

# Kvantifikacija evaporativnih gubitaka nafte i naftnih derivata tokom skladištenja

Marina A. Mihajlović<sup>1</sup>, Ana S. Veljašević<sup>1</sup>, Jovan M. Jovanović<sup>1</sup>, Mića B. Jovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko–metalurškog fakulteta u Beogradu, Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, Srbija

## Izvod

Skladištenje nafte i naftnih derivata neizbežno dovodi do pojave evaporativnih gubitaka, koji su važni sa stanovišta odgovarajućeg bilansa i sa stanovišta zaštite životne sredine. U radu je izvršena kvantifikacija evaporativnih gubitaka za različite tipove komercijalnih rezervoara sa fiksnim i plivajućim krovovima korišćenjem softverskog programa TANKS 409d. Na osnovu rezultata procenjene su mase evaporativnih gubitaka po toni uskladištene tečnosti. Gubici sirove nafte za rezervoare sa fiksnim krovom iznose oko 0,5 kg/t sirove nafte, a za rezervoare sa plutajućim krovom oko 0,001 kg/t. Gubici dizela i mazuta su zanemarljivo mali, iznose do 10<sup>-3</sup> kg/t. Najznačajniji gubici isparljivih tečnosti su u rezervoarima sa fiksnim krovom (do 2,07 kg/t), a najmanji gubici su kod rezervoara sa kupolastim krovom (oko 0,004 kg/t). Predmetni rezultati predstavljaju osnovu za analizu problema sa tehnološkim stanovišta i sa stanovišta zaštite životne sredine, u funkciji projektovanja.

**Ključne reči:** rezervoari, nafta, derivati nafte, evaporativni gubici.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Skladištenje nafte i naftnih derivata ima za posledicu isparavanje skladištenih tečnosti iz rezervoara. Imajući u vidu da isparavanjem naftnih derivata štetne supstance dolaze u atmosferu veoma je važno proceniti njihovu masu, jer se ona odražava na odgovarajući bilans i značajno utiče na životnu sredinu. Nafta i derivati mogu sadržati velike količine isparljivih organskih jedinjenja (eng. *volatile organic compound* – u daljem tekstu VOC). Stručna javnost ocenjuje da su najznačajniji izvori VOC saobraćaj i industrijska postrojenja. U industrijskom sektoru, dominantni izvori VOC su industrija rastvarača i rafinerijska postrojenja. VOC negativno utiče na ljudsko zdravlje i životnu sredinu. Reakcijom VOC sa oksidima azota pod dejstvom sunčeve svetlosti nastaje fotohemijski smog. Lokalno zagađenje doprinosi i promenama na globalnom nivou, kao što su globalno zagrevanje, smanjenje ozonskog omotača i efekat staklene bašte [1–3]. U našoj sredini, problem emisije VOC postali su predmet šire pažnje nakon 2000. god. [1,4–6]. Procena gubitaka isparavanjem može se izvršiti empirijskim, teorijskim, eksperimentalnim ili kombinovanim metodama. Empirijski model se zasniva na primeni jednačina iz eksperimentalnih istraživanja [7–9]. Procena evaporativnih gubitaka teorijskim metodom zasniva se na primeni jednačina dobijenih iz teorijske analize [10], eksperimentalni metod koristi rezultate dobijene direktno iz laboratorije [11], dok se procenom kombinovanim metodom upoređuju rezultati dobijeni

Prepiska: M. Mihajlović, Inovacioni centar Tehnološko–metalurškog fakulteta u Beogradu, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: msavic@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 1. mart, 2012

Rad prihvaćen: 22. maj, 2012

NAUČNI RAD

UDK 621.642:665.6/.7

Hem. Ind. 67 (1) 165–174 (2013)

doi: 10.2298/HEMIND120301050S

direktnim merenjima sa rezultatima teorijske analize [12,13].

Rezervoari za skladištenje nafte i naftnih derivata mogu da budu vertikalni ili horizontalni. Vertikalni rezervoari se uglavnom koriste na mestima gde je radni prostor ograničen. Komercijalni vertikalni rezervoari ograničeni su maksimalnom dimenzijom prečnika od 10 m i visinom od 25 m, odnosno maksimalnom zapreminom od oko 1750 m<sup>3</sup>. Izbor radnog pritiska u rezervoaru zavisi od odnosa temperature i napona pare skladišnog fluida [14]. Ocenjuje se da su u rafinerijama značajno zastupljeniji vertikalni rezervoari, pa su u radu proračuni evaporativnih gubitaka izvršeni samo za vertikalne rezervoare. U rafinerijama se koriste i rezervoari pod pritiskom i rezervoari sa promenljivom zapreminom, ali je njihov broj zanemarljiv. Rezervoari pod pritiskom mogu biti horizontalni, jajastog oblika ili sferični kako bi sačuvali strukturni integritet pod visokim pritiskom. Uobičajeno su to podzemni rezervoari. Rezervoari sa promenljivom zapreminom mogu biti cilindričnog ili sfernog oblika.

Evropska komisija kao najbolje dostupnu tehnologiju za skladištenje tečnosti preporučuje da se tečnosti sa vrednošću Reidovog napona pare (u daljem tekstu RVP) između 14 i 91 kPa skladište u rezervoarima sa unutrašnjim plivajućim krovom [14]. U realnim uslovima, posebno u zemljama u razvoju, moguće je da rafinerije ne poštuju uvek ove preporuke u potpunosti. Iz tog razloga, u analizu su uključeni i tipovi rezervoara koji nisu u skladu sa najbolje dostupnim tehnologijama za skladištenje nafte i naftnih derivata.

Pravilnim rukovanjem uz primenu odgovarajućih mera bezbednosti, pojava gubitaka curenjem i prosi-

panjem može se izbeći. Gubici te vrste ne mogu se predvideti, te oni nisu bili predmet ove analize.

## METODOLOGIJA

Proračun evaporativnih gubitaka izvršen je korišćenjem softverskog programa TANKS 409d koji je razvila Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih država (eng. *US Environmental Protecting Agency – US EPA*). Korišćeni softver namenjen je proceni gubitaka iz rezervoara u kojima se skladište organske supstance. Pomoću ovog programa, korisnici dobijaju izveštaj o gubicima na osnovu unosa specifičnih podataka vezanih za dimenzije, konstrukciju i lokaciju rezervoara (meteorološki uslovi), kao i podataka vezanih za vrstu skladištene tečnosti. Metodologija ovakvog proračuna zasniva se na jednačinama razvijenim od strane Američkog naftnog instituta (eng. *American Petroleum Institute*) [15]. Generisani izveštaji sadrže procenu emisija na mesečnom, višemesečnom ili godišnjem nivou za svaku komponentu ili smešu u rezervoaru.

Kao ulazni podaci analize izabrani su reprezentativni podaci za rafineriju srednjeg kapaciteta sa uobičajenim režimom rada. Rafinerija radi 11 meseci godišnje, dok je jedan mesec predviđen za remont. Modelovanje gubitaka izvršeno je za slučajeve skladištenja sirove nafte i naftnih derivata. Skladištene tečnosti razlikuju se po vrednosti napona pare – RVP, kao što je prikazano u tabeli 1. Naime, u zavisnosti od godišnjeg doba, prema naponima para razlikuju se letnji i zimski benzini [16]. Motorni benzin 1 predstavlja primer letnjeg benzina, a Motorni benzin 3 je primer zimskog benzina. Direktiva Evropske Unije 2003/17/EC propisuje maksimalnu vrednost RVP-a motornog benzina u letnjem periodu na 60 kPa i on je u radu predstavljen kao motorni benzin 2 [17].

Tabela 1. Naponi para skladištenih tečnosti  
Table 1. Reid Vapour Pressure of stored liquids

Derivat	Nafta	Pirobenzin	Motorni benzin		
			1	2	3
RVP, kPa	34,5	48,3	41,4	57,2	79,3

Meteorološki podaci korišćeni za procenu evaporativnih gubitaka odgovaraju području Srbije i prikazani su u tabeli 2.

Za procenu gubitaka u ovom radu, odabrani su vertikalni cilindrični rezervoari i to sa:

- fiksnim konusnim krovom;
- fiksnim kupolastim krovom;
- unutrašnjim plivajućim krovom;
- spoljašnjim plivajućim krovom;
- kupolastim krovom.

U industriji, najčešće korišćeni rezervoari su rezervoari sa fiksnim krovom. Niža cena rezervoara sa fiks-

nim krovom, u odnosu na druge rezervoare i minimalna upotreba pomoćne opreme, jedan je od glavnih razloga njihove česte upotrebe. Ovaj tip rezervoara sastoji se od cilindrične školjke od čelika i konusnog ili kupolastog krova koji je trajno pričvršćen za školjku rezervoara (slika 1).

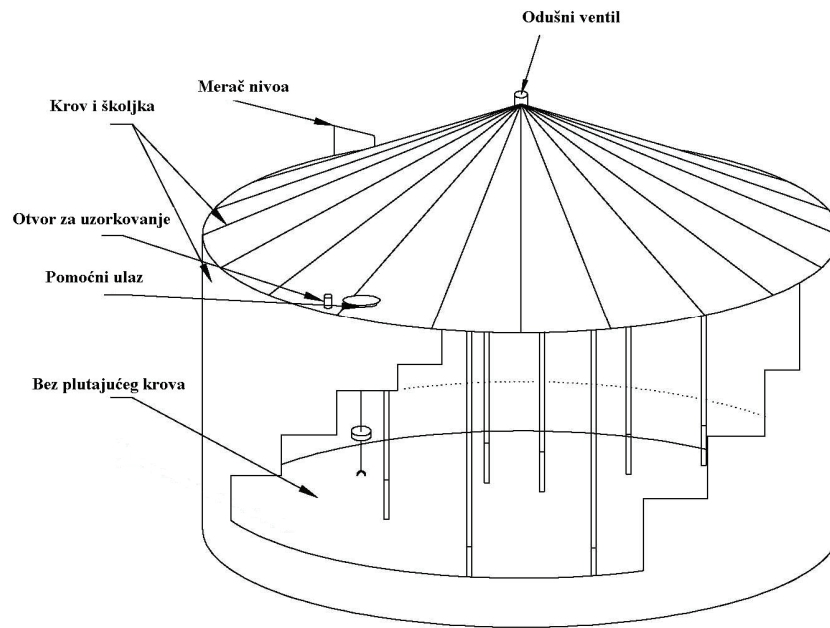
Tabela 2. Srednje prosečne vrednosti meteoroloških podataka u Srbiji

Table 2. Mean average meteorological parameters of Serbia

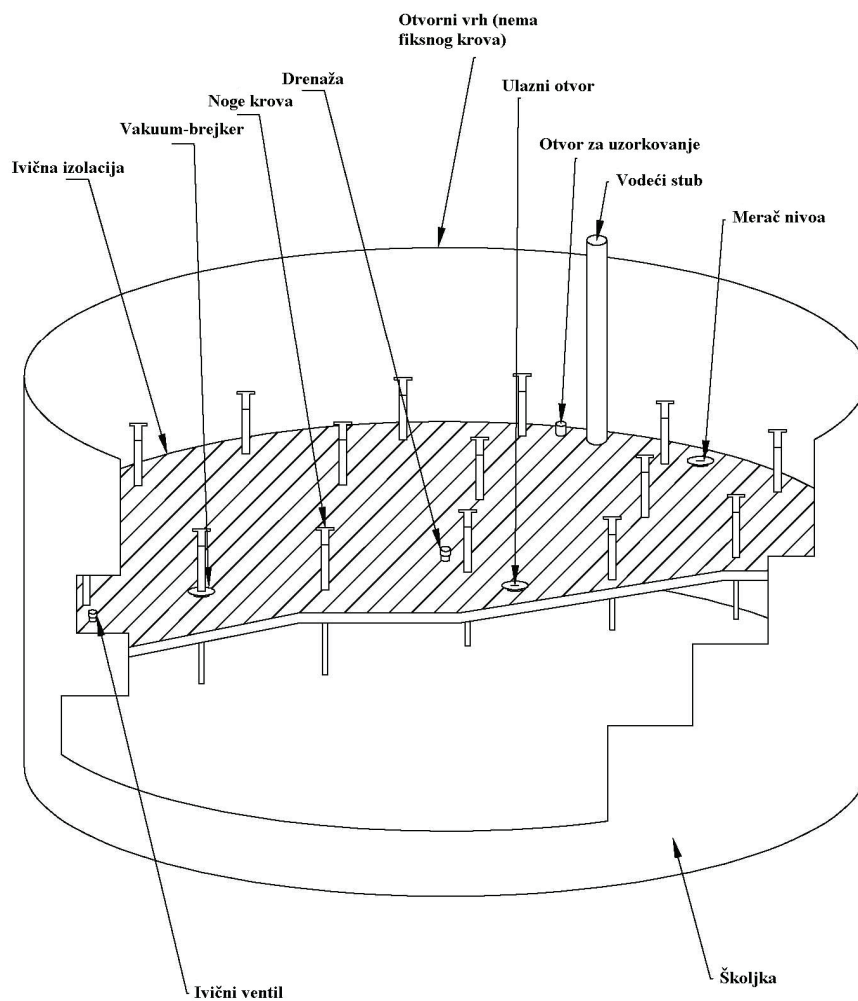
Mesec	Temperatura, °C	Atmosferski pritisak, mbar
Januar	−0,4	1009,6
Februar	2,0	1007,3
Mart	6,3	1005,7
April	11,7	1002,5
Maj	17,1	1004,0
Juni	20,2	1004,2
Juli	21,8	1004,6
Avgust	21,5	1004,9
Septembar	17,2	1006,8
Oktobar	11,7	1008,8
Novembar	6,0	1007,6
Decembar	1,2	1008,2
Prosek	11,3	1006,2

Gubici koji prate ove rezervoare su gubici pri stajanju (eng. *storage losses*) i gubici koji nastaju usled rada (kretanja) tečnosti u rezervoaru (eng. *working losses*). Gubici pri stajanju predstavljaju izbacivanje gasovitih supstanci iz rezervoara gasnom ekspanzijom koja je rezultat promene pritiska ili temperature okoline. Radni gubici nastaju kao posledica punjenja i pražnjenja rezervoara, odnosno kao posledica promene nivoa tečnosti u rezervoaru. Tokom punjenja, kako nivo tečnosti raste, raste i pritisak u rezervoaru, a kada dođe do kritične tačke otvara se sigurnosni ventil i ispuštaju se gasovite supstance iz rezervoara u okolinu. Isparavanje tokom pražnjenja je posledica uvlačenja vazduha u rezervoar tokom uklanjanja tečnosti iz rezervoara. Ovako usisan vazduh postaje zasićen organskim isparenjima, širi se i na taj način prevazilazi kapacitet rezervoara. Emisije kod ovog tipa rezervoara uslovljene su kapacitetom posude, naponom pare skladištene tečnosti, stepenom korišćenja rezervoara kao i meteorološkim karakteristikama lokacije.

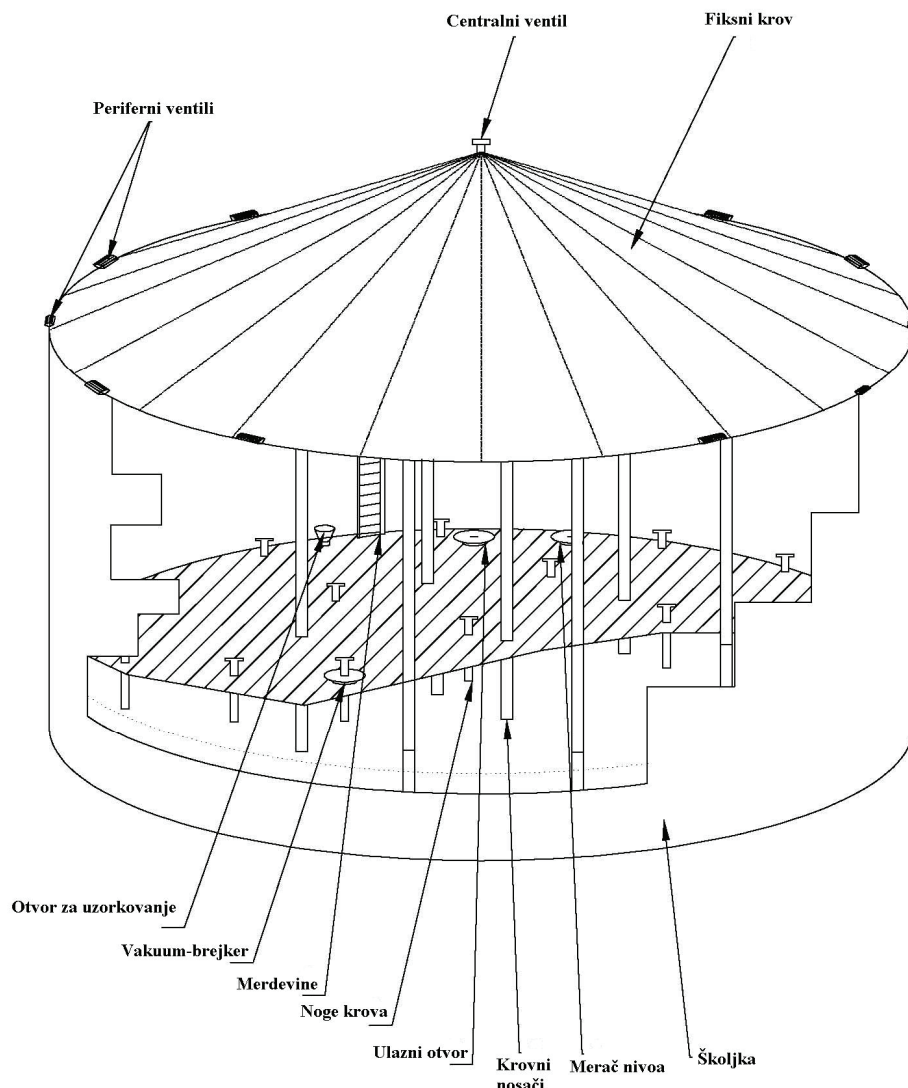
Plivajući krov rezervoara može biti spoljašnji, unutrašnji i kupolasti (slike 2–4). Rezervoare sa spoljašnjim plivajućim krovom karakterišu manji evaporativni gubici u odnosu na rezervoare sa fiksnim krovom, zbog eliminacije gasne faze iznad površine tečne faze. Tako se sprečava gubitak fluida koji nastaje zbog isparavanja sa slobodne površine tečnosti. Manji je i uticaj promene temperature fluida na brzinu isparavanja, kao i opasnost od eksplozije ili požara.



Slika 1. Rezervoar sa fiksnim krovom.  
Figure 1. Fixed roof tank.



Slika 2. Rezervoar sa spoljašnjim plivajućim krovom.  
Figure 2. External floating roof tank.

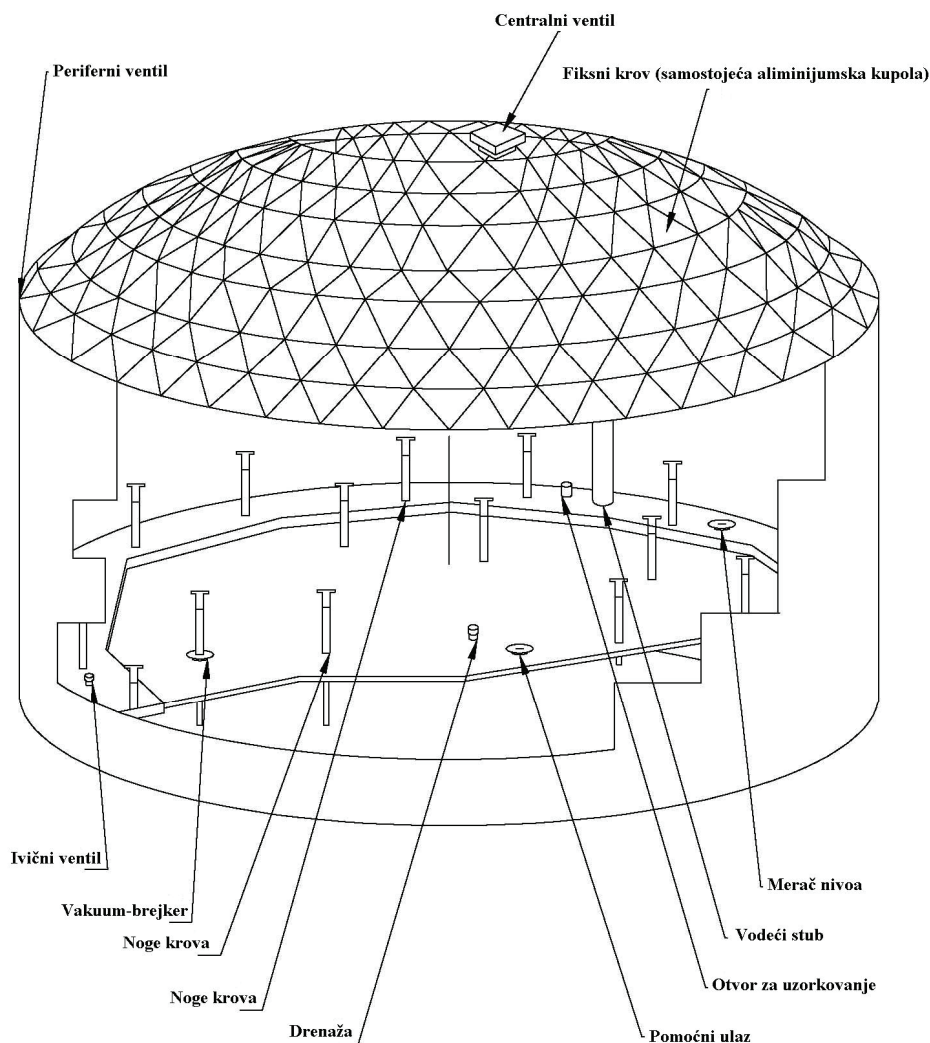


Slika 3. Rezervoar sa unutrašnjim plivajućim krovom.  
Figure 3. Internal floating roof tank.

Rezervoari sa spoljašnjim plivajućim krovom sastoje se od čelične školjke cilindričnog oblika i krova koji pluta na površini tečnosti. Plivajući krov se spušta ili podiže u zavisnosti od nivoa tečnosti u rezervoaru. Rezervoari sa spoljašnjim plivajućim krovom su opremljeni ivičnim izolacionim sistemom koji je vezan za krov, a u kontaktu je sa zidom. Rezervoari sa unutrašnjim plivajućim krovom u svom sastavu imaju i stalni fiksni krov i plivajući krov pri čemu se plivajući krov nalazi ispod fiksnog krova. Kod rezervoara sa unutrašnjim plivajućim krovom, kao i kod rezervoara sa spoljašnjim plivajućim krovom, ivični izolacioni sloj klizi duž zidova rezervoara kako se krov podiže i spušta. Ukupna emisija iz rezervoara sa plivajućim krovom je suma gubitaka uslovljenih stajanjem tečnosti u rezervoaru i gubitaka uslovljenih površinskim naponom skladištene tečnosti (radni gubici). Kod rezervoara sa plivajućim krovom gubici pri stajanju uzrokovani su ivičnom izolacijom, krov-

nom armaturom i krovnom konstrukcijom. Za rezervoare sa plivajućim krovom karakteristično je postojanje anularnog prostora između zida rezervoara i krova. Kako bi isparavanje kroz taj prostor bilo veliko, rezervoar mora da sadrži neki sistem ivične izolacije. Krovna armatura može biti izvor isparavanja tečnosti (eng. *deck fitting losses*) kada na krovu postoje otvori koji zahtevaju otvaranje. Ovi gubici se optimiziraju pomoću ventila i pravila dizajniranja. Pored navedenih gubitaka, postoje i gubici usled „disanja“ (eng. *breathing loss*) koji nastaju kao posledica promene temperature i atmosferskog pritiska, međutim ovi gubici su mali za rezervoare sa plivajućim krovom [15].

Odabrani rezervoari, na osnovu kojih je modelovanje urađeno, prema veličini, kapacitetima odgovaraju realnim podacima odabrane rafinerije. Nafta se smešta u rezervoare koji imaju veću zapreminu, dok su naftni derivati smešteni u rezervoare sa manjom zapreminom.



Slika 4. Rezervoar sa kupolastim plivajućim krovom.  
Figure 4. Domed external floating roof tank.

Zapremine rezervoara prikazane su u tabeli 3. Predpostavka je da je prosečni, radni nivo tečnosti u rezervoaru blizak vrednosti maksimalnog nivoa. U praksi, ovo bi se odnosilo na slučaj kada se rezervoar puni tečnošću do vrednosti maksimalnog nivoa, a ne do neke niže vrednosti. Izabrano je da su modelovani rezervoari sive boje, u dobrom stanju.

Tabela 2. Karakteristike rezervoara korišćenih za proračun evaporativnih gubitaka

Table 3. Tank parameters used for evaporative losses estimation

Sadržaj rezervoara	Prečnik rezervoara, m	Zapremina, m <sup>3</sup>
Sirova nafta	43	21.700
Derivati	20	4.508

## REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati procene gubitaka nafte i naftnih derivata na godišnjem nivou prikazani su u tabelama 4–9.

Pri odabiru tipa rezervoara u kome će se skladištiti neki fluid, bitno je poznavati i zavisnosti gubitaka od promenljivih faktora. Radni gubici nastaju kao posledica promene nivoa tečnosti u rezervoaru. Za dati tip i konstrukcione karakteristike rezervoara, radni gubici najviše zavise od broja punjenja i pražnjenja. Naime, tokom punjenja rezervoara, raste nivo tečnosti a samim tim i pritisak u rezervoaru. Kada pritisak dođe do kritične tačke otvaraju se sigurnosni ventili i gasovite supstance se ispuštaju u okolinu. Gubici pri stajanju nastaju kao rezultat promene temperature i pritiska okoline. Gubici koji su uslovljeni stajanjem fluida u rezervoaru zavise od više faktora: vrste ivične izolacije, broja i vrste otvora na krovu i od karakteristika skladišne tečnosti. Rezultati takođe pokazuju da su u slučaju rezervoara sa fiksnim krovom dominantni radni gubici, dok su za rezervoare sa plutajućim krovom višestruko značajniji gubici pri stajanju.

Proračun evaporativnih gubitaka ukazuje da su najveće emisije iz rezervoara sa fiksnim kupolastim kro-

Tabela 4. Ukupni godišnji gubici skladištene sirove nafte  
Table 4. Total annual evaporative losses of crude oil

Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	18,61	73,77	92,38
Fiksni sa konusnim krovom	36,65	73,77	110,43
Unutrašnji plivajući	0,939	0,194	1,13
Spoljašnji plivajući	2,56	0,194	2,76
Kupolasti	2,56	0,194	2,76

Tabela 5. Ukupni godišnji skladištenog dizel goriva  
Table 5. Total annual evaporative losses of fuel oil

Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	$1,67 \times 10^{-2}$	0,122	0,139
Fiksni sa konusnim krovom	$3,63 \times 10^{-2}$	0,122	0,159
Unutrašnji plivajući	$4,67 \times 10^{-3}$	$2,17 \times 10^{-2}$	$2,63 \times 10^{-2}$
Spoljašnji plivajući	$2,09 \times 10^{-2}$	$2,17 \times 10^{-2}$	$4,25 \times 10^{-2}$
Kupolasti	$2,87 \times 10^{-3}$	$2,17 \times 10^{-2}$	$2,45 \times 10^{-2}$

Tabela 6. Ukupni godišnji gubici pirobenzina  
Table 6. Total annual evaporative losses of raw pyrolysis gasoline

Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	7,87	33,68	41,56
Fiksni sa konusnim krovom	11,71	33,68	45,39
Unutrašnji plivajući	1,47	0,0171	1,49
Spoljašnji plivajući	6,72	0,0171	6,74
Kupolasti	0,91	0,0171	0,92

Tabela 7. Ukupni godišnji gubici motornog benzina 1  
Table 7. Total annual evaporative losses of gasoline fuel No. 1

Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	6,31	28,80	35,10
Fiksni sa konusnim krovom	9,69	28,80	38,48
Unutrašnji plivajući	1,23	0,0171	1,25
Spoljašnji plivajući	5,61	0,0171	5,63
Kupolasti	0,76	0,0171	0,77

vom. Rezervoari sa fiksnim konusnim krovom imaju nešto manje emisije. Značajno manji evaporativni gubici emituju se iz rezervoara sa plivajućim krovom, zahvaljujući eliminaciji gasne faze iznad površine tečnosti.

Na osnovu podataka prikazanih u tabelama 4–9, koji se odnose na ukupne godišnje gubitke modelovanog rezervoara i podacima o gustini tečnosti, izvršen je proračun evaporativnih gubitaka po toni uskladištenog derivata. Ovi podaci omogućavaju komparativan prikaz emisija različitih fluida za isti tip i konstrukciju rezervoara. Dobijeni rezultati su prikazani na slikama 5–7.

Dobijeni rezultati pokazuju da su emisije dizel goriva veoma male. Iako su i u ovom slučaju gubici iz rezervoara sa fiksnim krovom veći u odnosu na rezervoare sa plutajućim krovom (oko 5 puta), ukupne vrednosti emisija su veoma male. Na osnovu toga, može se izvesti zaključak da je skladištenje dizel goriva u rezervoarima sa fiksnim krovom, opravdano i sa stanovišta materijalnog bilansa i sa stanovišta zaštite životne sredine. Nasuprot tome, ukoliko je skladišni fluid neka isparljiva tečnost, evaporativni gubici mogu biti veoma značajni. U ovom radu, procenjeno je da emisije isparljivih teč-

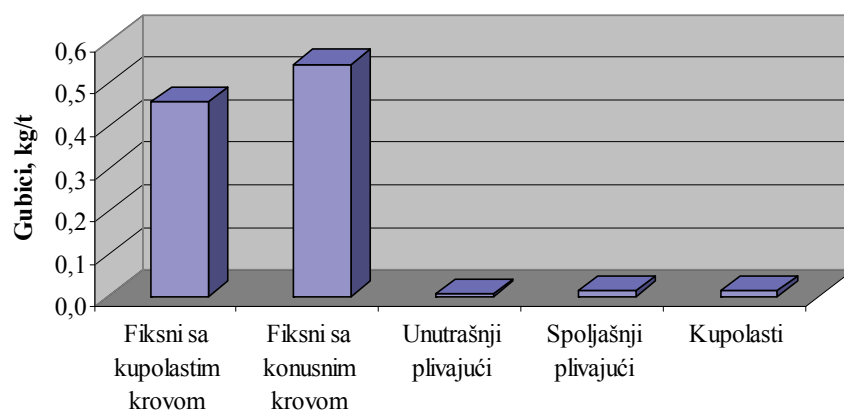
Tabela 8. Ukupni godišnji gubici motornog benzina 2  
Table 8. Total annual evaporative losses of gasoline fuel No. 2

Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	10,38	40,70	51,08
Fiksni sa konusnim krovom	14,88	40,70	55,58
Unutrašnji plivajući	1,84	0,0171	1,86
Spoljašnji plivajući	8,39	0,0171	8,40
Kupolasti	1,13	0,0171	1,15

Tabela 9. Ukupni godišnji gubici motornog benzina 3  
Table 9. Total annual evaporative losses of gasoline fuel No. 3

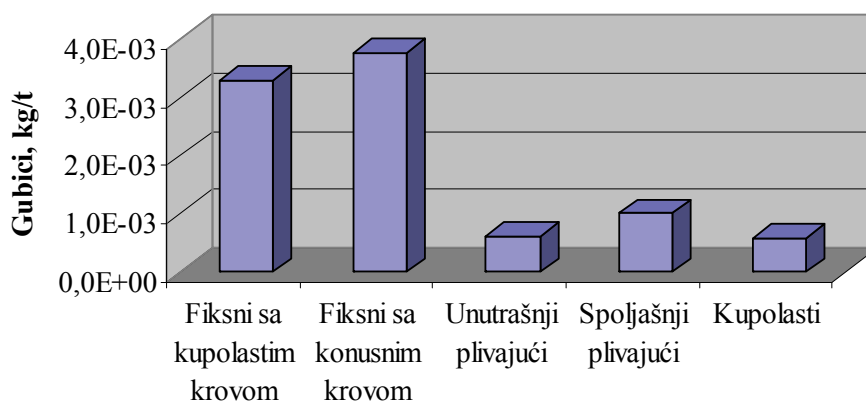
Tip rezervoara	Gubici, t/god		
	Pri stajanju	Radni	Ukupno
Fiksni sa kupolastim krovom	18,12	55,91	74,02
Fiksni sa konusnim krovom	24,27	55,91	80,18
Unutrašnji plivajući	2,77	0,0171	2,79
Spoljašnji plivajući	12,61	0,0171	12,63
Kupolasti	1,70	0,0171	1,72

#### Sirova nafta

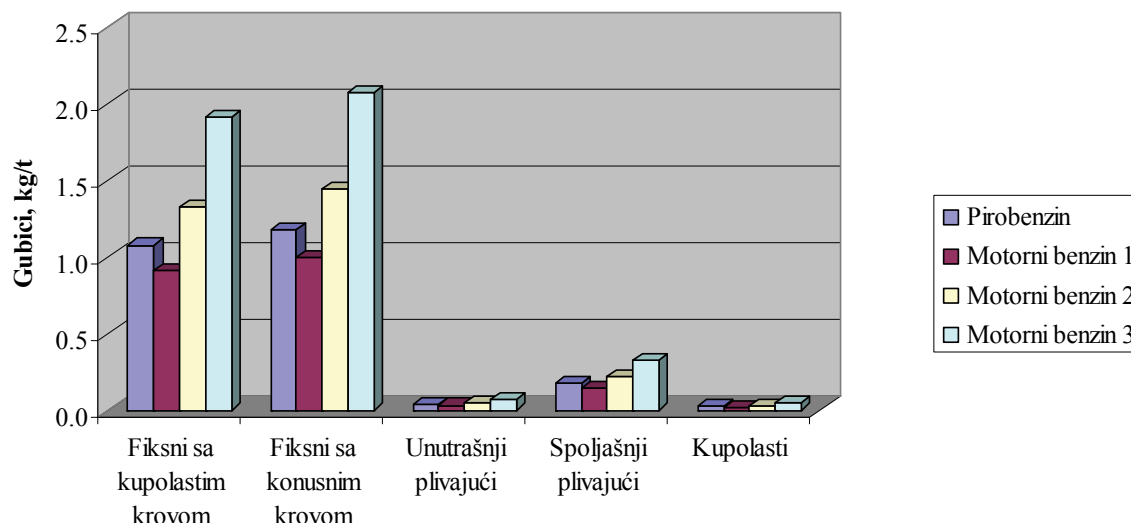


Slika 5. Evaporativni gubici sirove nafte.  
Figure 5. Crude oil evaporative losses.

#### Dizel gorivo



Slika 6. Evaporativni gubici dizel goriva.  
Figure 6. Diesel fuel evaporative losses.



Slika 7. Evaporativni gubici pirobenzina i motornih benzina.  
Figure 7. Raw pyrolysis gasoline and gasoline fuels evaporative losses.

nosti iz jednog rezervoara sa fiksnim krovom mogu biti 35–80 t godišnje. Ukoliko se uzme u obzir da broj rezervoara u krugu rafinerije može biti i stotina rezervoara, stiće se utisak o količini zagađujućih materija koja se može emitovati u ambijentalni vazduh ukoliko se za skladištenje koriste rezervoari sa fiksnim krovom. Takođe, važno je napomenuti da pojedini rafinerijski poluproizvodi, kao što je pirobenzin, mogu imati sadržaj mutagenih i kancerogenih lako isparljivih aromatičnih ugljovodonika BTEX-ova (benzen, toluen, etilbenzen i ksileni) i do 70 %. U ovakvim slučajevima, naročito je važno izvršiti pravilan izbor rezervoara. Kao i u predhodnim slučajevima, emisije iz rezervoara za skladištenje sirove nafte su najviše za rezervoare sa fiksnim krovom. Međutim, ukoliko se posmatraju vrednosti emitovanih materija po toni uskladištene tečnosti u skladu sa napred definisanim uslovima, vidi se da se emisije iz fiksnih rezervoara za naftu kreću do 0,54 kg/t nafte, a za isparljive derivate i do 2,07 kg/t derivata. Sirova nafta takođe sadrži VOC, ali je sadržaj BTEX-ova značajno manji nego u derivatima kao što su pirobenzin i motorni benzini.

## ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni rezultati proračuna evaporativnih gubitaka iz vertikalnih rezervoara za slučajeve skladištenja nafte i derivata nafte. Uz pomoć softverskog programa TANKS 409d, proračun je izvršen za rezervoare sa fiksnim krovom i za rezervoare sa plutajućim krovom, a na osnovu podataka o karakteristikama rezervoara, režimu rada rezervoara, meteoroloških uslova lokacije rezervoara i osobine skladištenih tečnosti. Analiza je rezultirala procenama evaporativnih gubitaka na godišnjem nivou u zavisnosti od tipa rezervoara i tipa skladištene tečnosti. Dobijeni rezultati uka-

zuju da su kod svih vrsta skladištenih tečnosti najveći evaporativni gubici pri skladištenju tečnosti u rezervoarima sa fiksnim kupolastim i fiksnim konusnim krovom. Rezervoari sa plutajućim krovom (u koje spadaju rezervoari sa unutrašnjim, spoljašnjim i kupolastim krovom) mogu imati i do 50 puta manje gubitke u odnosu na rezervoare sa fiksnim krovom. Ukoliko se posmatra struktura gubitaka, rezultati pokazuju da su u slučaju rezervoara sa fiksnim krovom dominantni radni gubici, dok su za rezervoare sa plutajućim krovom višestruko značajniji gubici pri stajanju. Ova informacija olakšava donošenje odluke o odabiru rezervoara ukoliko je poznata planirana dinamika rada rezervoara.

Na osnovu napred iznetog, zaključeno je da se tečnosti male isparljivosti i niskog sadržaja BTEX mogu skladištiti i u rezervoarima sa fiksnim krovom. U ovom slučaju, preovlađuje ekonomski aspekt (niži troškovi ulaganja i održavanja rezervoara), jer ukupne količine evaporativnih gubitaka ne utiču značajnije na životnu sredinu. Nasuprot tome, skladištenje isparljivih derivata sa visokim sadržajem BTEX-ova u rezervoarima sa fiksnim krovom, nije opravdano ni sa ekonomske strane, ni sa stanovišta zaštite životne sredine. Za njihovo skladištenje preporuka je da se koriste rezervoari sa unutrašnjim plivajućim i sa kupolastim krovom, jer su gubici u tim slučajevima najmanji.

## Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti na projektu TR 34009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] M. Savić, M. Jovanović, S. Petrović, Procena emisije ugljovodonika u procesu skladištenja pirobenzina u naft-



- no-petrohemijском kompleksu u Pančevu, VIII simpozijum "Savremene tehnologije i privredni razvoj", Zbornik izvoda radova, 2009, Leskovac, Srbija, str. 187–192.
- [2] D.R. Gentner, R. Harley, A. Miller, A. Goldstein, Diurnal and seasonal variability of gasoline-related volatile organic compound emissions in riverside, California, *Environ. Sci. Technol.* **43** (2009) 4247–4252.
- [3] M.R. Ras, R.M. Marce, F. Borrell, Characterization of ozone precursor volatile organic compounds in urban atmospheres and around the petrochemical industry in the Tarragona region, *Sci. Total Environ.* **407** (2009) 4312–4319.
- [4] A.P. Jovanović, M.Z. Stijepović, M.B. Jovanović, The analysis of loading losses from tank trucks, *Hem. Ind.* **60** (2006) 239–244.
- [5] A. Veljašević, M. Savić, J. Jovanović, M. Jovanović, New Method for Crude Oil Storage Tanks Evaporative Losses Determination, International Conference Innovation as a Function of Engineering Development, 2011, Niš, Serbia, pp. 381–386.
- [6] J. Jovanovic, M. Jovanovic, A. Jovanovic, V. Marinovic, Introduction of cleaner production in the tank farm of the Pancevo Oil Refinery, Serbia, *J. Clean. Prod.* **18** (2010) 791–798.
- [7] H. Pasley, C. Clark, Computational fluid dynamics study of flow around floating – roof oil storage tanks, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **86** (2000) 37–54.
- [8] M.M. Jackson, Organic liquids storage tanks volatile organic compounds (VOCs) emissions, dispersion and risk assessment in developing countries: the case of Dar-es-Salaam City, Tanzania, *Environ. Monit. Assess.* **116** (2006) 363–382.
- [9] W. Huang, J. Bai, S. Zhao, A. Lv, Investigation of oil vapor emission and its evaluation methods, *J. Loss Prev. Process Ind.* **24** (2011) 178–186.
- [10] J.R. Beckman, J.R. Gillmer, Model for predicting emissions from fixed-roof storage tanks, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **20** (1981) 646–651.
- [11] A.K. Chambers, M.S. Alberta, T. Wootton, J. Moncrieff, P. McCready, DIAL Measurements of Fugitive Emissions from Natural Gas Plants and the Comparison with Emission Factor Estimates, <http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei15/session14/chambers.pdf> (10.9.2011).
- [12] R. Rota, S. Frattini, S. Astori, R. Paludetto, Emissions from fixed-roof storage tanks: modeling and experiments, *Ind. Eng. Chem. Res.* **40** (2001) 5847–5857.
- [13] J.R. Beckman, J.A. Holcomb, Experimental and Theoretical Investigation of Working Emissions from Fixed-Roof Tanks, Department of Chemical and Bioengineering, College of Engineering and Applied Sciences, Arizona State University, Tempe, AZ, 85287
- [14] Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage, Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, 2006.
- [15] Emission Factor Documentation for AP-42, Section 7.1, Organic Liquid Storage Tanks, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Emission Factor and Inventory Group, 1997.
- [16] Pravilnik o tehničkim i drugim zahtevima za tečna goriva naftnog porekla, Sl. list SCG, br. 51/2004, 54/2005 i 18/2006, i Sl. glasnik RS, br. 128/2007.
- [17] Directive 2003/17/EC of the European Parliament and of the Council of 3 March 2003 amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels.

## SUMMARY

### ESTIMATION OF EVAPORATIVE LOSSES DURING STORAGE OF CRUDE OIL AND PETROLEUM PRODUCTS

Marina A. Mihajlović<sup>1</sup>, Ana S. Veljašević<sup>1</sup>, Jovan M. Jovanović<sup>1</sup>, Mića B. Jovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Belgrade, Innovation Center of the Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

<sup>2</sup>University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Storage of crude oil and petroleum products inevitably leads to evaporative losses. Those losses are important for the industrial plants mass balances, as well as for the environmental protection. In this paper, estimation of evaporative losses was performed using software program TANKS 409d which was developed by the Agency for Environmental Protection of the United States – US EPA. Emissions were estimated for the following types of storage tanks: fixed conical roof tank, fixed dome roof tank, external floating roof tank, internal floating roof tank and domed external floating roof tank. Obtained results show quantities of evaporated losses per tone of stored liquid. Crude oil fixed roof storage tank losses are *cca.* 0.5 kg per tone of crude oil. For floating roof, crude oil losses are 0.001 kg/t. Fuel oil (diesel fuel and heating oil) have the smallest evaporation losses, which are in order of magnitude  $10^{-3}$  kg/ton. Liquids with higher Reid Vapour Pressure have very high evaporative losses for tanks with fixed roof, up to 2.07 kg/ton. In case of external floating roof tank, losses are 0.32 kg/ton. The smallest losses are for internal floating roof tank and domed external floating roof tank: 0.072 and 0.044, respectively. Finally, it can be concluded that the liquid with low volatility of low BTEX amount can be stored in tanks with fixed roof. In this case, the prevailing economic aspect, because the total amount of evaporative loss does not significantly affect the environment. On the other hand, storage of volatile derivatives with high levels of BTEX is not justified from the economic point of view or from the standpoint of the environment protection.

**Keywords:** Storage tank • Crude oil • Petroleum products • Evaporative loss