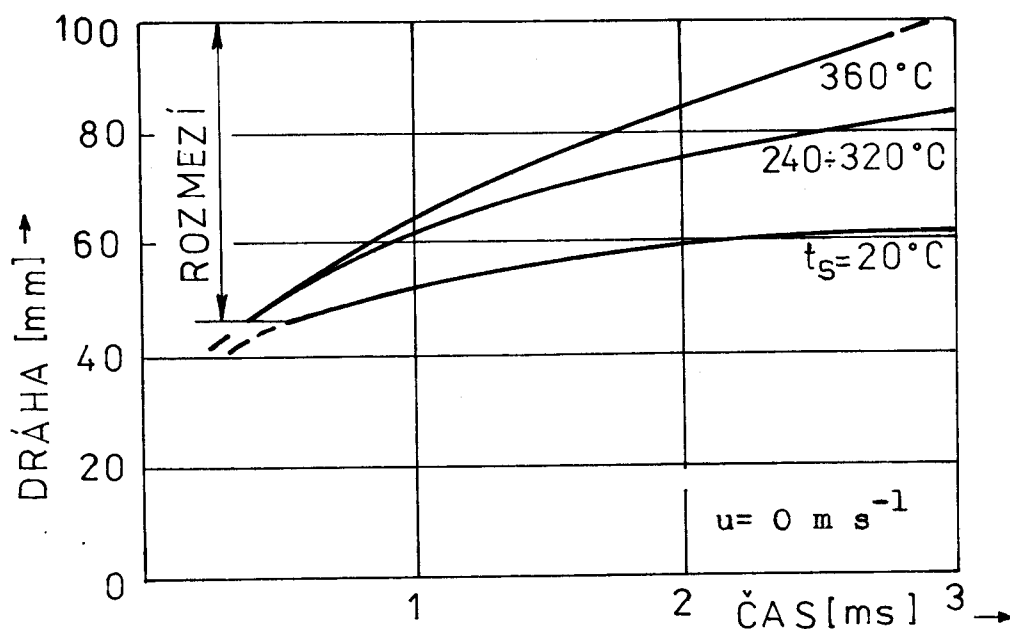


Obr. 20 Tangenciální vstřikování souhlasné se směrem víření

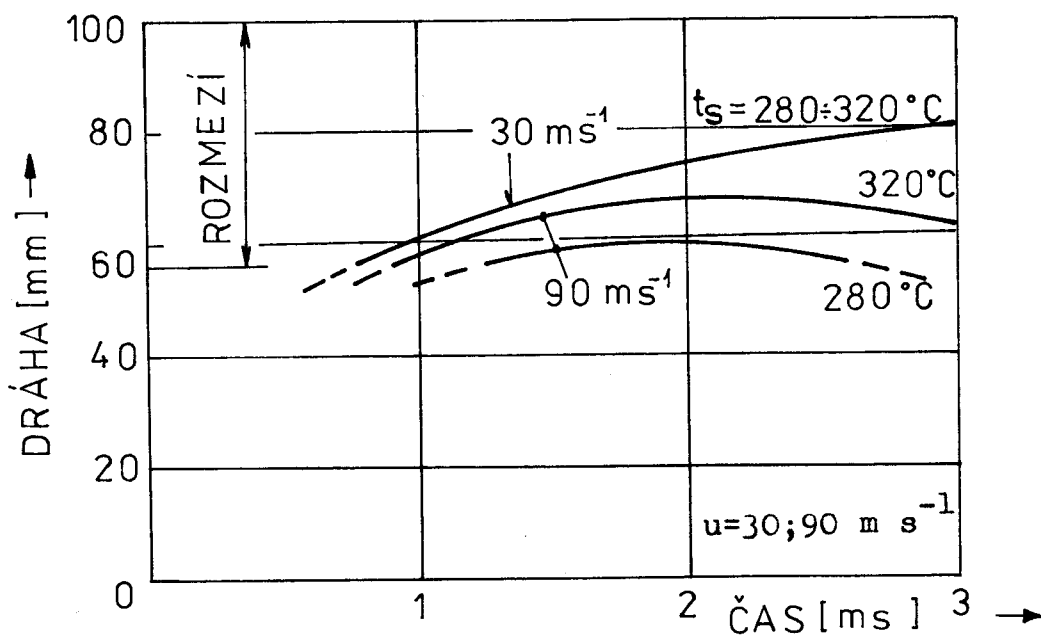


Obr. 21 Tangenciální vstřikování souhlasné se směrem víření

Obr. 20, 21 Dráha paprsku na obvodu komůrky v závislosti na čase při tangenciálním vstřikování pro různé teploty stěn; dle MTZ 1/1965



Obr. 23 Tangenciální vstřikování bez víření



Obr. 22 Tangenciální vstřikování proti směru víření

Obr. 22 a 23 Dráha paprsku na obvodu komůrky v závislosti na čase při tg. vstřikování pro různé teploty stěn; dle MTZ 1/1965

za předpokladu splnění stavové rovnice pro jednotlivou složku  $i$  v nejjednodušším tvaru

$$\dot{m}_i = \beta \cdot \rho_i = \beta \cdot \frac{M_i}{RT} \cdot p_i(T_p) \quad (1.1)$$

$\rho_i$  - parciální hustota kapaliny  
 $T_p$  - střední teplota kapaliny  
 $p_i$  - napětí par dané teplotou kapaliny

Velikost palivového filmu lze postihnout vztahem

$$\dot{m}_i = \rho_p \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{S} = \rho_p \cdot \frac{dh}{dt} = \beta \cdot \frac{M_i}{RT} \cdot p_i / T_p \quad (1.2)$$

kde  $\rho_p$  - hustota kapaliny  
 $dV$  - element objemu vypařený za dobu  $dt$  na ploše  $S$   
 $dh$  - výška vypařené vrstvy kapaliny  $dh = \frac{dV}{S}$

Konec vypařování nastane v době, kdy součet všech elementárních výšek  $dh$  bude roven počáteční hodnotě výšky  $h_0$ .

Integrací rovnice (1.2)

$$\rho_p \cdot \frac{h_0}{\Delta t} = \beta \cdot \frac{M_i}{RT} \cdot p_i / T_p \quad (1.3)$$

Tlouška vrstvy  $h_0$  není přímo známa, ale lze jí vyjádřit takto

$$\rho_p \cdot h_0 = \rho_p \cdot \frac{V_i}{S_0} \cdot k = k \cdot \frac{m_i}{S_0} \quad (1.4)$$

kde  $k$  nabývá hodnot 2 - 2,5 pro naftu a nástřík na rovnou ocelovou desku v klidném prostředí. Podle vztahů /1.3/ a /1.4/ je

$$k \cdot \frac{m_i}{S_0 \cdot \Delta t} = \beta \cdot \frac{M_i}{RT} \cdot p_i / T_p \quad (1.5)$$

Zavedením poměrného tlaku nejtěžší složky třeba  $x_{19} p_{19} / T_p$  vznikne ze vztahu (1.5) vztah

$$\Delta t = k \cdot \frac{m_{19}}{S_0} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \frac{RT}{M_{19}} \cdot \frac{1}{x_{19} \cdot p_{19} / T_p} \quad (1.6)$$

Na počátku je molární poměr malý /přibližně 0,1/, ale pak vzrůstá s odpařováním lehkých frakcí a blíží se hodnotě 1. Probíhá-li vypařování kapaliny bez bouřlivého varu, lze uvažovat platnost vztahu /1.6/ za předpokladu, že podmínky při spalování v motoru odpovídají nadkritickým tlakům /1 - 2/MPa a podkritickým teplotám /asi 460°C/.

Chceme-li posoudit jednotlivé činitele vztahu /1.6/ přepřechodu k vyšším parametrům a posoudit čas potřebný na odpaření, lze postupovat takto: dle Prandtlova vztahu je

$$\frac{1}{\beta} = \frac{2}{c_f} \cdot \frac{1}{u}$$

a obecně pro součinitel tečného napětí na stěně platí

$$c_f = \text{konst.} \cdot \text{Re}^n$$

Neuvažujeme-li konstanty, lze psát vztah

$$\frac{1}{\beta} \sim \frac{1}{u \text{Re}^n}$$

a pak pro hustotu a vazkost platí

$$\rho_m \sim \rho_k \cdot T_m^{-1}$$

$$\mu_m \sim T_m^{1/2}$$

pak také platí vztah

$$\frac{1}{\beta} \sim \frac{T_m^{(3/2)n}}{u^{1+n} \rho_k^n}$$

V normálních podmínkách platí pro  $c_f$  /u vyduté stěny/

$$c_f = 0,32 \cdot \text{Re}^{-0,2}, \text{ kde nabývá } n \text{ hodnoty } -0,2$$

Poslední člen výrazu pro dobu odpaření palivového filmu je

$$\frac{RT_m}{M_{19}} \cdot \frac{1}{x_{19} \cdot p_{19} \cdot /T_p/}$$

Závislost tlaku na teplotě, lze postihnout vztahem

$$p_{19} = \text{konst} \cdot \exp \left( - \frac{q_{vyp} \cdot M_{19}}{R T_p} \right)$$

a celý výraz lze zjednodušit



$$K_1 \cdot T_m \cdot \exp \left( + \frac{Kz}{T_p} \right)$$

Tento výraz vysvětluje velmi krátkou dobu po vypařování paliva ze stěny. Střední teplota  $T_m$  vzrůstá, avšak exponenciální vzrůst je pronikavější. Teplota kapaliny také stoupá nad teplotu stěny vlivem intenzivní konvekce a sáláním plameze /jejich poměr vyplývá z výpočtu

$$\begin{array}{ll} q \text{ konvek} & \sim 1710 \ 000 \quad [W \ m^{-2}] \\ q \text{ sálání} & \sim 600 \ 000 \quad [W \ m^{-2}] \end{array} \text{ při teplotě } 1800^\circ C /$$

Doba odpařování je pro  $T_p = 400^\circ C$  /tedy ještě pod kritickou teplotou  $T_k = 550^\circ C$ ,  $p_k = 3 \text{ MPa}$ , a rychlost víření  $u = 90 \text{ m s}^{-1}$  k  $\cdot \frac{m_{19}}{S_0}$  a  $c_f$  stejné jako při pokusech, výsledné  $t = 2 \text{ ms}$ , což odpovídá plně realitě na motorech.

### 5. 3 Hoření směsi

Podobně jako probíhá hoření u klasických vznětových motorů, probíhá i v izolovaném motoru s jistými odlišnostmi spalování, které je částí pracovního oběhu, začíná podnětem k zapálení paliva a pokračuje přechodovým úsekem průtahu vznícení. Během průtahu vznícení dochází vlastně k chemické a fyzikální přípravě paliva pro samotné vznícení, při němž se palivo ohřívá, odpařuje a prochází různými předoxidačními změnami.

Kromě mnoha dílčích vlivů, které působí na průtah vznícení /jako je dokonalost rozprášení paliva, kvalita vstřikovaného paliva/, nejvýznačněji ho ovlivňuje teplota a rychlost odpařování paliva. Rychlost odpařování paliva je ovlivňována tlakem a ve spalovacím prostoru, čím jsou vyšší, tím vyšší je přestup tepla do kapek a rychlost odpařování vzrůstá. Protože se pracovní médium nestačí za krátkou dobu sání výrazněji ohřát /ohřátí náplně je stejné jako u konvenčního motoru/, nedochází ke značné změně doby odpařování rozptýleného paliva. Toto palivo tvoří jen určitou část celkově vstřiknutého paliva do motoru. Zbývající část paliva dopadá na stěnu a dochází k vytvoření souvislého palivového filmu. To pochopitelně ovlivní rychlost a množství odpařeného paliva a zvětšuje se průtah vznícení paliva, které vytvořilo film. Teplota stěny je nižší než teplota plynů ve spalovacím prostoru, přestup tepla k filmu je tedy menší, rychlost odpařování i množství odpařeného paliva se tím zmenší a průtah druhé části vstřiknutého paliva se i proto zvětší. Tím se zmenší množství paliva připravené k prvnímu vznícení, což by ve svém důsledku mělo způsobit, že chod izolovaného/izotermálního/motoru by se měl vyznačovat vyšší měkostí než u klasických motorů s přímým vstřikem/za předpokladu vstřikování části paliva na stěnu spalovacího prostoru/.

## 6. 0 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ DÍLŮ MOTORU A POUŽÍVANÉ MATERIÁLY

Při tepelném a mechanickém namáhání exponovaných částí je nutné vycházet z hodnot maximálního spalovacího tlaku, které se blíží hodnotě 14 MPa a z povrchových teplot izolovaných částí dosahujících 800 - 1100°C. Podstatně zvýšená teplotní úroveň spalovacího prostoru u izolovaného motoru si vyžádala i nekonvenční materiály použité ve stavbě motoru. Konstruování komponentů spolehlivého motoru s keramikou je mnohem obtížnější a nesporně odlišné od konstruování z tvárných materiálů. Předvěpodobnost poškození kovové konstrukce je zcela předpověditelná, kdežto u keramiky poruchu dost dobře odhadnout nemůžeme. Keramické komponenty musí být velmi nízko mechanicky namáhány a proto se musí používat materiálů dobré kvality a vysoké pevnosti. U tepelně izolovaného motoru musí keramický materiál v zásadě splnit tyto požadavky:

- a/ vysokou pevnost, i za vysokých teplot
- b/ dobré izolační vlastnosti
- c/ nízký koeficient tepelné roztažnosti a odlnosti proti tepelným rázům
- d/ nízkou cenu

Sklokeramický materiál LAS /lithium-aluminium-silikát/ tyto požadavky splňuje, ale nemá dostatečnou mechanickou pevnost. Naproti tomu lisovaný nitrid křemíku má zase dobrou pevnost i za vysokých teplot, ale v ostatních vlastnostech trochu zůstává. Avšak přes tyto okolnosti se jeví jako nejvýhodnější materiály na bázi nitridu křemíku nebo karbidu křemíku. Díly zhotovené z křemíkové keramiky na bázi lithia a hliníku jsou sice levné, mají vysokou izolační schopnost a malou tepelnou roztažnost, což vede k jednoduché konstrukci. Bohužel tento materiál dosahuje malé pevnosti a v zásadě v motoru nevyhověl. Žáruvzdorné materiály vysokých mechanických hodnot vykazují i poměrně vysokou tepelnou vodivost, proto se musí při použití izolovat. Podle odborníků firmy Cummins je zatím nejvýhodnější silikon nitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$  za tepla lisovaný. Některé používané materiály společně se svými vlastnostmi jsou uvedeny v tab. V.

Materiál	Součinitel tepelné roz- tažnosti $\frac{1}{K} \cdot 10^{-6}$	tepelná vedivost [KJ/hod m °C]	modul pružnosti E' [MPa]
Nitrid křemíku lisovaný za tepla	2,2	65,4	307 000
slinovaný nitrid křemíku	3,1	60,4	279 000
slinovaný karbid křemíku	4,7	120,2	377 000
křemíková keramika	0,5	7,5	147 000
ocel	12 - 16	55	206 000
litina	10,5	165 - 200	172 000
hliníkové slitiny	20	600	70 000

Tab. V. Některé materiály používané k izolaci motoru.

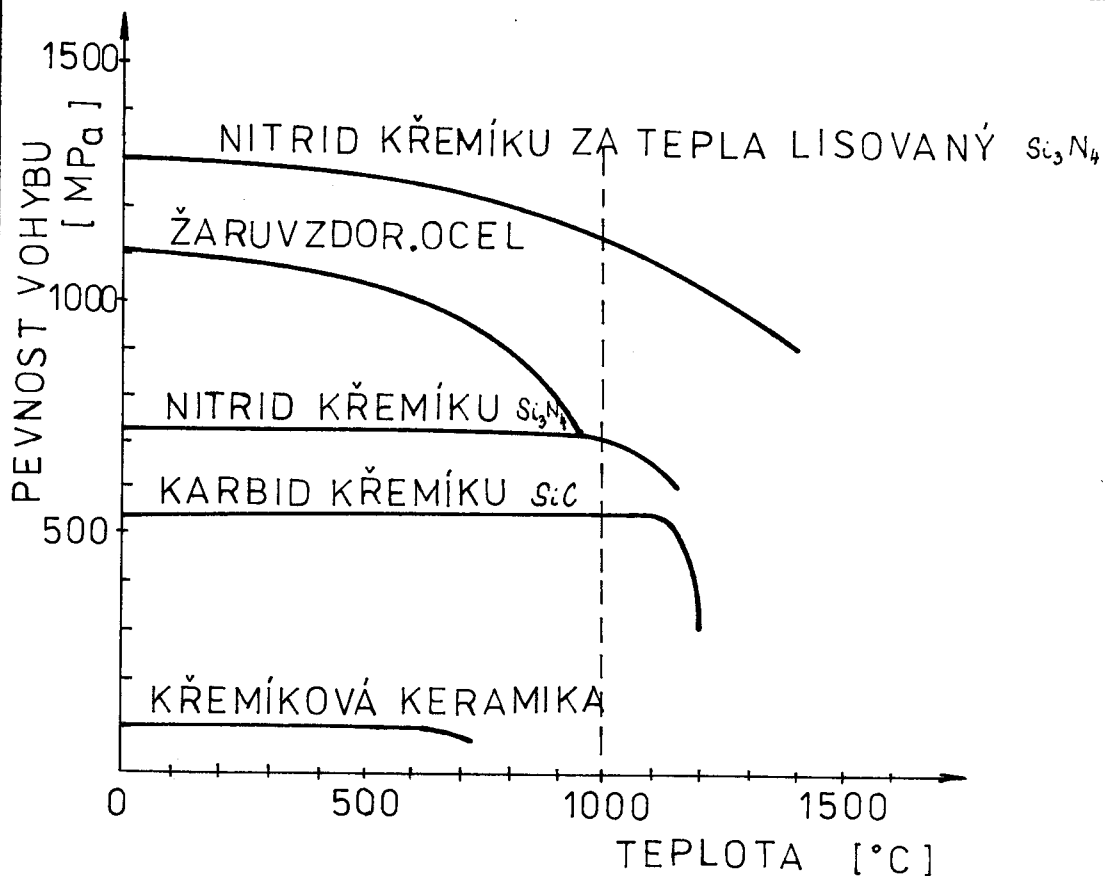
Protože vlastnosti keramických látek se mění v závislosti na teplotě, je nutné uvažovat správnou hodnotu pro namáhání. Změny pevnosti v ohybu s teplotou u keramických materiálů zachycuje obr. 24. Např. u nitridu křemíku za tepla lisovaného dojde ke snížení pevnosti v ohybu při 1000°C zhruba o 140 MPa. Na druhé straně materiál na bázi karbidu křemíku /SiC/ si udrží svou pevnost v ohybu /sice nižší/i po překročení teploty 1000°C. Pevnost v ohybu a další mechanické vlastnosti jsou však také závislé na nehomogenosti materiálu. Všeobecně je známo, že spolehlivost keramických materiálů je silně závislá na mikrotrhlínky, vměstky, pórovitost, které mají negativní dopad a vedou ke snížení mechanických hodnot.

Keramické materiály se používají v izolovaném motoru ve formě samostatných dílů /izolace dna pístu/ nebo ve formě povlaků,

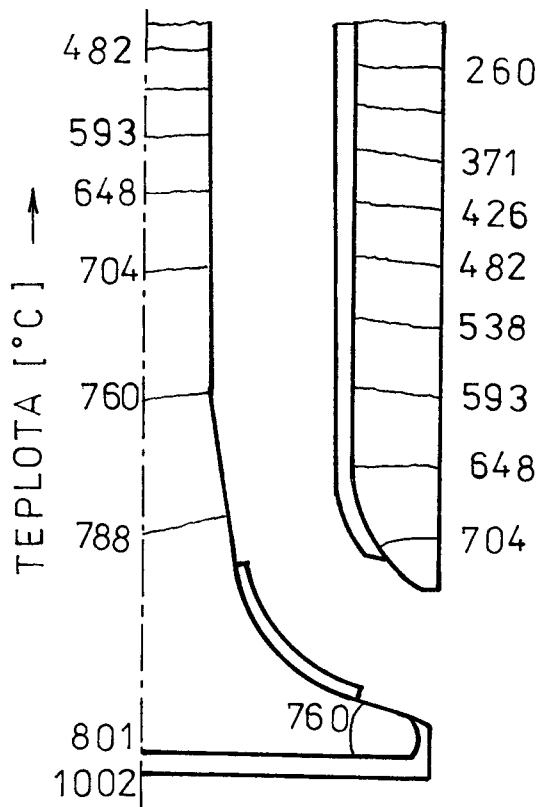
na nanášených přímo na povrch nebo obou způsobů.

Hlavní problémy konstrukce jsou ve zvládnutí míst, kde se stýkají materiály rozdílných tepelných roztažností. Buď zachytávání jejich tepelných deformací, resp. umožnění dilatace. Vážné jsou i nesnáže spojené se soudržností izolovaných vrstev nanášených na kovový podklad, ale i zachování dlouhodobé těsnosti izolovaných spojení. Keramický izolační povlak vytvářený na výfukovém kanále /potrubí/ je nanášen plazmovým nástřikem. Tento nástřik v sobě skrývá jisté potíže. Zejména v rozdílných tepelných roztažnostech obou stýkajících se materiálů, což způsobí vnitřní napjatost v keram. vrstvě. Také soudržnost této vrstvy je snížena s rostoucím počtem nanášených vrstviček. Jistého snížení pnutí se dá docílit nanášením vhodné mezivrstvy, která rozdíl dilatací kompenzuje, ale i správnou technologií. Pomocí keramických nástřiků tloušťky 0,1 mm se dá vytvořit slupka až 5-8 mm silná.

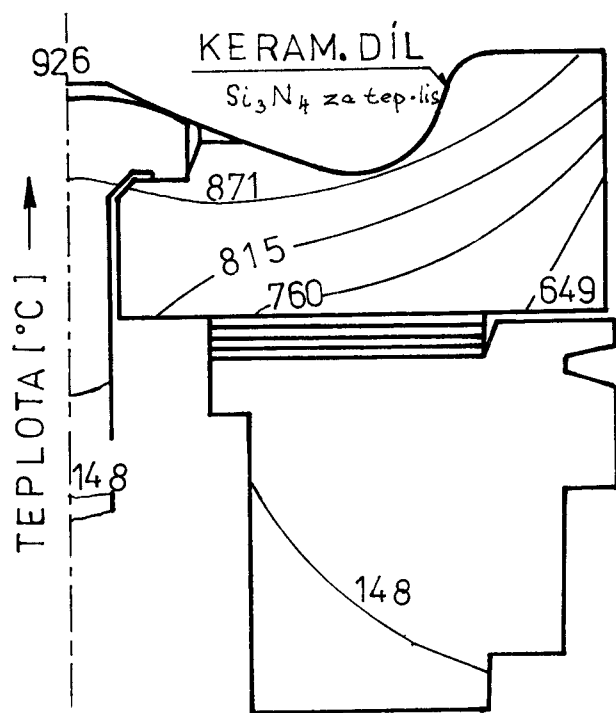
Přehled o teplotním namáhání dílů motoru tvořících povrch spalovacího prostoru nám udávají obr. 26; 27; 25. Z obr. 25 je patrné, že nejvyšší teplota na ventilu dosahuje hodnoty až 1000°C. Také teplota vodící části ventilu je ještě vysoká. Nejinak tomu není ani u dalších částí, které jsou ve styku s hořícími plyny. Vložka válce obr. 26 i když je částečně zakryta pístem v průběhu expanzního zdvihu dosahuje také vysokých teplot. Je zde zachycena izoterma na úrovni 704°C, což pro zachování podmínek mazání je pro nás v současné době těžko představitelné. Koruna pístu sice dosahuje vysokých hodnot obr. 27, ale vodící část pístu se nachází na přijatelné teplotní úrovni. Bylo toho dosaženo dobrou konstrukcí s oddělenou korunou pístu.



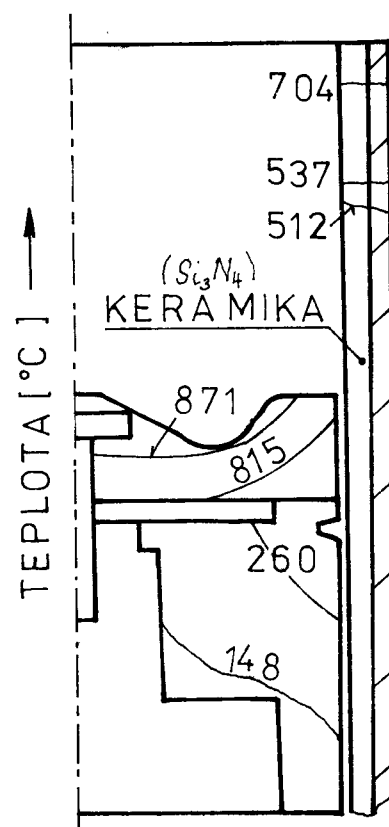
Obr. 24 Závislost pevnosti v ohybu na teplotě; dle [1]



Obr.25 Průběh teplot ve výfukovém ventilu; dle [6]



Obr. 27 Průběh teplot pístu;  
dle [13]



Obr. 26 Teplota válce  
spalov. prostoru;  
dle [13]

7. 0 NÁVRH EXPERIMENTU

Při návrhu experimentu bylo nutno vycházet z keramických materiálů u nás dostupných. Konstrukční změny byly aplikovány na jednoválcový motor naftový 1D90TA /ČKD Napajedla/. Jedná se o dvoudobý motor chlazený vzduchem, stojatý s tříkanálovým rozvodem a přímým vstřikem paliva.

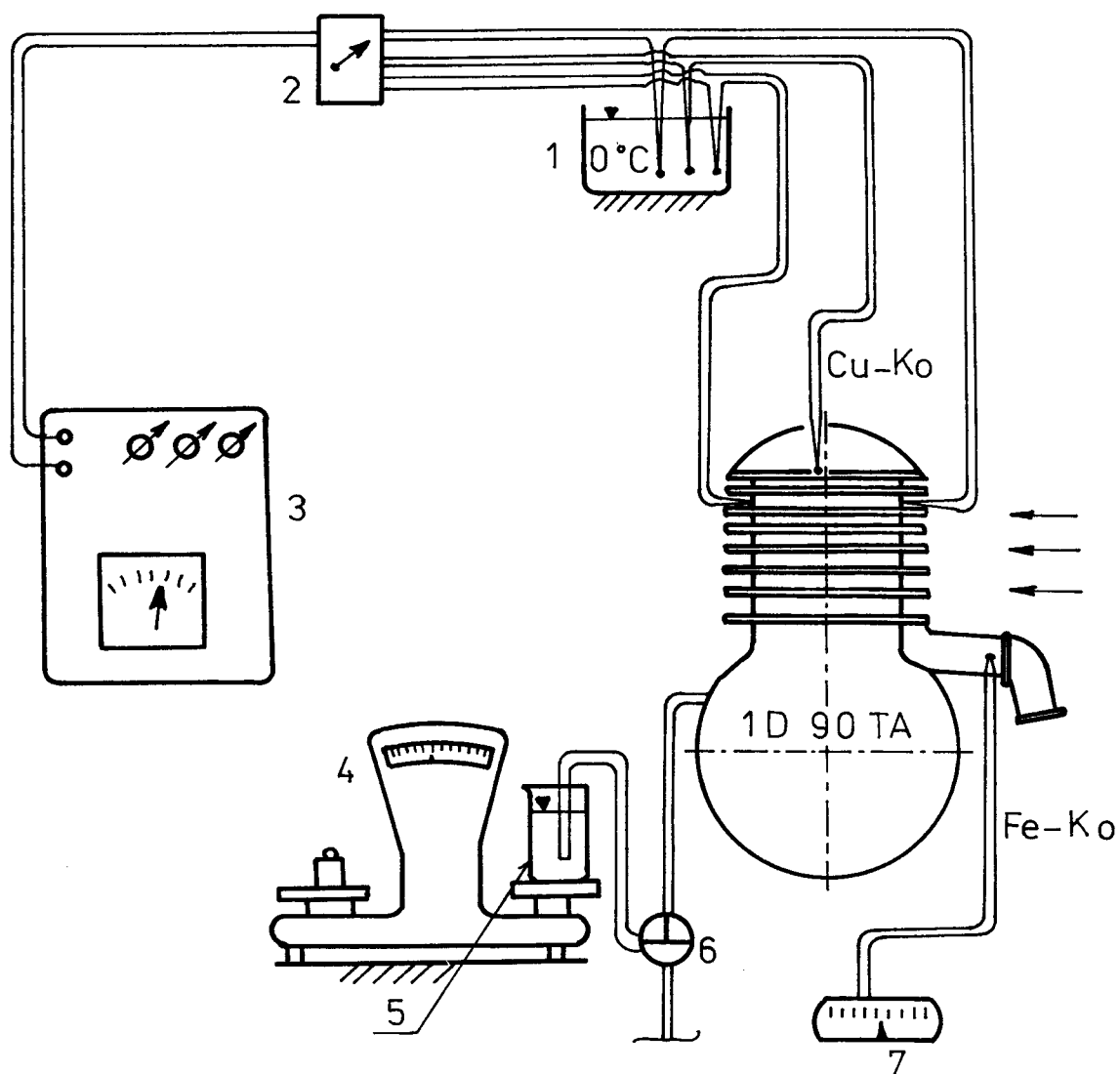
Základní technické parametry motoru	1D90TA
jmenovité otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	2200
jmenovitý výkon $P_j$ [kW]	8,45
vrtání válce [mm]	90
zdvih pístu [mm]	104
obsah válce motoru [ $\text{cm}^3$ ]	660
kompresní poměr /po uzavření výfuk. kanálu/	$15^{+0,5}$
střední pístová rychlost [ $\text{m s}^{-1}$ ]	7,4
kompresní tlak [MPa]	4
spalovací tlak [MPa]	6,5
volnoběžné otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]	700-900

Motor byl instalován ve zkušebně KSD VŠST v Liberci. Cílem připraveného experimentu bylo zjistit, jak se projeví provedené konstrukční úpravy na teplotní úrovni spalovacího prostoru. Z toho důvodu byl zabudován do chladicího pláště hlavy válce jeden termočlánek /vedle vstřikovací trysky/. Do vložky válce byly instalovány dva termočlánky, na stranu vložky válce, kde nabíhá proud chladicího vzduchu, jeden a druhý na odtokovou stranu, vždy mezi první a druhé žebro válce. Teplotu bylo nutno snímat na vzdálenosti dvou až tří mm od povrchu spalovacího prostoru. V těchto místech by měla být už amplituda kmitání teploty malá a teplotní hladina ustálená.

Měřicí stanoviště se skládalo z motoru připojeného k elektrickému dynamometru MS 22/8-4, termočlánků pro měření teplot, vah, odměrného válce pro měření spotřeby paliva, přepínače a QTK místku. Schéma uspořádání je obr. 28.

Protože velkou část spalovacího prostoru tvoří povrch pístu, byla věnována pozornost právě jemu. Píst konvenčního motoru z ČKD Napajedla má takřka rovné dno /motor má spalova-





- 1 - termoska s vodou a ledem
- 2 - přepínač
- 3 - QTK můstek
- 4 - váhy
- 5 - odměrný válec
- 6 - dvoucestný ventil
- 7 - teploměr výfuku

Obr. 28 Schéma měřicího stanoviště

cí prostor v hlavě/ a tudíž úpravy nevyžadují velkou náročnost na provedení. Byly navrženy dvě varianty úprav dna pístu, abychom se co možná nejvíce přiblížili k adiabatickému motoru a pak i k izolovanému /izotermálnímu/.

V prvním případě, tj. k dosažení adiabatických podmínek práce, je dno opatřeno planžetkou, která je ze žáruvzdorného materiálu. Tloušťkaté planžetky se volila 0,3 mm z důvodu malé tepelné setrvačnosti. Planžetka chrání dno pístu před čelem plamene a zamezuje přestupu tepla. Protože vůle v horní úvrati je malá /0,5 - 1 mm/, bylo nutno snížit výšku pístu o 1 mm, ale co možná zachovat kompresní poměr, abychom neovlivnili výsledky měření. Pro malou tepelnou setrvačnost planžetky se předpokládalo, že její teplota se bude více přizpůsobovat teplotě pracovního média a dosáhne se přiblížení k adiabatickým podmínkám. Mezi planžetkou a vlastním dnem pístu je nutná mezera, asi 0,5 mm, která také přispívá k omezení přestupu tepla. Mezer je z části udržována výstupky na planžetce, aby jí narůstání tlaku nepřihnulo k samotnému pístu. Tato mezera je navíc i částečně profukována vzduchem z vyplachovacího kanálu a tím se částečně ochlazuje. Planžetka je držena centrálním šroubem M8 uloženým pružně.

V druhém konstrukčním návrhu jsme se chtěli přiblížit izolovanému motoru. Píst je opatřen vrchní izolační částí pro omezení přestupu tepla. Izolační materiál v podobě křemenného skla se jevil jako nejvýhodnější k těmto účelům / $\text{Si}_3\text{N}_4$  se vyrábí v ČSSR pouze zkušebně/. Zkoušeli jsme jiný materiál např. korund /99 %ní  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /. Korund jsme podrobili tepelnému šoku a ten ztratil svou pevnost úplně /po zkoušce se drolil/. Křemenné sklo má vysokou odolnost vůči vysokým teplotám. Snese rozpálení až do červeného žáru a tak by spolehlivě mělo vydržet námi předpokládanou teplotu  $1200^\circ\text{C}$  /jedná se o dvoudobý motor/. Navíc dobře snáší časté střídání teplot. Ale má i své nevýhody v podobě malé pevnosti v ohybu 70 - 100 MPa /závislé na teplotě/. Za vysoké teploty pod vlivem působení mastných nebo halových prvků dochází k odskelnění povrchové vrstvy.

Destička tloušťky 5,5 mm vytvářela povrch spalovacího prostoru. Výšku pístu bylo nutno snížit tedy o 5,5 mm, a nezměnit tak kompresní poměr. Destička byla opět držena centrálním šroubem s pružným uložením, aby spojení obou dílů bylo částečně poddajné. V obou případech byly průměry destičky i planžetky 89 mm. Pro motor izolovaný keramikou byla navržena i konstrukční změna hlavy, abychom i zde se pokusili o snížení tepelných ztrát. V hlavě byla vysoustružena prohlubeň do hloubky 5,5 mm,  $\varnothing$  96. Křemenná destička je držena ocelovým kroužkem, který velice těsně zapadá do vysoustruženého otvoru. Křemenná destička v podobě mezikruží tvoří část povrchu spalovacího prostoru. Konstrukční změny jsou na přiložených výkresech. Pak s takto upravenými písty změřit charakteristiku motoru 1D90TA a nejvíce sledované parametry u motorů, jako je měrná spotřeba, teplota výfuku a teplota stěny spalovacího prostoru. Výsledkem by bylo porovnání hodnot změřených na motoru s původním pístem s hodnotami změřenými na témže motoru s provedenými úpravami. V průběhu příprav motoru k měření došlo při chodu v původním, ještě neupraveném provedení k vážnému poškození motoru /zadržení pístu/. Vzhledem k tomu, že nebyly k dispozici potřebné náhradní díly na opravu a s ohledem na větší časovou náročnost vlastní opravy a nové přípravy motoru k měření, bylo od realizace praktického ověření navržených úprav upuštěno.

## 8. 0 ZÁVĚR

Klíč k budoucnosti vznětového motoru leží v nalezení správného technického řešení ke snížení jeho škodlivých emisí ve výfukových plynech a ve větším využití přivedeného tepla. Tepelně izolované motory s využitím energie výfukových plynů, eventuelně s dalším snížením třecích ztrát, mohou znamenat, pokud se podaří dovést výzkum a vývoj do úspěšného konce, vrchol techniky a technologie pístových spalovacích motorů před jejich nahrazením jiným typem zdroje mechanické energie. I když spojování spalovacích motorů s turbínou není úplnou revolucí v kon-

strukci stávajících pohonných jednotek, jistého přínosu se dosahuje. Docílení ještě vyšší tepelné účinnosti znamená dokonalejší využití převedeného tepla a zvýšení ekonomičnosti provozu. Lepších ekonomických parametrů se dosahuje za cenu větší složitosti a komplikovanosti soustrojí. Přestože už byly postaveny a zkoušeny funkční vzorky motorů, větší rozšíření je zatím omezeno výběrem keramických materiálů pro tyto účely. Zejména v oblasti zvyšování pevnosti v ohybu u keramických materiálů jsou značné rezervy.

Funkční vzorky dosahují zatím životnosti 250 hodin, ale v 90. letech se předpokládá dosažení hranice až 15 000 hodin.

Už pouhým spojením vozidlového motoru Cummins s plynovou turbínou bylo dosaženo přírůstku výkonu o 17 % a růstu točivého momentu o 14 %, zejména v oblasti nižších otáček. Výhodnější rozložení točivého momentu v oblasti nízkých otáček dovoluje příznivější využití motoru. Motor se také vyznačuje velmi pružným provozem mezi 1600-1800 min<sup>-1</sup> /maximální otáčky 1900 min<sup>-1</sup>/. Zkoušky s takto upraveným motorem ukázaly další přednosti, zejména tepelná účinnost dosáhla hodnoty 48 %. Po ujetí 80 000 km v silničním provozu nebyly shledány vážnější poruchy v převodovém mechanismu turbíny.

Pro tepelně izolovaný motor s připojenou turbínou jsou výsledky ještě příznivější, vzrostl výkon až o 37 % a minimální specifická spotřeba dosáhla hranice 172 gkWh<sup>-1</sup>. Také hmotnost této pohonné jednotky se snížila použitím keramických materiálů o 22 % v porovnání s původním provedením motoru. V oblasti škodlivých emisí /NO<sub>x</sub> + HC/ zůstaly hodnoty na stejných úrovních. Ekonomický přínos takto upravených motorů je značný.

Předpokládejme, že z nové produkce u nás vyrobených motorů jich bude 1000 vybaveno připojenou turbínou. Předpokládejme také využitelnost maximálního výkonu motoru zhruba 40 %, t.j. v průměru 60 kW a roční počet provozních hodin u jednoho motoru 1500 hodin. Úspora paliva na jednom motoru s připojenou turbínou činí v průměru 20 gkWh<sup>-1</sup>, což pak představuje roční úsporu paliva 2000 litrů.

V případě, že by za stejných předpokladů jezdili i tepelně izolované motory /1000 kusů s připojenou turbínou, 1500 hod. provozu/ dosáhlo by se úspory  $40 \text{ gkWh}^{-1}$  na jednom motoru, což pak celkově představuje roční úsporu paliva 4300 litrů. Zanedbatelná není ani možnost různopalivového provozu a snížená hlučnost takto upravených motorů o 1, místy až o 2 dB. Jedná se pouze o hrubý odhad a proto je potřeba brát vypočtené hodnoty s rezervou. Údaje nemusí zcela odpovídat skutečnosti a proto je potřeba tak pohlížet na celkový výsledek.

Ale určité možnosti ve zdokonalování vznětových motorů stále jsou jak to i dokládá uvedená studie.

Na závěr diplomové práce bych rád poděkoval s. Ing. Stanislavu Berounovi a Ing. Miroslavu Hrušovi za pomoc, kterou mi poskytli při řešení a zpracování dipl. práce.

LITERATURA

1. BOČEK, J. : Tepelně izolované motory, sborník Motor progres 82, ČSVTS Ústí n.L., 1982
2. ELSBETT, L.: Entwicklung eines Dieselmotors mit Wärmedichterem Verbrennungsraum. MTZ 3/1981
3. ENENKL, V., CHRASTINA, J.: Termomechanika, 1.vydání Brno 1970
4. FLATZ, W.: Das Verdampfen von Dieselkraftstoff an der Wand. MTZ 1/1965
5. HOHENBERG, G.: Berechnung des gegenseitigen Wärmeüberganges in Dieselmotoren. MTZ 7/1980
6. KAMO, R., BRYZIK, W.: Adiabatic turbocompound engine performance prediction. Congress and exposition, Techn.Paper SAE, SER.780 068 Detroit 1978
7. KOVÁŘ, Z.: Podmínky spalování paliva na stěně spal.prostoru, VŠST 1968
8. KOŽOUŠEK, J.: Teorie spalovacích motorů , 3.vydání, SNTL Praha 1971
9. KOŽOUŠEK, J.: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I. SNTL Praha 1978
10. TAMURA, Z., TANASAVA, Y.: Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface. Seventh symposium on combustion. Butter worth, London 1959

11. WALLACE, F.J., WAY, R.J.B., VOLLMERT, H.: Effect of partial suppression of heat loss to coolant on the high output diesel engine cycle University of Bath. SAE/SP-79/449 / § 02.50. SAE 1979.
12. ZABLOCKI, M.: Vtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokeprežnych. Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa 1976.
13. : An update on turbocompound an adiabatic engine programs, Diesel Progress North American 7/1981
14. : Automobil, 1982 č. 2, str. 35-36
15. : Old dog diesel must learn new tricks, Commercial Motor w/e, 5/ 1981.
16. : The latest on organic Rankine bottoming cycles. Diesel x gas turbine progress. /fotokopie článku /

2

3

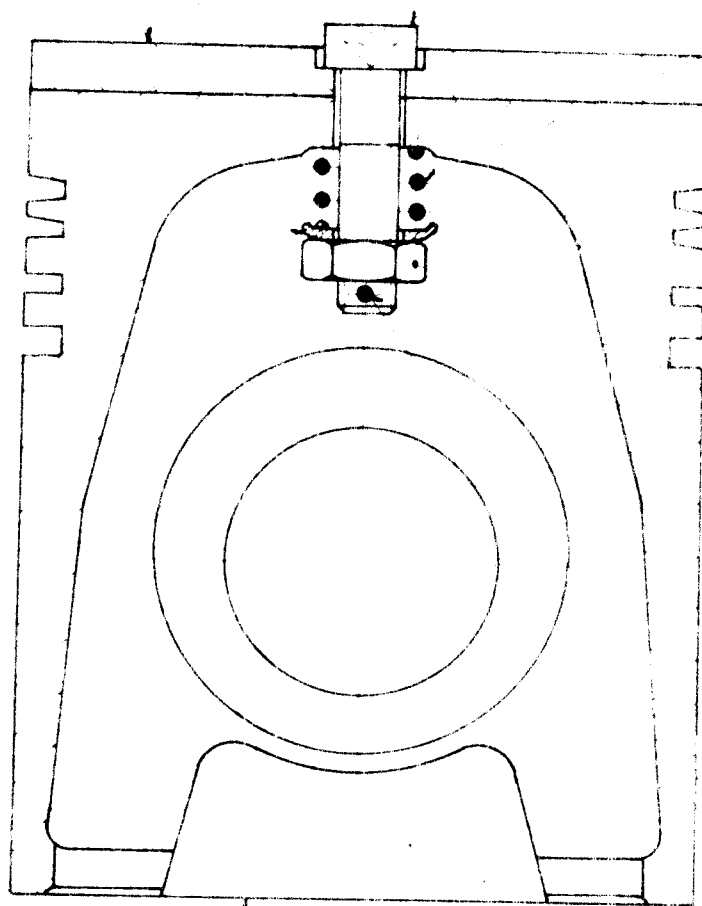
4

7

5

6

1





1	OPĚRKA 2.15		115		7
1	ZAVLÁČKA 2.15	ČSN 02 1781			6
1	IMSTICE MB. 1	ČSN 2 14 3			5
1	PRUŽINA 32 140	ČSN 4 2 540 1			4
1	ROHR MB. 1	ČSN 12 1781			3
1	KERAMICKÉ DESTIVA		400		2
1	PÍST 390	ČSN 1781	420 35 85		1

Henderson

1:1

27. 1. 1965

VŠST  
LIBEREC PÍST

3

KSD-038-1.03

1	OPĚRKA $\phi$ 18		11 500		001				7
1	ZÁVLAČKA 2x15	ČSN02 1781							6
1	MATICE M8x1	ČSN02 1403							5
1	PRUŽINA $\phi$ 2 - 140	ČSN42 6403,31							4
1	ŠROUB M8 - 32	ČSN02 1143,50							3
1	KERAMIC. DESTIČKA <sup><math>\phi</math> 89</sup>		KORUND						2
1	PÍST $\phi$ 90	ODLITEK	424336.53		822 0,85				1

Hanousek

1:1

27.5.1983

VŠST

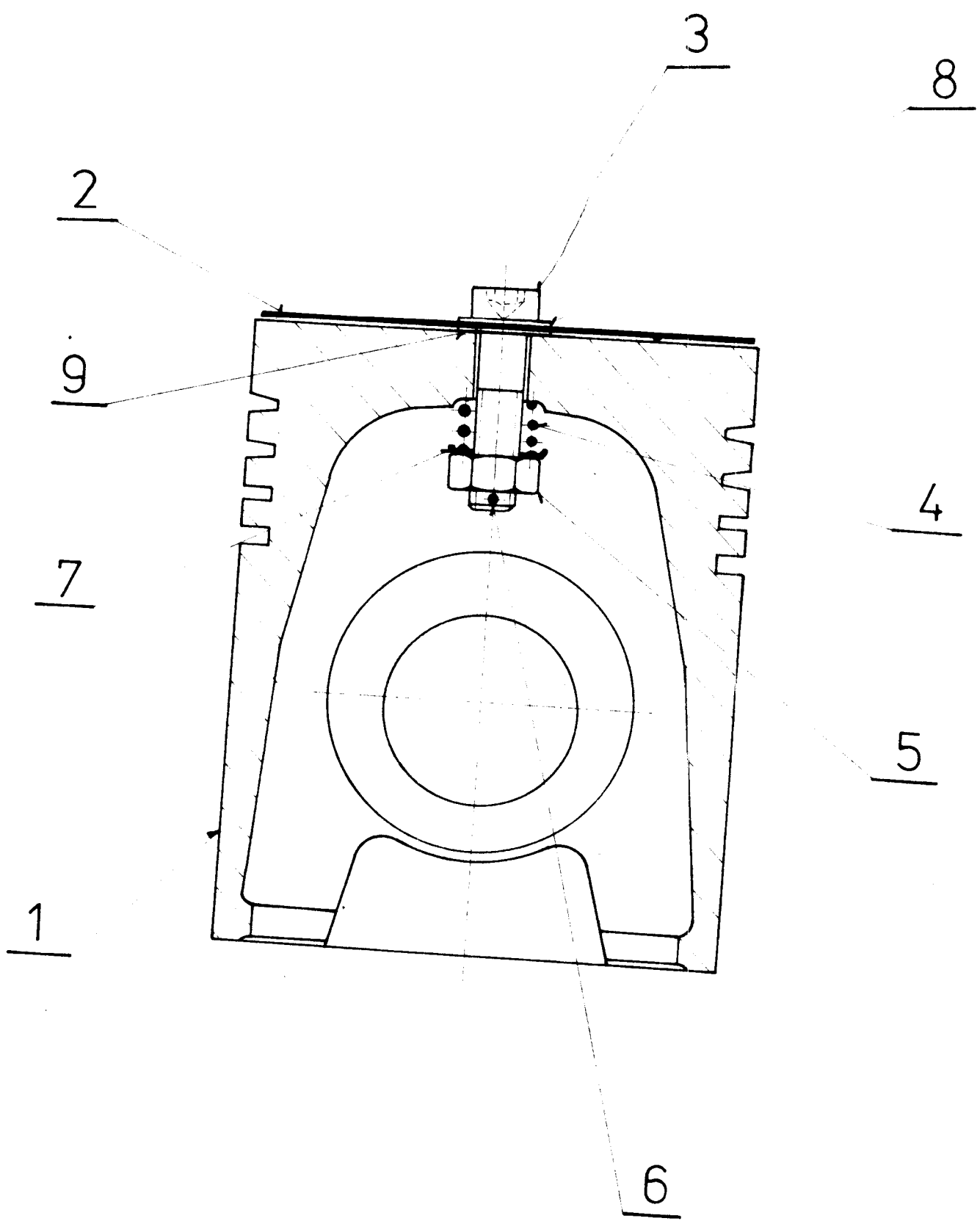
LIBEREC

PÍST

3

KSD-038-1.03

3



1	PODLOŽKA $\phi$ 18-05		11 500		001				9
1	PODLOŽKA $\phi$ 18-1		17 255		032				8
1	OPĚRKA $\phi$ 18		11 500		001				7
1	ZÁVLAČKA 2x15	ČSN 021781							6
1	MATICE M8x1	ČSN 021403							5
1	PRUŽINA $\phi$ 2-140	ČSN 4264 0331							4
1	ŠROUB M8-35	ČSN 021143.50							3
1	PLANŽETKA $\phi$ 89-0,3		17 255		032				2
1	PÍST $\phi$ 90	ODLITEK	4 243 36,53			822	0,86		1

Hanousek

1:1

24.5. 1983

VŠST

LIBEREC

PÍST

3

KSD-038-1.03

2