

Direktno določevanje sile curka pri gorilnikih velikih kapacitet

Sila curka ima pri vrednotenju delovanja in prilagodljivosti gorilnika pomembno vlogo. Za gorilnike z enostopenjskim razprševanjem lahko silo curka s pomočjo predhodnih merjenj tudi računsko določimo. Pri tem nam merjenja podajo stopnjo izkoristka šobe gorilnika, nakar je moč izračunati pravo silo curka. Pri gorilnikih z večstopenjskim razprševanjem pa je postopek meritev precej otežkočen in je zaradi daljšega izpada gorilnika iz obratovanja za prakso skoraj nesprijemljiv, račun pa negotov. Članek obravnava direktno merjenje sile curka s pomočjo vzmetnega dinamometra na kombiniranem gorilniku z dvo-stopenjskim razprševanjem mazuta ob dodatnem kurjenju z zemeljskim plinom.

Martinovka je v večini naših jeklarn še vedno glavni proizvodni agregat za masovna in nekatere vrste legiranih jekel. Ker je potencialni porabnik toplotne energije, je razumljivo, da posvečamo racionalnemu izkoriščanju goriv vso pozornost. Prav k temu pa med drugim mnogo pripomore uporaba ustreznega gorilnika.

Merilo, kako dela gorilnik, je sila curka. Vrednotenje delovanja gorilnika na osnovi sile curka je prišlo vse bolj do izraza ob prehodu od uporabe mešanega generatorskega plina na uporabo mazuta, ki ga rabimo kot samostojno gorivo ali v kombinaciji s plini. Pri razprševanju tekočih goriv s paro ali komprimiranim ogretim zrakom dobimo pri ekspanziji na atmosferski pritisk curek z veliko hitrostjo. Pri tem je energija, ki se uporablja za samo razprševanje, relativno majhna in jo lahko pri obravnavi zanemarimo. Pri izstopu iz šobe gorilnika se pojavi sila curka, ki je enaka produktu masnega pretoka in hitrosti curka. Ta sila doseže maksimalno vrednost tedaj, ko se razpoložljiva energija pare, to je količina toplote, ki se sprosti pri adiabatni ekspanziji od začetnega na atmosferski pritisk, razdeli na paro in mazut v razmerju njunih masnih pretokov. Pri tem dobe kapljice mazuta isto hitrost, kot jo ima para in je stopnja razprševanja najboljša. Sila curka, ki izteka v peč, povzroči na gorilniku reakcijo, ki je po velikosti enaka, toda curku nasproti usmerjena. Če bomo uspeli izmeriti to silo reakcije, lahko torej izmerimo silo curka in to nas zanima. Zakaj pripisujemo sili curka pri plamenu tak

pomen? Pri plamenu, ki se lahko prosto razvije, bo njegova dolžina tem krajša, plamen pa tem bolj vroč in oster, čim večja bo sila curka. Ker se npr. pri martinovkah razvije plamen v zaprtem prostoru, kjer zidovi delno vplivajo na razvoj plamena, dobimo v mejnih conah plamena delno recirkulacijo zgorevnih plinov. Čim večja je sila curka, tem bolj prihaja ta recirkulacija do izraza. Na ta način je tudi postavljena meja možnosti skrajševanja plamena s pomočjo povečanja sile curka. Prevelika sila curka vpliva močno na karakteristike plamena t. j. od določene meje naprej znižuje temperaturo in emisijsko sposobnost plamena. To se dogaja, ker delci ogljika prehitro zgore zaradi močnih vrtincev, v katerih pridejo v kontakt s kisikom iz zraka. S tem pa izgubimo osnovne karakteristike plamena, primerne za obratovanje v martinovki, t. j. plamen, katerega temperatura je sicer sorazmerno nizka, ima pa visoko intenziteto sevanja ter emisivnost. Zviševanje sile curka vpliva dalje tudi na povečanje oksidacije vložka v fazi taljenja, kasneje pa vodi do povečanega razogljčevanja taline. Sila curka, s katero obratuje gorilnik, se reflektira tudi na obstojnost v ognju vzdržne obloge. Če je gorilnik pravilno nameščen in dela z določeno optimalno silo curka za posamezno delovno fazo, je obremenitev stropa manjša, s tem pa se podaljša življenjska doba. Praksa je pokazala, da v fazi taljenja najbolj ustreza sila curka cca $1,8 \text{ kp}/10^6 \text{ kkal/h}$; v fazi, ko je vse raztaljeno $1,3 \text{ kp}/10^6 \text{ kkal/h}$, pri rafinaciji pa cca $1 \text{ kp}/10^6 \text{ kkal/h}$.

Teoretično lahko izračunamo silo curka, zlasti pri enostavnih konstrukcijah gorilnikov z enostopenjskim razprševanjem. Dejanska sila curka pa je zaradi trenja v šobi in trenja, ki nastopi med oljem in paro za razprševanje (ali zrakom), vedno manjša od teoretične vrednosti. Razmerje med dejansko in teoretično silo curka imenujemo učinek šobe, oz. stopnjo izkoristka, ki jo ima sila curka pri določenih pogojih pretoka. S poizkusi so ugotovili, da se učinek šobe spreminja odvisno od oblike šobe, če se spreminja razmerje mazut : količina sredstva za razprševanje. Za določeno vrsto šobe in razmerje moramo torej poznati učinek šobe, če naj računsko določimo silo curka. Prav to pa je glavna težava, ki se pokaže v potencirani obliki pri gorilnikih z razprševanjem v več stopnjah.

Za boljše razumevanje si oglejmo teoretične prijeme za izračun sile curka. Pri izstopu iz šobe ima, kot rečeno, curek veliko hitrost in potegne za seboj pline iz okolice, ki imajo le majhno hitrost. Odda jim del svoje energije v obliki hitrosti, pri tem pa jo seveda rapidno izgublja. Enota mase pare, ki ekspandira adiabatno in oddaja toploto ΔH , dobi hitrost w_p , ki je podana z enačbo:

$$\frac{w_p^2}{2g} = I \cdot \Delta H \quad (1)$$

kjer je:

I — mehanski ekvivalent toplote

g — pospešek prostega pada.

Pri ekspanziji para razpršuje olje in se torej razpoložljiva energija razdeli na olje in paro ter pišemo:

$$\frac{M_p \cdot w_p^2}{2} = \frac{M_p \cdot w_1^2}{2} + \frac{M_o \cdot w_2^2}{2}$$

$$\text{in} \quad M_p \cdot w_p^2 = M_p \cdot w_1^2 + M_o \cdot w_2^2 \quad (2)$$

kjer je:

M_p — masni pretok pare

M_o — masni pretok olja

w_1 — hitrost pare v zmesi olja in pare

w_2 — hitrost olja v zmesi olja in pare.

Ker je sila curka enaka produktu masnega pretoka in hitrosti, pišemo torej:

$$F = M_p \cdot w_1 + M_o \cdot w_2 \quad [N]$$

maksimalno silo curka bomo dobili, kot sledi iz enačbe (2), če je izpolnjen pogoj: $w_1 = w_2$ in

$$w_1 = w_2 = w_p / \sqrt{1 + M_o/M_p}$$

torej:

$$F_{\max} = w_p \cdot M_p \cdot \sqrt{1 + M_o/M_p}$$

in iz tega:

$$F_{\max} = M_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot I \cdot \Delta H (1 + M_o/M_p)} \quad [N]$$

Če izrazimo to teoretično silo curka v kp, pa je:

$$G = M_p \cdot \sqrt{2g \cdot I \cdot \Delta H (1 + M_o/M_p)/g}$$

oziroma:

$$G = 9,25 \cdot M_p \cdot \sqrt{\Delta H \cdot (1 + M_o/M_p)} \quad [kp] \quad (5)$$

Za gorilnike z enostopenjskim razprševanjem bomo lahko izračunali silo curka, če smo predhodno izmerili naslednje veličine:

- 1 — tlak pare pri vходу v šobo pri zaprtem dovodu olja. Pri tem je potrebno meriti pretok pare pri različnih tlakih, s čemer dobimo karakteristične podatke za pogoj »pretok olja = 0«.
- 2 — pri maksimalnem dovodu olja merimo tlake pare na gorilniku. Paro dodajamo količinsko, tako, da je razmerje para : olje = 0,3 do 0,7 kp/kp. Za tem povečamo pretok pare na maksimum, vendar mora biti tlak olja večji, kot je tlak pare.

Tako dobljene vrednosti vnesemo v diagram in lahko za poljubni tlak v gorilniku določimo za poljubni pretok olja potrebni tlak pare. Na ta način lahko torej določimo stopnjo izkoristka E in če na osnovi enačbe (5) izračunamo silo curka množimo z izkoristkom E , dobimo dejansko silo curka gorilnika, torej:

$$G = 9,25 \cdot \sqrt{\Delta H} \cdot M_p \cdot E \cdot \sqrt{1 + M_o/M_p} \quad [kp] \quad (6)$$

Pri kombiniranem kurjenju, t. j. pri gorilnikih, kjer razpršujemo olje s paro z eno stopnjo, dodajamo pa še plin kot dodatno gorivo, moramo upoštevati še silo curka, ki jo daje plinski gorilnik:

$$G = 44,7 \cdot 10^{-2} \cdot M_{pl} \cdot E \cdot \sqrt{p/\rho_{pl}} \quad [kp] \quad (7)$$

kjer je:

E — stopnja izkoristka sile curka

p — poprečni tlak plina v mm H₂O

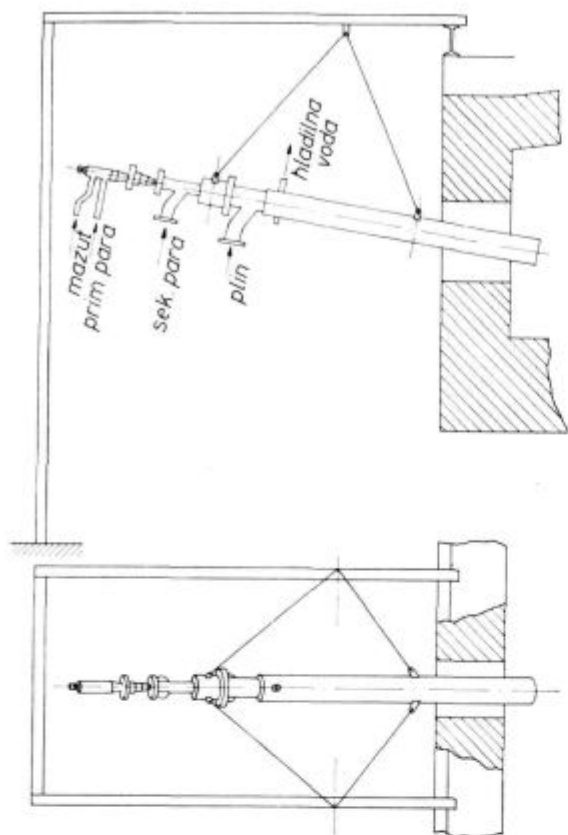
M_{pl} — pretok plina v kg/s

ρ_{pl} — poprečna gostota plina v kg/m³

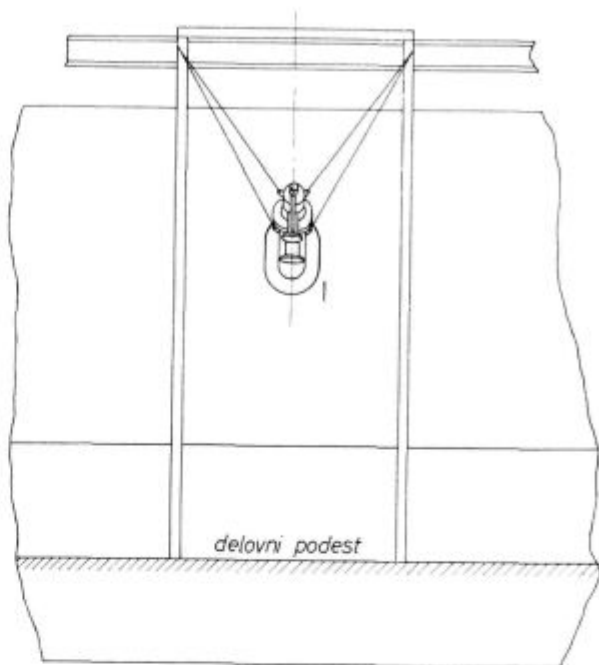
Tudi v tem primeru moramo stopnjo izkoristka eksperimentalno določiti. Določevanje pa je seveda glede na potrebni dodatni inštrumentarij in priprave gorilnika še bolj komplicirano. Ker je nameščenje vodov za mreženje tlaka pred šobo zahtevno in terja daljši izpad gorilnika iz obratovanja, se nujno zmanjša preduktivnost agregata. Takšen način določevanja sile curka je za industrijsko prakso seveda skoraj nesprejemljiv. Razen tega moramo računati še na objektivne in subjektivne napake pri samem merjenju. Če upoštevamo, da imamo npr. opravka z gorilnikom s tri-stopenskim razprševanjem to tako zakomplicira delo, da smo za praktično vrednotenje sile curka prešli raje k direktnemu določevanju s pomočjo dinamometra.

Uvodoma smo omenili, da se sila curka demonstira kot reakcijska sila na gorilniku. Zato je oportuno, da to silo izmerimo. V ta namen smo izbrali kombinirani gorilnik na mazut in zemeljski plin, ki je delal z dvostopenjskim razprševanjem olja s pomočjo pare. Gorilnik je imel maksimalno kapaciteto 2000 Nm³/h zemeljskega plina in 2000 kg/h mazuta. Če upoštevamo, da je imel zemeljski plin v povprečju kaloričnost 9700 kkal/Nm³, mazut pa 9300 kkal/kp, smo dovedli v peč, ne upoštevaje entalpijo pare za razprševanje 38,10⁶ kkal/h.

Gorilnik smo obesili na tanke jeklene pletenice, tako da je zadržal nagib in smer proti talini, sicer pa je povsem prosto visel. Skico nameščenja kaže slika 1. Na koncu gorilnika smo s prižemo, v katero sta segali oporni konici vzmetnega dinamometra, montirali stojalo z vzmetnim dinamometrom, ki ga kaže slika 2. Spremembo dolžine cilindrične vzmeti je merilna ura merila z natan-



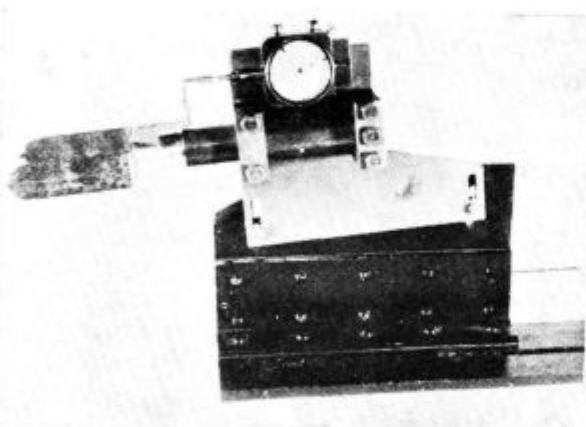
Slika 1
Shema obešenja kombiniranega gorilnika na zemeljski plin in mazut



Shema obešenja kombiniranega gorilnika
na zemni plin in mazut

M 1:25

Slika 1



Slika 2
Vzmetni dinamometer

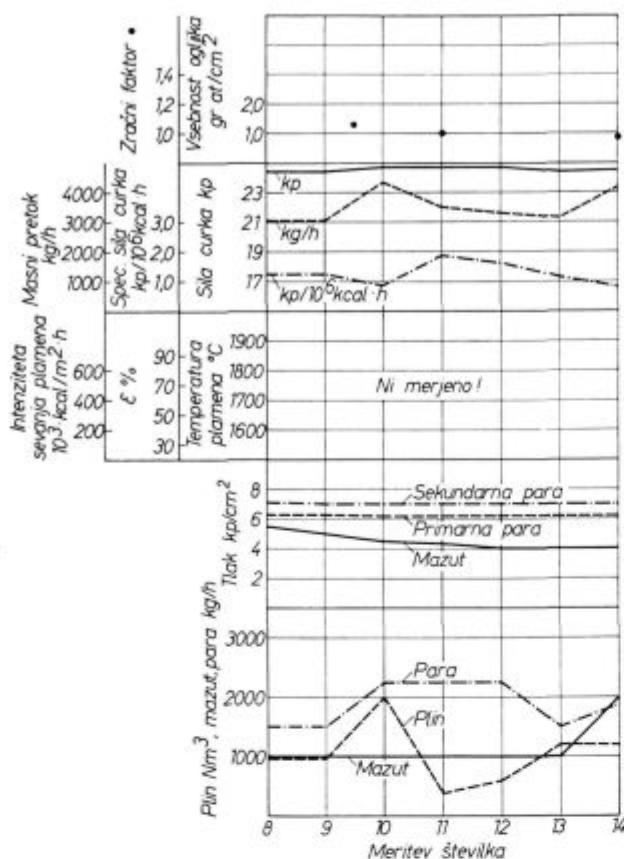
čnostjo razbirka 1 : 100 mm, tisočinke pa smo ocenili. Vzmet dinamometra smo preračunali, tako da bi pri največji sili curka, ki je v martinarnah v rabi, in sicer $2 \text{ kg}/10^6 \text{ kkal/h}$ znašala kontrakcija 11 mm. Gorilnik bi torej nihal lahko največ za 11 mm, kar je v primerjavi s celotno dolžino gorilnika 0,03 %.

Zaradi tako kratke razdalje, ki pa je omogočala dovolj natančno merjenje, se seveda tudi položaj

fleksibilnik cevovodov za dovod mazuta, pare in zemeljskega plina ni med obratovanjem bistveno spreminjal. Ker je bil gorilnik obešen na cca 1,9 m dolgih pletenicah, je oporna točka gorilnika pri dinamometru opisovala pot po krožnici, vendar zaradi malega pomika lahko privzamemo, da je bila ravna. Sleherni pomik gorilnika je učinkoval torej le aksialno v smeri vzmeti dinamometra. Pri obratovanju med meritvami dejansko nismo imeli s tem nobenih težav.

Silo curka smo merili pri 7 zaporednih reverziranjih 150 t martinovke, pri čemer smo pogoje kurjenja spreminjali. Med merjenji smo vsake tri minute sinhrono registrirali, z odbiranjem kontrakcije vzmeti dinamometra, tudi naslednje podatke: porabo zemeljskega plina, porabo mazuta, količino in temperaturo pare za razprševanje, tlak zemeljskega plina, tlak mazuta (oboje pred gorilnikom) ter temperaturo plamena. Temperaturo plamena smo merili z barvnimi pirometri »Tricolor« in določali barvno in črno temperaturo plamena ter iz tega tudi vsebnost ogljikovih delcev v plamenu.

Ko smo vrednotili rezultate meritev, smo s pomočjo izmerjene, t. j. barvne in črne temperature, določali dalje še intenziteto sevanja plamena ter emisijsko sposobnost plamena. Med meritvami

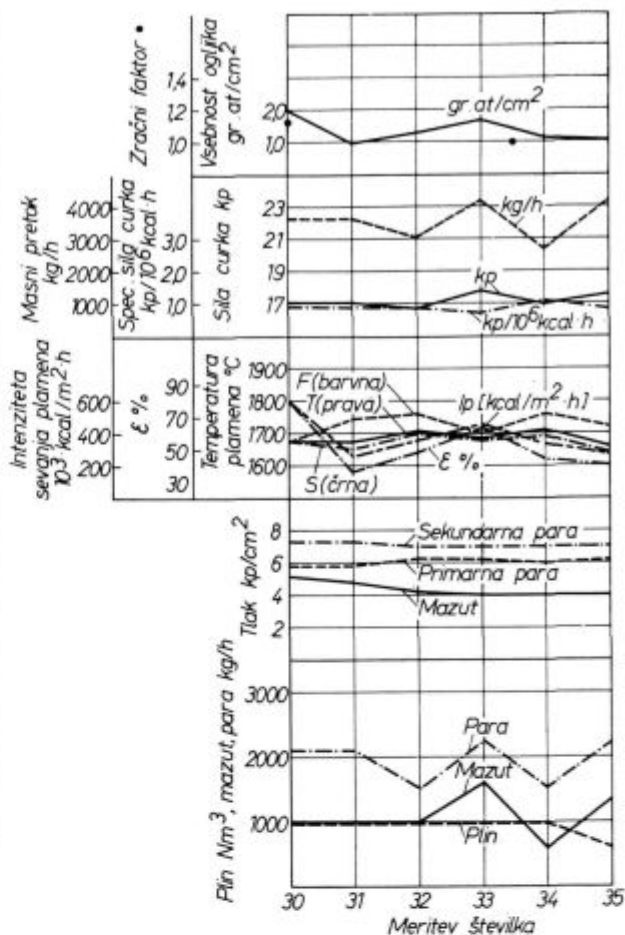


Slika 3 a
Diagram meritev

smo spremljali tudi analizo dimnega plina z Orsat aparatom in določali zračni faktor ob upoštevanju poprečnega odgorka ogljika iz kopeli 286 kg C/h .

Ker je tabelarni prikaz numeričnih vrednosti za posamezne merjene veličine nepregleden, smo izbrali od 56 meritev rezultate v diagramih, v slikah 3 a, b, c. Ti naj ponazore bistvena zapažanja pri obratovanju preiskovanega gorilnika. Iz diagramov lahko razberemo naslednje:

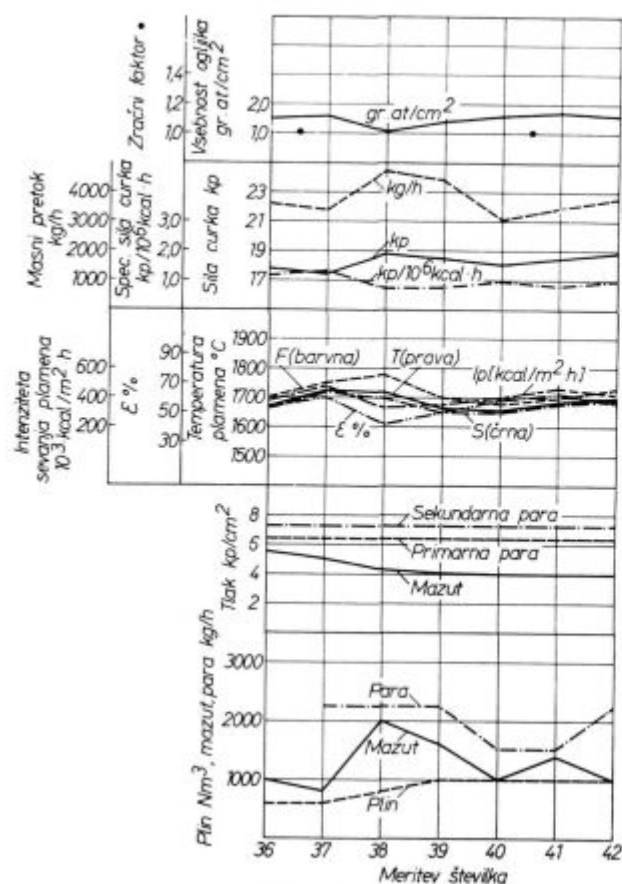
Tlak mazuta je odvisno od pregretja, vendar od pričetka periode reverziranja proti koncu vedno padal od poprečno $5,5 \text{ kp/cm}^2$ na $4,0 \text{ kp/cm}^2$ ob koncu periode. Tlak primarne pare za razprševanje je znašal cca $6,2 \text{ kp/cm}^2$, sekundarne pa cca $7,2 \text{ kp/cm}^2$ in se med preiskavo nista bistveno spreminjala. V periodi meritev št. 8 do 14 zaradi okvare vratic ni bilo moč meriti temperature plamena, vendar je zaradi poteka meritev sile curka ta perioda interesantna. Po reverziranju smo pri merjenju od meritve 9 dalje pričeli zviševati porabo pare od cca 1000 na $2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ter spremenili tudi porabo pare od 1500 kg/h na 2250 kg/h . Pri tem je porasla sila curka, kot je razvidno v diagramu na sliki 3 a. Masni pretok se je povečal,



Slika 3 b
Diagram meritev

vendar pa specifična sila curka v $\text{kp/10}^6 \text{ kcal/h}$ pri tem prične opadati. Vzrok je velika kaloričnost zemeljskega plina, ki pa je imel ves čas poskusa tlak $0,8 \text{ kp/cm}^2$.

Po enačbi (7) seveda ne doprinese dosti k sili curka in ustvarja zato varljivo podobo nizke specifične sile curka. Podobna je slika pri meritvah od 11...13 na sliki 3 a, kjer smo količino plina zviševali, pritisk pare pa zniževali. Krivulji za silo curka in specifično silo curka le potrđita prejšnje trditve! Iz diagrama na slikah 3 b in 3 c je razvidno, da imata bistveni vpliv na silo curka le masni pretok pare in mazuta, saj krivulji masnega pretoka in sile curka pri vseh meritvah potekata smiselno. Ker smo merili temperaturo plamena in določevali iz tega tudi intenziteto sevanja in emisivnost, pogledajmo, kako večja ali manjša sila curka vpliva na omenjene lastnosti plamena! Poviševanje sile curka (meritev 33), kjer povečujemo pretok pare in mazuta, kaže naraščanje emisivnosti plamena (ϵ) in intezitete sevanja (I_p) ob istočasnem padanju prave temperature plamena (T). To pa je za obzidavo peči (zlasti strop) ugodno. Trditve pa podpira tudi porast vsebnosti ogljika v g. atom/ cm^2 , kar smo določili s pomočjo izmerjene



Slika 3 c
Diagram meritev

barvne in črne temperature plamena, ki se z višjo silo curka povečuje.

Pri gostem plamenu, kjer smo iz analize dimnih plinov izračunali zračni faktor $n = 1$ (meritve 36...42), je znašala temperatura plamena cca 1730°C , intenziteta sevanja $430 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$, emisivnost pa od 42...58 %, kar je za obratovanje peči v tej fazi zelo ugodno. Ob manjši porabi goriva sledi namreč pri optimalnih parametrih gorilnika dober prenos toplote na talino. To dosežemo pri sorazmerno nizkih temperaturah plamena, kar varuje obzidavo peči.

Merjenja sile curka s pomočjo dinamometra direktno na gorilniku so pokazala, da je metoda uporabna in daje za prakso uporabne rezultate. Če pa kritično ocenimo način merjenja, je treba ugotoviti naslednje: ker vpliva trenja tako pri samem dinamometru kakor tudi vpliva togosti fleksibilnih dovodnikov za paro, mazut in zemeljski plin ni mogoče odpraviti, temveč jih le lahko zmanjšamo na določen minimum, lahko trdimo, da je metoda merjenja še sprejemljiva. Daje vsaj relativne rezultate, ki so nedvomno bližje realni vrednosti sile curka kot teoretični izračun. Pri teore-

tičnem izračunu posameznih izkoristkov šob, oz. stopenj razprševanja ne poznamo ali pa jih poznamo samo približno. Konstrukcijo dinamometra pa bi bilo potrebno spremeniti v toliko, da bi bila merilna ura vgrajena v krožni elastično lok. S tem bi odpadlo trenje cilindrične vzmeti v vodilni cevi. Pri kalibriranju in večkratnih poizkusih sicer dinamometer naše izvedbe ni pokazal bistvenih odstopanj (bila so zanemarljivo majhna), vendar je v stroju za stiskanje (Amsler) bil nameščen dinamometer popolnoma centrično. Pri gorilniku, ki je bil obešen na žicah, nismo imeli absolutno linearne pomika, temveč pomik po linearizirani krožnici ter ne moremo trditi, da bi bilo tu trenje res zmanjšano na minimum. Pri merjenjih se je gorilnik in s tem dinamometer skoraj vedno vrnil do začetnega položaja. Največja napaka je znašala $+0,53 \text{ mm}$, t. j. $+4,3 \%$ od končnega odklona, pri največji merjeni sili curka. Pri delu smo zapazili še, da ob maksimalnih obremenitvah gorilnika pri prekoračenju določene hitrosti iztoka prične gorilnik trepetati. Merilna ura je kazala nihanje vrednosti razbirta $\pm 0,32 \text{ mm}$, kar je zelo otežkočalo odbiranje prave vrednosti sile curka. Pri manjših obremenitvah pa je merilna ura zadovoljivo sledila vsakršnemu pomiku gorilnika.

Na osnovi opravljenih meritev je mogoče podati naslednji zaključek: Gorilnik, ki smo ga preiskovali, je elastično spremljal spremembo posameznih parametrov, kar se kaže v kvaliteti plamena (F, S, T, I, ϵ), razen pri spremembi količine zemeljskega plina. Ker v primerjavi s podatki iz literature², ki navaja za gorilnik 150 t martinovke potrebni tlak plina 1,5 do 3 atm, tlak mazuta 4 do 6 atm in tlak pare 5 do 7 atm, lahko trdimo, da je tlak plina premajhen, saj je v povprečju pri meritvah znašal le 0,8 atm. Tu lahko tudi iščemo vzrok za nesorazmerni pad specifične sile curka pri povišanju porabe zemeljskega plina. Z drugimi besedami, gorilnik v tej izvedbi za tak tlak plina ni primeren.

Pri vrednotenju same metode moramo še pripomniti, da je delo v obratnih pogojih vezano na trenutne zahteve procesa v peči, kar merjenje občutno otežkoča. Od meritev z izboljšano izvedbo dinamometra, pri gorilniku, montiranem na zgoraj omenjenem kanalu ali pa v eksperimentalni peči, kjer bi s preciznejšimi merilniki (predvsem za merjenje tlaka pretočnih medijev) lahko spremljali vse parametre, pa lahko pričakujemo za teorijo in prakso zanimive rezultate.

Literatura

1. Bisra: The installation and operation of open-hearth furnace burners, Posebna izdaja 1963
2. R. Kissel, L. Septier, G. Husson, S. Terrat: Der Impuls der Flamme, Theorie und Anwendung bei SM-Ofen, Berg u. Hüttenmannische Monatshefte, 108, str. 130-136.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Messungen der Kraft des Strahles an einem kombinierten Öl-Erdgasbrenner mit zweistufiger Zerstäubung zeigten, dass es mit der direkten Messmethode möglich ist für die technische Praxis genügend genaue Daten von der Kraft des Strahles zu bekommen. Der dazu gebrauchte Stahlzugfederdynamometer hat sich gut bewährt. Von einer ausgebesserten Dynamometerausführung mit der Feder in der Form eines Bogens mit einer eingespannten Messuhr erwarten wir noch bessere Ergebnisse. Die Rei-

bung würde auf den Minimum herabgesetzt, werden die Reproduzierbarkeit noch besser.

Die praktischen Versuche eines jeden Brenners sollten an einem Experimentalofen oder in einem entsprechendem Verbrennungskanal, wo die Arbeitsbedingungen besser sind, ausgeführt werden. Der Vorteil dieser Methode für die industrielle Praxis ist vor allem in der Einfachheit der Messung, die Messwerte können reproduziert werden, und sie ist selbst ein gutes Mittel für die Bewertung der Brennerwirkung.

SUMMARY

Measurements of jet force for combined burner with two stage atomising, designed to burn »bunke C« oil or natural gas are showing, it is possible to get results good enough for industrial use, engaging direct method of measurement. For the purpose dynamometer with cylindrical spring was used satisfactorily. Better results are expected from the improved dynamometer design which should

have spring in an arch shape with measuring instrument built in. Practical testing of each burner should be carried out at the pilot furnace or corresponding combustion channel where the conditions for undisturbed work would exist. Advantage of this method for industrial practise is in simplicity of measurement. It is very simple to reproduce the measured values and the method itself is a great help for the burner scoring.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерение силы струи на комбинированной горелке на мазут и природный газ двойной степени распыления показали, что методом прямого определения можно получить данные довольно точные для заводской практики. Измерение выполнено при помощи динамометра с цилиндрической пружинкой. Более лучшие результаты можно получить с динамометром в котором пружин-

ка бы находилась в форме дуги с натянутыми для измерения часами; поправилась бы возможность репродукции и уменьшилось трение. Для заводской практики надо испытать каждую горелку на экспериментальной печи или в канале сгорания где бы условия были несомненно лучше. Метод рекомендуется для оценки горелок в заводской практике.