

UDK 621.43.016:621.434.13

Hladilne razmere pri dvotaktnem bencinskem motorju*

RADISLAV PAVLETIČ

Studij toplotnih in tokovnih razmer v motorju z notranjim zgorevanjem na poenostavljenih teoretičnih modelih omogoča analizo in razlago rezultatov iz meritev toplotnih tokov in drugih značilnih veličin motorja v odvisnosti od izdatnosti hlajenja. Preizkusi so potekali na Tomosovem dvotaktnem bencinskem motorju z delovno prostornino 50 cm³.

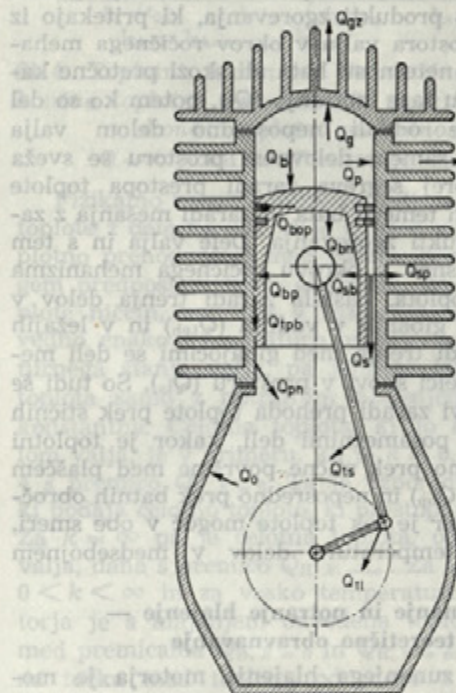
1. Uvod

Toplota prestopa z delovnih plinov na površine, ki omejujejo delovni prostor valja motorja, in segreva njegove dele, katerih temperaturo moramo vzdrževati na določeni višini zaradi trdnosti materialov, zaradi mazanja in obrabe medsebojno gibajočih se delov, kakor tudi zaradi samega delovnega procesa. Vzdrževanje temperature terja segrevanje oziroma hlajenje posameznih delov motorja. Od površin, na katere toplota prestopa, se zaradi prevodnosti materialov, iz katerih so deli izdelani, toplota širi skozi nje in prehaja tudi na druge dele motorja. Prek toplejših površin prehaja toplota z delov na okolico s sevanjem ali s konvekcijo s posredovanjem hladilnih medijev (hladilni zrak, hladilne tekočine, olje). Hlajenje delov motorja po tej poti imenujemo zunanje hlajenje za razliko od notranjega hlajenja, s katerim razumemo hlajenje delov motorja neposredno s snovjo, ki se pretaka skozi motor.

Notranje hlajenje je za delovanje motorja izredno pomembno, ne samo zaradi hlajenja delov in vzdrževanja njihove temperature v dopustnih mejah, ampak tudi zaradi neposrednega vpliva na delovni proces. Od temperaturnega stanja snovi so v veliki meri odvisni polnitev valja oziroma njegov prostorninski izkoristek, priprava zmesi goriva in zraka ter vžig in zgorevanje snovi v valju, kar vse vpliva na specifično moč motorja in na sestav izpušnih plinov kot osnovnih kriterijev, po katerih presojamo kvaliteto in tehnično dovršenost konstrukcije motorja.

2. Toplotni tokovi

Med snovjo, ki se pretaka skozi motor, in konstrukcijskimi deli motorja se toplota ne izmenjuje samo v fazi zaprtega delovnega procesa, ampak tudi v fazi zamenjave delovne snovi, tako v valju kakor tudi drugje v motorju. To je še zlasti izrazito pri dvotaktnih motorjih, pri katerih se celotna masa delovne snovi pretaka skozi okrov ročičnega mehanizma in skozi kanale med delovnim



Sl. 1. Toplotni tokovi v motorju z notranjim zgorevanjem

prostorom in prostorom v okrovu. Toplotne tokove v valju in v okrovu dvotaktnega motorja s karter-sko črpalko prikazuje shematično slika 1.

Deli valja motorja se segrevajo zaradi prestopa toplote z delovnega medija na površine puše valja, glave valja in bata (Q_v , Q_g , Q_b) predvsem v zaprti fazi delovnega procesa in le v manjši meri tudi v fazi zamenjave delovne snovi, dokler temperatura snovi v valju še presega temperaturo sten. Med večjim delom trajanja faze izpiranja pa so temperature snovi nižje od temperature sten valja, zaradi česar teče toplotni tok v nasprotni smeri. Prav tako prehaja toplota s toplih delov delovnega valja tudi na snov, ki vstopa in je v okrovu ročičnega mehanizma (Q_{ba} , Q_{pn}), zaradi česar se snov segreva. Z njenim posredovanjem se nekaj toplote, ki je z delovnih plinov prestopila na dele valja, od njih zopet odvaža. Delom valja odvezeta toplota se iz motorja odvaža deloma neposredno s snovjo, ki v fazi izpiranja zapuša valj zaradi prekrivanja krmilnih časov, deloma pa toplota s se-

* Teoretično eksperimentalna študija v okviru raziskovalne naloge z naslovom »Vpliv vrste, sestave in strukture materialov za bate in valje na moč in druge obratovalne lastnosti pri specifično visoko obremenjenem dvotaktnem motorju majhne delovne prostornine«, ki sta jo financirala Raziskovalna skupnost Slovenije in Inštitut Tomos, izvajala pa skupaj Inštitut Tomos in Fakulteta za strojništvo v Ljubljani.

grete snovi v okrovu ročičnega mehanizma prestopa na hladnejše stene okrova motorja (Q_{ob}), in se prek njega odvaža zopet v okolico. Preostala, posameznim delom delovnega valja odvzeta toplota ostaja v delovni snovi, zaradi česar se zviša njena temperatura. Temperatura delovne snovi v začetku zaprtega delovnega procesa vpliva na njegovo temperaturo in tlak in s tem na njegovo delovno sposobnost. Poleg toplote, ki prehaja na medij s toplejših sten delovnega valja, se snov v okrovu segreva še s toplimi plini — z zmesjo goriva in zraka in s produkti zgorevanja, ki pritekajo iz delovnega prostora valja v okrov ročičnega mehanizma zaradi netesnosti bata ali skozi pretočne kanale v začetku faze izpiranja (Q_{a}), potem ko so del svoje toplote oddali neposredno delom valja (Q_{ab} , Q_{ap}). V samem delovnem prostoru se sveža zmes še naprej segreva zaradi prestopa toplote s sten valja in temena bata in zaradi mešanja z zastalimi produkti zgorevanja. Del valja in s tem deloma tudi snov v okrovu ročičnega mehanizma segreva še toplota, nastala zaradi trenja delov v medsebojnem gibanju v vodilih (Q_{tpb}) in v ležajih (Q_{tl}) ter zaradi trenja med gibajočimi se deli mehanizma in delci snovi v prostoru (Q_{ts}). So tudi še toplotni tokovi zaradi prehoda toplote prek stičnih površin med posameznimi deli, kakor je toplotni tok neposredno prek stične površine med plaščem bata in pušo (Q_{bp}) in neposredno prek batnih obrobov (Q_{bop}), kjer je tok toplote mogoč v obe smeri, odvisno od temperature delov v medsebojnem stiku.

3. Zunanje in notranje hlajenje — teoretično obravnavanje

Izdatnost zunanjega hlajenja motorja je mogoče sorazmerno preprosto uravnavati v zelo širokem obsegu, vse do njegove popolne izključitve. Z zunanjim hlajenjem odvedeno toploto razmeroma lahko izmerimo, in sicer za celoten motor skupaj in tudi ločeno za posamezne dele, kakor so okrov motorja, puša valja, glava valja itd.

Izračunavanje prestopa toplote z delov motorja na snov, ki se pretaka skozi motor, je zaradi preločnih in temperaturnih razmer v pretočnem kanalu, ki ga sestavljajo vstopni in izpušni sistem, prostor okrova ročičnega mehanizma in delovni prostor v valju motorja, praktično nemogoče. Pač pa je toploto, odvedeno delom motorja z notranjim hlajenjem, mogoče izračunati, in sicer najpreprosteje po metodi toplotne bilance.

Toplota, ki jo pri dvotaktnem motorju z notranjim hlajenjem odvajamo od glave valja, je razmeroma majhna. Z notranjim hlajenjem se odvaža toplota predvsem od puše valja in bata. Pri dvotaktnem motorju je bat toplota odvzeta pretežno z notranjim hlajenjem, pri višjih temperaturah motorja pa izključno z notranjim hlajenjem. Zato bomo v nadaljevanju opazovali le toplotne razmere v puši valja, v batni in v okrovu motorja.



Sl. 2. Toplotni tokovi na »teoretičnem modelu z neskončno toplotno prevodnostjo materialov«

Q — toplotni tok, T — temperatura valja

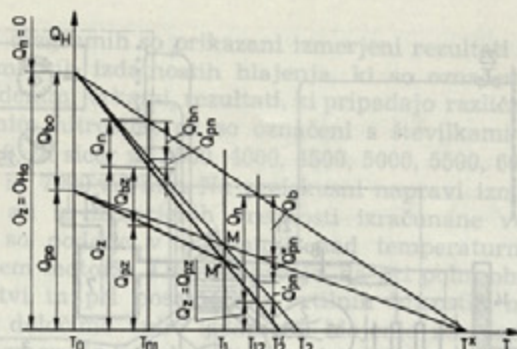
Toplotne tokove, prikazane na sliki 1, bomo opazovali na določenih teoretičnih modelih razmer v valju in se bomo skušali s postopnim uvajanjem vse bolj realnih razmer približati dejanskemu stanju toplotnih tokov v valju motorja.

Slika 2 prikazuje toplotne tokove na modelu razmer v valju, ki ga bomo imenovali »teoretični model z neskončno prevodnostjo materialov«. Zanj naj velja naslednje:

- 1) toplotna prevodnost materialov za valj in bat je neskončno velika ($\lambda = \infty$);
- 2) delovni proces v valju motorja je neodvisen od temperaturnega stanja motorja;
- 3) zunanje hlajenje obsega vrednosti od neskončne do ničelne izdatnosti, če neskončno izdatnost hlajenja ponazoruje neskončno velika toplotna prestopnost ($\alpha_z = \infty$), ničelno pa ničelna toplotna prestopnost ($\alpha_z = 0$);
- 4) pretok medija (zraka in goriva) skozi motor je od temperaturnega stanja motorja neodvisen, prav tako pa tudi toplotna prestopnost med medijem in stenami;
- 5) toplotna prehodnost prek stičnih površin bata in puše valja je tudi neskončna ($k = \infty$);
- 6) toplota prestopa na snov, ki se pretaka skozi motor, samo s površin bata, ne pa tudi s puše valja, in

- 7) specifična toplota snovi, ki se pretaka skozi motor, in snovi, ki oblika zunanje hladilne površine motorja, je tudi neskončna ($c = \infty$).

Vsaki izdatnosti zunanjega hlajenja pripada določeno temperaturno stanje motorja. Celotno, z zunanjim in notranjim hlajenjem odvedeno toploto Q_H podaja nad temperaturnim stanjem T valja premica med točko Q_{H0} na ordinatni osi in točko T^* na abscisni osi, premica med točkama Q_{p0} in T^* pa podaja toploto, ki pri temperaturnem stanju motorja T prestopa na pušo valja (Q_p); razlika med Q_H in Q_p pa pomeni toploto, ki prestopa na bat (Q_b). Pri popolni odsotnosti zunanjega hlajenja doseže valj temperaturo T_2 in vsa toplota se odvede samo z notranjim hlajenjem, medtem ko temperaturno stanje T_1 pripada oni izdatnosti zu-



Sl. 3. Toplota, odvedena z notranjim in zunanjim hlajenjem na modelu

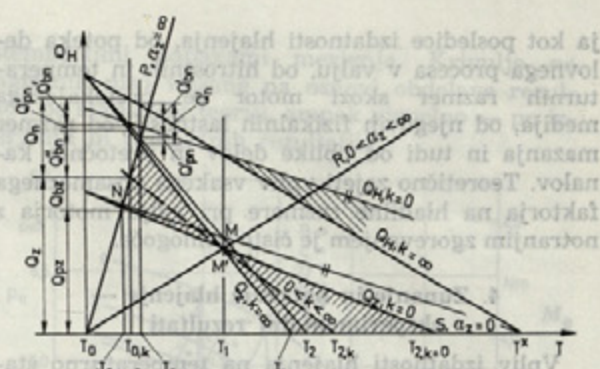
Q — toplotni tok, T — temperatura valja

nanjega hlajenja, pri kateri je celotna toplota od puše odvedena z zunanjim hlajenjem, celotna toplota od bata pa z notranjim hlajenjem. Ordinate daljice med točkami Q_{H0} , M in T_2 pomenijo celotno toploto, odvedeno z zunanjim hlajenjem, ordinate do zlomljene linije Q_{P0} , M in T_2 pa pomenijo toploto, odvedeno puši valja z zunanjim hlajenjem. Pri takem hlajenju bi deli valja lahko dosegli maksimalno temperaturo T_2 .

Prvi korak za približevanje opisanega modela k realnim razmeram naj napravimo z upoštevanjem, da snov, ki se pretaka skozi motor, ne odvzame toplote samo batu ampak tudi puši, ker prihaja v stik z njo. Slika 3 prikazuje toplotne tokove v teh razmerah. Pri nadaljnjem približevanju modela realnim razmeram vzemimo, da je toplotna prevodnost materialov končna veličina, vendar samo v radialni smeri, v aksialni smeri pa naj ostane še vedno neskončno velika. V tem primeru se bo temperaturno polje v delih valja spreminjalo samo v radialni smeri, v smeri osi valja pa ne. Pri končni toplotni prevodnosti v radialni smeri je za tok v tej smeri potrebna temperaturna razlika.

Zunanje hlajenje je odvisno od temperaturne razlike med notranjo steno puše valja in med njeno zunanjo površino. Tudi pri neskončni izdatnosti zunanjega hlajenja, pri kateri bi zunanja površina valja imela temperaturo okolice, bi morala biti temperatura notranje površine višja. Temperaturo notranje površine puše valja imejmo za karakteristično temperaturo, ki definira temperaturno stanje motorja.

Odvisnost toplotnega toka od temperaturnega stanja motorja pri neskončni intenzivnosti zunanjega hlajenja je na sliki 4 dana s premico P . Zaradi višje temperature notranje stene valja bo temperaturna razlika tudi med njo in snovjo, ki se pretaka skozi motor, tako da bo pri vsaki izdatnosti zunanjega hlajenja tudi še notranje hlajenje. Temperatura notranje površine je na sliki 4 za primer neskončne izdatnosti zunanjega hlajenja označena s $T_{0,k} = \infty$, toplota, odvedena z notranjim hlajenjem, pa s Q'_{H0} , ki jo sestavljata toploti, odvedeni od valja Q'_{Pn} in od bata Q'_{Bn} .



Sl. 4. Toplotni tokovi na »teoretičnem modelu s končno toplotno prevodnostjo materialov in z neskončno toplotno prehodnostjo«

Q — toplotni tok, T — temperatura valja

Fizikalno nesprejemljiv je tudi neoviran prehod toplote z dela na del, ki je izražen z neskončno toplotno prehodnostjo med batom in pušo. Pri drugem predpostavljenem ekstremu, ko je prehod toplote ničeln, ima bat v razmerah našega modela vedno enako temperaturo, neodvisno od temperaturnega stanja valja, pa je batu lahko odvedena toplota samo z notranjim hlajenjem, ki je tudi konstantna. Celotna toplota, ki jo odvedemo delom valja, je v primeru, ko je $k = 0$, dana na sliki 4 s premico $Q_{H,k=0}$. Ta je vzporedna s premico, ki podaja celotno toploto, ki prestopi na pušo valja. Za $k = \infty$ pa je celotna toplota, odvajana delom valja, dana s premico $Q_{H,k=\infty}$. Za vsako vrednost $0 < k < \infty$ in za vsako temperaturno stanje motorja je s hlajenjem odvedena toplota, prikazana med premicama $Q_{H,k=0}$ in $Q_{H,k=\infty}$. Razmejitevna točka med toploto, odvedeno z zunanjim in notranjim hlajenjem pri nekem temperaturnem stanju motorja, je v črtkani površini med premicama $Q_{Z,k=0}$ in $Q_{Z,k=\infty}$, premico P in abscisno osjo. Za neko dano toplotno prevodnost k je razmejitevna linija zopet premica, ki gre skozi točko M' , in leži v črtkanem področju.

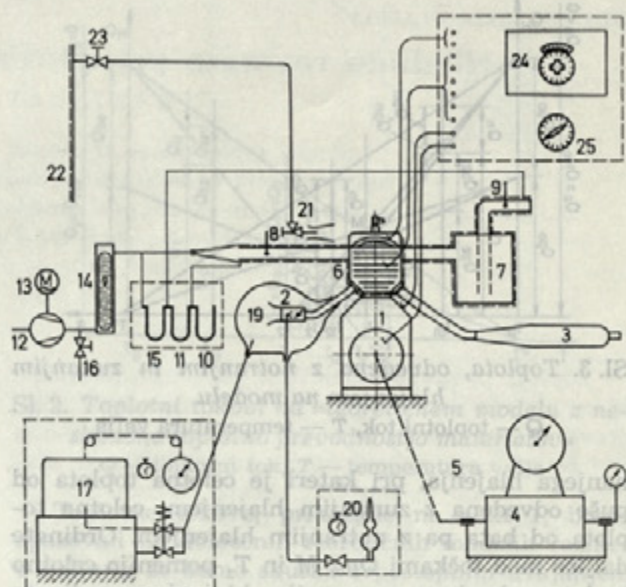
Razmere, zamišljene pri obravnavanem modelu, še zdaleč niso enake razmeram v valju dejanskega motorja. Končno prevoden ne more biti material samo v radialni smeri. Toplota teče v vseh smereh v odvisnosti od temperaturnega padca v opazovani smeri in v odvisnosti od toplotne prevodnosti materiala, ki navadno ni odvisna od smeri. Temperaturne razlike, zaradi katerih toplota prestopa na tekočine in pline ali prehaja z materiala na material so krajevno različne, zaradi česar so različni tudi lokalni toplotni tokovi, tako po velikosti kakor tudi po smeri. Medtem ko toplota na nekem delu površine teče v eni smeri, lahko na nekem drugem delu iste površine teče tudi v nasprotni smeri. Na sliki 1 prikazani toplotni tokovi so le rezultirajoči toplotni tokovi kot krajevno in časovno poprečje zelo kompleksnih temperaturnih, prestopnostnih in prehodnostnih razmer na površinah, ki so odvisne od temperaturnega stanja motor-

ja kot posledice izdatnosti hlajenja, od poteka delovnega procesa v valju, od hitrostnih in temperaturnih razmer skozi motor se pretekajočega medija, od njegovih fizikalnih lastnosti, od razmer mazanja in tudi od oblike delov in pretočnih kanalov. Teoretično zajeti vpliv vsakega posameznega faktorja na hladilne razmere pri valju motorja z notranjim zgorevanjem je čisto nemogoče.

4. Zunanje in notranje hlajenje — eksperimentalni rezultati

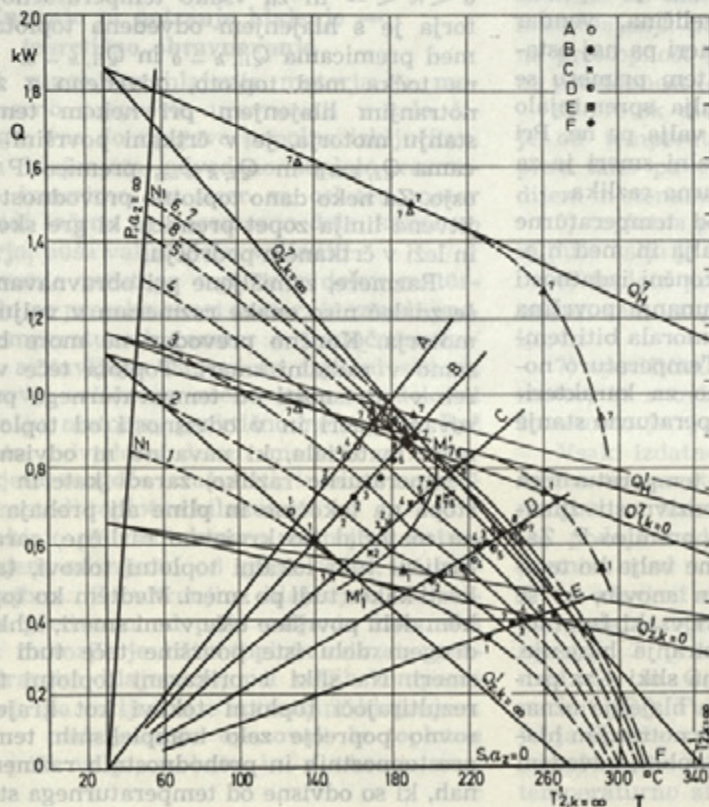
Vpliv izdatnosti hlajenja na temperaturno stanje valja in s tem na hladilne razmere motorja ter na njegove karakteristične obratovalne veličine smo raziskovali na zračno hlajenem dvotaktnem bencinskem motorju z delovno prostornino 50 cm³, izdelku tovarne Tomos z označbo 50/4 V-K. Raziskave so potekale v področju vrtilnih hitrosti od 3500 do 7000 vrt/min pri polni obremenitvi. Preizkusno napravo shematično prikazuje slika 5.

Zrak za hlajenje motorja je razdeljen v dva toka, od katerih eden obliha hladilne površine puše valja, drugi pa hladilne površine glave valja. Oba toka sta med seboj ločena. Hladilni zrak, ki hladi pušo valja, vodimo skozi poseben, od okolice toplotno izoliran kanal. Pretok zraka, izražen s prostorninskim pretokom na uro, pomeni izdatnost hlajenja valja in je relativno merilo intenzivnosti zunanega hlajenja celotnega motorja. Obratovalne razmere, pri katerih so potekale raziskave, so razvidne iz diagramov na naslednjih slikah. S črkami



Sl. 5. Preizkusna naprava

od A do F so v diagramih označene krivulje, ki pripadajo pretočnim količinam hladilnega zraka, in sicer 100, 75, 50, 25, 12,5 in 0 m³/h. Meritve v občutljivem področju pri višjih temperaturah motorja pri izdatnosti hlajenja, označenih z E in F, so sicer bile izvedene več ali manj uspešno, tako da rezultati količinsko niso čisto zanesljivi, vendar dopuščajo, da ocenjujemo smer sprememb pri opazovanih veličinah.



Sl. 6. Toplotni tokovi zaradi zunanega in notranjega hlajenja v odvisnosti od temperaturnega stanja — rezultati preizkusov

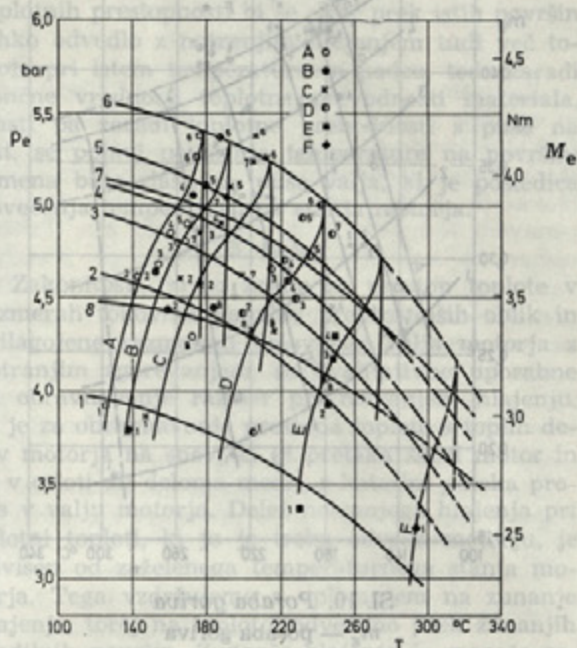
- Q — toplotni tok
T — temperatura valja
1 — 3500 min⁻¹
2 — 4000 min⁻¹
3 — 4500 min⁻¹
4 — 5000 min⁻¹
5 — 5500 min⁻¹
6 — 6000 min⁻¹
7 — 6500 min⁻¹
8 — 7000 min⁻¹

V diagramih so prikazani izmerjeni rezultati pri posameznih izdatnostih hlajenja, ki so označeni z navedenimi črkami, rezultati, ki pripadajo različnim vrtilnim hitrostim pa so označeni s števkami od 1 do 8, in sicer za 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500 in 7000 vrt/min. Na preizkusni napravi izmerjene ali iz izmerjenih vrednosti izračunane veličine so podane v diagramih nad temperaturnim stanjem motorja. One dopuščajo, da pri polni obremenitvi in pri posameznih vrtilnih hitrostih motorja določimo vpliv izdatnosti hlajenja na hladilne razmere in na obremenitev, izraženo s srednjim efektivnim tlakom.

Poleg izdatnosti hlajenja, izražene s pretokom hladilnega zraka skozi kanal ob puši valja, moramo definirati še temperaturno stanje motorja. Temperaturno stanje motorja definiramo kot srednjo temperaturo štirih mernih mest v puši valja, in sicer 0,8 mm pod njeno drsno površino v področju batnih obrobočkov, ko je bat v zgornji mrtvi legi.

Toplotne tokove zaradi zunanega in notranjega hlajenja prikazuje slika 6. Na sliki so narisane krivulje konstantne izdatnosti hlajenja (označene s črkami) in krivulje konstantnih vrtilnih hitrosti (označene s števkami). Te krivulje so narisane po izmerjenih vrednostih, ki v nadaljnjih diagramih podajajo odvisnost karakterističnih veličin motorja od izdatnosti hlajenja [1]. V diagramih na slikah od 7 do 11 so prikazani: toplota, odvedena od puše valja, vrtilni moment oziroma srednji efektivni tlak, poraba zraka in poraba goriva, kakor tudi izračunana moč (vse veličine na ordinatah) v odvisnosti od temperature (veličine na abscisi), ki pomeni temperaturno stanje motorja. V diagramih vrisane krivulje so najverjetnejše vrednosti ustreznih veličin pri temperaturnih stanjih motorja in enakih začetnih razmerah, z izključenimi subjektivnimi in

sistematskimi napakami merjenja. Krivulje na diagramih niso vrisane na osnovi obdelave rezultatov po statistični teoriji, ampak vizuelno — po izmerjenih in prikazanih rezultatih.

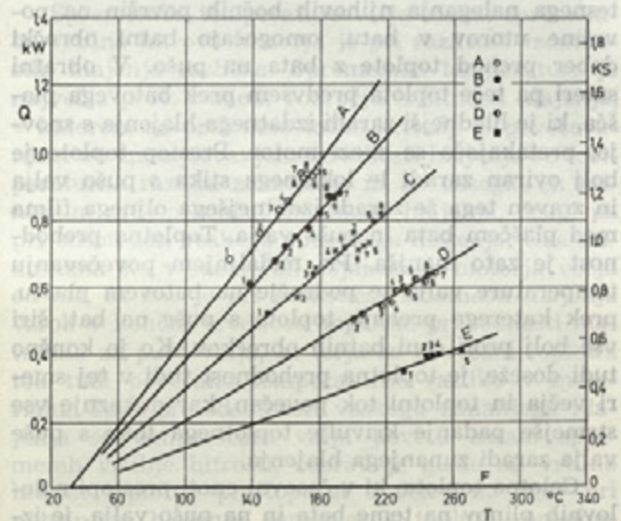


Sl. 8. Srednji efektivni tlak in vrtilni moment

p_e — srednji efektivni tlak

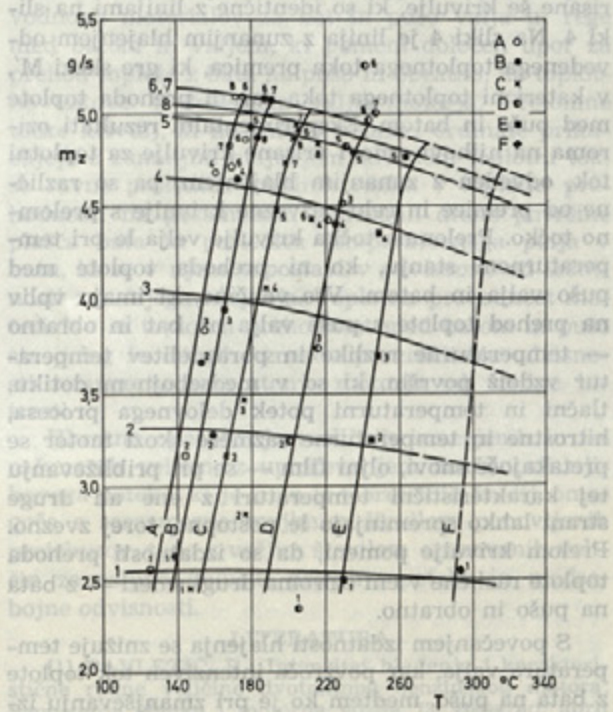
M_e — vrtilni moment

(Druge označbe kakor na sl. 6)



Sl. 7. Z zunanjim hlajenjem od valja odvedena toplota

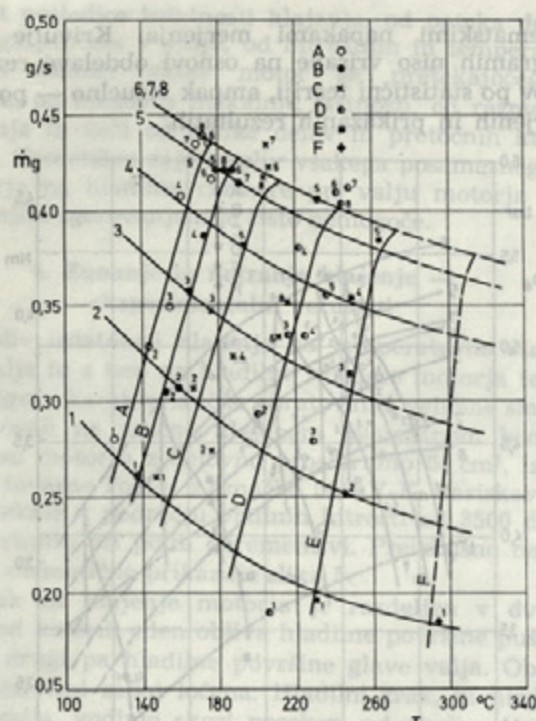
(Označbe kakor na sl. 6)



Sl. 9. Poraba zraka

m_z — poraba zraka

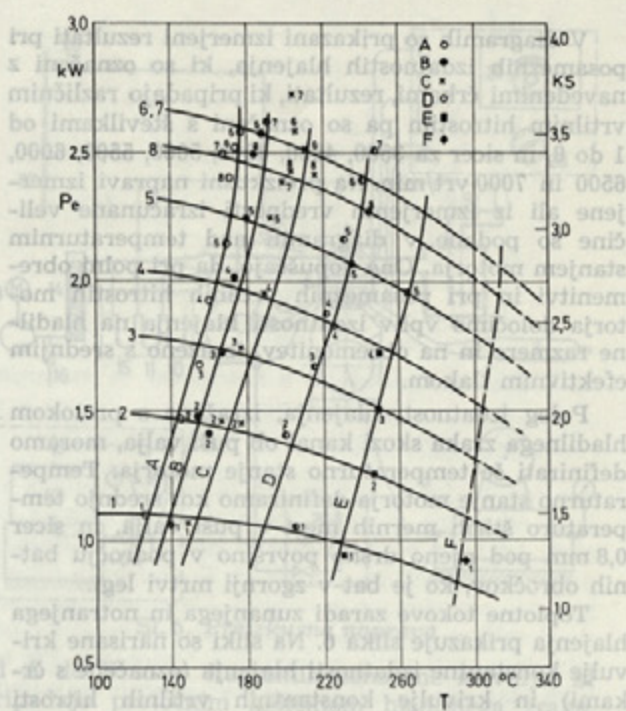
(Druge označbe kakor na sl. 6)



Sl. 10. Poraba goriva
 $\dot{m}_g$ — poraba goriva
 (Druge označbe kakor na sl. 6)

Krivuljama za valju z zunanjim hlajenjem odveden toplotni tok, ki pripadeta polni obremenitvi in vrtilnima hitrostma 3500 in 6500 vrt/min, so prrisane še krivulje, ki so identične z linijami na sliki 4. Na sliki 4 je linija z zunanjim hlajenjem odvedenega toplotnega toka premica, ki gre skozi M', v kateri ni toplotnega toka zaradi prehoda toplote med pušo in batom. Eksperimentalni rezultati oziroma na njihovi osnovi vrisane krivulje za toplotni tok, odveden z zunanjim hlajenjem, pa so različne od premice in celo nezvezne krivulje s prelomno točko. Prelomna točka krivulje velja le pri temperaturnem stanju, ko ni prehoda toplote med pušo valja in batom. Vse veličine, ki imajo vpliv na prehod toplote s puše valja na bat in obratno — temperaturne razlike in porazdelitev temperatur vzdolž površin, ki so v medsebojnem dotiku, tlačni in temperaturni potek delovnega procesa, hitrostne in temperaturne razmere skozi motor se pretakajoče snovi, oljni film — se pri približevanju tej karakteristični temperaturi z ene ali druge strani lahko spreminjajo le postopno, torej zvezno. Prelom krivulje pomeni, da so izdatnosti prehoda toplote različne v eni oziroma drugi smeri — z bata na pušo in obratno.

S povečanjem izdatnosti hlajenja se znižuje temperatura valja, kar povzroča intenziven tok toplote z bata na pušo, medtem ko je pri zmanjševanju izdatnosti hlajenja prehod toplote s puše na bat zelo oviran. Krivulja za toplotni tok, odveden z zunanjim hlajenjem, se zato v okolici točke M' v po-



Sl. 11. Moč motorja
 P_e — moč
 (Druge označbe kakor na sl. 6)

dročju nižje temperature približuje premici, ki na sliki 4 pripada neskončni vrednosti toplotne prehodnosti ($k = \infty$), v področju višje temperature pa se približuje premici, ki pripada ničelni vrednosti toplotne prehodnosti ($k = 0$).

Toplotni tok z bata na pušo je zlasti izdaten v coni batnih obročkov, kjer so temperature višje zaradi bližine temena bata, na katerega prestopa toplota z delovnih plinov. Zaradi tesnega naleganja drsnih površin batnih obročkov na pušo valja in tesnega naleganja njihovih bočnih površin na površine utorov v batu, omogočajo batni obročki dober prehod toplote z bata na pušo. V obratni smeri pa teče toplota predvsem prek batovega plašča, ki je hladnejši zaradi izdatnega hlajenja s snovjo, pretakajočo se skozi motor. Prestop toplote je bolj oviran zaradi le lokalnega stika s pušo valja in zraven tega še zaradi izdatnejšega oljnega filma med plaščem bata in pušo valja. Toplotna prehodnost je zato manjša. Pri nadaljnjem povečevanju temperature valja se področje na batovem plašču, prek katerega prehaja toplota s puše na bat, širi vse bolj proti coni batnih obročkov. Ko jo končno tudi doseže, je toplotna prehodnost tudi v tej smeri večja in toplotni tok povečan, kar dokazuje vse strmejše padanje krivulje toplotnega toka s puše valja zaradi zunanjega hlajenja.

Celotna toplota, ki v časovni enoti prestopi z delovnih plinov na teme bata in na pušo valja, je izračunana za obe vrtilni hitrosti in za temperaturni stanji, ki ju valj doseže pri normalnem obratovanju, pri kakršnem so bili tudi posneti indikator-

ski diagrami. Te izračunane toplote so na sliki 6 označene z znakom $\blacktriangle$. Po eksperimentalnih rezultatih — izmerjene z zunanjim hlajenjem odvedene toplote, izmerjenega pretoka zraka in goriva ter izmerjene temperature zmesi zraka in goriva v okrovi ročičnega mehanizma — je izračunana tudi celotna toplota, odvedena s hlajenjem pri vrtilnih hitrostih 3500 in 6500 vrt/min. Rezultati so prikazani na sliki 6 z znaki $\triangle$, skozi katere so potegnjene ustrezne krivulje Q_H in Q'_H . Vzrok naglega zmanjšanja z zunanjim hlajenjem odvedene toplote v področju višjih temperatur motorja je znižanje indiciranega tlaka delovnega procesa zaradi slabše polnitve valja s svežo zmesjo kot posledico izdatnega segrevanja snovi, ki se pretaka skozi motor.

Na sliki 6 so prikazani rezultati preizkusov toplotnega toka skozi pušo valja v odvisnosti od temperature motorja tudi še za druge vrtilne hitrosti. Ekvivalentne linije, ki so vrisane za krivulji vrtilnih hitrosti 3500 in 6500 vrt/min, za druge krivulje niso vrisane, ker bi slika postala preobremenjena in nejasna. V področju izvedenih meritev so krivulje za toplotne tokove narisane s polnimi črtami, zunaj tega področja pa je črtkano narisana potek krivulj, ki so ekstrapolirane z upoštevanjem spremembe toplotne prestopnosti v odvisnosti od vrtilne hitrosti in tlačnega poteka, kakršnega približno ponazarja dejanski tlak na sliki 8. S slike 6 je tudi razvidno, da se temperatura valja, pri kateri preneha prehajanje toplote z bata na pušo in obratno, s povečevanjem vrtilne hitrosti premika proti večjim vrednostim, dokler pri 6000 vrt/min ne doseže maksimuma. Pri tej vrtilni hitrosti doseže tudi dejanski tlak svoj ekstrem. Z vrtilno hitrostjo se pri dani izdatnosti hlajenja spremeni temperatura motorja in je najvišja pri vrtilni hitrosti, pri kateri je tudi moč motorja največja.

Sprememba temperature valja zaradi spremembe vrtilne hitrosti motorja je pri različnih izdatnostih hlajenja različna. Sprememba temperature je največja prav v onem področju izdatnosti hlajenja, v katerem so prelomne točke krivulj. S povečevanjem ali zmanjševanjem izdatnosti hlajenja se temperaturna razlika zmanjšuje in bo dosegla en minimum pri neskončni izdatnosti hlajenja, drugi pa pri odsotnosti vsakega zunanega hlajenja. Oba minimuma sta v razmerah dejanskega motorja večja od nič, za kar je pri neskončni izdatnosti hlajenja vzrok v končni vrednosti toplotne prevodnosti materiala za pušo valja, ki terja za povečani toplotni tok tudi povečano temperaturno razliko v materialu. Tudi pri odsotnosti vsakega zunanega hlajenja se temperatura valja poveča zaradi sprememb vrtilne hitrosti, čeprav je glede na vrtilno hitrost toplotna prestopnost z delov na snov pri notranjem hlajenju sorazmerna toplotni prestopnosti z delovne snovi na površini valja. V tem primeru je z notranjim hlajenjem odvedena vsa toplota, tudi tista, ki je prešla na pušo valja. Pri po-

večanju vrtilne hitrosti se poveča toplota, ki prestopi na teme bata in na pušo valja in sorazmerno temu povečanju se mora povečati tudi toplota, odvedena z notranjim hlajenjem. Zaradi sorazmernosti toplotnih prestopnosti bi se sicer prek istih površin lahko odvedlo z notranjim hlajenjem tudi več toplote pri istem temperaturnem padcu, toda zaradi končne vrednosti toplotne prevodnosti materiala, zlasti pa zaradi toplotne prehodnosti s puše na bat, se pojavi povišanje temperature na površini temena bata zlasti pa puše valja, ki je posledica povečanja temperaturnega stanja motorja.

5. Sklep

Zakovitosti, ki so znane za prestop toplote v razmerah tokovnih kanalov preprostejših oblik in prilagojene razmeram delovnega valja motorja z notranjim zgorevanjem, so kvalitativno uporabne za obravnavanje razmer pri notranjem hlajenju, to je za obravnavanje prestopa toplote s toplih delov motorja na snov, ki se pretaka skozi motor in je v celoti ali deloma medij, s katerim poteka proces v valju motorja. Delež notranjega hlajenja pri celotni toploti, ki jo je treba odvesti motorju, je odvisen od zaželenega temperaturnega stanja motorja. Tega vzdržujemo z vplivanjem na zunanje hlajenje, torej na toplotu, odvedeno prek zunanjih hladilnih površin. Zunanje hlajenje je mogoče regulirati v zelo širokem obsegu, zlasti pri dvotaktnem motorju s kartersko črpalko, pri katerem je notranje hlajenje tudi izdatno.

Kvalitativno je raziskovan vpliv toplotne prevodnosti materialov za bat in pušo valja in rege med batom in valjem, ki pomeni določen upor za prehod toplote z bata na pušo in obratno, na toplotne tokove v delovnem valju motorja. Prelomne točke krivulj, ki na sliki 6 v smeri ordinate prikazujejo z zunanjim hlajenjem odvedeni toplotni tok, so ravno posledica lokalnih razlik v toplotni prehodnosti na posameznih področjih drsne površine plašča bata in posledica temperaturnega polja v batu, ki se v njem vzpostavi v odvisnosti od izdatnosti zunanega hlajenja. Toplotna prevodnost materialov in toplotna prehodnost med batom in pušo sta poleg še drugih vzrokov povzročitelja odvisnosti temperaturnega stanja motorja od vrtilne hitrosti.

Hkratno opazovanje različnih izmerjenih in izračunanih veličin, z upoštevanjem značilnosti njihovega poteka, ki je znan iz teoretičnih študij, omogoča s sorazmerno majhnim številom ponovljenih preizkusov, toda z večjim številom opazovanih veličin zanesljivo določiti pravilne poteke in medsebojne odvisnosti.

LITERATURA

- [1] PAVLETIČ, R.: Intenzitet hlađenja i karakteristične radne veličine dvotaktnog benzinskog motora; Saopštenja Nauka i motorna vozila 73, Beograd, april 1973, zvezek 1, str. 91...103.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Radislav Pavletič
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani