

*ejektor's surface sections.
The results are presented by graphs.*

Key words: vacuum; ejector; water; pressure; calculation; time

Ejektorske vakuumpumpe

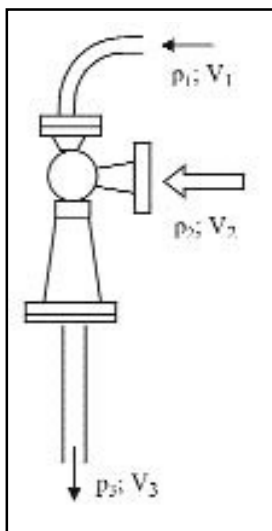
Kapacitet ejektorskih vakuumpumpi i visina vakuuma mogu se kretati u širokim granicama (protoci do nekoliko hiljada m³/h, a usisni apsolutni pritisak $p < 1$ mbar). Ejektorske vakuumpumpe za pogon koriste energiju pogonskog fluida. Pogonski fluid prolaskom kroz mlaznicu najveći deo svoje pritisne energije preobražava u kinetičku (brzinsku) energiju, tako da u usisnu komoru ejektora ulazi velikom brzinom (kod gasova i para i nadzvučnom). U usisnoj komori pogonski fluid dolazi u dodir sa usisanim fluidom, koji zahvata, meša se sa njim, povlači sa sobom i pri tome sabija na atmosferski pritisak.

Pumpe se koriste pri vakuumiranju sudova, uređaja, aparata i cevovoda, vakuumiranju komora i prostorija, za povećanje usisnih visina centrifugalnih pumpi, za pretakanje tečnosti i za obezbeđenje vakuuma u mnogim drugim operacijama.

Ejektorske hidrovakuumpumpe

Za pogon ovih pumpi upotrebljava se tečnost. Visina vakuuma kod ovih pumpi zavisi od temperature i pritiska pogonske tečnosti. Sa nižim temperaturama i višim pritiscima tečnosti postiže se viši vakuum i obratno. Najniži pritisak koji se može postići, u prostoru koji se vakuumira, jednak je pritisku temperature isparavanja pogonske tečnosti.

Pogonska tečnost može se koristiti u jednom prolazu (slika 1), ili u recirkulaciji (slika 2). Pri radu sa recirkulisanom tečnošću, usled kondenzacije usisanih isparenja, dolazi do zagrevanja pogonske tečnosti, pa je potrebno povremeno ili kontinualno dovoditi svežu tečnost ili u recirkulisanu tečnost, povremeno ubacivati led.



Slika 1. Ejektor – vakuumiranje u liniji

Uslovi pod kojima je izvršen proračun

Da bi se izvršio proračun kojim će se odrediti vreme potrebno za vakuumiranje rezervoara povezanog sa ejektorskom vakuumpumpom pogonjenom vodom, urađeno je sledeće. Sistem rezervoar–cevovo–ejektor (slika 3) raščlanjen je na tri segmenta i to tako da su sastavni delovi sistema razmatrani svaki posebno.

Rezervoar je posmatran kao adijabatski izolovana posuda (nema razmene toplote sa okolinom) u kojoj se nalazi suv vazduh na atmosferskom pritisku. S obzirom da se

vrši istakanje vazduha iz rezervoara promene veličine stanja vazduha u rezervoaru su izračunavane po politropskoj promeni. Eksponent politrope n je određen kao 80% od eksponenta izentrope za dvoatomni gas – vazduh. Termodinamičkim jednačinama za određivanje veličina stanja vazduha po politropskoj promeni određivana je temperatura vazduha u rezervoaru. Ostale potrebne veličine stanja vazduha u rezervoaru određivane su korišćenjem redukovane jednačine stanja idealnog gasa ($p \cdot v = Z \cdot m \cdot R \cdot T$).

S obzirom na moguću pojavu velikih brzina vazduha u cevovodu koji spaja ejektor sa rezervoarom, pad pritiska u istom cevovodu određen je korišćenjem jednačine za pad pritiska pri kompresibilnom strujanju.

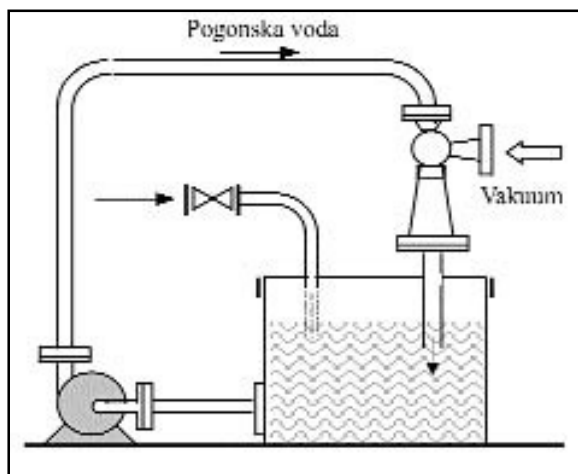
$$\dots \dots \dots (1)$$

Kako je režim rada ejektora promenljiv, jer se menjaju veličine stanja vazduha na usisu neposredno ispred ejektora onda će i ejektor u svakom trenutku vremena od početka njegovog rada do završetka procesa vakuumiranja raditi pod različitim uslovima. To znači da će ejektor u početku usisavati više vazduha iz rezervoara, a kako se smanjuju masa, pritisak i gustina vazduha u rezervoaru, usisavanje vazduha će biti sve manje i manje. Zapremina vazduha koju ejektor može da usisa zavisi i od samih dimenzija ejektora kao i zapreminskog protoka pogonske vode kroz ejektor. Kao faktor koji utiče na maseni protok usisanog vazduha mora se u obzir uzeti i zapreminski protok vodene pare koja nastaje isparavanjem pogonske vode u ejektoru (jednačina 2):

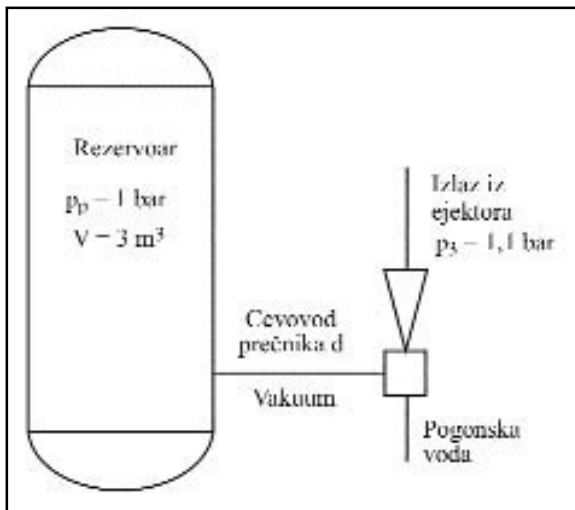
$$\dots \dots \dots (2)$$

Proračunska procedura

Proračun je izvršen tako što je postavljen uslov da je zapreminski protok vazduha kroz cev koja spaja rezervoar sa ejektorom jednak zapreminskom protoku protoku



Slika 2. Vakuumiranje u recirkulaciji



Slika 3. Rezervoar sa cevovodom i ejektorom

vazduha koji ejektor može da usisa u zadatim uslovima. Pri tome je korišćena jednakost brzina w_2 , što znači da brzina vazduha kroz cev mora biti jednaka brzini vazduha na ulazu u ejektor. Na taj način je postavljen sistem od dve nelinearne jednačine koji je rešavan po brzini w_2 . Kako je sistem rešavan korišćenjem računara, vremenski interval za koji je vršeno izračunavanje iznosilo je u svim posmatranim slučajevima $\Delta\tau = 0,1$ s. Za svaki vremenski interval izračunavane su veličine stanja preostalog vazduha u rezervoaru i radna tačka ejektora.

Proces izračunavanja počinje za izračunatu masu vazduha u rezervoaru M_p pre početka vakuumiranja. Izračunavanje je završeno onda kada je masa preostalog vazduha u rezervoaru M jednaka masi vazduha u rezervoaru za zadati vakuum M_k , a koja je izračunata pre početka procesa izračunavanja.

Prilikom izračunavanja postavljen je i uslov da brzina vazduha ne može biti veća od kritične brzine za zadate uslove.

Uslovi pod kojima su izvršeni proračuni

Proračun je izvršen za sledeće uslove.

Rezervoar

Radna materija u rezervoaru – vazduh.

Rezervoar adijabatski izolovan.

Zapremina rezervoara $V = 3 \text{ m}^3$.

Pritisak u rezervoaru pre početka vakuumiranja $p_p = 1$ bar.

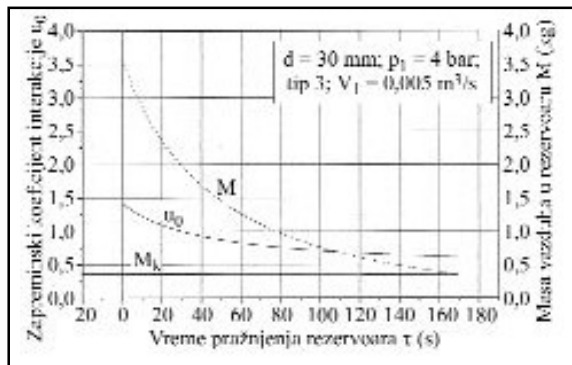
Pritisak u rezervoaru posle završetka procesa vakuumiranja $p_k = 0,1$ bar.

Temperatura vazduha u sudu $t = 20^\circ\text{C}$.

Cev koja povezuje rezervoar i ejektor

Proračuni su izvršeni tako da je menjan prečnik cevi i to $d = \{10 \ 20 \ 30\}$ mm.

Koeficijent lokalnih otpora $\xi = 1$, koeficijent trenja u cevi $\lambda = 0,02$.



Slika 4. Promena koeficijenta injekcije ejektora i mase vazduha u sudu u funkciji vremena

Ejektor

Temperatura pogonske vode $t_l = 15^\circ\text{C}$.

Protok pogonske vode $V_1 = \{0,005 \ 0,01 \ 0,02 \ 0,03\} \text{ m}^3/\text{s}$.

Pritisak pogonske vode $p_1 = \{3 \ 4 \ 5 \ 6\}$ bar.

Odnos površina karakterističnih preseka ejektora $f_{r1}/f_3 = \{0,255 \ 0,25 \ 0,275\}$ (Na dijagramima pod tip 1 predstavljen je ejektor gde je $f_{r1}/f_3 = 0,255$; tip 2 $f_{r1}/f_3 = 0,25$ i tip 3 $f_{r1}/f_3 = 0,275$).

Izlazni pritisak iz ejektora $p_3 = 1,1$ bar.

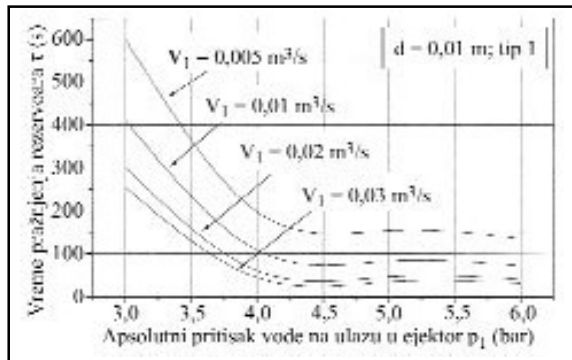
Kombinujući navedene parametre dobijena su 144 različita slučaja.

Rezultati proračuna

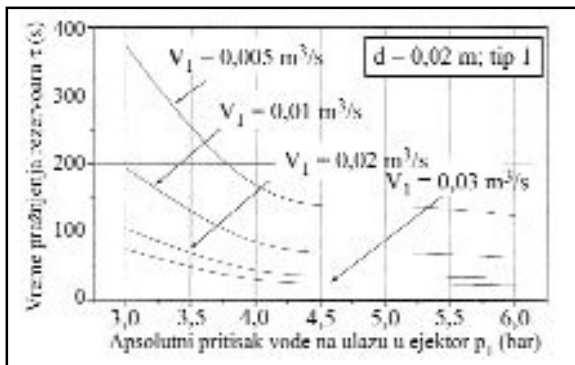
Izračunavanjima izvršenim za sve slučajeve dobijeni su podaci koji su zatim sistematizovani i predstavljeni na sledećim dijagramima.

Na dijagramu na slici 4 predstavljena je promena koeficijenta injekcije ejektora u funkciji od vremena. Koeficijent injekcije predstavlja zapreminski odnos usisanog vazduha prema zapreminskom protoku vode i promenu mase vazduha u rezervoaru u funkciji od vremena.

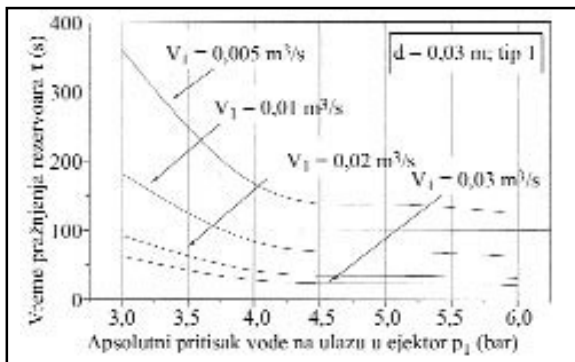
Dijagramom na slici 5 prikazana je promena vremena vakuumiranja u zavisnosti od pritiska pogonske vode i njenog protoka za jedan određeni prečnik dovodne cevi i jedan tip ejektora. Isto je prikazano na dijagramima na slikama 6 i 7.



Slika 5



Slika 6



Slika 7

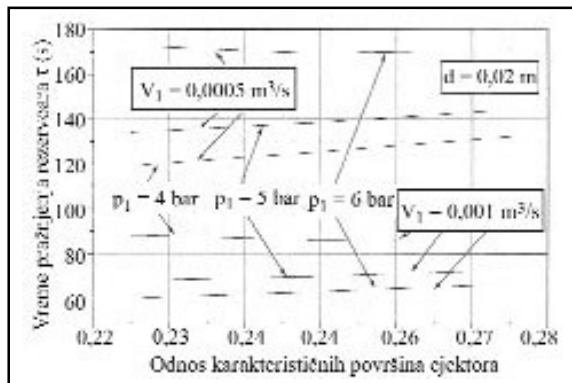
Na dijagramu na slici 8 predstavljena je promena vremena vakuumiranja u zavisnosti od odnosa površina karakterističnih prečnika ejektora za jedan prečnik cevovoda za povezivanje ejektora i rezervoara, a različite radne pritiske i protoke pogonske vode.

Analiza rezultata i zaključak

Analizom urađenom prema dijagramima na slikama 5, 6 i 7 kao i dijagramima i rezultatima proračuna koji nisu predstavljeni u ovom radu, može se zaključiti sledeće:

- 1) vreme potrebno za vakuumiranje se smanjuje sa povećanjem protoka pogonske vode;
- 2) za veće vrednosti protoka pogonske vode razlika u vremenu potrebnom za vakuumiranje je sve manja, npr. za ejektor tipa 2, $d = 0,02$ m i $p_1 = 4$ bar;
- 3) veće vrednosti pritiska pogonske vode daju kraće vreme vakuumiranja, pri čemu se za slučajeve prikazane na dijagramima (ejektor tipa 1) može uočiti da se za pritiske radne vode preko cca 4,25 bar vreme vakuumiranja neznatno smanjuje;
- 4) vreme vakuumiranja se značajno prudažava smanjivanjem prečnika dovodne cevi.

Analizom prema dijagramu na slici 8 uočava se da se vreme pražnjenja rezervoara produžava sa povećanjem odnosa površina karakterističnih dimenzija ejektora, pri čemu se može zaključiti da je ta promena relativno mala. Navedeno važi za jednu vrednost protoka i pritiska pogonske vode. Na osnovu toga, zaključuje se da se za vakuumiranje prostora određene zapremine može primeniti više različitih tipova ejektora, a da se pri tome značajno ne poremeti vreme za koje će se izvršiti vakuumiranje. Podra-



Slika 8

Protok pogonske vode V_1 (m^3/s)	Ukupno vreme potrebno za vakuumiranje τ (s)	Razlika u vremenu $\Delta\tau$ (s)
0,005	169,2	-
0,01	85,9	83,3
0,02	44,3	41,6
0,03	30,5	13,8

zumeva se da se ne smeju preći odnosi koji važe za proračun i dimenzionisanje ejektorskih hidrovakuum-pumpi.

S obzirom da se postupak vakuumiranja često obavlja u uslovima koji podrazumevaju izvlačenje isparenja koja se konstantno stvaraju u prostorima koji se vakuumiraju, ili dolazi do „rušenja” vakuuma usled loše zaptivenosti vakuumskih instalacija, sledi da je u tehničkoj praksi često potrebno isti tip ejektora primenjivati u dve faze. Prva faza podrazumeva vakuumiranje na zadatu vrednost pritiska, a druga faza je održavanje vakuuma u vakuumskoj instalaciji. Druga faza podrazumeva izvlačenje mnogo manjih masa.

Količina vazduha koja iz spoljne sredine prodire u vakuumski prostor (vakuumsku instalaciju), zavisi od: veličine, vrste materijala i načina izrade suda (zavarena konstrukcija ili razdvojiva veza), broja spojnih mesta (prirubnice, slavine, ventili, nivokazna stakla i dr). Za normalne spojne veze sa prirubicama većeg prečnika uzima se 200–400 g/h prodora vazduha. Za specijalne prirubnice sa precizno obrađenim površinama gornje vrednosti se mogu umanjiti za 50–100 g/h. Za vakuumske uređaje kroz koje prolaze vratila ili osovine, može se uzeti da pri normalnoj zaptivosti prodor vazduha iz spoljne sredine u vakuumski prostor iznosi 1–2 kg/h.

U vakuumskim instalacijama u kojima je apsolutni pritisak manji od 528 mbar i pri temperaturi od 20°C, količina vazduha koja uđe u vakuumski prostor, iz spoljne sredine, kroz otvor od 1 mm², iznosi 0,85 kg/h.

Isti ejektor se u velikom broju slučajeva može koristiti i za rad u drugoj fazi, pri čemu se protok pogonske vode smanjuje, a time i njena potrošnja.

Oznake

- ϕ_1, ϕ_3, K_1 – koeficijenti lokalnih otpora u ejektoru
- f_{r1}/f_3 – odnos površina karakterističnih preseka ejektora mlaznica – komora za mešanje
- $u_o = V_2/V_1$ – zapreminski koeficijent injekcije ejektora
- Z – faktor kompresibilnosti

$Z_m = (Z + Z_2) / 2$ – srednja vrednost faktora kompresibilnosti;

$A = (d^2 \pi) / 4$ – površina preseka cevi koja spaja ejektor i rezervoar

d – prečnik cevi koja spaja ejektor i rezervoar

M – masa vazduha u rezervoaru

n – eksponent politrope

v – zapreminski protok.

Indeksi

bez indeksa – veličine koje se odnose na trenutno stanje vazduha u rezervoaru

1, 2, 3 – veličine koje se odnose na ejektor prema slici 1

p – početno stanje u rezervoaru

k – krajnje stanje u rezervoaru

Literatura

- [1] **Baženov, M. I.**, *Isledovanje raboti dvuhfaznih strui-nih apparatov*, Elektr. stanci, Moskva, 1967.
- [2] **Berman, L. D., G. I. Efimočki**, *Rasčetnie zavisimosti dlja vodostruinih ežektorov*, Teploenergetika, Moskva, 1964.
- [3] **Skobeljci, J. A., A. N. Gnedkovski, V. V. Žagulin**, *Isledovanie raboti ežektora hloratora Loni – 100*, vodosnabženie i san. tehnika, Moskva, 1975.
- [4] *** Projektantski katalozi, Ejektinženjering, Beograd, 2001.
- [5] **Hewitt, G. F.**, *Handbook of Heat Exchanger Design*, Begell House Inc., New York, Wallingford (U.K.), 1992.

TEHNOLOGIJA RAPID PROTOTYPING (RP) U FUNKCIJI IZRADE PROTOTIPOVA I TRANSPARENTNIH MODELA ZA VIZUELNU ANALIZU PROTOKA FLUIDA

**Aleksandar Rajić, dipl. inž. met.,
Viša tehnička škola, Zrenjanin,
dr Slobodan Stojadinović, dipl. inž. met.,
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin**

U radu su prikazani najvažniji procesi rapid prototyping (RP) kao specifičnih aspekata tehnologija CAD/CAM. Procesi RP omogućavaju izradu fizičkog prototipa i modela na osnovu trodimenzionalnog CAD zapisa. Primenom tehnologije RP moguće je, u vrlo kratkom roku, formirati prototip proizvoda u razvoju ili transparentni model, od specifičnih fotopolimernih materijala.

Ovakav model se kasnije može iskoristiti za funkcionalnu verifikaciju i analizu protoka fluida u procesnoj industriji. U radu su prikupljeni i analizirani podaci o materijalima, opremi i softveru koji se koriste u najvažnijim RP procesima, kojima se mogu formirati transparentni modeli.

U radu je dokazano da su RP tehnologije superiornije u odnosu na konvencionalne tehnologije, u postupku analize protoka, sa ekonomskog i tehničkog aspekta.

Ključne reči: rapid prototyping; stereolitografija; transparentni model; analiza protoka

THE APPLICATION OF RAPID PROTOTYPING (RP) TECHNOLOGY IN PRODUCTION OF PROTOTYPES AND TRANSPARENT MODELS FOR FLUIDS FLOW VISUALIZATION ANALYSIS

This work described the most significant rapid prototyping processes as a specific aspect of CAD/CAM technologies. RP process enables the development of the physical prototypes and models, based on three-dimensional CAD data. RP technology allows, in a very short time, the creation of a prototype of a design and a transparent model from a specific photosensitive polymer. Such a model can be used in functional verification and flow visualization test in process industry. The paper presents and analyzes RP materials, equipment and software which can create transparent models. The paper proves that RP technologies are superior to the conventional technologies in flow analysis methods, both from the economic and technical standpoint.

Key words: rapid prototyping; stereolitography; transparent model; flow analysis

1. Uvod

S obzirom na njihovu fizičku suštinu, svi procesi obrade se mogu podeliti u tri grupe:

- procese, koji se karakterišu skidanjem materijala (suptraktivni);
- procese, koji se karakterišu očvršćavanjem materijala (kompresivni);
- procese, koji se karakterišu dodavanjem materijala (aditivni).

U suptraktivnim procesima, materijal se skida da bi se dobio željeni oblik. Većina konvencionalnih procesa spada u suptraktivne. Ovakav postupak obrade je teško primeniti kod delova sa veoma malim unutrašnjim šupljinama i delova veoma složene geometrije. U kompresivnim procesima, polučvrst ili tečni materijal se pod pritiskom dovodi u željeni oblik, nakon čega očvršćava. Predstavnik kompresivnih procesa je livenje. Aditivni proces pod-