Prof. dr Jovan Mandić,
dipl. inž.
Mr Dragan Knežević,
potpukovnik, dipl. inž.

Analitičko definisanje elastičnohidrauličnog simulatora impulsa pritiska reflektovanog udarnog talasa

Uvod

Zbog funkcionalnih veza između spoljnjeg sveta i unutrašnjosti objekta, na zaštitnim objektima postoje otvori za kretanje, dovod i odvod vazduha. U te otvore ugrađuju se specijalne konstrukcije, kao što su pregrade vrata i protivudarni ventili. Kvalitet zaštite objekta direktno je zavisian od kvaliteta zaštite tih otvora. U smislu nalaženja optimalnih rešenja tih konstrukcija i provere otpornosti pre ugradnje u zaštitni objekat, potrebno je izvršiti provere ispitivanja tih konstrukcija na opterećenja koja se neznatno razlikuju od dejstva vazdušnog udarnog talasa (VUT-a) nuklearne eksplozije. Jedino eksperimentom potvrđena teorijska razmatranja mogu dati pouzdana tehnička rešenja konstrukcija otpornih na VUT. Za te svrhe, u praksi se koriste posebni uređaji u kojima je moguće ostvariti opterećenja koja su identična (ili približna) dejstvu VUT-a nuklearne eksplozije u vazdušnom prostoru. U radu je data nova koncepcija ostvarivanja reflektovanog pritiska udarnog talasa, koja se bitno razlikuje od do sada poznatih i realizovanih uređaja (udarnih cevi). Uređaj je nazvan elastičnohidraulični simulator reflektovanog pritiska udarnog talasa. Suština koncepcije sastoji se u tome što se potencijalna energija vazduha pod visokim pritiskom pre-

tvara u kinetičku energiju, a ova se ispoljava impulsom udarnog talasa na konstrukciju koja se ispituje.

Koncepcija simulatora

Shematski prikaz simulatora dat je na slici 1. Simulator se sastoji od dve komore, radne (1) i pogonske (2), koje su razdvojene membranom (3). U po-

Sl. 1 Shematski prikaz elastičnohidrauličnog simulatora impulsa pritiska udarnog talasa: 1 — radna komora; 2 — pogonska komora; 3 — membrana; 4 — ventil; 5 — manometar; 6 — ventil; 7 — ventil; 8 — konstrukcija koja se ispituje.

gonskoj komori nalazi se komprimirani vazduh, pod pritiskom Δp_m . U radnoj komori nalazi se voda pod atmosferskim pritiskom. Membrana simulatora

je proračunata tako da se raskida pod odgovarajućim pritiskom komprimiranog vazduha. Na pogonskoj komori ugrađen je ventil (4) za dovod vazduha pod visokim pritiskom u komoru. Komora je snabdevena manometrom (5) za kontrolu radnog pritiska vazduha. Ispod membrane simulatora predviđen je slobodan prostor (određene visine), koji omogućava raskidanje membrane bez otpora tečnosti. Slobodan prostor između pogonske i radne komore ventilom (6) vezan je za spoljnu atmosferu.

Na bočnoj strani radne komore (1) postavlja se konstrukcija (8) koja se želi ispitivati na dejstvo impulsa udarnog talasa. Na radnu komoru ugrađen je ventil (7) radi punjenja komore vodom. Ventil (6) ujedno služi za regulaciju trajanja impulsa udarnog talasa ostvarenog u simulatoru.

Princip rada simulatora

Pogonska komora (2) u stanju pripreme ispunjena je vazduhom pritiska Δp_m . Veličina pritiska Δp_k funkcija je reflektovanog pritiska Δp_m koji se želi ostvariti, trajanja i drugih uticajnih faktora, koji će se analitički definisati. Proces u simulatoru se aktivira raskidanjem membrane pri pritisku Δp_k u pogonskoj komori. Potencijalna energija vazduha u pogonskoj komori, nakon rasprskavanja membrane posredse u kinetičku, a ova se ispoljava impulsvom vode u radnoj komori, pretvara som udarnog talasa na zidove komore, a time i na konstrukciju (8). U kratkom intervalu (t_1) u celokupnom sistemu uspostaviće se pritisak izjednačenja Δp_m . Taj proces, definisan pritiskom Δp_m vremenom t_1 predstavlja fazu I (sl. 2). Pritisak Δp_m faktički znači reflektovani pritisak Δp_r ($\Delta p_m = \Delta p_r$).

Ventilom (6) reguliše se odvod komprimiranog vazduha, odnosno tok promene pritiska od vrednosti Δp_m do atmosferskog.

Ovim je opisana i faza II procesa, koju karakteriše promena pritiska $p = p_m f(t)$ i trajanje t_k (vidi sl. 2).

Sl. 2 Tok promene reflektovanog pritiska ostvaren u elastičnohidrauličnom simulatoru udarnog talasa

Vreme t_k faze II zavisi od prečnika otvora ventila (6) i nivoa radnog pritiska. U daljem delu rada izložiće se, u teorijskim okvirima, proces ostvarivanja udarnog talasa.

Teorijski opis procesa u simulatoru

U ovom poglavlju analitički će se definisati proces dobijanja impulsa udarnog talasa u simulatoru.

Promena zapremine elastičnog simulatora

Posle raskidanja membrane u kratkom intervalu t_1 u simulatoru se uspostavlja pritisak izjednačenja Δp_m . Usled dejstva pritiska Δp_m u simulatoru će se pojaviti elastične deformacije, koje se manifestuju promenom zapremine svih elemenata sistema. Ukupna promena zapremine simulatora iznosi

$$\Delta V = \Delta V_t + \Delta V_s + \Delta V_p, \quad (1)$$

pri čemu je promena zapremine tečnosti

$$\Delta V_t = -V_t \frac{\Delta p_m}{E_t}, \quad (2)$$

promena zapremine komore

$$\Delta V_s = K_s V_s \frac{\Delta p_m}{E_s} \approx K_s V_t \frac{\Delta p_m}{E_s}, \quad (3)$$

promena zapremine predmeta (konstrukcije) koji se ispituje

$$\Delta V_p = K_p V_t \frac{\Delta p_m}{E_s} \quad (4)$$

U opštem, promena zapremine sistema može da se napiše u obliku

$$\Delta V = V_t \frac{\Delta p_m}{E}, \quad (5)$$

pri čemu je:

$$E = E_t \frac{1}{1 + K_s \frac{E_t}{E_s} + K_p \frac{E_t}{E_s}} \quad (6)$$

Iz jednačine (5) modul elastičnosti E sistema je:

$$E = \Delta p_m \frac{V_t}{\Delta V} \quad (7)$$

Usled dejstva pritiska Δp_m sistem će pretrpeti elastičnu deformaciju, koja se izražava promenom zapremine ΔV i ravna je zapremini vode koja se ispušti iz simulatora u procesu dejstva pritiska Δp_m . Prema [1] pritisak Δp_m definisan je sa:

$$\Delta p_m = \sqrt{\frac{\omega_0 V \rho \varepsilon}{1 + \frac{\varepsilon D}{E \delta}}} \quad (8)$$

Potrebno je analitički definisati pritisak Δp_m zavisno od pritiska u pogonskoj komori.

Analitičko definisanje pritiska izjednačenja Δp_m u simulatoru

Stanje komprimiranog vazduha u pogonskoj komori pri pritisku Δp_k definisano je jednačinom gasnog stanja:

$$\Delta p_k V_k = mRT \quad (9)$$

Nakon raskidanja membrane masa komprimiranog vazduha zauzeće zapreminu $V_m = V_k + \Delta V$. U novonastalom stanju delovaće pritisak Δp_m ($\Delta p_m < \Delta p_k$). Za to stanje važi jednačina:

$$p_m (V_k + \Delta V) = mRT \quad (10)$$

Pod pretpostavkom da se promena stanja ostvaruje pri konstantnoj temperaturi $T = \text{const}$ iz (9) i (10) dobija se veza pritiska Δp_m i Δp_k u obliku:

$$\Delta p_m = \Delta p_k \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta V}{V_k}} \quad (11)$$

Brzina širenja komprimiranog vazduha u trenutku raskidanja membrane

Za određivanje vremena t_1 koje protekne do uspostavljanja pritiska izjednačenja Δp_m u simulatoru potrebno je odrediti brzinu širenja komprimiranog vazduha. Ona je određena prema [2] i [3] za adijabarsku promenu izrazom:

$$\omega = \gamma \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \cdot \sqrt{RT} = 18,33 \gamma \sqrt{T} \quad (12)$$

Potrebno je napomenuti da je proces raskidanja membrane i isticanja vazduha iz radne komore u fazi kratkotrajne ekspanzije vazduha stanja Δp_k , V_k na stanje Δp_m , V_m , vrlo složen i zahteva posebna teorijska i eksperimentalna istraživanja.

Prema tome, izraza (12) znači stvarnu brzinu isticanja vazduha do trenutka pre kontakta sa vodom.

Analitički izraz vremena tj. uspostavljanja pritiska izjednačenja

Jednačinom (12) definisana je početna brzina isticanja komprimiranog vazduha iz pogonske u radnu komoru

Sl. 3 Promena brzine površinskog sloja tečnosti u intervalu t_1

u trenutku raskidanja membrane. Pretpostavićemo da se istom početnom brzinom ω_0 pokrene i površinski sloj tečnosti. Zbog otpora sredine brzina ω će u kratkom vremenu t_1 pasti na nulu. Ako pretpostavimo da je pad brzine linearan u intervalu $t = 0$ do $t = t_1$, dobija se zakon promene brzine oblika:

$$\omega = \frac{\omega_0}{t_1}(t_1 - t). \quad (13)$$

Promena zapremine elastičnog sistema zavisna je od brzine W i vremena t . Promena zapremine ΔV može da se napiše u obliku:

$$\Delta V = A_k \int_0^{t_1} \omega dt. \quad (14)$$

Nakon uvođenja jednačine (13) u (14) i integriranja dobijamo:

$$\Delta V = \frac{A_k \omega_0 t_1}{2}. \quad (15)$$

Iz jednačine (15) dobijamo analitički izraz vremena t_1 :

$$t_1 = \frac{2\Delta V}{A_k \omega_0}. \quad (16)$$

Ako u jednačinu (16) uvedemo izraz (5) za ΔV , nakon njenog sređivanja dobijamo:

$$t_1 = 2 \frac{V_t}{A_k \omega_0 E} \Delta p_m. \quad (17)$$

Sl. 4 Promena zapremine elastičnog sistema simulatora

Analitičko definisanje trajanja t_1 udarnog impulsa pritiska

Da bi se u predloženoj koncepciji simulatora ostvario tok promene pritiska (koji bi bio jednak trajanja pozitivne faze VUT-a), potrebno je u simulatoru realizovati proces kontinuelnog opadanja pritiska od vrednosti Δp_m na atmosferski (vidi sl. 5). Kontinualan pad pritiska u simulatoru postiže se tako što se na simulatoru ugradi ventil sa regulišućim otvorom (sl. 1, pozicija 6), kroz koji se vrši oticanje komprimiranog vazduha u spoljnu atmosferu nakon uspostavljanja pritiska izjednačenja Δp_m .

Sl. 5 Shematski prikaz promene pritiska u elastičnohidrauličnom simulatoru

Trajanje impulsa pritiska udarnog talasa iznosi

$$\tau = t_1 + t_{kr} + t_{dkr}, \quad (18)$$

i trebalo bi da odgovara trajanju pozitivne faze VUT-a pri natpritisaku $\Delta p_m = \Delta p_r$. Da bi se definisalo trajanje τ impulsa udarnog talasa potrebno je uspostaviti analitičku vezu između parametara: τ , V_m , p_m , f i $t_k = t_{kr} + t_{dkr}$. To je u teorijskim okvirima izloženo u [2]. Kao što se vidi, ceo proces isticanja vazduha odvija se u dva režima (dve faze). Vreme t_{kr} isticanja vazduha u natkritičnoj oblasti, tj. vreme za koje pritisak Δp_m opadne na p_{kr} kritičnu vrednost, definisano je jednačinom (prema [2]):

$$t_{kr} = \frac{2,55 V_k}{1000 \mu f}. \quad (19)$$

Drugi režim isticanja definisan je vremenom t_{dkr} u dokritičnoj oblasti, tj. vreme za koje pritisak opadne od p_{kr} na pritisak okoline (1 bar). To vreme definisano je izrazom:

$$t_{dkr} = \frac{3,6 V_m}{1000 \mu f} \cdot \left(\frac{p_{kr}}{p_o} \right)^{0,10} \quad (20)$$

Izrazima (17), (18), (19) i (20) definisano je trajanje impulsa pritiska udarnog talasa.

U navedenim izrazima oznake znače:

- τ — trajanje impulsa pritiska udarnog talasa [s],
- V_m — zapremina pogonske komore nakon uspostavljanja pritiska izjednačenja [m^3],
- p_{kr} — kritični pritisak izjednačenja [bar],
- p_o — atmosferski pritisak [bar],
- f — površina preseka otvora odušnog ventila [m^2],
- μ — koeficijent otpora isticanja vazduha.

Definisanje brzine prenošenja hidrauličnog impulsa udarnog talasa

Veliki značaj kod ovog sistema ima brzina prenošenja hitrauličnog impulsa udarnog talasa, od koga zavisi vreme t_i

uspostavljanja reflektovanog pritiska. Od interesa je da vreme t_i bude što kraće. Brzina rasprostiranja impulsa udarnog talasa u tečnosti određuje se iz poznate jednačine N. E. Žukovskog, [4]:

$$C = \frac{1}{\left[\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D_s}{\delta E_s} \right) \right]^{0,5}} = \left(\frac{\varepsilon}{\rho} \right)^{0,5} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{D_s \varepsilon}{\delta E_s} \right)^{0,5}} \quad [m/s]. \quad (21)$$

Promena toka pritiska u simulatoru

Promena pritiska reflektovanog VUT-a prema [5], definisan je jednačinama:

$$p = p_r \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^n \quad (22)$$

$$n = 1,9 (p_f)^{0,5} \quad (23)$$

$$p = 2p_f + \frac{6p_f^2}{p_f + 7,2} [\text{bar}]. \quad (24)$$

Za svaku vrednost eksponenta n određen je tok promene pritiska (sl. 6-a). Kod elastičnohidrauličnog simulatora tok promene pritiska prema [6] ima oblik (što je lako dokazati)

$$\Delta p = \Delta p_m \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^2 \quad (25)$$

dakle sa eksponentom $n = 2$ (sl. 6-b).

Sl. 6 Tok promene reflektovanog pritiska:

a — vazdušnog udarnog talasa b — u elastičnohidrauličnom simulatoru.

Imajući u vidu analitički izraz promene pritiska u vremenu kod iznete koncepcije simulatora, nameće se zaključak da impuls pritiska simulatora obuhvata sve impulse reflektovanih pritiska VUT-a i to za područja za koja je $n \geq 2$. To je od praktičnog značaja pri ispitivanju otpornosti konstrukcija i ide u prilog sigurnosti dobijenih podataka. Ovu konstataciju lako je i dokazati.

Impuls pritiska VUT-a računa se prema obrascu:

$$I_r = \frac{\Delta p_r \cdot \tau_t}{n+1} \quad (26)$$

Impuls pritiska u simulatoru računa se prema obrascu:

$$I_s = I_I + I_{II} = I_{II} \left(-\frac{I_I}{I_{II}} + 1 \right) = \alpha \cdot I_{II} \quad (27)$$

Za $\alpha \sim 1$ impuls pritiska simulatora može se izraziti u obliku:

$$I_s \sim \int_0^{t_k} \Delta p \, dt \quad (28)$$

Nakon uvođenja izraza (25) u (28) i integriranja, dobijamo:

$$I_s = \Delta p_m \cdot \int_0^{t_k} \left(1 - \frac{t}{t_k} \right)^2 dt = \frac{\Delta p_m \cdot t_k}{3} \quad (29)$$

Ako potražimo odnos I_s/I_r , dobijamo

$$\frac{I_s}{I_r} = \frac{n+1}{3} \quad (30)$$

odakle sledi zaključak: $I_s/I_r > 1$, odnosno $I_s > I_r$, da impuls pritiska dobijen u elastičnohidrauličnom simulatoru obuhvata sve impulse pritiska reflektovanog VUT-a kod kojih je tok promene pritiska definisan sa $n \geq 2$. Iz iznetog obrazloženja sledi zaključak: da se u predloženoj koncepciji elastičnohidrauličnog simulatora može ostvariti u praktičnim okvirima impuls pritiska približan impulsu pritiska VUT-a nuklearne eksplozije u vazдушnom prostoru.

Potrebno je naglasiti da bi izvesne pretpostavke date u pojedinim procesima trebalo eksperimentalnim istraživanjima proveriti, odnosno preciznije definisati. Ovaj rad je teorijska podloga za dalji rad na toj problematici.

Zaključak

U radu je data nova koncepcija elastičnohidrauličnog simulatora za ostvarivanje parametara reflektovanog udarnog talasa adekvatnog reflektovanom vazдушnom udarnom talasu nuklearne eksplozije u vazдушnom prostoru. Analitički je definisan proces ostvarivanja reflektovanog pritiska udarnog talasa u funkciji radnih i geometrijskih parametara elastičnohidrauličnog simulatora. Izvesne pretpostavke, date u opisima pojedinih procesa, trebalo bi eksperimentalnim istraživanjima proveriti. Rad je teorijska podloga za dalji rad na toj problematici.

Korišćenje oznake u radu

U radu su korišćene oznake:

E_t	— modul stišljivosti tečnosti (vode),
E_s	— modul elastičnosti materijala od koga je izrađena komora simulatora,
K_s i K_p	— koeficijenti zavisni od oblika i dimenzija komora i predmeta koji se ispituje. (Određuju se eksperimentalno.)
ω_0	— početna brzina sloja tečnosti, odnosno brzina isticanja vazduha iz radne komore,
ρ	— zapreminska masa vode [kg/m ³]
ϵ	— modul stišljivosti tečnosti (vode) [N/m ²],
D_s	— unutrašnji prečnik cevi simulatora [m],
δ	— debljina zida (cevi) simulatora [m],

m	— masa komprimirang vazduha u pogonskoj komori,	γ	— koeficijent otpora isticanja vazduha iz pogonske komore,
R	— gasna konstanta za vazduh,	A_k	— površina preseka pogonske komore,
T	— apsolutna temperatura vazduha u pogonskoj komori,	P_r	— reflektovani pritisak VUT-a,
W	— brzina isticanja vazduha iz pogonske komore u posmatranom (proizvoljnom) trenutku t,	n	— koeficijent promene toka pritiska VUT-a,
		p_f	— pritisak u frontu VUT-a.

Literatura:

- [1] Voronjec K.: »Dopuna kursa mehanike fluida«, Mašinski fakultet, Beograd, 1973.
- [2] Mandić, J.: »Ostvarivanje udarnog kratkotrajnog impulsa pritiska u udarnim cevima izjednačavajućeg pritiska«, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1976.
- [3] Loicjanski, L. G.: »Mehanika žiljkosti i gasa«, Nauka, Moskva, 1971.
- [4] Bašta, M. T.: »Mašinska hidraulika«, prevod sa ruskog, Naučna knjiga, Beograd, 1972.
- [5] Korenov, G. B., Rabinovič M. I.: »Dinamički proračun objekata na specijalna dejstva«, Moskva, 1981.
- [6] Mandić, J.: »Prilog proučavanju mogućnosti smanjenja hidrauličnog udara u sudovima«, Zbornik radova Mašinskog fakulteta, Novi Sad, 1972.