

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: tepelné techniky

Fakulta: strojní

Školní rok: 1973/74

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Františka Petra

obor stavba výrobních strojů a zařízení

Protože jste splnil... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic Ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Odvod tepla stěnami válců vznětového rychloběžného motoru a jeho zahrnutí do výpočtů uvolňování tepla ve válci motoru.

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši.
2. Proveďte kritické posouzení metodiky výpočtů odvodu tepla stěnami válců používané na VZM při zpracování změřených indikátorových diagramů.
3. Porovnejte zmíněnou metodu s výpočtem odvodu tepla stěnami válce podle empirického vztahu, doporučeného v odborné literatuře.
4. Podle výsledků řešení z předcházejících bodů vypracujte, příp. odzkoušejte návrh metodiky pro zahrnutí odvodu tepla stěnami válců do výpočtu uvolňování tepla ve válci motoru podle změřeného indikátorového diagramu, při čemž v maximální míře respektujte poměry na zkoumaném motoru (zejména přesné změření průběhu kompresního tlaku a jeho užití při výpočtu).

Autorské právo se řídí ustanovení MŠK pro ústřední závěrečné zkoušky č. 131/1973-1974/2 ze dne 13. května 1962 a ustávně MŠK VIII. sešit 24 ze dne 31. 8. 1962 § 19 autoritativní zákon č. 115/53

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

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 stran

Seznam odborné literatury:

1. Referativnyj žurnal, r.1968-1973
2. Košťál-Suk: Pístové spalovací motory, ČSAV 1963
3. Kožoušek: Teorie spalovacích motorů, SNTL 1971
4. Beroun: Spalovací proces vznětového rychloběžného motoru s částečně připravenou směsí, záv.zpráva LFS 90/1 VŠOT
5. Woschni G.: Beitrag zum Problem des Wärmeüberganges im Verbrennungsmotor, MTZ 4/1965
6. Woschni G.: Untersuchungen zum Wärmeübergang in Verbrennungsmotor, Internal combustion engines conference Bucharest 1967, Editura tehnica

Vedoucí diplomové práce: Ing.Stanislav Beroun CSc

Konsultanti: Ing.Stanislav Beroun CSc

Ing. Jan Mojžíš

Datum zahájení diplomové práce: 15.října 1973

Datum odevzdání diplomové práce: 31.května 1974



.....
Vedoucí katedry

.....
Děkan

VŠST Liberec

katedra tepelné
techniky

Fakulta strojní

DP-VS-89/74

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Odved tepla stěnami válců vznětového
rychloběžného motoru a jeho zahrnutí
do výpočtů uvolňování tepla ve válci
motoru

květen 1974

František Petr

Obsah

	str.
1.0 Úvod.....	6
2.0 Empirické vztahy užívané k výpočtu tepla odvedeného stěnami válce.....	10
2.1 Součinitel přestupu tepla a jeho význam ve výpočtu.....	10
2.2 Součinitel přestupu uváděné v technické literatuře.....	13
2.3 Skutečný stav poznatků.....	15
2.4 Stanovení součinitele přestupu tepla na základě teorie podobnosti.....	19
2.5 Shrnutí výsledků.....	26
2.6 Závěr literárního zpracování.....	37
3.0 Zahrnutí tepla odvedeného stěnami spalovacího prostoru do výpočtu celkově uvolněného tepla metodou navrženou VZM.....	52
3.1 Měřicí aparatura a způsob měření průběhu tlaku ve válci na VZM.....	53
3.2 Zahrnutí tepla odvedeného stěnou do výpočtu celkově uvolněného tepla.....	56
3.3 Blokové schéma pro výpočet celkově uvolněného tepla na číslicové počítači MINSK 22 metodou VZM.....	60
3.4 Vyhodnocení výsledků.....	62

4.0	Zahrnutí tepla odvedeného stěnami válce do výpočtu celkově uvolněného tepla pomocí empirického vztahu.....	69
4.1	Zahrnutí tepla odvedeného stěnami do výpočtu celkově uvolněného tepla.....	70
4.2	Blokové schéma pro výpočet celkově uvolněného tepla na počítači MINSK 22 /použitím emp.vztahu/.....	72
4.3	Rozbor a porovnání výsledků získaných na číslicovém počítači.....	74
5.0	Závěr	81

Použité symboly, označení a jejich rozměry

- α součinitel přestupu tepla $/W m^{-2} deg^{-1}/$ resp.
 $/kcal h^{-1} m^{-2} deg^{-1}/$
- b barometrický tlak $/N m^{-2}/$
- $c_{v\varphi}$ měrné teplo při stálém objemu v úseku $\varphi /Jkg^{-1} deg^{-1}/$
- $c_{p\varphi}$ měrné teplo při stálém tlaku v úseku $\varphi /Jkg^{-1} deg^{-1}/$
- c_s střední pístová rychlost $/m sec^{-1}/$
- c_m střední rychlost proudění plynů $/m sec^{-1}/$
- D průměr /vrtání/ válce $/m/$
- $F_{s\varphi}$ styčná plocha náplně válce se stěnami spal.prostoru
v úseku $\varphi /m^2/$
- $HÚ$ horní úvrať
- κ adiabatický exponent
- l délka ojnice $/m/$
- μ dynamická viskozita $/Ns m^{-2}/$
- M_v hmotnost vzduchové náplně válce $/kg/$
- Nu Nusseltovo číslo
- n otáčky motoru $/l min^{-1}/$
- ν kinematická viskozita $/m^2 s^{-1}/$
- P tlak ve válci motoru $/Nm^{-2}/$ resp. $/kp cm^{-2}/$
- P_e střední efektivní tlak $/kp cm^{-2}/$
- P_i střední indikovaný tlak $/kp cm^{-2}/$
- P_s tlak v sání motoru $/kp m^{-2}/$
- $P_r, P_{r\varphi}$ tlak náplně válce v hraničních bodech úseku φ
 $/Nm^{-2}/$ resp. $/kp cm^{-2}/$
- Q_{φ} teplo potřebné ke zvýšení vnitřní energie
a vykonání práce v daném kroku $/J/$ resp $/cal/$
- $Q_{st\varphi}$ ztráta tepla odvodem stěnami v úseku $\varphi /J/$
resp $/cal/$
- $Q_{sk\varphi}$ skutečně uvolněné teplo v daném kroku $/J/$ resp $/cal/$
- r poloměr zalomení kliky $/m/$

- R měrná plynová konstanta $/\text{Jkg}^{-1}\text{deg}^{-1}/$
- R_e Reynoldsovo číslo, charakterizující rozptředění
směsi ve válci
- t_0 teplota nasávaného vzduchu $/^\circ\text{C}/$
- T_0 střední teplota stěn spalovacího prostoru $/^\circ\text{K}/$
- $T_{\varphi}^N, T_{\varphi+\varphi}^N$ teplota náplně válce v krajních bodech úseku $/^\circ\text{K}/$
- $T_{\varphi}^K, T_{\varphi+\varphi}^K$ teplota náplně válce v úseku φ při čisté kompresi
- expanzi $/^\circ\text{K}/$
- φ vlhkost vzduchu $/\%/$
- U_{φ} vnitřní energie náplně válce v bodě φ $/\text{J}/$
- V_{φ} měrný objem náplně při pootočení kliky v bodě φ
 $/\text{m}^3\text{kg}^{-1}/$
- V_k objem kompresního prostoru $/\text{m}^3/$
- V_Z celkový zdvihový objem válce $/\text{m}^3/$
- φ úsek indikátorového diagramu, krok výpočtu $/1^\circ/$
- η objemová účinnost $/\%/$
- γ tlak nasycených vodních par $/\text{Nm}^{-2}/$
- Z zdvih pístu $/\text{m}/$

Pozn.:

Rozměry použitých veličin jsou uvedeny v hlavních jednotkách soustavy SI, některé veličiny, zejména pak grafické zpracování výsledků, jsou pro snazší orientaci a srovnání s dosud obvykle používanými jednotkami uvedeny i v násobných vedlejších jednotkách, podle ČSN 01 1300, ČSN 01 1312 a ČSN 01 1303.

1.0 Ú v o d

Řešení problému tepla odvedeného stěnami válců vystupuje do popředí zejména při podrobném studiu spalovacího procesu. Podrobíme-li analýze např. průběh odvedeného tepla stěnami válce, případně uvolněného tepla spalováním paliva v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele, lze poměrně velmi přesně sledovat změny, které během spalovacího procesu probíhají.

Dále nám zkoumání problému odvodu tepla stěnami spalovacího prostoru napsává při řešení některých konstrukčních problémů. Okamžité teploty ve válci vznětového motoru dosahují hodnot přes 2000°C . Tyto značně vysoké teploty mají vliv na celkovou tepelnou bilanci motoru a rovněž na jeho konstrukční řešení. Důsledkem může být např. porušení potřebného olejového filmu na kluzkých plochách, což vede zpravidla k poruchám. Proto je nutné s těchto a mnoha jiných důvodů provádět intenzivní chlazení válců, hlavy motoru, případně i dalších částí, které přímo nebo nepřímo přicházejí do styku s oblastmi, v nichž probíhá spalovací proces. Za takové součásti lze považovat např. ventily, výfukové potrubí a další. Snížením nebo úplným odstraněním těchto vlivů můžeme dosáhnout jednak zvýšení provozní spolehlivosti a rovněž prodloužení životnosti motoru.

VŠST Liberec	Odvod tepla stěnami válců spalovacího motoru	Katedra tepelné techniky
Fakulta strojní		DP-VS-89/74 list 83

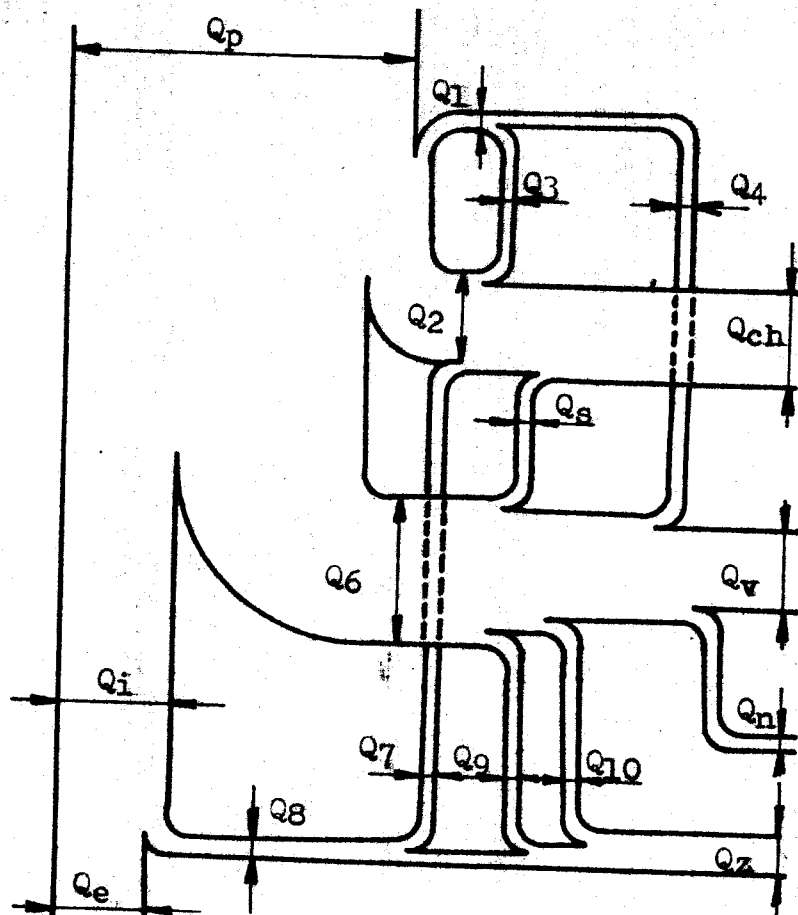
Vlastní úsudek o podíle jednotlivých tepelných složek v pracovním procesu spalovacího motoru umožňuje diagram tepelné bilance /obr. 1-1/. V této souvislosti je vhodné si povšimnout složky Q_2 , která zahrnuje teplo odvedené stěnami válce. V podstatě celé množství tohoto tepla je odváděno chladičí vodou. Ve vztahu k celkové tepelné bilanci je zřejmé, že tato složka má poměrně velký vliv na celkovou účinnost spalovacího motoru.

Stanovení množství tepla odvedeného stěnami válce, není záležitostí zcela jednoduchou již vzhledem k tomu, že tato otázka souvisí bezprostředně s ději, probíhajícími ve spalovacím prostoru a ty lze přesně velmi obtížně zachytit. Problém odvodu tepla souvisí v podstatě velmi úzce s otázkou řešení rozlohy teplot v okolí spalovacího prostoru, tedy ve válci, hlavě motoru a v pístu. V mnoha případech právě znalost rozložení teplot umožňuje vhodně uspořádat jednak spalovací prostor /např. výfukové kanály/ i blok motoru. Jedná se především o místa s různými tepelnými namáháními a tato problematika je vždy středem pozornosti konstruktéra.

Množství tepla odvedené stěnami spalovacího prostoru je závislé na velikosti teplosměnné plochy /na níž se přestup uskutečňuje/, na rozdílu teplot obou prostředí a dále na součiniteli přestupu tepla. Zjištění teplot i součinitele přestupu tepla se provádí na základě experimentální metody.

Zvláště stanovení vztahu vyjadřujícího průběh součinitele přestupu tepla je poměrně obtížné. V tech-

nické literatuře se můžeme přesvědčit o existenci celé řady empirických vztahů. Množství tepla odvedené stěnami spalovacího prostoru určené dle těchto vztahů vykazuje určité, mnohdy nemalé odchylky. Příčinu této skutečnosti lze vidět především v rozdílnosti metodiky, kterou použili různí autoři při stanovování těchto vztahů.



Obr. 1-1 Diagram tepelné bilance spalovacího motoru
 Q_p - teplo přivedené palivem, Q_i - teplo přeměněné v indikátorový výkon, Q_e - teplo odpovídající užitečnému výkonu, Q_{ch} - teplo odváděné chladičí vodou, Q_v - teplo odvedené výfukovými plyny, Q_n - teplo odcházející v nespáleném palivu, Q_s - zbytkové teplo, Q_1 - teplo potřebné na ohřev vstupního systému, Q_2 - teplo odváděné stěnami válce, Q_3 - teplo předávané vstupnímu systému chladičí vodou, Q_4 - teplo předávané vstupnímu systému výfukovými plyny, Q_5 - teplo předávané chladičí vodě výfukem, Q_6 - teplo odpovídající celkové energii výfukových plynů při jejich výstupu z válce, 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, rozvedových orgánů

VŠST Liberec	Odvod tepla stěnami válců	katedra tepelné techniky
Fakulta strojní	spalovacího motoru	DP-VS-89/78 list 239

2.0. Empirické vztahy užívané k výpočtu tepla odvedeného stěnami válce

2.1. Součinitel přestupu a jeho význam ve výpočtu

Uvedení do problematiky je možné provést na základě vztahů užívaných v oboru tepelné techniky zabývající se přestupem tepla. Jak bylo již v úvodu naznačeno, právě tato záležitost je velmi důležitá v souvislosti s řešením celé řady problémů, vyskytujících se na spalovacím motoru. Z tepelné bilance /obr.1-1/ spalovacího motoru je patrný právě význam otázky odvodu tepla stěnami spalovacího prostoru. Uvážíme-li, že z celkové počtu kalorií, které při plném zatížení motoru přivádíme palivou, se přemění v užitečnou práci asi 20 - 30%, u vysokotlakých naftových asi 28 - 40%. Výfukovými plyny a sáláním se odvádí 28 - 40% a chlazením asi 25 - 40%, 4 - 10% činí ztráty mechanické. Tyto hodnoty jsou průměrné a jsou závislé především na typu motoru, rychloběžnosti zatížení, způsobu chlazení, kvalitě paliva a dalších okolnostech. Chlazením motoru je tedy třeba odvádět asi 600 až 1 500 kcal/kh. Při menším zatížení klesá obvykle počet kalorií zužitkovaných a naopak stoupá podíl odváděný výfukem, chlazením a rovněž ztrátami mechanickými.

Význam a důležitost chlazení vyplývá nejlépe z hodnot, udávajících přibližně množství tepla odváděného u provedených motorů do chladicího prostředí jednotkou plochy za hodinu. Předpokládáme-li pro zjednodušení, že teplo se odvádí stejnoměrně celým vnitřním povrchem pracovního válce odpovídajícím úvrtí pístu, což je proti sku-

VŠST Liberec	Odvod tepla stěnami válců spalovacího motoru	katedra tepelné techniky
Fakulta strojní		DP-VS-89/74 list č. 11

tečností mnohem příznivější, dostáváme tímto výpočtem již u malých čtyřdobých volnoběžných motorů hodnoty prostupu 20 000 - 50 000 kcal/m²/h. U motorů více namáhaných, rychloběžných a dvoudobých stoupá tato hodnota na 150 000 - 300 000 kcal/m² h a u speciálních a letadlových motorů dosahuje 600 000 kcal/m² h i více. Uváděné údaje jsou průměrné z celého oběhu a celého povrchu kompresního i zdvihového prostoru a skutečné hodnoty musí být proto místně i časově ještě vyšší.

Teple, které se odvádí ze žhavého obsahu válce se předává chlazeným stěnám jednak sáláním, jednak vedením a sdílením a to hlavně v oblasti vysokých teplot tj. při vlastním spalování směsi a začátku expanse. Při sacím zdvihu resp. při výměně náplně válce a začátku komprese je naopak obsah válce stěnami ochříván a stěny jsou v těchto okamžicích chlazeny.

Teple vyzařované v jednotce času dokonale černým tělesem je podle Stefan-Boltzmanova zákona vyjádřeno vztahem:

$$Q_{s\dot{e}} = \alpha_{\dot{e}} \cdot F \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad /2.1/$$

kde $\alpha_{\dot{e}}$konstanta sálání absolutně černého tělesa - /4,96 kcal/m²h °K⁴/

Fsálající plocha

Tteplota tělesa

Pro pracovní prostor spalovacích motorů je možno použít uvedeného vztahu, známa-li experimentálně zjištěnou konstantu skutečného sálání mezi hořícími plyny a

stěnou válce. Potom je množství tepla ztraceného sáláním za jednotku času dáno rovnicí:

$$Q_s = \alpha_s \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] \quad /2.2/$$

kde α_s experimentálně zjištěná konstanta sálání
 F sálající plocha
 T_s okamžitá teplota stěny

Většina empirických vztahů však tuto složku ztrát nezahrnuje. Stanovení množství tepla ztraceného vedením a sdílením je poměrně obtížné. Je známo, že součinitel přestupu tepla je závislý mimo jiné na rychlosti proudění vzduchu v okolí stěny a ta je v případě spalovacího motoru celkem těžko zjistitelná. Obsah válce není v klidu, má převážně turbulentní charakter proudění, způsobený jednak rychlostmi v sacích kanálech, jednak pohybem pístu a postupným hořením paliva.

Ztráty lze určit převážně na základě měření. Množství tepla předané v motoru chlazeným stěnám, vedením a sdílením, je dáno rovnicí přestupu tvaru:

$$Q_s = \alpha_v \cdot F \cdot (T_p - T_s) \left[\frac{T_p}{100} \right]^4 \quad /2.3/$$

kde α_v součinitel přestupu tepla
ostatní veličiny shodné jako ve vztahu /2.1/

VŠST Liberec	Odvod tepla stěnami válců spalovacího motoru	Katedra tepelné techniky
Fakulta strojní		DP-VS-89/74 list č. 13

2.2. Součinitelé přestupu uváděné v technické literatuře

Při literárním zpracování jsem vycházel především ze zahraničních pramenů, neboť shrnutí uvedená v naší technické literatuře se nezabývají způsobem, na jehož základě byly jednotlivé vztahy získány, případně na jakých druzích motorů byly prováděny experimenty. Ze zahraniční technické literatury je to především práce, kterou provedl dr.ing.Gerhard Woschni /MZT 4/1965/ a další uvedené v seznamu použité literatury.

Všeobecně lze říci, že je známa celá řada různých vztahů, ^{od} různých autorů, jimiž lze s větší či menší přesností stanovit množství tepla, které přestoupí do stěny válce motoru. Protože získání spolehlivé hodnoty pro různé typy motorů je poměrně obtížné, je nutné tyto hodnoty porovnat a přihlížet přitom na typ motoru a podmínky, za nichž byla měření prováděna,

Jako modela pro obecnější zkoumání bylo z počátku používáno trubky, v níž proudila vzdušina o zcela určitých parametrech, při čemž se předpokládalo, že největší část tepla se uvolňuje konvekcí.

Přestup tepla do stěny, jak bylo zjištěno, závisí především na teplotním spádu, t.zn. na rozdílu teplot mezi oběma prostředími, mezi nimiž přestup tepla probíhá. Zahrnutím vlivu teploty na velikost součinitele přestupu je i v současné době středem zájmu výzkumných prací.

K ujasnění dějů, probíhajících během přestupu tepla v okolí spalovacího prostoru, je nutné si uvědomit, jak již bylo dříve řečeno, že teplo uvolněné spalování se dělí zhruba na tři části. Je to teplo odvedené v podobě