Zatvaranje prve faze flotacijskog jalovišta „Pekina glavica“

DRAGANA D. NIŠIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DINKO N. KNEŽEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

LUKA M. ILINČIĆ, Gradirmontenegro, Pljevlja, R. Crna Gora

GORAN M. GOGIĆ, Gradirmontenegro, Pljevlja, R. Crna Gora

Originalni naučni rad

UDC: 621.271.4(497.113)

DOI: 10.5937/tehnika1801047N

U radu je prikazano zatvaranje prve faze flotacijskog jalovišta „Pekina glavica“ na rudniku „Šuplja stijena“ u Šulama, kod Pljevalja u Crnoj Gori. Rudnik se opredelio za višefazni razvoj flotacijskog jalovišta, tako da su se otvaranjem trećeg jalovišta stekli uslovi za zatvaranje jalovišta iz prve faze. Odabrali su metodu suvog zatvaranja nanošenjem više slojeva materijala različitih karakteristika, saglasno preporukama Međunarodne komisije za visoke brane (ICOLD). Uglavnom su korišćeni zemljani materijali izvađeni iz podine trećeg jalovišta, otkrivka sa rudnika i krupnozrna jalovina iz procesa pretkoncentracije. Planirano je nanošenje 5 slojeva ukupne debljine 1,6 m, a zbog viška zemljanog materijala iz podine, ukupna debljina je premašila 4 m. Ovakvom metodologijom zatvaranja ispunjeni su zahtevi urbanista i ekologa, a zatvaranjem i formiranjem biopokrivača zadovoljno je i stanovništvo iz okruženja. Racionalnim korišćenjem raspoloživih resursa zatvaranje je postalo finansijski održivo za kompaniju.

Ključne reči: Rudnik „Šuplja stijena“, zatvaranje flotacijskog jalovišta, višeslojni pokrovni sistem, kisele drenažne vode

1. UVOD

Flotacijska jalovišta su rudarski objekti bez kojih se ne može računati na primenu flotacijske koncentracije. Saglasno tome, koncentraciju ruda obojenih metala karakterišu flotacijska jalovišta, koja svojim dimenzijama zavređuju posebnu pažnju.

Za izbor lokacije i formiranje flotacijskih jalovišta potrebno je razmotriti i međusobno uporediti desetine parametara, složenih u tehnološko-tehničke, urbanističke, ekološke, ekonomske i sociološke faktore [1].

Među tim parametrima nigde se ne spominju mogućnosti i uslovi zatvaranja, mada se u savremenoj svetskoj rudarskoj praksi to smatra normalnim. Poslednjih godina takav trend se oseća i na našim prostorima. Kao primer izdvaja se zatvaranje flotacijskog jalovišta tzv. faze 1 na rudniku olova i cinka „Šuplja stijena“ u Šulama (kod Pljevalja, Crna Gora) [2].

2. ZAŠTO ZATVARATI FLOTACIJSKA JALLOVIŠTA?

Nekako se podrazumeva, da ono što se otvori mora jednom i da se zatvori. No, industrijska praksa nije uvek poštovala ovu prirodnu zakonitost. Odgovor na pitanje zašto zatvarati flotacijsko jalovište mogao bi se sažeti u nekoliko sledećih konstatacija/zadataka [3, 4]:

- zato što, po pravilu, zauzima veliku površinu,
- radi ponovnog uspostavljanja staništa za divlje životinje,
- radi zaštite podzemnih i površinskih voda u okruženju,
- radi zaštite vazduha u okruženju,
- radi obezbeđenja javnog pristupa javnom zemljištu, i
- radi zaštite zdravlja i povećanja bezbednosti stanovništva iz okruženja.

Kod zatvaranja flotacijskog jalovišta (i sličnih deponija industrijskog otpada) osnovni problem leži u odabiru najboljeg pokrovnog sistema. Pri izboru je važno pridržavati se sledećih, opštih, zahteva [5, 6]:

- Fizička stabilnost:

Adresa autora: Dragana Nišić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: dragana.nisic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 16.01.2018.

Rad prihvaćen: 24.01.2018.

- sprečavanje pojave prašine i kontrolisanje erozije,
- sprečavanje direktnog kontakta jalovine sa florom i faunom iz okruženja.
- Hemijska stabilnost:
 - kontrolisanje penetracije kiseonika i vode u deponovani otpad,
 - kontrolisanje zagađenja preko kontrolisane infiltracije.
- Korišćenje zemljišta i ostalih javnih dobara:
 - obezbeđenje uslova za rast vegetacije,
 - vraćanje zemljišta u javnu upotrebu.

Kod izbora pokrovnih sistema ima mnogo varijanti. Neke od njih, interesantne za predele sa umereno vlažnom i vlažnom klimom prikazani su u tabeli 1 [5, 7].

Tabela 1. Alternativi pokrovni sistemi za područja sa umereno vlažnom i vlažnom klimom

Kateg- gorija	Primena	Ključne karakteristike	Komentari
Sistem za zaštitu od erozije	Nereaktivni otpadi sa malim sadržajem metala i soli	Površinski sloj debljine ~0.3 m u kojem je posejana trava, ili sloj šljunka ili gabiona debljina ~ 0,3 m ako je vegetacija nepoželjna	Može se zahtevati procena stanja zemljišta za odvod vode
	Kontrola penetracije kiseonika i vode nije potrebna		
Pokrovni sistem barijera	Niska stopa perkolacije, 5- 10% prosečnih godišnjih padavina	Sloj male propustljivosti za formiranje vegetaciju debljine ~1 m	Dugotrajnost sloja treba rešavati u fazi projek- tovanja
	Kontrola ulaska i izlaska gasova je poželjna	Naneseni sloj može biti glina, mešavina peska i bentonita ili trajno smrznuti sloj	Projektom treba sprečiti pojavu erozije
Višesloj ni sistem	Veoma niska perkolacija, <5% prosečnih godišnjih padavina	Sloj debljine ~1 m iznad folije	Skupo Treba razmotriti dugovečnost folije
	Kontrola ulaska i izlaska gasova je poželjna	Osnovni i drenažni sloj su uglavnom potrebni	Projektom treba sprečiti pojavu erozije

Proces zatvaranja može se posmatrati najmanje sa dva aspekta: administrativnog, koji je definisan važećim zakonima i pravilnicima i tehničkog, koji je

definisan nivoom tehničkih znanja i praktičnih iskustava projekatanta i osoblja koje opslužuje rudarske objekte. Inženjerska logika prednost daje tehničkom aspektu, a praksa administrativnom!

2.1. Administrativni okvir zatvaranja jalovišta

Zakonska regulativa u našem širem regionu prilagođena je legislativi Evropske unije i od nje se ponekad razlikuje u objedinjavanju više evropskih dokumenata u jedan domaći. Retko se pojavljuje slučaj da se u domaćoj regulativi pooštavaju preporučeni (zadani) evropski standardi.

Osnovni lokalni rudarski zakon [8] reguliše zatvaranje rudarskih objekata dosta uopšteno, bez posebnog izdvajanja (flotacijskih) jalovišta. U pravilnicima koji regulišu sadržaj rudarske dokumentacije [9] zatvaranje rudarskih objekata se tretira, ali se jalovišta spominju samo kod rekultivacije. U Uredbi o rudarskom otpadu [10] izričito se zahteva da vlasnik u plan upravljanja jalovištem unese i „predlog plana zatvaranja, uključujući i sanaciju, ukoliko je potrebna, procedure nakon zatvaranja i praćenje ...“. Da bi se pristupilo zatvaranju neophodno je imati i klasifikaciju flotacijske jalovine saglasno Katalogu otpada [11].

U katalogu otpada prvu grupu otpada čine „Otpad koji potiče od istraživanja, iz rudnika i kamenoloma, i fizičkog i hemijskog tretmana minerala“. S obzirom da se flotacijska jalovišta uglavnom vezuju za pripremu ruda obojenih metala (posebno bakar, olovo i cink) u crnogorskom Katalogu su interesantne dve odrednice:

- 01 04 07* otpad koji sadrži opasne supstance iz fizičkih i hemijskih procesa obojene metalurgije, (M)
- 01 04 99 otpad koji nije drugačije specifikovan.
- Dakle, prema Katalogu otpada flotacijske jalovine su potencijalno opasan otpad (oznaka M) ili uopšte nije specifikovana.
- Oznaka (M) uz opasan otpad pokazuje da se otpad smatra opasnim samo u sledećim slučajevima:
 - kad ima jednu ili više od opasnih svojstava H1 (eksploziv), H2 (oksidirajući), H9 (infektivan), H12 (u kontaktu sa vodom, vazduhom ili kiselinom se oslobađaju otrovni ili vrlo otrovni gasovi), H13 (osetljivost/razdražljivost), H14 (ekotoksičan) ili H15 (nakon odlaganja mogu nastati druge materije koje imaju bilo koju od svojstava od H1-14) ili
 - kad mu je tačka paljenja < 55 °C, ili
 - je koncentracija opasnih supstanci iznad dozvoljene granične vrednosti na osnovu kojih se otpad u skladu sa Prilogom 4 ovog Pravilnika razvrstava u opasni otpad.

Flotacijska jalovina nema ni jedno od gore navedenih svojstava. Karakterizacija vezana za stavku H14, ekotoksične materije, i rizik (neposredni i odloženi) može se posebno razmatrati jer kod flotacijskih jalovišta uvek postoji rizik da će doći do neke havarije i da će nekontrolisano oticanje usloviti probleme u okruženju. Mere koje se preduzimaju (izrada moćnih inicijalnih nasipa, hidroizolacija dna i unutrašnjih kosina, ugradnja drenažnog sistema, zatvoreni ciklus korišćenja povratne vode, monitoring itd.) upravo su u funkciji trajnog obezbeđenja stabilnosti nasipa, pa se i ova karakteristika može smatrati kao kontrolisana, odnosno ne utiče na promenu statusa flotacijskog jalovišta.

Flotacijska jalovina ne gori, pa nema ni tačku paljenja ispod 55°C, a nema nijednu opasnu supstancu u saglasnosti sa Prilogom 4 navedenog Pravilnika.

Očigledna je šturost u definisanju vrsta rudarskog otpada jer su flotacijske jalovine (najviše zahvaljujući rudnicima bakra) maseno najzastupljeniji otpad u svetskoj industrijskoj praksi [1]. U domaćoj praksi flotacijska jalovina se uglavnom katalogizira kao „otpad koji nije drugačije specifikovan“.

U crnogorskom pravilniku o deponijama [12], koji se odnosi i na opasni i neopasni rudarski otpad zatvaranje se spominje i u naslovu i u članu 12, koji donosi i tehničke detalje vezane za „završni prekrivni sloj“:

- 1) prekrivni sloj, minimum 0,5 m debljine;
- 2) sloj koji omogućava degasifikaciju deponije (deponije neopasnog otpada) od materijala minimum 1×10^{-4} m/s hidraulične provodljivosti i minimum 0,3 m debljine;
- 3) kompaktni mineralni sloj (geološka barijera) od minimum 0,5 m debljine, hidrauličke provodljivosti manje ili jednake 1×10^{-9} m/s, ili tanji sa ekvivalentnom vrijednosti u pogledu vodonepropusnosti, sa HD-PE folijom minimalne debljine 1 mm (samo za deponije opasnog otpada);
- 4) drenažni sloj 0,5 m debljine i hidraulične propustljivosti od minimum 1×10^{-4} m/s;
- 5) sloj zemlje za rekultivaciju debljine 1 m, u koji može biti umješan površinski sloj humusa minimalne debljine 0,1 do 0,3 m ili kanalizacioni mulj koji ispunjava uslove utvrđene propisom.

U Zakonu o upravljanju otpadom [13], koja se direktno ne odnosi na rudarski otpad, zatvaranje je tretirano samo uopšteno, bez bilo kakvih tehničkih detalja.

2.2. Tehnički okvir zatvaranja flotacijskih jalovišta

Otvaranje jalovišta se analizira na bazi tehničko-tehnoloških, urbanističkih, ekoloških, ekonomskih i socioloških faktora [1]. Nema razloga da se i zatvaranje ne analizira na isti način, ali se sada redosled postavljanja zahteva i njihovo ostvarivanje menja.

Kako je jalovište tehničko-tehnološki već definisano, za njegovo zatvaranje, odnosno, prevođenje iz zatečenog stanja u prihvatljivo stanje (za okruženje, društvenu zajednicu, rudnik) uslove zadaju ekolozi i urbanisti, s njima se saglašava stanovništvo iz okruženja, dok vlasnici postavljaju finansijska ograničenja koja u mnogome definišu tehnička i tehnološka rešenja. Jalovište treba tehnološki pripremiti i tehnički zatvoriti na taj način da se poštuju urbanistički zahtevi, da se ekološki ne ugrozi okruženje, da ekonomski u razumnoj i održivoj meri optereti rudnik, te da stanovništvo iz okruženja bude zadovoljno [14].

2.2.1. Tehničko-tehnološki faktori

Tehničko-tehnološki faktori koje treba razmatrati vezani su za ispunjavanje zahteva vlasnika rudnika (maksimalno korišćenje zauzetog prostora), urbanista (estetsko oblikovanje i uređenje), ekologa (sprečavanje svih vidova zagađenja okruženja), sociologa (promena namene i omogućavanje ponovnog korišćenje zauzetog prostora) i ekonomista (ekonomično i održivo korišćenje raspoloživih sredstava). Ovde se bitno razlikuju dva slučaja: a) potpuni prestanak aktivnosti na rudniku jer je dalja eksploatacija neisplativa, pa samim tim i završetak korišćenja formiranog jalovišta i b) nastavak aktivnosti na rudniku, formiranje novog jalovišta uz zatvaranje postojećeg, čiji kapaciteti su u potpunosti iskorišćeni.

U prvom slučaju flotacijsko jalovište treba da omogući deponovanje svih količina jalovine koje će se proizvesti do trenutka zatvaranja. Ovo ne isključuje improvizacije i neplanirano izdizanje postojećih nasipa kako bi se cilj ostvario. Suštinski, tek kada rudnik i flotacijsko postrojenje prestanu sa radom pristupa se tehničkom oblikovanju i uređenju starog flotacijskog jalovišta. Ovi radovi traju više godina po zatvaranju, sprovodi ih vlasnik rudnika (jalovišta) uz stalnu kontrolu i nadzor lokalne samouprave. Troškovi ovakvog uređenja mogu biti veoma visoki.

U drugom slučaju je bitno blagovremeno definisati vreme napuštanja i zatvaranja starog jalovišta i uređenja novog prostora za deponovanje jalovine. U jednom periodu doći će do preklapanja aktivnosti na obe lokacije. U periodu zajedničkog rada staro jalovište ima status „u zatvaranju“, a novo „u radu“. Aktivnosti na starom jalovištu su maksimalno usmerene na oblikovanje završne konture jalovišta uz maksimalno korišćenje raspoloživog akumulacionog prostora.

Ovo podrazumeva da se popunjava i rezervni prostor („freeboard“ = prostor formiran usled visinske razlike između kota nasipa i deponovane mase radi prijema svih ekscesnih voda [1]). Sva popunjavanja i oblikovanja vrše se korišćenjem flotacijske jalovine, što bitno smanjuje troškove zatvaranja. Da bi se očuvala stabilnost objekta korišćenje starog jalovišta vrši

se periodično uz kontrolisano upravljanje taložnim jezerom. Kada se celokupni akumulacioni prostor iskoristi i kote nasipa i deponovane jalovine izjednače, vrši se tehničko oblikovanje građevinskom mehanizacijom i pristupa završnim radovima na ispunjenju zadatih uslova.

2.2.2. Urbanistički faktori

U fazi izbora lokacije urbanisti postavljaju uslove vezane za prostor na kojem se jalovište može locirati, za dimenzije jalovišta, posebno visinu i način uređenja. Kada je u pitanju zatvaranje urbanisti, u sprezi sa stanovništvom i ekolozima, postavljaju zahtev „dovođenja zauzetog terena u prethodno stanje“ i, u novijoj praksi, postavlja se zahtev estetskog oblikovanja.

Dovođenje zauzetog terena u prethodno stanje je široko primenjiva floskula koja je praktično veoma teško izvodljiva. Da bi se ovo ostvarilo trebalo bi svu deponovanu jalovinu premestiti na novu lokaciju (time, ponovo doći u problem) i onda izvršiti sanaciju i remedijaciju terena. Time bi sve prethodne aktivnosti bile tretirane kao privremene, a nova deponija kao trajno rešenje. Ovo je kod flotacijskih jalovišta tehnički teško ostvarivo, zbog mase koju treba premestiti, ekološki je veoma osetljivo jer se može dodatno zagaditi zauzeti prostor, a potencijalno zagađenje će se proširiti na novu lokaciju i uz transportnu trasu. Ekonomski bi ovakva aktivnost u potpunosti uništila rudnik, a otvorilo bi se više problema vezanih za prihvatanje nove lokacije i odobravanje trase kojom bi se jalovina transportovala. Zbog svega ovo „dovođenje zauzetog terena u prethodno stanje“ u suštini se svodi na prilagođavanje napuštenog i uređenog prostora nekoj drugoj korisnoj nameni. Najčešće su to rekreativni tereni za sport (biciklizam, slobodno penjanje, pešačenje, trčanje, golf) i odmaranje [15-17]. Zbog mogućnosti ugrožavanja stabilnosti deponovane mase i neravnomernog sleganja izbe-gava se izgradnja stabilnih građevinskih objekata.

Problem uređenja oblika deponovane jalovine i njeno prilagođavanje okolnom reljefu je u saglasnosti sa Evropskom konvencijom o predelima [18]. Završno oblikovanje deponija podrazumeva formiranje oblika koji se uklapa u reljef i koji manje ružno deluje prolaznicima. Danas je estetski izgled postao opšti zahtev za tehničko uređenje.

2.2.3. Ekološki faktori

Ekološki faktori se praktično svode na obezbeđenje trajne geotehničke stabilnosti jalovišta, sprečavanje nastanka i izdvajanja kiselih drenažnih voda i potpuno sprečavanje aerizacije. U tehničko-tehnološkoj fazi radi se na ublažavanju nagiba kosina i jalovišta, a sve u cilju obezbeđenja trajne geotehničke

stabilnosti jalovišta. Sve se to kombinuje i sa sprečavanjem nastanka kiselih drenažnih voda i aerizacije.

Delovanjem vode i vazduha na otpad dolazi do reakcija koje uzrokuju nastajanje sumporne kiseline i promenu pH vrednosti, odnosno izdvajanje kiselih drenažnih voda. Da bi došlo do stvaranja kiselih drenažnih voda neophodno je da se u istom trenutku zajedno nađu sulfidni sumpor (najčešće kao pirit), kiseonik (iz vazduha) i voda. Delovanjem kiseonika iz vazduha i vode dolazi do transformacije fero jona u feri jon i do precipitacije feri-hidroksida. Retko se pojavljuje otpad mineralnog porekla u kojem nema pirita. Proces oksidacije pirita može se prikazati u tri glavna koraka: 1. oksidacija sumpora, 2. oksidacija fero gvožđa Fe^{2+} do feri oblika Fe^{3+} , 3. hidroliza i precipitacija feri kompleksa:

Oksidacija dvovalentnog gvožđa i prevođenje u trovalentno nije ograničena jer je molekularni kiseonik iz vazduha raspoloživ, a hidroliza trovalentnog gvožđa i proizvodnja kiselog rastvora će progresivno smanjivati pH vrednost. U kiseloj sredini proces će se dodatno ubrzati jer će se povećati bakterijska aktivnost čime će se povećati aktivnost slobodnog trovalentnog gvožđa [7, 19-21].

Iz prethodnog je jasno da se problem rešava sprečavanjem istovremenog delovanja sulfidnog sumpora, vode i kiseonika. To se uspešno može ostvariti pokrivanjem jalovišta inertnim materijalom dovoljne debljine. Praktično, istim merama se rešava i problem aerizacije.

2.2.4. Ekonomski faktori

Sve što je zahtevano potrebno je i isfinansirati. Iskustveno se zna da zatvaranje može da bude i do 4 puta skuplje od otvaranja jalovišta [1]. Zbog toga je neophodno pažljivo planirati svaku tehničku aktivnost i usaglasiti je sa mogućnostima finansiranja. Da bi se mnoštvo uslova, zahteva i ograničenja ispunilo najvažnije je dinamički razraditi plan zatvaranja. Suštinsko pitanje je kada započinje zatvaranje flotacijskog jalovišta?

Najskuplja varijanta je kada se početak zatvaranja poklopi sa krajem aktivnosti na eksploataciji rudnika. Tog trenutka nema slobodnog novca, zatvaranje nije trošak proizvodnje, već postaje investicija. Formalno, investitor je vlasnik (sada već bivšeg) rudnika, a time i jalovišta. Ko će biti stvarni investitor je bolno i neprijatno pitanje koje se razmatra za svako jalovište po-naosob.

Ekonomski jedino prihvatljivo rešenje je da zatvaranje započne dok je rudnik još aktivan, tako da se završetak proizvodnje poklopi sa završetkom radova na zatvaranju. U tom slučaju zatvaranje postaje trošak

proizvodnje i proteže se na dugi niz godina. Ostaje problem kako to tehnički izvesti? Kao najbolja rešenja izdvaja se vremenski smaknuto korišćenje više jalovišta ili podela jednog jalovišta na više kaseti, odnosno, faza eksploatacije. U oba slučaja najveći deo troškova zatvaranja se pokrije iz tekućih obrtnih sredstava, a samo mali deo ostaje investicija za period kada rudnik bude zatvoren.

2.2.5. Sociološki faktori

Sociološki faktori podrazumevaju odnos između stanovništva iz okruženja (tzv. javnosti) i vlasnika rudnika, odnosno jalovišta. Ti odnosi se usaglašavaju tokom celog veka rudnika, intenzitet saglasnosti se stalno menja, ali da bi rudnik opstao neophodno je te odnose stalno negovati. Kada flotacijsko jalovište ide u zatvaranje kod javnosti se mešaju najmanje tri osećaja:

- dobro je što se jalovište zatvara, jer se po pravilu jalovište smatra opasnim objektom koji potencijalno ugrožava okruženje,
- neizvesnost oko toga da li će se jalovište sanirati i zatvoriti ili će se svi pokupiti i otići ostavljajući sve probleme lokalnoj upravi i stanovništvu iz okruženja, i
- loše, gde će se sada stanovništvo uposliti, odnosno znači li zatvaranje i početak selidbe stanovništva iz okruženja [22]?

Tek posle toga na red dolazi razmatranje kako najbezbolnije zatvoriti i najprikladnije koristiti prostor bivšeg jalovišta.

3. MOGUĆA REŠENJA

U osnovi su prisutna dva načina zatvaranja jalovišta: mokro i suvo [23-25]. Mokro podrazumeva da se prostor na kojem je formirano jalovište potopi, odnosno da se u dolini u kojoj je bilo jalovište formira veštačko jezero. Ovakav pristup podrazumeva zauzimanje većeg prostora nego što je bilo zauzeto jalovištem, a primenjuje se tamo gde ima viška vode (geografski skoncentrisano na severne predele severne hemisfere – Kanada, Švedska, Finska) i u uslovima da konfiguracija jalovišta ne zahteva izgradnju veštačkih nasipa [26]. Dodatno su razvijeni sistemi formiranja bioreaktora unošenjem dodatnih slojeva zemlje i sadnjom biljaka [27].

Suvo zatvaranje podrazumeva nanošenje više slojeva zemlje, šljunka i peska kako bi se prekrila deponovana jalovina. Po nanošenju zemljanih slojeva treba pristupiti i biološkoj rekultivaciji. Ovaj način zatvaranja se češće koristi, a na našim prostorima je, praktično, jedino i primenljiv. Postoji mnogo načina formiranja suvog završnog pokrova [28-30]. Ti sistemi su uglavnom razvijeni za deponije komunalnog i opasnog

otpada, ali se mogu primeniti i na industrijske deponije, odnosno na flotacijska jalovišta. Suštinski se rešenje svodi na rešavanja sledećih pitanja: treba li deponiju potpuno izolovati i na koji način to praktično izvesti, koliko slojeva inertnog, drenažnog i izolacionog materijala treba naneti, kolika je potrebna debljina svakog sloja, odnosno kako te slojeve treba rasporediti?

Valja zapaziti da se izolacijom jalovine vodom ili zemljom u osnovi rešavaju ekološki problemi – nema izdvajanja kiselih drenažnih voda i nema aerozagađenja. Ako se oba načina zatvaranja analiziraju sa aspekta „dovođenja zauzetog terena u prethodno stanje“ onda je jasno da se to kod mokrog zatvaranja ne može ostvariti, a kod suvog treba iznaći način najboljeg korišćenja novoformiranog prostora.

Ne treba zaboraviti i da postoje zakonima definisana rešenja zatvaranja [12, 31].

4. ZATVARANJE FAZE 1 FLOTACIJSKOG JALOVIŠTA „PEKINA GLAVICA“

Rudnik olova i cinka „Šuplja stijena“ otvoren je polovinom pedesetih prošlog veka. Rudnik se nalazi u ataru sela Šula, a flotacijsko postrojenje bilo je locirano u naselju Gradac, koje je 11 km udaljeno od Šula [32]. Posle privatizacije, uprava rudnika je odlučila da sve aktivnosti premesti na lokaciju rudnika, a jalovište da se formira na lokaciji „Pekina glavica“. Ekonomski parametri su diktirali fazno otvaranje i razvoj flotacijskog jalovišta [33]. U ovom trenutku je jasno da će jalovište na ovoj lokaciji biti razvijeno u 3 faze, a njihov današnji status je sledeći: faza 1 (neto površine oko 2,3 ha) – završena eksploatacija, zatvoren i spreman za biološku rekultivaciju, faza 2 (neto površine oko 7 ha) – eksploatacija je u završnoj fazi i sprema se prelazak na fazu 3, i faza 3 (neto površine oko 17 ha) – pripreme za aktiviranje jalovišta su u završnoj fazi. Stanje na lokaciji u jesen 2017. godine, može se videti sa snimka Google Earth-a, slika 1.

Slika 1 - Fazni razvoj flotacijskog jalovišta „Pekina glavica“, jesen 2017. (izvor Google Earth)

Deponovana flotacijska jalovina ima gustinu 2.830 kg/m³, zapreminsku gustinu 1.438 kg/m³, oko 55% zrna je sitnije od 0,074 mm, u hemijskom sastavu prevladavaju SiO₂ (53%), Al₂O₃ i Fe₂O₃ (po 12%), učešće CaO je nisko (3%), dok je učešće K₂O relativno visoko (6%). U mineraloškom sastavu najdominantnije zastupljeni minerali su kvarc i feldspati koji su praktično potpuno alterisani. Od minerala feldspata značajnije su prisutni K-feldspati u odnosu na plagioklase. Jalovina ne pokazuje koheziju, ugao unutrašnjeg trenja je 29°, koeficijent filtracije 2,48x10⁻⁶ m/s, a poroznost 65%, modul stišljivosti (pri opterećenju od 600 kPa) iznosio je 21,8 MPa. Flotacijska jalovina iz rudnika olova i cinka „Šuplja stijena“ je kategorisana kao neopasni otpad sa kodom „01 04 99 otpad koji nije drugačije specifikovan“. Deponovana jalovina u najvećem delu jalovišta predstavlja čvrstu podlogu po kojoj se mehanizacija može kretati.

U trenutku kada je planirano zatvaranje faze 1 (zimski period) u akumulacionom prostoru nije bilo tehnološke vode, već samo neznatna količina vode od padavina, prostor van vode je bio raskvašen i ispucao, slika 2, a jalovište je imalo nagib prema jalovištu faze 3 oko 2%. Ovaj nagib je namerno izveden tokom aktivnog korišćenja faze 1 kako bi se po zatvaranju sva voda usmerila u nizvodni aktivni deo faze 3, što se smatra prihvatljivim rešenjem za zatvaranje [14].

Slika 2 - Stanje jalovišta, faza 1, pre početka radova na zatvaranju, u zimskom periodu 2015.

Vodeći računa o klimatskim prilikama, konfiguraciji terena, faznom razvoju jalovišta, veličini jalovišta koje se zatvara i raspoloživim materijalima na licu mesta odabrana je metodologija suvog zatvaranja nanošenjem više slojeva: rudničke otkrivke, materijala iz

podine, krupnozrne jalovinu iz postrojenja za pretkoncentraciju i drugih lakodostupnih prirodnih materijala.

Saglasno preporukama Međunarodne komisije za visoke brane (ICOLD) zatvaranje je projektovano nanošenjem 5 slojeva (posmatrano odozgo nadole), slika 3 [36]:

- A - vlažni sloj, sloj na kojem će se kasnije formirati bio pokrivač (trava, žbunje, drveće),
- B - protivintruzioni sloj, sloj koji treba da spreči prodiranje vode ka jalovini,
- V - drenažni sloj, sloj koji treba da izvede (izdrenira) svu vodu koja je prodrila kroz prethodni sloj van kontura jalovišta,
- G - sloj fino usitnjenog materijala, koji treba da predstavlja fizičku prepreku između slojeva i deponovane jalovine,
- H - sloj krupnozrnog (beskapilarnog) materijala.

Ukupna (projektovana) debljina svih pet slojeva je 1,6 m. Za svetsku praksu ovo je prihvatljiva debljina nanesenih slojeva [34, 35].

Slika 3 - Raspored slojeva pri zatvaranju flotacijskog jalovišta [prema 36]

Sloj A. Najgornji ili tzv. vlažni sloj (oznaka A na slici 3) predstavlja sloj na kojem će se formirati biopokrivač, na kojem će rasti trava, žbunje ili drveće, te saglasno tome treba naneti plodni sloj zemlje. Prema projektu [2] bilo je potrebno obezbediti 12.000 m³ materijala kako bi se formirao sloj debljine 0,5 m. Planirano je da se materijal obezbedi čišćenjem terena za jalovište iz faze 3, izdvajanjem materijala sa više humusa. Međutim, tokom čišćenja terena za fazu 3 skinute su znatno veće količine „humusa“ pa je visina ovoga sloja narasla na 2,5 m, za što je potrošeno oko 60.000 m³ materijala. Kako se birao „humusni“ materijal zajedno sa zemljom nanoseni su i panjevi borova koji su uklonjeni pre čišćenja prostora za fazu 3, slika 4. Razume se, pre sadnje vršiče se priprema „humusnog“ sloja pa će se ovi panjevi ukloniti.

Slika 4 - Izgled završnog vlažnog sloja na spoljašnjoj kosini nasipa

Sloj B. Ispod vlažnog sloja A nalazi se protivintruzioni sloj B, slika 3. Zadatak ovoga sloja je da spreči kretanje atmosferskih voda ka deponovanoj jalovini. Ovaj sloj je formiran od sitnozrnu jalovinu krupnoće - 8+0 mm. Posle nanošenja i razgratanja jalovina je uvaljana u jednom sloju debljine 0,2 m. Za formiranje ovog sloja utrošeno je oko 5.000 m³ materijala. Nabijanje je obavljeno vibro valjkom do postizanja modula stišljivosti 25 MPa i vodopropustljivosti reda 10⁻⁶ m/s.

Sloj V. Ispod protivintruzionog sloja B nalazi se drenažni sloj V, slika 3. Zadatak ovoga sloja je da prihvati svu vodu koja se procedi kroz prethodna 2 sloja i da je, kao nezagađenu, izvede iz kontura jalovišta. Debljina ovoga sloja je 0,2 m. Za formiranje ovoga sloja koristio se šljunak i jalovi materijal sličnih karakteristika, krupnoće -50+2 mm, sa manje od 10% zrna krupnoće ispod 2 mm. Za formiranje ovog sloja utrošeno je oko 5.000 m³ materijala. Sloj je razgranuti i poravnat, bez posebnog nabijanja. Vodopropustljivost ovoga sloja je reda veličine 10⁻² – 10⁻³ m/s.

Sloj G. Ispod drenažnog sloja V nalazi se sloj fino usitnjenog materijala G, slika 3. Ovaj sloj sprečava prodiranje atmosferskih voda ka deponovanoj jalovini i bilo kakvo kapilarno kretanje vode iz pora deponovane jalovine ka gornjim slojevima. Debljina ovoga sloja je 0,2 m. Sloj je od krupnozrne jalovine iz procesa koncentracije, krupnoće -8+0 mm, pri čemu je zrna krupnoće +8 mm bilo ispod 10%, a -2+0 mm, iznad 30%. Za formiranje ovog sloja utrošeno je oko 5.000 m³ materijala. Naneseni materijal je razgrnut i uvaljan. Nabijanje je vršeno pomoću vibro valjka do postizanja modula stišljivosti iznad 25 MPa i vodopropustljivosti reda 10⁻⁶ m/s.

Sloj H. Ispod sloja G, a iznad deponovane jalovine nalazi se sloj krupnozrnog, beskapilarnog materijala, H na slici 3. Zadatak ovoga sloja je da spreči svako kapilarno izdizanje vode iz pora deponovane jalovine ka gornjim slojevima. Prema projektu [2] bilo je potrebno obezbediti 12.000 m³ materijala kako bi se formirao sloj debljine 0,5 m. Ovaj sloj je formiran nanošenjem rudničke otkrivke i jalovine iz postrojenja za pretkoncentraciju. Sloj nanet, razgrnut i uvaljan bez

posebnog nabijanja radi postizanje zbijenosti ili vodopropustljivosti.

Pri nanošenju slojeva akumulacioni prostor jalovišta je ostao pod nagibom prema fazi 3 kako bi se sve vode od padavina usmerile u uvele u novo jalovište. Ovo je dugoročno rešenje s obzirom da je završna kota jalovišta iz faze 1 1200-1202 mm, a iz faze 3 – 1199 - 1200 mm. Posle nanošenja pokrovnih slojeva kote se podižu na 1204-1206 mm, na fazi 1 i 1201-1202 mm, na fazi 3, slika 5.

Slika 5 - Model projektovanog jalovišta sa završnim kotama posle zatvaranja

5. MONITORING

Od ključne je važnosti uspostaviti efikasan sistem monitoringa stanja u okruženju zatvorenog flotacijskog jalovišta. Uspostavljeni sistem prati dva segmenta – geotehničku i ekološku stabilnost [1]. Geotehnička stabilnost se bavi tehničkim osmatranjem, koje obuhvata vizuelni pregled (deformacije osnovnog terena ili spoljnih kosina na nasipu; pojavu izvora, bara ili vlažnih zona na jalovištu i na okolnom terenu; pojavu erozije; oštećenja pojedinih objekata na jalovištu), te geodetskim, geotehničkim i hidrotehničkim merenjima. Vizuelna osmatranja treba obavljati najmanje jedanput godišnje, geodetska merenja u početku jednom u pet, a potom jednom u deset godina, dok geotehnička i hidrotehnička merenja i analize treba provoditi kada se za to ukaže potreba.

Ekološki monitoring treba usaglasiti sa programom monitoringa ostalih objekata na rudniku, a zbog bliske udaljenosti teško je izolovano posmatrati zatvoreni deo. Bitno je da se zatvoreno jalovište ne preskače, te da se pri analizi indikatora uvek imaju na umu i događanja u zatvorenom jalovištu. Tipični indikatori za zatvorene rudarske objekte su: stanje površinskih i podzemnih voda, stabilnost objekta i erozija, korišćenje zemljišta i socio-ekonomski indikatori [37].

6. ZAKLJUČAK

Prostorom koji zauzimaju i visinom koju dosežu flotacijska jalovišta zavređuju posebnu pažnju. Izbor lokacije na kojoj će se jalovište formirati, način nadgradnje i eksploatacije odavno su postali rutinska inženjerska aktivnost. No, njihovo zatvaranje postalo je

tehnički aktuelno tek poslednjih 40-ak godina, a na našim prostorima tek na kraju XX veka. U međuvremenu, u svetu se razvila zakonska regulativa i administrativne procedure po kojima je zatvaranje rudnika, a time i jalovišta, postalo zakonska obaveza, a tehničko-tehnološka rešenja su usmerena na implementaciju zahteva i naloga urbanista i ekologa uz nadzor javnosti iz okruženja i strogu kontrolu trošenja sredstava od strane ekonomista.

S obzirom da se flotacijska jalovišta tretiraju kao trošak odavno je njihov razvoj usmeren na formiranje više kaseti unutar istog jalovišta ili na formiranje više prostorno manjih jalovišta na bliskom rastojanju. Na ovaj način se smanjuju početne investicije, a širenje se tretira kao operativni trošak, koji se pokriva iz tekuće proizvodnje. Na rudniku olova i cinka „Šuplja stijena“ u Šulama odlučili su se za fazni razvoj izgradnjom 3 jalovišta na lokaciji „Pekina glavica“. Najpre je formirano jalovište, tzv. faza 1, na najvišem delu terena na malom prostoru od neto 2,3 ha. Njegova eksploatacija je završena pre 5 godina i tada je aktivirano novo jalovište, tzv. faza 2, na površini od oko 7 ha.

Ove godine treba da se aktivira i treća faza razvoja na površini od oko 17 ha. Uporedo sa pripremanjem za formiranje jalovišta treće faze donesena je odluka da se ide u zatvaranje jalovišta iz prve faze. Procenjeno je da je petogodišnje mirovanje bilo dovoljno da se „potroši“ sva slobodna voda i da se završi stabilizacija deponovane mase. Na kraju eksploatacije prvog jalovišta istakanje jalovine je rađeno tako da se formira nagib ka budućem jalovištu iz faze 3 kako bi se kod zatvaranja sva voda od padavina usmerila ka uređenom prostoru novog jalovišta.

Odabrana je metodologija zatvaranja nanošenjem više slojeva materijala različitih karakteristika. Projektovano je nanošenje 5 slojeva ukupne debljine 1,6 m. U smeru od vrha ka deponovanoj jalovini formirani su: vlažni sloj na kojem će se kasnije formirati bio pokrivač, protivintruzioni sloj koji treba da spreči prodiranje vode od padavina ka jalovini, drenažni sloj koji treba da svu vodu koja je prodrila kroz prethodni sloj izvede van kontura jalovišta, sloj fino usitnjenog materijala, koji predstavlja fizičku prepreku između slojeva i deponovane jalovine i sloj krupnozrnog (beskapilarnog) materijala.

Kao materijal koji se nanosi na deponovanu jalovinu korišćen je „humus“ koji je dobijen čišćenjem terena za treće jalovište, krupnozrna rudnička i jalovina pretkoncentracije. Ovakvim višeslojnim

zatvaranjem sprečen je kontakt jalovine sa vodom i kiseonikom, pa samim tim i formiranje kiselih drenažnih voda, onemogućeno je aerozagadenje raznošenjem sitnih čestica jalovine i stvoreni uslovi da se biološkom rekultivacijom na bivšem jalovištu formira zelena površina sa niskim rastinjem, čime se taj deo terena uklapa u postojeći reljef i šumu koja okružuje jalovišta. Korišćenjem materijala iz podine novog jalovišta i otpadnih materijala iz rudarske proizvodnje značajno su smanjeni troškovi zatvaranja i ceo posao je za Rudnik postao finansijski održiv. Od ove godine radovi se nastavljaju na završnom tehničkom oblikovanju i biološkoj rekultivaciji. Pozitivni efekti i iskustva sa zatvaranja prvog jalovišta za koju godinu će se preneti i na zatvaranje druge faze jalovišta.

Iskustva zatvaranje prve faze jalovišta pokazuju da zatvaranje za Rudnik može biti finansijski održivo, a za okruženje prihvatljivo ako se sve aktivnosti na zatvaranju uklape u uobičajene rudarske aktivnosti uz korišćenje svih raspoloživih resursa (materijal, oprema, ljudi).

Predviđeni tehnički i ekološki monitoring treba da potvrdi uspešnost obavljenog posla na zatvaranju jalovišta.

LITERATURA

- [1] Knežević D, Torbica S, Rajković Z, Nedić M, *Odlaganje industrijskog otpada*, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014.
- [2] Grupa autora, Glavni rudarski projekat eksploatacije rude cinka i olova na rudniku Šuplja Stijena, *Tehnički rudarski projekat deponovanja flotacijske jalovine*, *Sveska 2. Zatvaranje jalovišta*, Faza 1, Gradironenogro, Pljevlja, 2016.
- [3] Stiles D, Closure and Reclamation of the Troy Mine Mine, *Design, Operations & Closure Conference*, 2016
- [4] Pritchard J, Jensen T, Welsh D, Options for Management and Closure of Tailings Storage Facilities, *Engineering and Mining Journal*, Vol. 211, No. 2, pp. 72, 74-75, 2010.
- [5] MEND (Mine Environment Neutral Drainage), *Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings*, Canadian Mine Environment Neutral Drainage Program, Project 2.21.4, 2004.
- [6] Ayres B, O’Kane M, Mine Waste Cover Systems, *An International Perspective and Applications for Mine Closure in New Zealand*, AusIMM New Zealand Branch, Annual Conference, Nelson, 25 - 28 August, 2013.

- [7] GARD Guide, Global Acid Rock Drainage Guide, The International Network for Acid Prevention, 2009 [citirano 18.02.2018]. Dostupno na: <http://www.gardguide.com/>
- [8] Zakon o rudarstvu, Sl. list Crne Gore, br. 65/08, 74/10.
- [9] Pravilnik o sadržini rudarskih projekata, Sl. list Crne Gore, br. 74/2009.
- [10] Uredba o uslovima i postupku izdavanja dozvole za upravljanje otpadom, kao i kriterijumima, karakteristikama, klasifikaciji i izveštavanju o rudarskom otpadu, Službeni glasnik RS, br. 53/17
- [11] Pravilnik o klasifikaciji otpada i katalogu otpada, Sl. list Crne Gore, br. 59/13
- [12] Pravilnik o bližim karakteristikama lokacije, uslovima izgradnje, sanitarno-tehničkim uslovima, načinu rada i zatvaranja deponija, Sl. list Crne Gore, br. 31/13.
- [13] Zakon o upravljanju otpadom, Sl. list Crne Gor", 64/11
- [14] Thompson N, Moreno P, Thickened Tailings Deposition for Closure, *20th Inter. Seminar on Paste and Thickener tailings*, Beijing, pp. 226-234, Fulton County Department of Public Works, Atlanta, Georgia, 2017.
- [15] Coates R, Spencer A, Converting a closed landfill into a golf course can provide an effective redevelopment alternative, 2004 APWA Congress, 2004
- [16] Lee G. F, Jones-Lee, A, *Closed Landfill Cover Space Reuse: Park, Golf Course or a Tomb?* Report of G. Fred Lee & Associates, El Macero, CA, 1994.
- [17] DOE, *Alternative Landfill Cover*, Innovative Technology Summary Report No. DOE/EM-0558. U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, Office of Science and Technology, 2000.
- [18] *The European Landscape Convention*, CETS No 176 European Council Press, 2001.
- [19] Dimitrijević, M. D, Antonijević, M. M, Dimitrijević V, Oksidacija pirita-posledice i značaj, *Hemijska industrija*, Vol. 56, 6p. 7-8, pp. 299-31, 2002.
- [20] Dold B, Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine, in *Waste Management*, E.S. Kumar (Ed.), InTech, 2010.
- [21] Azcue M. J. (ed.), *Environmental impacts of mining activities: emphasis on mitigation and remedial measures*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [22] Strachan C.L, Davis M. M, Lessons learned from mine facilities' closures, *11th Inter. Conf. on Mine Closure*, 15-17. March, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2016.
- [23] Szymanski M.B., Davies M.P., Tailings dams design criteria and safety evaluations at closure, *BC Reclamation Symposium*, 2004.
- [24] Koerner M. R, *Designing with geosynthetics*, 6th edition, Vol. 2, Xlibris Corporation, 2012.
- [25] Cacciuttolo C, Tabra K, Water Management in the Closure of Tailings Storage Facilities, *10th Inter. Conf. On Acid Rock Drainage and IMWA Annual Conf.*, April 21-24, Santiago, 2015.
- [26] Bjelkevik A, *Water Cover Closure Design for Tailings Dams State of the Art Report*, Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005.
- [27] Higgins J, *An alternative to water-covered mine tailings areas*, ES&E's September/October 2014.
- [28] La Grega D. M, Buckingham L. P, Evans C. J, *Hazardous waste management*, 2nd ed., Waveland Press inc., Long Grove, 2010.
- [29] Radosavljević J, Đorđević A, *Deponije i deponovanje komunalnog otpada*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2013.
- [30] Qian X, Koerner R, Gray, *Geotechnical aspects of landfill design and construction*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [31] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, Official Journal L 182, 16/07/1999 P. 0001 - 0019, 1999.
- [32] Knežević D, Vučinić D, *Osmatranje jalovišta van upotrebe na primeru flotacijskog jalovišta rudnika 'Šuplja stijena'*, Tehnika Vol. 58, 6p. 5, pp. 1-8, 2007.
- [33] Torbica S, Knežević D, & Hadži-Niković G, *Formiranje jalovišta "Pekina glavica" za deponovanje filtrirane flotacijske jalovine*, Tehnika, Vol. 64, 6p. 1, pp. 39-45, 2013.
- [34] Ajax Project, *Environmental Assessment Certificate Application / Environmental Impact Statement for a Comprehensive Study*, Appendix 17.4-C Tailings Storage Facility Conceptual Closure Plan Alternatives Assessment KGHM, 2015.
- [35] Bonstrom, K. L, Chapman, D, Swain D. and O'Kane M, Staged Approach to Closure of a Tailings Storage Facility in the Kimberly, Western Australia, Proc. of the Mine Closure Conf., Perth, 9-11 September, pp. 65-78, 2009.
- [36] ICOLD Bulletin 103, Tailing dams and Environmental – Review and Recommendations, 1996.
- [37] Robertson A, Shaw S, Mine Closure, Infomine E-book, [cited 15.01.2018.] available at: <http://www.infomine.com/publications/docs/E-Book%2002%-20Mine%20Closure.pdf>, 2002.

SUMMARY

A CLOSURE OF THE FIRST PHASE OF THE FLOTATION TAILINGS STORAGE FACILITY "PEKINA GLAVICA"

First phase closure of the flotation tailings storage facility „Pekina glavica“ at the mine „Šuplja stijena“, Sula – Montenegro has been shown in this paper. The mine has opted for the multiphase development of the flotation tailings storage facility, so by activating the third phase, the conditions for first phase tailings storage facility closure has been met. Dry closure method has been selected by applying multilayers of materials with different characteristics, which is in accordance with the recommendations of the International Commission on Large Dams (ICOLD). Earth materials extracted from the floor of the third tailings storage facility, overburden from the open pit mine and coarse tailings from the preconcentration process were mainly used. Five layers of a total thickness of 1,6 m were planned, but total thickness exceeded 4 m, because of the excess soil material from the floor. This closure method met the requirements of urban planners and environmentalists, and local residents were satisfied with closure and biotechnical rehabilitation. The closure has become financially sustainable for the company because of the rational use of available resources.

Key words: Šuplja stijena mine, closure of the flotation tailings storage facility, multilayers covering system, acid mine drainage