

# Analiza neophodnih bezbednosnih mera pri efikasnom korišćenju ugljenog praha

Mr Branislav Repić, dipl. inž., mr Slobodan Šikmanović, dipl. inž.,  
dr Ljubomir Jovanović, dipl. inž., Ljubomir Stamenić, dipl. inž.,  
Institut za nuklearne nauke "Vinča",  
Laboratorija za termotehniku i energetiku, PF 522, 11001 Beograd

*U novim tehnologijama korišćenja ugljenog praha (UP), radi njegovog efikasnog korišćenja, posebna pažnja se mora posvetiti odgovarajućim merama zaštite i sigurnosti u radu, s obzirom da je UP eksplozivan i zapaljiv. U radu je izvršena analiza mera i postupaka zaštite pri radu sa UP, kao i pregled kritičnih uslova pri kojima može doći do pojave samozapaljenja i eksplozije UP. Kao primer, navedene su praktične mere zaštite primenjene na postrojenju za potpalu kotlova sa UP na TE "Kolubara".*

## 1. Uvod

U poslednje vreme se opravdano pridaje veliki značaj zameni uvoznih tečnih goriva domaćim energetskim sirovinama. S obzirom na rasprostranjenost u našoj zamlji, jedina realna alternativa tečnim gorivima su domaći ligniti. Do sada je kod nas lignit korišćen uglavnom u energetskim kotlovima. Međutim, kada je reč o lignitu u vidu UP, potencijalno polje primene je daleko veće, kao npr. u industrijskim ložištima i kotlovima, ciglanama, krečanama, cementarama i dr.

Uporedo sa razvojem tehnologija sa UP, tj. opreme za proizvodnju, skladištenje, transport i sagorevanje UP, treba posvetiti odgovarajuću pažnju merama zaštite i sigurnosti pri radu. Razlog za to leži u činjenici da UP karakterišu zapaljiva eksplozivna svojstva. Kod nas se čine koraci u razvoju novih tehnologija sa UP. Radi se na zamenu tečnih goriva pri startu i podršci vatre u energetskim kotlovima. U tom cilju je izgrađeno probno postrojenje za potpalu i podršku vatre u kotlovima TE "Kolubara". Pri projektovanju ovog postrojenja prostudirani su aspekti potencijalne opasnosti kao i mere zaštite pri rukovanju sa UP, izvršen je pregled inostranih normi, pošto naše ne postoje, i pregled literaturnih podataka, kao i analiza već izvedenih postrojenja u svetu.

## 2. Opasnosti pri rukovanju ugljenim prahom

Kada se nalazi u naslagama, UP je sklon samozapaljenju i tinjanju. Samozapaljenje i tinjanje predstavljaju spontano zagrevanje UP usled apsorpcije kiseonika iz okoline, ili procesa oksidacije čestica UP. Uslovi koji pogoduju ovoj pojavi su [4]:

- finoća meljave UP,
- sadržaj kiseonika u UP i sposobnost čestica da apsorbuju kiseonik iz okoline, vlaga sopstvena ili iz okoline,

- prisustvo "uhvaćenog" vazduha u naslagama,
- prisustvo sumpora u obliku pirita ili markazita (povećava krtost UP, što dovodi do usitnjavanja čestica),
- povišene temperature površine na kojoj su nahvatane naslage,
- nedovoljna ventilacija okolnog prostora i dr.

Istraživanja su pokazala [9] da za UP postoje utvrđene karakteristike paljenja i eksplozivnosti i to temperatura samozapalivosti, tinjanja i paljenja, donja i gornja granica eksplozivnosti, pritisak eksplozije, maksimalno vremensko povećanje pritiska i stepen eksplozivnosti. Postoje manje-više standardne metode određivanja ovih karakteristika. Međutim, one mnogo zavise od samog UP i to: finoće mlevenja, sadržaja kiseonika u UP, sadržaja pepela, vlage i isparljivih u UP, koncentracije UP i dr. Kvalitativne promene su prikazane na slici 1: a) promena temperature i sadržaja O<sub>2</sub>, CO i CO<sub>2</sub> u vremenu tokom skladištenja UP u bunkeru; b) promena eksplozivnog pokazatelja, u zavisnosti od koncentracije UP i sadržaja pepela; c) uticaj sadržaja vlage u UP; d) uticaj sadržaja isparljivih u UP.

Dovođenjem tinjajućeg UP u stanje lebdenja, postižu se uslovi koji omogućuju eksploziju, u slučaju da postoji neki izvor paljenja. Iskustvo u radu sa UP i analiza uzroka požara i eksplozija UP su pokazali da su najčešći izvori paljenja (a zatim i eksplozije) UP sledeći: Otvoreni plamen, varnice, usijani materijali, toplota trenja, egzotermne hemijske reakcije itd.

Uslovi i parametri koji utiču na pojavu eksplozije UP su sledeći [2, 3, 4]:

- Mešavina UP i vazduha u koncentracijama od 50 do 600 g/m<sup>3</sup>.
- Granična vrednost procenta isparljivih materija u UP sa aspekta eksplozivnosti se smatra 6%. Ako je taj procenat veći, postoji opasnost od eksplozije, za procenat manji od 35% opasnost je manja, a ako je veći opasnost je prisutna.
- Opasnost od eksplozije je veća što je procenat vlage i mineralnih materija u UP manji.
- Ako je O<sub>2</sub> < 16% (u okolini UP), nema opasnosti od eksplozije.

Neki rezultati ispitivanja eksplozivnih karakteristika domaćih ugljeva se mogu naći u radovima [4, 5].

## 3. Mere zaštite

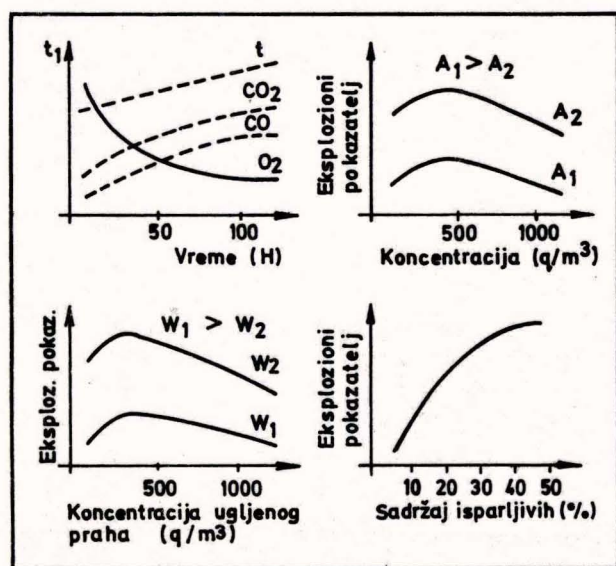
Naša zemlja još uvek nema propisane mere zaštite postrojenja koja rade sa UP. Zato je korisno koristiti ruske i nemačke standarde [6] o toj problematici.

Zbog velikog broja normi, od kojih su mnoge za konkretne vrste uglja i opremu, izvršena je sistematizacija svih mera, u cilju boljeg sagledavanja problematike. Uslovno su sve mere podeljene na projektne, u toku rada i za umenjenje posledica u slučaju havarija.

Sve neophodne mere zaštite i postupci se moraju predvideti u projektnoj fazi, međutim u ovom radu se pod pojmom projektnih mera podrazumeva, pre svega, sama filozofija ili strategija zaštite. U tom smislu se pod projektnim merama podrazumevaju sledeće:

- 1) Sprečavanje razletanja (raspršivanja) UP kao i pristup potencijalnih izvora paljenja UP.
- 2) Sprečavanje mogućnosti taloženja UP u pojedinim komponentama i to na sledeći način:
  - cevovodi moraju biti nagnuti prema horizontali bar za 45° (izuzetno mogu biti horizontalni, ako je i pri minimalnom režimu pneumatskog transporta UP brzina nosećeg gasa veća od 18 m/s);
  - bunker i druge komponente moraju biti sa glatkim unutrašnjim površinama i takvog oblika koji omogućavaju potpuno pražnjenje.
- 3) Konsekventno uzemljenje celog postrojenja (čime se izbegava stvaranje elektrostatičkog naboja i iskri).
- 4) Pravilno zaptivanje pojedinih komponenti i njihovo izolovanje radi sprečavanja kondenzacije vlage iz UP i iz nosećeg gasa.
- 5) Po mogućstvu vršiti manipulaciju UP sa nosećim gasom sa sadržajem O<sub>2</sub> ispod 16% (npr. dimnim ili inertnim gasovima, ili smešom vazduh-inertni gas, vazduh-dimni gas i sl.)
- 6) Predvideti praćenje temperature u prostoru gde se zadržava UP (bunker, cikloni i sl.), a po mogućnosti i nekih gasova kao što su CO, H<sub>2</sub> ili CH<sub>4</sub>, koji se razvijaju pri tinjanju UP. Predvideti mere zaštite koje deluju u slučaju prekoračenja dozvoljenih nivoa (temperatura više od 50 °C, sadržaj CO veći od 0,3% itd.)
- 7) Predvideti adekvatne mere za umanjenje posledica u slučaju havarije.
- 8) Potrebno je osigurati da se pomoćni personal za rad na postrojenjima upozna i striktno pridržava uputstava za rukovanje i sa odgovarajućim merama u slučaju opasnosti. Ovo posebno važi za protivpožarnu službu.

Pod merama zaštite pri radu postrojenja (što je uopšteno obuhvaćeno tačkom 6. projektnih mera) podrazumevaju se one mere koje se primenjuju kada pojedini radni parametri počnu da odstupaju od uobičajenih vrednosti i time ukazuju na smanjen stepen sigurnosti. Ove mere se uglavnom odnose na komponente u kojima se UP zadržava duže vreme, kao što



Slika 1. Kvalitativne promene eksplozivnih pokazatelja; a) uticaj vremena skladištenja; b) uticaj koncentracije praha i sadržaja; c) uticaj sadržaja vlage; d) uticaj sadržaja isparljivih

su bunker, prihvatni rezervoari ispod ciklona i sl. i podrazumevaju sledeće:

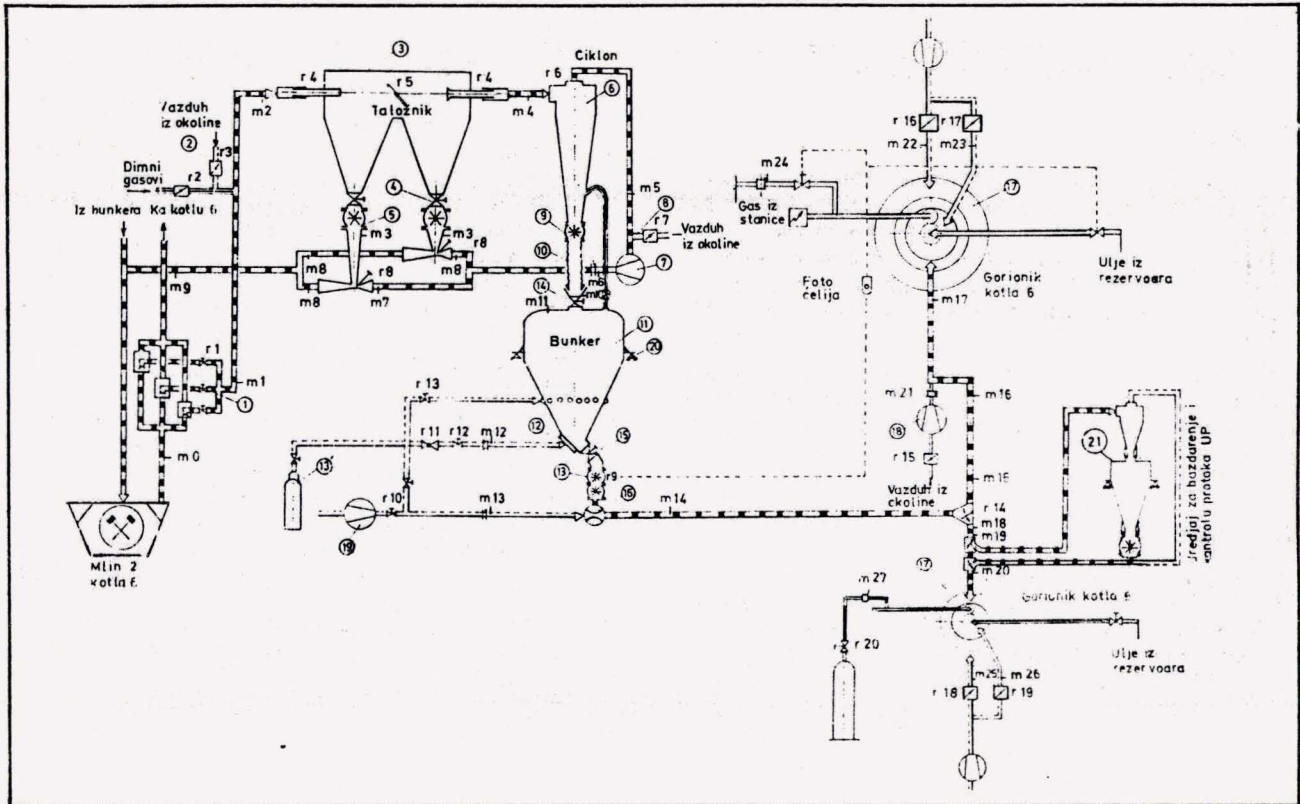
- 1) Potrebno je inertizovati prostor iznad UP sa CO<sub>2</sub> ili N<sub>2</sub>, ako se predviđa da će UP mirovati duže od 12 h u skladišnom bunkeru.
- 2) Treba obezbediti mali natpritisak u prostoru iznad UP (≈ 100 Pa), radi sprečavanja prodora svežeg vazduha iz okoline.
- 3) U slučaju prekoračenja dozvoljenih nivoa temperature ili sadržaja CO preduzima se sledeće:
  - ubacuju se nove količine inertnog gasa i u prostoru iznad UP se održava mali natpritisak;
  - vrši se pražnjenje bunkera, s tim da se UP koristi u daljem procesu, bez uskladištenja novih količina, sve dok se UP potpuno ne istroši.
- 4) Ukoliko prethodne mere nisu dovele do poboljšanja situacije, a pogotovo ako se konstatuje tinjanje ili otvoren plamen, preduzimaju se sledeće mere:
  - ubrizgavanje vode ili zasićene vodene pare u prostor iznad UP i to paralelno sa tavanicom, da se UP ne bi "uzburkao";
  - pojačano ubacivanje inertnog gasa;
  - vrši se havarijsko pražnjenje bunkera nakon sanacije stanja.

Sve dosad navedene mere služe za sprečavanje najteže vrste havarije, tj. eksplozije. Pošto nijedna mera zaštite nije potpuno sigurna, moraju se predvideti i mere za umanjenje posledica od eventualne eksplozije. Postoje tri osnovna načina umanjenja posledica:

- 1) Projektovanje svih delova postrojenja da izdrže maksimalne pritiske koji se razvijaju pri eksploziji.
- 2) Predviđanja zaštitnih (eksplozivnih) klapni za izduvavanje gasova pri eksploziji, čime se zaštićuju ostale komponente postrojenja i osoblje.
- 3) Predviđanje ubacivanja određenih inhibitora koji deluju kao negativni katalizatori (J, B, soli alkalnih metala) na određene hemijske reakcije koje se odvijaju pri eksploziji i na taj način ne dozvoljavaju razvijanje velikih pritisaka sa težim posledicama po pojedine komponente, postrojenja i osoblje.

Prva metoda se može upotrebiti za mala postrojenja, jer bi inače bila vrlo skupa (zidovi komponenti moraju izdržati pritiske od ≈ 0,8 MPa koji se razvija pri eksploziji UP). Treća metoda je nova, i tek je u fazi razrade u svetu. Za drugu metodu važe sledeći standardi:

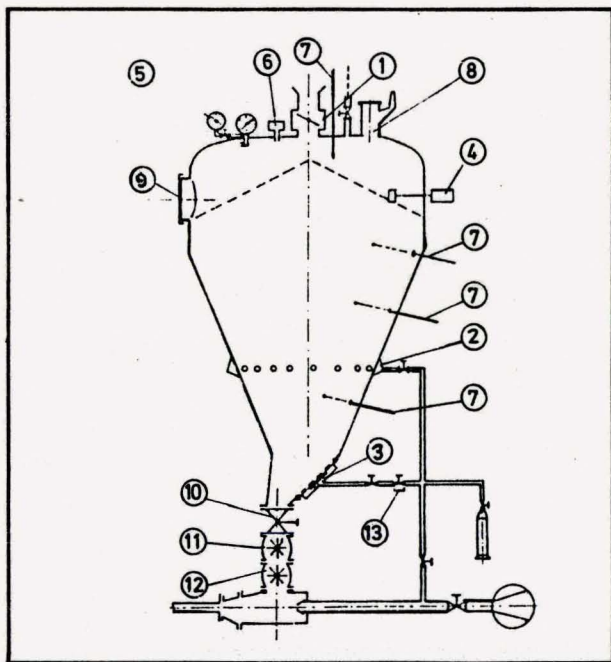
- oprema koja je snabdevena eksplozivnim klapnama (EK) mora biti dimenzionisana najmanje za natpritisak od 40 kPa;
- EK treba postaviti na delove postrojenja koja rade sa natpriskom od najviše 15 kPa;
- ukupna površina svih EK mora biti veća od 0,04 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> zapremine postrojenja koje uključuju proces proizvodnje UP (postojenja sa mlinovima sa čekićima) i 0,02 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (sa ventilatorskim mlinovima);
- cevovod mora biti opremljen sa EK potrebne površine u srazmeri sa svojom zapreminom (do 25 m<sup>3</sup>-0,04 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, do 75 m<sup>3</sup>-0,03 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, i preko 75 m<sup>3</sup>-0,02 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), sa ravnomernom raspodelom, a obavezno ispod i iza svih komponenti;
- na skladišnim bunkerima je obavezno postaviti 1 ili više EK ukupne površine kao i pri razmatranju celog postrojenja (0,04 ili 0,02 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>);
- na samom ciklonu je obavezno postaviti 1 ili više EK čija površina mora biti najmanje 0,05 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> zapremine ciklona.



Slika 2. Probno postrojenje za potpalu kotlova sa UP u TE "Kolubara"

#### 4. Primena mera zaštite na probnom postojenju

Da bi se pokazale navedene mere zaštite, uzeto je kao primer probno postrojenje za potpalu i podršku vatre u kotlovima TE "Kolubara". Postrojenje je šematski prikazano na slici 2.



Slika 3. Predviđene mere zaštite bunkera za skladištenje UP; 1 - ventil; 2 - fluidizacija bunkera; 3 - udvajanje inertnog gasa; 4 - nivometar; 5 - manometar; 6 - indikator CO; 7 - termopar; 8 - eksplozivna klapna; 9 - revizioni otvor; 10 - ventil; 11 - sektorski dozator; 12 - sektorski dozator

i može se grubo podeliti na dva sistema. Prvi sistem je usisno-potisni cevovod sa pripadajućim komponentama (usisna sonda, taložnik, ciklon, ventilator itd.) i služi za izdvajanje UP iz kanala aerosmeše i pripremu UP. Kapacitet linije je 1 000 kg/h UP i 6 500 m<sup>3</sup>/h dimnog gasa na 160 °C. Drugi sistem služi za skladištenje UP i pneumatski transport do gorionika posebne konstrukcije, snage 6 MW (1 200 kg/h UP) i 30 MW (6 000 kg/h UP) [7].

Kod usisno-potisne linije je procenjeno da nema nepovoljnih uslova sa aspekta sigurnosti (zbog inertizujućeg delovanja dimnih gasova) i kod transportnih cevovoda do gorionika. I pored toga predviđene su sledeće EK: na vrhu taložnika, na izlaznom kolenu iz ciklona, na povratnom delu usisno-potisne linije i ukupno 3 na transportnim cevima (slika 2). Posebne mere zaštite su predviđene za bunker (slika 3) u kome se skladišti UP. Olakšavajuća okolnost je da se pri punjenju bunkera, vrši se njegova izolacija ventilima, a zatim se prostrujava UP sa N<sub>2</sub>, dok natpritisak u bunkeru ne dostigne ≈ 100 Pa.

Tokom skladištenja se vrši dopunjavanje N<sub>2</sub>, radi održavanja pomenutog natpritisaka i sprečavanja prodora okolnog vazduha. Nadgledanje stanja u bunkeru se vrši kontinualnim indikatorom sadržaja CO i sa 4 termopara smeštena u njemu.

Dosadašnji rad sa postrojenjem je ukazao na ispravnost projektne i tehnološke strategije zaštite, kao i na predviđene mere zaštite. Do danas se nije konstatovalo ni jedno akcidentno stanje. U početku rada je povremeno dolazilo do "pufovanja" na eksplozivnoj klapni na vrhu taložnika. Razlog tome je bilo zagrevanje usisno-potisne linije toplim vazduhom kojom prilikom je kiseonik dolazio u kontakt sa već tinjajućim česticama UP. Po prestanku predgrevanja nije se više javljalo "pufovanje". Taj događaj je ukazao na nekoliko stvari:

- izvedene eksplozivne klapne su dobro funkcionisale,
- iako je u početku dolazilo do pomenutih pojava opasnosti po okolno osoblje nije bilo, i
- tinjajuće čestice UP koje su uskladištene u bunkeru nisu

izazivale nikakve dalje probleme, jer su adekvatno pripremljene mere zaštite (inertizacija sa N<sub>2</sub>).

## 5. Zaključak

U razvijanju tehnologija sa UP, mora se voditi računa o istraživanjima sigurnosnih aspekata manipulacije njime. Pošto ne postoje domaće norme u ovoj oblasti, predlaže se korišćenje nemačkih i ruskih normi. U radu su ove mere sistematizovane na tehničko-tehnološke mere zaštite u toku projektovanja i u toku rada i mere za umanjenje posledica eventualnih havarija.

Iskustva stečena na probnom postrojenju za potpalu i podršku vatre u kotlovima TE "Kolubara" pokazuju da je sigurna manipulacija sa UP moguća ukoliko se dosledno primene odgovarajuće mere zaštite.

## Literatura

- [1] MOWRER, D. S., Dungan K. W.: CEP, April 48 (1982).
- [2] \*\*\*: *Pravila vzbizobezopasnosti ustanovok dlja prigtovljenija i szigania topliv v pylevidnom sastoyanii*, ME SSSR, MTM SSSR (1956).
- [3] WOLFRUM, E., Scherrer, E.: *Ugljeni prah – svojstva i*

*sigurnosno-tehnički aspekti korišćenja*, ZEMENT-KALK-GIPS br. 8 (1981).

- [4] VUKANOVIĆ, B.: *Korelacija između fizičko-hemijskih osobina i eksplozivnih karakteristika prašina mrkih ugljeva u Jugoslaviji*, doktorska disertacija, Beograd (1962).
- [5] ČURČIĆ, A., Vukanović, B.: *Nataložena UP kao mogući uzrok pojave požara i eksplozija u elektroenergetskim postrojenjima*, Savetovanje o zaštiti od požara elektroenergetskih instalacija i postrojenja, Šibenik, april 1980.
- [6] \*\*\*: *Propisi o zaštiti na radu i zaštiti od požara 125/2 pogonske prostorije ugrožene od prašine uglja i koka*, "Službeni list DDR", posebno izdanje br. 774, Berlin, 19. juli 1974.
- [7] RADULOVIĆ, P., Šikmanović, S., Repić, B., Grubor, B.: *Idejno-tehničko rešenje probnog postrojenja za potpalu kotlova K-5 i K-6 u TE "Kolubara" posebno pripremljenim ugljenim prahom*, IBK-ITE-361, Juli 1982.
- [8] REPIĆ, B., Saljnikov, A.: *Pulverzied coal combustion in multifuel burners*, 2nd European Conference On Industrial Furnaces And Boilers, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2-5. april 1991.
- [9] ŠIKMANOVIĆ, S., Repić, B., Jovanović, Lj.: *Mogućnosti korišćenja ugljenog praha*, NIV-ITE-880), Vinča, april 1992.