

MODELIRANJE I METODOLOŠKI PRISTUP PRORAČUNU ČVRSTOĆE NOSEĆE STRUKTURE REZERVOARA ZA TEČNI UGLJEN DIOKSID (TUD)

MODELLING AND METHODOLOGICAL APPROACH TO THE CALCULATION OF BEARING STRUCTURE HARDNESS OF LIQUID CO₂ STORAGE TANK

V. Aleksić, M. Arsić*

Rezime: U radu je vodeći računa o važećim propisima i standardima dat metodološki pristup modeliranja i proračuna čvrstoće noseće strukture rezervoara za TUD metodom konačnih elemenata. Na osnovu analize dobijenih rezultata proverena je stabilnost elemenata strukture, ocenjena je nosivost, a dati su i predlozi u cilju poboljšanja nosivosti i optimizacije date strukture.

Summary: In this paper is given one methodological approach for modeling and strength calculation of a bearing structure of liquid CO₂ storage tank, using finite elements method, with all respects to the appropriate standards and rules. Based on the received results analysis, the structure elements stability is checked, the carrying capacity is evaluated and some proposals for improvements and optimization of the structure are given.

1. UVOD

Osnovni zahtevi koji rukovode projektovanje, proračun i izradu noseće strukture rezervoara za tečni CO₂ (TUD) su sadržani: u "Pravilniku o tehničkim normativima za pokretne zatvorene sudove za komprimirane, tečne i pod pritiskom rastvorene gasove", tehničkim uslovima standarda JUS M.E2.516/89 /1/, materijalnim podlogama sadržanim u tehničkom opisu i mogućnostima i tehnološkoj opremljenosti proizvođača.

Rezervoar iz proizvodnog programa "GOŠA" spada u grupu pokretnih sudova pod pritiskom za smeštaj i transport tečnog ugljen-dioksida, horizontalne izrade. Tehničke karakteristike rezervoara su:

- Najveći dozvoljeni radni pritisak 20 bara
- Proračunski pritisak, JUS M.E2.250 20 bara
- Ispitni pritisak 26 bara
- Ispitna materija voda
- Temperatura ispitne materije temperatura okoline
- Maksimalna i minimalna temperatura zida -30^{±3} °C
- Radni medijum neotrovan, nezapaljiv, neeksplozivan
- Zapremina 21 m³
- Masa prazne posude 4400 kg
- Najveća masa punjenja 20440 kg.

Dimenzije rezervoara date su na sl.1 /2/. Uzimajući opšte i lokacijske činioce rezervoar spada u klasu II (JUS M.E2.151) posuda pod pritiskom.

Kod projektovanja se teži unifikaciji limova i priključaka, a za vezivanja elemenata strukture se koristi postupak elektrolučnog zavarivanja na način propisan tehnologijom zavarivanja.

Rezervoar se ugrađuje na drumsko vozilo, na pripremljene oslonce, a utovar se vrši pomoću čeličnih sajli akačenih za uške rezervoara i dizalice odgovarajuće nosivosti, a potom se ugrađuje odgovarajuća oprema. Po nameštanju na vozilo, mala je verovatnoća da će u svom veku biti premeštan na drugo vozilo.

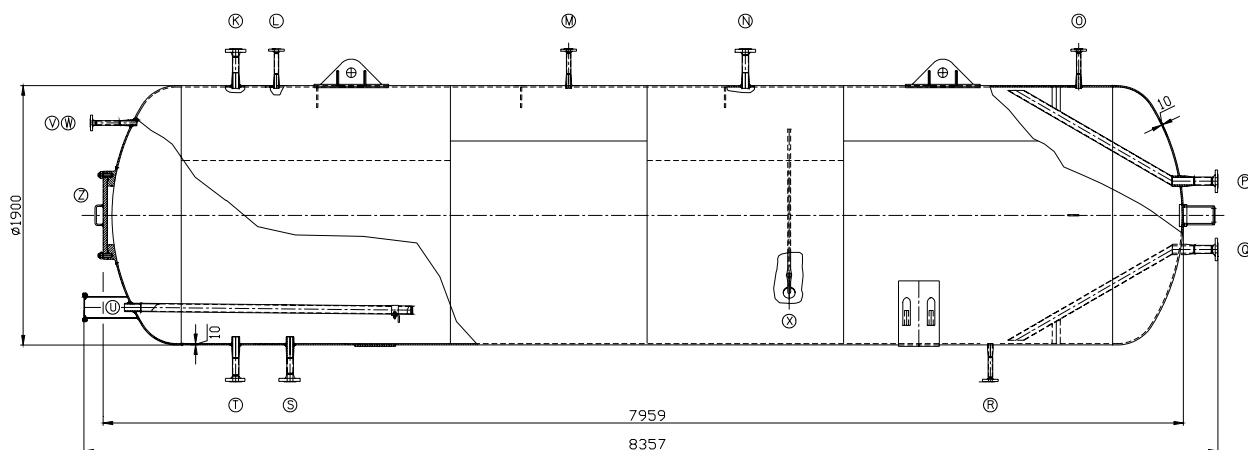
2. OPTEREĆENJA ZA PRORAČUN

Kao polazna osnova za određivanje merodavnih opterećenja služe norme koje se odnose na projektovanje, proračun i konstruisanje pokretnih posuda pod pritiskom za tečni ugljen dioksid, a definisane su standardom

* Mr Vujadin Aleksić, istraživač saradnik, dr Miodrag Arsić, naučni saradnik, Goša institut, Milana Rakića 35, Beograd, tel. 011/413-087, 011/417-073, e-mail: razvoj@verat.net, v_aleksic@hotmail.com.

JUS M.E2.516/89, a koje za proračun čvrstoće i stabilnosti suda za TUD pod pritiskom, zavisno od vrste, namene i klase suda, uzimaju u obzir:

1. mirna opterećenja stvorena unutrašnjim pritiskom;
2. dinamička i udarna opterećenja uključujući i nagle promene pritiska;
3. opterećenja stvorena statičkim pritiskom radne materije;
4. opterećenja izazvana sopstvenom masom suda i masom radne, odnosno ispitne materije;
5. opterećenja izazvana priključnim cevovodima, radnom opremom i izolacijom;
6. opterećenja izazvana vetrom (u slučaju postavljanja suda na otvorenom prostoru);
7. opterećenja izazvana seizmičkim potresom;
8. naprezanja izazvana temperaturnim poljima u materijalu;
9. lokalna naprezanja na mestima priključivanja, odnosno oslanjanja.



Sl. 1. Rezervoar za tečni ugljen dioksid zapremine 21 m³

2.1. Analiza opterećenja

U svom radnom veku ovaj rezervoar je izložen svim opterećenjima nabrojanim gore, ali su dominantna opterećenja pod rednim brojem: 1, 3, 4, 9, kao i opterećenje praznog rezervoara u trenutku dizanja rezervoara sajlama preko uški u cilju nameštanja na transportno sredstvo ili nameštanja na mesta oslanjanja. Ostale vrste opterećenja, zbog svog retkog pojavljivanja i malog uticaja na čvrstoću i stabilnost rezervoara neće biti uzete u obzir pri proračunu.

2.2. Usvojeno opterećenje za proračun

Za slučaj opterećenja pod rednim brojem 1, mirno opterećenje stvoreno unutrašnjim pritiskom, usvaja se ispitni pritisak od 26 bara=0.26 kN/cm².

Za slučaj opterećenja pod rednim brojem 3, opterećenje stvoreno statičkim pritiskom radne materije, usvaja se kontinualno raspoređena masa maksimalnog punjenja po čitavom rezervoaru od 20440 kg≈204.40 kN.

Za slučaj opterećenja pod rednim brojem 4, opterećenje izazvano sopstvenom masom suda i masom radne, odnosno ispitne materije, uz istovremeno dejstvo pritiska, usvaja se kontinualno raspoređena masa suda i masa maksimalnog punjenja po čitavom rezervoaru, 4400+20440, od 24840 kg≈248.40 kN i 26 bara=0.26 kN/cm²

Naprezanja izazvana slučajem opterećenja pod rednim brojem 9, lokalna naprezanja na mestima priključivanja, odnosno oslanjanja, delimično su uzeta u obzir specifičnom koncepcijom modeliranja rezervoara, tako da se ostavlja mogućnost dogradnje bilo kog postojećeg priključka u cilju dobijanja tačnije raspodele napona oko priključka, a time i sagledavanje uticaja koncentracije napona na čitavu strukturu.

Za slučaj opterećenja 10, izazvanog dizanjem praznog rezervoara preko sajlj okačenih za uške rezervoara pod uglom od 45°, usvaja se opterećenje izazvano delovanjem sopstvene mase rezervoara od 4400 kg≈44.0 kN.

2.3. Dozvoljene deformacije i naponi

Najveće dozvoljene deformacije su definisane zahtevom iz standarda JUS M.E2.200/78 t. 8.1, koji glasi da kod primenjenih opterećenja ne smiju postojati trajne deformacije, a one su definisane materijalom od koga

je izrađena posuda. Za izradu rezervoara za tečni CO₂ odabran je sitnozrni čelik TStE355 čija su mehanička svojstva data u tabeli 1.

Tabela 1. Mehanička svojstva materijala TStE355

Modul elastičnosti	Poasonov koeficijent	Granica tečenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Žilavost ISO - V [J]	
E [kN/cm ²]	ν []	R _{eH} [kN/cm ²]	R _m [kN/cm ²]	Lo=5d [%]	-20 °C	-50 °C
20000	0.3	41.4-43.6	57.4-58.2	28-30	176-200	50-53

Da bi ostalo sve u granicama elastičnosti i posle prestanka delovanja opterećenja usvaja se minimalni stepen sigurnosti za deformacije i napone $\nu=1.1$. Pa prema tome sledi:

$$\sigma_{\text{doz}} = R_{eH} / \nu = 41.4 / 1.1 = 37.6 \text{ kN/cm}^2$$

$$l_{\text{doz}} = \sigma_{\text{doz}} l / E = 37.6 \cdot 835.7 / 20000 = 1.57 \text{ cm}$$

Vodeći računa o postavljenim zahtevima u pogledu opterećenosti strukture rezervoara urađen je sledeći proračun metodom konačnih elemenata (MKE) u programu KOMIPS /3/.

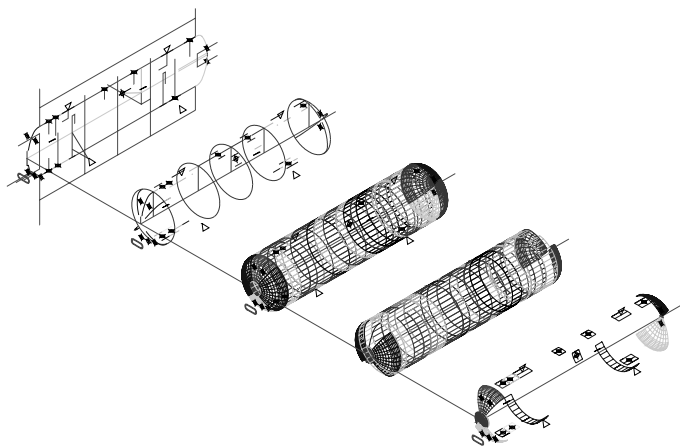
3. MODEL NOSEĆE STRUKTURE REZERVOARA

Rezervoar se tretira kao prostorna struktura međusobno povezanih elemenata tipa ploče (četvorougone i trougaone) promenljivog poprečnog preseka.

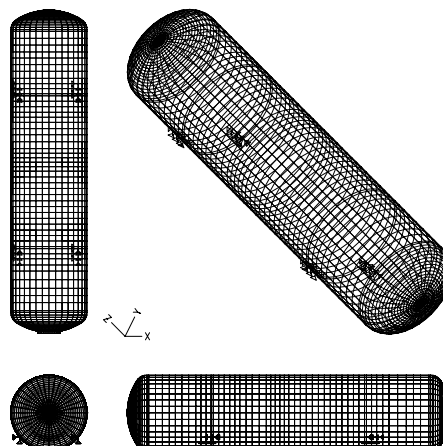
Celokupna noseća struktura je svedena na: srednju ravan omotača i prednjeg i zadnjeg danca. Svi priključni elementi su svedeni u jednu od navedenih ravni, pa su napravljene odgovarajući modeli čiji su elementi definisani podacima iz tabele 2., i podacima očitanim sa sl. 2 /2/.

Usvojeni mehanički model, sl. 3., ima 3242 čvora i 3308 elemenata tipa ploče. Globalni koordinatni sistem modela, sl. 3., je usvojen tako da je:

- koordinatni početak "O" u centralnoj osi rezervoara na početku revizionog otvora,
- osa "Ox" se prostire upravno na centralnu osu rezervoara u pravcu suprotnom od X priključka,
- osa "Oy" se prostire upravno na centralnu osu rezervoara u pravcu K priključka, a
- osa "Oz" se poklapa sa centralnom osom rezervoara, tako da sa prethodne dve ose čini trijedar.



Sl. 2. Raspedela ploča omotača, oslonaca, priključaka i uški svedenih na ploče modela



Sl. 3. Usvojeni model rezervoara za proračun

Statički proračun strukture je baziran na standardu JUS M.E2.516/89 koji definiše opterećenja koja se moraju uzeti u obzir pri proračunu čvrstoće i stabilnosti suda.

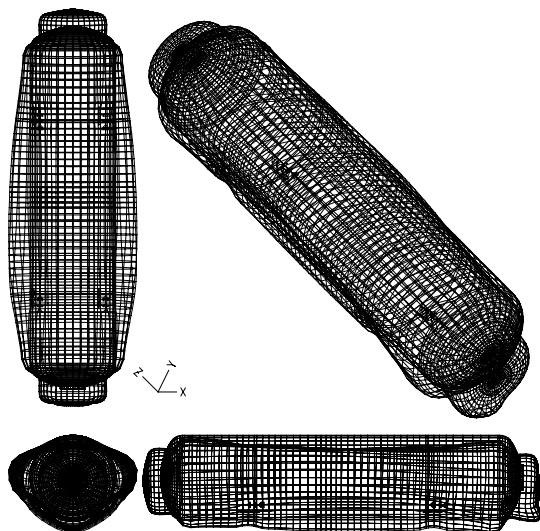
Dinamička opterećenja uzeta su u obzir statičkim slučajevima opterećenja, pa nije urađen poseban dinamički proračun strukture. Odgovarajući zaključci su izvedeni iz statičkog proračuna.

4. REZULTATI PRORAČUNA

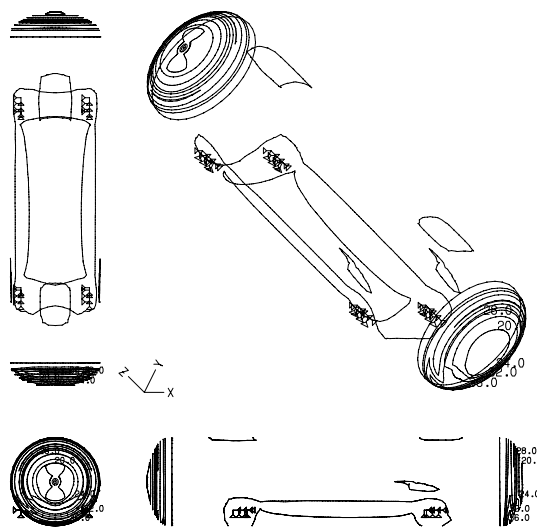
Za elemente tipa ploče, izračunati su najveći ekvivalentni naponi u konkretnom preseku odgovarajućim programskim modulima programa KOMIPS /3/.

Deformacije (pomeranja čvornih tačaka) za karakterističan i najkritičniji slučaj opterećenja 4 su prikazane na sl.4, a naponska slika oplata kontejnera na sl. 5 /2/.

OPT4



Sl. 4. Pomeranja čvornih tačaka za slučaj opterećenja 4

Sl. 5. Naponi u elementima za slučaj opterećenja 4 > 20 kN/cm² sa korakom 4

Za slučaj opterećenja 4, ostvarena su najveća pomeranja na prednjem i zadnjem dancu u području priključaka U,Y,Z i P,Q, a vrednosti su u granicama dozvoljenih vrednosti.

Naponi u elementima ploča su ispod dozvoljenih napona, s tim da se u zoni priključaka U,Y veoma približavaju dozvoljenoj granici za predviđenu vrstu materijala.

4.1 Analiza stabilnosti elemenata noseće strukture

Površinski elementi koji su izloženi pritisku ili smicanju trebaju da zadovolje uslove stabilnosti. Stabilnost elemenata plašta proverava se na "traci" plašta između uški, čija je dimenzija:

$$\begin{aligned} h &= 1.0 \text{ cm} - \text{debljina plašta,} \\ a &= 430.0 \text{ cm} - \text{dužina polja,} \\ b &= 33.5 \text{ cm} - \text{širina polja.} \end{aligned}$$

Kritični naponi se dobijaju prema izrazima:

$$\sigma_{kr} = K_{\sigma} \cdot E \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad \text{i} \quad \tau_{kr} = K_{\tau} \cdot E \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (1)$$

Za odnos $b/a=33.5/430.0=0.078$ koeficijenti konturnih uslova za slučaj uklještenih ivica polja plašta iznose $K_{\sigma}=3.8$ i $K_{\tau}=8$, pa su kritični naponi:

$$\sigma_{kr} = 3.8 \cdot 21000 \cdot \left(\frac{1.0}{33.5}\right)^2 = 71.11 \cdot \text{kN} / \text{cm}^2 \quad \text{i}$$

$$\tau_{kr} = 8 \cdot 21000 \cdot \left(\frac{1.0}{33.5}\right)^2 = 149.70 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Ovi naponi su dosta visoki, pa u delovima plašta koji su izloženi naponima pritiska ili smicanja zbog nižih napona od kritičnih ne može doći do gubitka stabilnosti.

5. ZAKLJUČAK SA PREDLOGOM ZA OPTIMIZACIJU

Proračun ima globalni karakter i ne bavi se lokalnom vezama, što pretpostavlja dobru vezu između delova plašta međusobno i vezu sa dancima, kao i vezu između priključaka, oslonaca i uški sa plaštom i dancima. Drugim rečima pretpostavlja se kvalitetno izvedeni svi varovi u skladu sa tehnologijom zavarivanja, kao i sama veza rezervoara na mestu oslanjanja.

Na osnovu rezultata i analiza naponskog i deformacionog stanja, može se konstatovati da se naponi i deformacije nalaze u granicama dozvoljenih. Analizom stabilnosti je utvrđeno da oplata u datim režimima opterećenja ne može izgubiti stabilnost, zbog izuzetno visokih kritičnih napona.

Proračun pokazuje da odabrani materijal za izradu rezervoara i priključnih delova, TStE355, sa stanovišta analiziranih opterećenja ima zadovoljavajuće mehaničke karakteristike.

Naponi u elementima ploča su dosta ispod dozvoljenih napona, osim u zoni priključaka U,Y gde se veoma približavaju dozvoljenoj granici za predviđenu vrstu materijala, pa ukoliko se želi veća rezerva sigurnosti potrebno je izvršiti ojačavanje rezervoara u ovoj zoni.

Radi preciznije raspodele i koncentracije napona oko priključaka, oslonaca i uški potrebno je uraditi realniji model i na osnovu njega dati preciznija uputstva o eventualnom ojačavanju rezervoara na ovim mestima.

LITERATURA

- [1] Standardi i propisi vezani za proračun, izradu i eksploataciju posuda pod pritiskomž
- [2] Projekat "PRORAČUN ČVRSTOĆE NOSEĆE STRUKTURE REZERVOARA ZA TUD OD 21 m³ ", Institut GOŠA, Beograd, 2001.
- [3] Taško Maneski : KOMPJUTERSKO MODELIRANJE I PRORAČUN STRUKTURA, monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.