YU — ISSN — 0039 — 2480

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 24 LJUBLJANA, SEPTEMBER—OKTOBER 1978 ŠTEVILKA 9—10

UDK 66.067.38:621.43.068

Uporaba ultrazvočne aglomeracije letečega pepela pri čiščenju dimnih plinov

LEOPOLD ANDRÉE

1. UVOD

Za raziskovalno nalogo: »Preizkusi za določitev vpliva ultrazvoka na intenzivnost zgorevanja premogovega praha v parnem kotlu«* so bili izvedeni primerjalni preizkusi v parnem kotlu *Sulzer* za 140 t/h št. III v TE Šoštanj v letu 1962.

Za izvedbo teh preizkusov je bil nameščen nad vsakim od štirih gorilnikov za premogov prah tega kotla po en generator ultrazvoka. V ta namen je bila pripravljena v šamotnem obzidju odprtina s premerom 80 mm. Za preizkuse je bil uporabljen generator ultrazvoka lastne konstrukcije po *Hartmannu* na pogon s komprimiranim zrakom in izdelan iz nerjavnega jekla »Prokron«. Preizkusi so bili izvedeni s 4 enakimi generatorji ultrazvoka z naslednjimi podatki:

moč ultrazvoka:	W	71
frekvenca pri 1000 °C	kHz	22,5
obratovalni tlak (abs.)	bar	4,2

Za obratovanje teh generatorjev pri visoki temperaturi v kurišču (okoli 1000 °C) je bilo treba zagotoviti:

— dovajanje in odvajanje hladilne vode in

— dovajanje komprimiranega zraka (4,2 bar).

To je omogočil sistem treh koncentričnih cevi z dolžino, kakršno terja debelina obzidja kotla na mestu vgradnje (okoli 540 mm) ter gibljivega priključka generatorja ultrazvoka.

Za namestitev teh generatorjev ultrazvoka v pripravljene odprtine ∅ 80 mm je bilo treba najprej vstaviti sprejemne armature, ki sestoje iz vodilnih cevi ustrezne dolžine in fiksnih priključkov. Fiksni priključek ima take nastavke, s katerimi se ujemajo odprtine gibljivega priključka generatorja ultrazvoka. Ko vstavimo generatorje ultrazvoka v vodilne cevi, sproti pritrdimo njihove gibljive priključke na fiksne s pomočjo preklopnih stremen.

Da bi generator prenehal proizvajati ultrazvok, ne da bi ga izvlekli iz vodilne cevi, povsem zadostuje, da naravnamo absolutni tlak na 1,8 bar. Tolikšen tlak namreč ne zadostuje za proizvajanje ultrazvoka, pač pa ga zadostno hladi in ščiti pred nasedanjem letečega pepela.

Po teh prvih pripravah je bila izvedena serija primerjalnih preizkusov, in sicer vsakokrat:

— najprej pri normalnem načinu obratovanja kotla in

— nato ob delovanju in učinkovanju ultrazvoka.

Da bi olajšali opazovanje vpliva ultrazvoka na zgorevanje smo imeli namen izvesti oba preizkusa v enakih razmerah, tj.:

— s premogom z enako kurilnostjo;
— pri enaki finosti mletja premoga;
— pri enaki obremenitvi kotla;
— pri enako dolgih preizkusnih dobah (6 ur);
— pri optimalno naravnanem razmerniku zraka;
— pri enakem podtlaku v kurišču.

Pri izvedenih preizkusih smo merili vse veličine, ki so potrebne za določitev izkoristka kotla po indirektni metodi (DIN 1942). Pri vseh preizkusih z ultrazvokom je znašala poprečna moč ultrazvoka na 1 m³ kurišča okrog 0,41 W/m³.

Po preračunu merilnih odčitkov so bili ugotovljeni rezultati, o katerih je bilo prvič poročano na III. simpoziju JDT 1966. leta v Zagrebu ter še posebej v reviji *Tehnika* — Opšti deo [1].

Tu pa navajamo samo nepričakovani rezultat, ki je pomemben za temo tega referata, namreč: *količino letečega pepela,* izločeno iz obeh polj elektrofiltra. To količino smo določili pri vseh preizkusih na enak način. Pokazal se je nepričakovani rezultat, da smo dobili pri preizkusih z ultrazvokom za 10 . . . 24 % večjo količino letečega pepela kakor pa pri preizkusih brez ultrazvoka.

2. ANALIZA VZROKA ZA POVEČANO KOLIČINO LETEČEGA PEPELA

V kuriščih parnih kotlov s kurjavami na premogov prah imamo *aerosole,* ki jih tvorijo:

— pred zgorevanjem: zgorevalni zrak kot nosilni medij in leteči delci premogovega praha;

— po zgorevanju: dimni plini kot nosilni medij in leteči pepel.

Če dodamo toku aerosola, ki nastaja pri atmosferskem zgorevanju v kuriščih kurjav na premogov prah, dodatno ultrazvočno valovanje, potem

* Poročilo na V. simpoziju JDT v maju 1978 v Sarajevu.

nas zanima, kako to vpliva na dimne pline in leteči pepel. Ultrazvok smo izbrali zato, da bi dobili pri višjih frekvencah močnejše vplive ter zato, da močnejši zvoki s frekvenco nad mejo slišnosti ne bi motili okolice.

Pri izvedenih preizkusih je delovalo ultrazvočno valovanje kot longitudinalno stojno valovanje *prečno* na smer gibanja aerosola. Pri tem se gibljejo delci plina s hitrostjo, ustrezno jakosti zvoka, v taktu frekvence sem in tja ter se pri tem pomikajo tudi še v smeri toka aerosola, tj. po kurišču navzgor. Pod vplivom ultrazvoka se torej gibljejo delci plina po načinu cik-cak.

Kaj se pri tem dogaja z letečimi delci premoga oziroma z letečim pepelom? Pri določeni frekvenci ultrazvočnega valovanja nihajo leteči delci tembolj z nosilnim plinom, čim drobnejši so; delci določene velikosti pa tem manj slede nihanju plina, čim višja je frekvenca ultrazvoka.

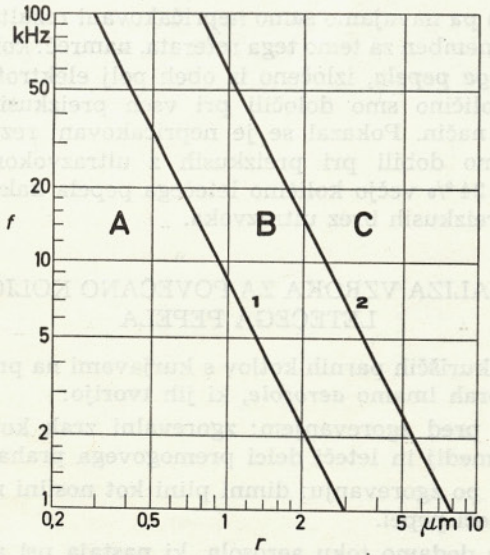
Stopnja sonihanja, tj. kooscilacije delca z zvočnimi nihaji nosilnega plina v stojnem valovanju, je podana po *Bergmannu* [2] z razmerjem:

$$\frac{x_p}{x_g} = \frac{\text{amplituda delca}}{\text{amplituda plina}}$$

Če bi bilo: $x_p = x_g$, bi imeli teoretični primer popolne kooscilacije delcev, ki pa v praksi sploh ni mogoča.

Sonihanje delcev v polju zvočnega valovanja prikazuje pregledno sl. 1, v kateri je na abscisi polmer delca, na ordinati frekvenca zvoka in kot parameter razmerje amplitud x_p/x_g. Na sliki 1 sta vrisana le dva značilna parametra, in sicer

parameter 1: stopnja kooscilacije $x_p/x_g = 0{,}8$
parameter 2: stopnja kooscilacije $x_p/x_g = 0{,}2$.



Sl. 1. *Zveza med polmeri delcev in frekvenco zvoka za dve stopnji kooscilacije*

Ta dva parametra razdelita sliko 1 na tri področja: A, B in C.

V področju A nihajo skupno s plinom praktično vsi delci heterogenega aerosola,

v področju B nihajo skupno s plinom drobnejši delci z večjo implitudo, debelejši delci pa z manjšo amplitudo,

v področju C praktično mirujejo vsi delci aerosola.

Aglomeracija je pojav, ko se drobni delci ob sonihanju v zvočnem polju medsebojno zadevajo in združujejo v večje delce. To je prva faza aglomeracije, ki se pojavlja v področju A, kjer sprva niha večina delcev v zvočnem polju. Druga faza aglomeracije pa se pojavi v področju B, kjer drobnejši delci nihajo z večjo amplitudo in pri tem nujno zadevajo ob debelejše delce, ki nihajo z manjšo amplitudo.

Določene velikosti delcev premoga nihajo v polju ultrazvočnega valovanja sprva razmeroma malo. Ko pa delci premoga zgore, preostanejo delci letečega pepela, katerih velikost je zmanjšana od delcev premoga v razmerju količine pepela. Zato se ustrezno poveča stopnja nihanja teh zmanjšanih delcev, na katere potem vpliva aglomeracija.

Pri opravljenih preizkusih je deloval ultrazvok pri visoki temperaturi v kurišču (okoli 1000 °C). Zato so bili delci letečega pepela v testastem stanju. Zaradi ultrazvočne aglomeracije smo dobili zato skupke (= aglomerate), ki so se sprijeli oziroma natalili skupaj. To so razmeroma zelo *stabilni* sprimki, ki ne morejo razpasti v svoje sestavne dele, ker so kakor zlepljeni.

Znano je, da izloča elektrofilter samo take velikosti delcev letečega pepela oziroma njihove sprimke, pri katerih je elektrostatična privlačna sila večja od dinamične sile, s katero vleče tok plinov te delce s seboj.

Pri preizkusih z ultrazvokom so bile aglomerirane določene količine letečega pepela, zato jih je elektrofilter izločil več, kakor pa pri preizkusih, pri katerih ultrazvok ni vplival.

3. PREIZKUSI V CEMENTARNI TRBOVLJE

Opisano načelo aglomeracije smo skušali uporabiti prvič pri raziskovalni nalogi: »Preizkus uporabe aglomeracije, nastale zaradi ultrazvoka, za dodatno čiščenje dimnih plinov v ciklonih sušilnice premoga v Cementarni Trbovlje«.

Pri teh preizkusih so bili nameščeni generatorji ultrazvoka pri temperaturi odtekajočih dimnih plinov. Zato ni bilo treba hladiti generatorjev ultrazvoka; hladilni del generatorjev je bil zato demontiran.

Razumljivo je, da nastanejo aglomeracijski skupki sicer tudi pri nižjih temperaturah dimnih plinov, da pa niso tako dobro »zlepljeni«, kakor je

bil to primer pri skupkih, nastalih pri aglomeraciji v kurišču. Čim pridejo ti nestabilni skupki na vtok v ciklone, se tu poveča hitrost aerosola nad 12 m/s. Pri tolikšni hitrosti pa skupki razpadejo na svoje prvotne sestavne komponente. Zato pri teh preizkusih sploh ni bilo mogoče pričakovati kakšnega uspeha.

4. PREIZKUSI V TOPLARNI LJUBLJANA

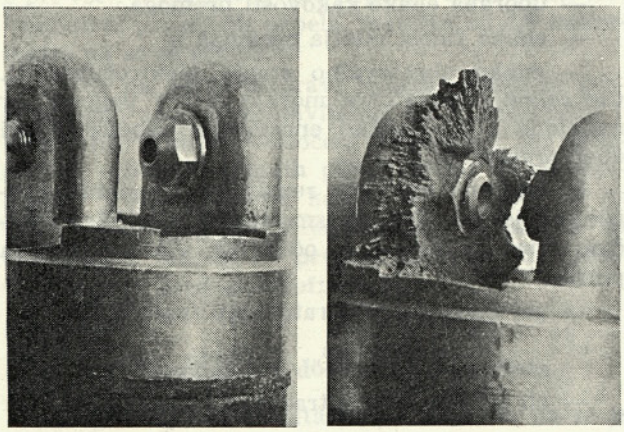
Pri raziskovalni nalogi: »Preizkus uporabe aglomeracije letečega pepela, nastale zaradi ultrazvoka, za dodatno čiščenje dimnih plinov v elektrofiltrih Toplarne Ljubljana« smo opravili preizkuse ob delovanju ultrazvoka v *predkomori* elektrofiltra, tj. pri razmeroma nizki temperaturi odtekajočih dimnih plinov. Zato smo uporabili v ta namen generatorje ultrazvoka, ki so imeli demontiran hladilni del, kakor pri preizkusih v Cementarni Trbovlje.

Prvi preizkusi so bili opravljeni v juliju 1976 leta, in sicer kot primerjalni preizkusi. To pomeni, da je bil opravljen prvi preizkus pri normalnem obratovanju kotla, nato pa še ob delovanju ultrazvoka.

Preizkusi so bili izvedeni na kotlu 1, ki stoji bliže upravni stavbi. Na iztoku iz tega kotla se razdele dimni plini na dva dela: na desno in na levo stran. V vsako stran so vgrajeni grelnik zraka *Ljungström*, elektrofilter in ekshaustor. Pred vtokom v dimnik se zopet združijo plini desne in leve strani.

Prvi preizkusi so bili opravljeni tako, da je deloval pri primerjalnem preizkusu ultrazvok samo v predkomori elektrofiltra desne strani. V ta namen sta bila uporabljena dva generatorja ultrazvoka (sl. 2), za katerega so veljali podatki:

moč ultrazvoka	W	121
frekvenca pri 160 °C	kHz	18
obratovalni tlak (abs.)	bar	5,2

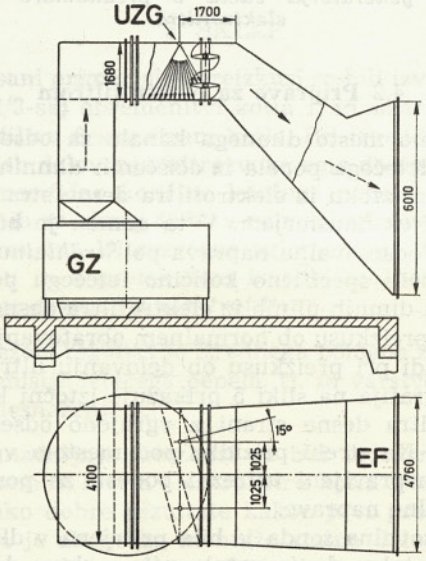


Sl. 2. *Glava UZ — generatorja: levo pogled na šobo, desno pogled na rezonator po delovanju*

4.1 Priprave pred elektrofiltrom

Stopnja aglomeracije je odvisna od časa, v katerem so bili delci letečega pepela v aerosolu izpostavljeni vplivu ultrazvoka, tj. čim manjša je hitrost plinov, tem večja je stopnja aglomeracije. Torej je treba izbrati za namestitev generatorjev ultrazvoka tisti del dimnega kanala pred elektrofiltrom, kjer je prerez največji.

Glede na dostopnost in na možnost strege smo izbrali mesta za vgradnjo ultrazvočnih generatorjev, kakor to prikazuje slika 3. V strop predkomore elektrofiltra desne strani kotla 1 sta bili vgrajeni dve cevi s prirobnicami za namestitev sprejemne armature. Vsaka od teh cevi s prirobnicami je nameščena v sredini obeh namišljenih polovic širine predkomore elektrofiltra, in sicer toliko pred zapornimi loputami, kolikor je to potrebno, da lopute ne bi ovirale širjenja ultrazvoka.



Sl. 3. *Razmestitev prirobnic za vgradnjo UZ — generatorjev v predkomoro desnega elektrofiltra kotla 1 v Toplarni Ljubljana*

V pripravljeni dve cevi s prirobnicama v stropu predkomore elektrofiltra sta bili vgrajeni sprejemni armaturi za generatorje ultrazvoka tako

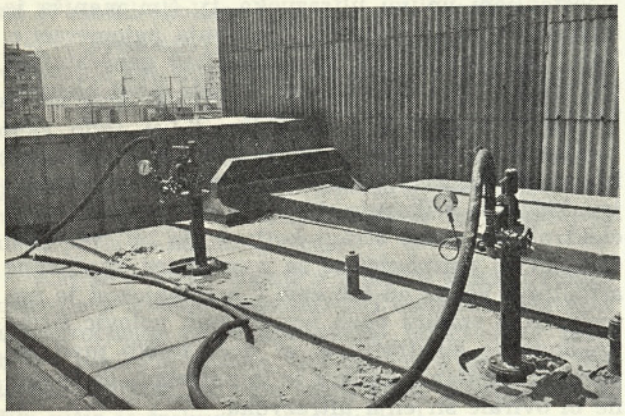
— da sta segali v tok dimnih plinov predkomore elektrofiltra samo glavi obeh generatorjev ultrazvoka;

— da je oklepala os pahljače širjenja ultrazvoka vsakega generatorja kot okrog 15° s smerjo toka dimnih plinov (v tem primeru se ultrazvočni valovanji obeh generatorjev medsebojno ne ovirata) in

— da zapolni ultrazvok vsakega generatorja pripadajoči del predkomore elektrofiltra.

Na vsako sprejemno armaturo sta bila priklopljena po 1 manometer za nadtlak 10 bar ter priključena armirana gumijasta cev za dovod

komprimiranega zraka. Fotografija na sliki 4 prikazuje nameščena oba generatorja ultrazvoka na vrhu predkomore elektrofiltra desne strani.



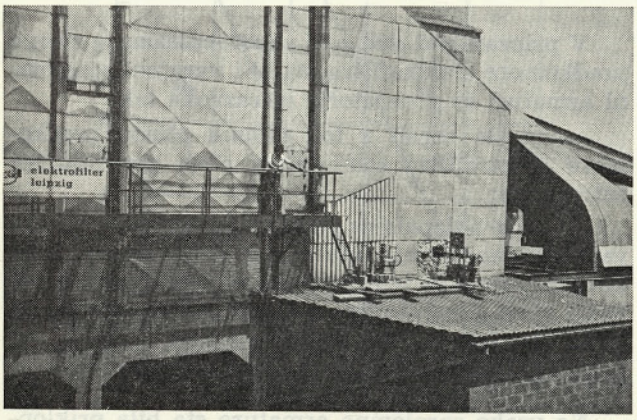
Sl. 4. *UZ generatorja vdeta v predkomoro desnega elektrofiltra*

4.2 Priprave za elektrofiltrom

Merilno mesto dimnega kanala za odsesavanje vzorcev letečega pepela iz očiščenih dimnih plinov je bilo na iztoku iz elektrofiltra desne strani, vendar pred ekshaustorjem. V ta namen je bila uporabljena odsesovalna naprava po *Ströhleinu*. Z njo smo določili specifično količino letečega pepela v očiščenih dimnih plinih iz elektrofiltra desne strani tako pri preizkusu ob normalnem obratovanju kotla kakor tudi pri preizkusu ob delovanju ultrazvoka.

Fotografija na sliki 5 prikazuje iztočni kanal iz elektrofiltra desne strani z vgrajeno odsesovalno napravo. Na strehi prizidka pod mestom vgradnje so bili pripravljeni ustrezni podesti za postavitev odsesovalne naprave.

Odsesovalna sonda je bila pritrjena v dimovodni kanal tako, da je segala njena glava do okrog 1/3 širine dimovoda in je bila obrnjena proti smeri toka plinov. Pri črpanju so se pretakali dimni plini



Sl. 5. *Iztočni dimni kanal desnega elektrofiltra z vgrajeno odsesovalno sondo za aparaturo STRÖHLEIN*

po vrsti skozi navedene elemente *Ströhleinove* odsesovalne naprave:

— odsesovalna glava z odsesovalno sondo;

— izločevalnik letečega pepela z grelnikom;

— hladilnik dimnih plinov in izločevalnik vlage;

— sušilni stolp s silikagelom;

— rotameter za pretočno količino dimnih plinov;

— plinometer (števec za količino dimnih plinov)

— regulacijski ventil in ekshaustor na električni pogon.

Na vtočno stran plinometra sta bila montirana še termometer in U-cevni manometer.

4.3 Potek in rezultat preizkusov

Izvedena sta bila dva preizkusa; vsak je trajal po 60 minut. Prvi preizkus je bil izveden pri normalnem načinu obratovanja kotla, drugi pa ob učinkovanju ultrazvoka v predkomori elektrofiltra.

Vzorec letečega pepela iz očiščenih dimnih plinov se je nabiral pri preizkusih na filtrirnem papirju, ki je bil vstavljen v izločevalnik. Ta je bil električno ogrevan, tako da se ni mogla pojaviti kondenzacija vodnih par v dimnih plinih.

Pred vsakim preizkusom je bil filtrirni papir sušen pol ure pri temperaturi 105 °C in nato stehtan. Prav tako je bil posušen in stehtan filtrirni papir z nabranim letečim pepelom po vsakem preizkusu.

Med vsakim preizkusom smo odčitovali vse veličine, ki jih omogoča naprava po *Ströhleinu*. Za ugotavljanje preostalih obratovalnih podatkov parnega kotla 1 med preizkusi smo uporabljali odčitke kotelske komandne plošče.

Da bi bili rezultati obeh preizkusov medsebojno primerljivi, so morali biti izpolnjeni tile pogoji za stacionarno obratovanje:

— enaka in konstantna obremenitev parnega kotla 1,

— uporaba enake kakovosti premoga,

— enaka finost mletja premoga in

— enako obratovalno stanje elektrofiltra, tj. vse celice elektrofiltra morajo biti v pogonu ter napajane s konstantno enosmerno napetostjo pri obeh preizkusih.

Iz izračuna merilnih rezultatov izvedenih preizkusov je razvidno, da smo dobili specifično količino letečega pepela v očiščenih vlažnih dimnih plinih

— pri normalnem obratovanju (vzorec 1):

$$0{,}0992\ g/m^3_{nv} \ldots 100\ \%$$

— ob učinkovanju ultrazvoka (vzorec 2):

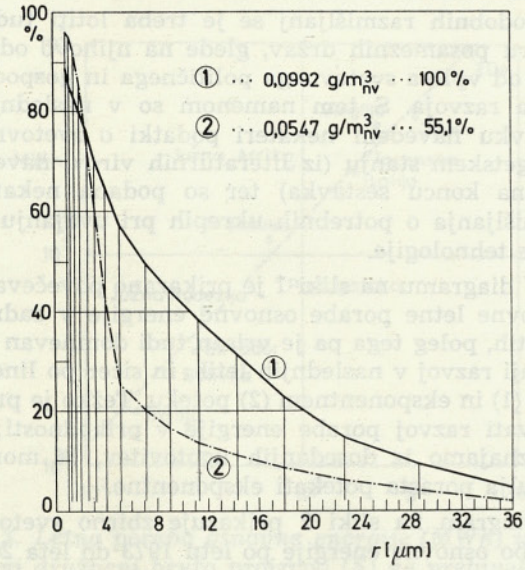
$$0{,}0547\ g/m^3_{nv} \ldots 55{,}1\ \%$$

kar lahko ocenimo kot pomemben uspeh.

4.4 Granulacijski sestav vzorcev letečega pepela

Da bi dobili prepričljivo razlago za dobljeni rezultat, smo oddali nasesane vzorce letečega pepela obeh preizkusov (vzorec 1 in vzorec 2) v granulacijsko analizo z napravo *Coulter Counter* mod. TA, ki meri do velikosti delcev 1 mikrometra.

Rezultati te analize so prikazani na sliki 6, ki kaže kumulativni krivulji utežnih deležev (v %) raznih velikosti delcev letečega pepela v očiščenih dimnih plinih pri obeh izvedenih preizkusih.



Sl. 6. *Kumulativni krivulji utežnih odstotkov letečega pepela v očiščenih dimnih plinih pri primerjalnih preizkusih elektrofiltra kotla 1 v Toplarni Ljubljana (julija 1976)*

S te slike je razvidno, da so se v primerjavi z ustreznimi utežnimi deleži vzorca 1 *zmanjšali* kumulativni utežni odstotki letečega pepela vzorca 2 pri vseh premerih delcev pepela, večjih od 2,6 mikrometra; pri delcih pepela, manjših od 2,6 mikrometra pa so se *povečali*.

Glede na način priprave vzorca pepela za granulacijsko analizo ugotavljamo, da so morebitni v elektrofiltru sicer neizločeni aglomerati ter odsesani iz očiščenih dimnih plinov nujno že razstavljeni v svoje sestavne komponente. Torej se na sliki 6 podani granulacijski sestav ne nanaša na aglomerate, temveč na prvotne sestavne dele letečega pepela pred elektrofiltrom.

4.5 Obrazložitev doseženega rezultata

Iz ugotovljenih rezultatov je razvidno, da se je zmanjšala specifična količina letečega pepela v očiščenih dimnih plinih pri preizkusu ob delovanju ultrazvoka za okrog 45 %, tj. od 100 % na 55 %. To pomeni, da je elektrofilter izločil ob delovanju ultrazvoka toliko več letečega pepela, kolikor se je pri tem preizkusu zmanjšala specifična količina letečega pepela v očiščenih dimnih plinih.

Ta rezultat je v skladu z zmanjšanjem kumulativnih utežnih odstotkov vseh delcev letečega pepela, večjih od 2,6 mikrometrov. Dejstvo, da se je povečal kumulativni utežni delež odstotkov letečega pepela, manjših od 2,6 mikrometrov, pa si razlagamo takole:

— zaradi nezadostno dolge dobe učinkovanja ultrazvoka niso sodelovali pri aglomeraciji vsi drobnejši delci;

— zaradi izločanja debelejših delcev letečega pepela v elektrofiltru so postali neizločeni drobnejši delci relativno številnejši (njihov kumulativni utežni delež v odstotkih se je zato povečal).

5. SKLEP

Opisani primerjalni preizkusi so bili izvedeni pri okrog 2/3-ski obremenitvi kotla 1, in sicer samo na elektrofiltru desne strani kotla. Pri izvedenem preizkusu ob delovanju ultrazvoka smo dosegli zmanjšanje specifične količine letečega pepela v očiščenih plinih za okrog 45 % v primerjavi z normalnim obratovanjem. Ultrazvočna aglomeracija daje torej v načelu in v preizkušeni izvedbi možnost za *poboljšanje delovanja elektrofiltrov.*

Doseženi rezultat je izrednega pomena za zmanjšanje emisije letečega pepela, tj. za varstvo ozračja pred onesnaženjem.

Vsi nadaljnji preizkusi so bili izvedeni hkrati na desnem in levem elektrofiltru kotla 1 ter so dali prav tako dobre rezultate kakor prvi preizkusi. V pripravi je akcija za montažo stalno delujočih generatorjev ultrazvoka z vzbujanjem s pregreto paro kot pihalnem mediju namesto komprimiranega zraka.

LITERATURA

[1] L. Andrée: Ultrazvuk u ložištima parnih kotlova, TEHNIKA — Opšti deo, 1969/12.

[2] L. Bergmann: Der Ultraschall, 1954.

[3] POROČILO o merjenjih ob preizkusu uporabe aglomeracije, nastale zaradi ultrazvoka, za dodatno čiščenje dimnih plinov v ciklonih sušilnice premoga v Cementarni Trbovlje. LJUBLJANA, december 1971.

[4] TEHNIČNO POROČILO o preizkusu ultrazvočne aglomeracije za izboljšanje delovanja elektrofiltrov. LJUBLJANA, december 1976.

[5] SFRJ — patentna prijava: P — 2154/76 od 2. 9. 1976.

[6] BRD — patentna prijava: P 27 01 498.8 — 23.

Avtorjev naslov: prof. ing. Leopold Andrée
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani