Dr Dragan M. Knežević,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

METOD ANALITIČKOG DEFINISANJA REPREZENTATIVNIH VENTILA MEHANIČKIH SISTEMA ZA ZAŠTITU OD PRODORA UDARNOG TALASA U UNUTRAŠNJOST OBJEKTA

UDC: 621.646.5:623.459.72

Rezime:

Na originalan način analitički su definisani modeli procesa za tipične – karakteristične protivudarne ventile sa aksijalno pomičnim pokretnim sklopom za zaštitu od prodora vazdušnoumernog talasa u unutrašnjost objekta. Modeli ventila definisani su u zavisnosti od otpornosti ventila na dejstvo impulsa pritiska vazdušnoumernog talasa nuklearne eksplozije, geometrijskih karakteristika, karakteristika elastičnih elemenata i aerodinamičkih karakteristika sličnih ventila željenih nazivnih prečnika. Posebno je obrađen dinamički kriterijum za ocenu valjanosti ventila, izražen vremenom zatvaranja ventila nazivnih prečnika 100–200 mm, otpornosti do 900 kPa. Detaljno je izložen metod analitičkog definisanja koeficijenta otpora ventila i sproveden eksperimentalni postupak. Na osnovu dobijenih podataka, regresionom analizom, metodom najmanjih kvadrata, definisan je opšti analitički izraz koeficijenta otpora sličnih ventila koristeći pri tome metode matematičke statistike. Izvršen je izbor optimalnih i po otpornosti univerzalnih rešenja konstrukcija ventila.

Ključne reči: nuklearna eksplozija, vazdušnoumerni talas, zaštita, ventili, matematičko modeliranje, planiranje eksperimenta, metode matematičke statistike, aerodinamičke, dinamičke karakteristike, optimalna rešenja.

THE METHOD OF ANALYTICAL DEFINITION OF REPRESENTATIVE VALVES OF MECHANICAL SYSTEMS FOR PROTECTION FROM BLAST WAVES PENETRATION INSIDE THE BUILDING

Summary:

By original analytical way the paper defines models of process for typical anti-shock valves with axle moving texture for protection from penetration inside the building. Valve models are defined depending on valves resistance to pressure impulse of air-blast wave of nuclear explosion, geometrical characteristics, characteristics of elastic elements and aerodynamics characteristics of simular valves with desired nominal diameters. Dynamic criterion for estimation of valves, expressed by closing time of valves with diameters 100–200 mm, with resistance up to 900 kPa is given in particular. The paper also estabilishes the method of analytical definition of valve resistance coefficient and the experimental procedure is carried out. Using the obtained data, methods of mathematical statistics, regression analysis and the least square method, analytical expression of resistance coefficient of simular valves is defined. The selection of optimal solutions of valves construction, is done and criteria established for valve quality estimation.

Key words: nuclear explosion, air-blast wave, shelter valves, mathematical modelling, experimental planing, mathematical statistics methods, aerodynamics, dynamics characteristics, optimal solution.

Uvod

Zbog funkcionalnih veza između okoline i unutrašnjosti objekta, na objektima specijalne namene postoje otvori za kretanje, prolaz ljudi, dovod svežeg vazduha i sveže vode kao i odvod vazduha i otpadne vode. U ventilacione otvore (za dovod svežeg i odvod korišćenog vazduha) objekata specijalne namene ugrađuju se razne konstrukcije ventila i sistema ventila, koji predstavljaju i najosetljivije tačke takvih objekata. Kvalitet zaštite direktno zavisi od kvaliteta zaštite raznih otvora objekata specijalne namene.

Izbor sistema ventila mehaničkih sistema za zaštitu od prodora vazdušnog talasa (VUT-a) nuklearne i klasične eksplozije u unutrašnjost objekta, koji se ugrađuju u ventilacione otvore objekata, svodi se na dva reprezentativna tipa ventila:

- protivudarni ventili sa akcijalno pomičnim pokretnim sklopom,
- kombinovani protivudarni ventili sa membranom za regulaciju natpritiska.

Na najvećem broju objekata preovlađuju ventili i sistemi ventila koji se zatvaraju pod neposrednim dejstvom direktnog vazdušnog talasa.

Cilj istraživanja, obuhvaćenog ovim radom, jeste analitičko definisanje reprezentativnih ventila mehaničkih sistema za zaštitu od prodora VUT-a nuklearne i klasične eksplozije u unutrašnjost objekta. Cilj rada je da se izvedu analitički izrazi, kojima su definisana vremena zatvaranja ventila u zavisnosti od otpornosti, geometrijskih karakteristika i karakteristika elastičnih elemenata sličnih ventila, kao i analitički izrazi koeficijenata otpora ventila, odnosno otpora strujanju vazduha kroz ventile u funkciji njihovog prečnika i protoka vazduha. Zatim, na

osnovu analize teorijski i teorijski-eksperimentalno izvedenih izraza kojima su definisani ventili, uslova da su vremena zatvaranja ventila 2 ms za otpornost 900 kPa, izvršen je izbor optimalnih i univerzalnih rešenja ventila nazivnih prečnika 100; 150 i 200 mm, otpornosti 300; 600 i 900 kPa. Da bi se dostigao postavljeni cilj, potrebna je kompleksna analiza, koja obuhvata:

- definisanje analitičkih izraza vremena zatvaranja protivudarnih ventila i kombinovanih protivudarnih ventila sa membranom za regulaciju natpritiska i zaštitu od prodora VUT-a nastalog pri nuklearnoj i klasičnoj eksploziji u unutrašnjost objekta;
- definisanje analitičkih izraza koeficijenata otpora i otpora ventila u zavisnosti od protoka vazduha kroz ventile i prečnika ventila;
- uporednu analizu teorijskih i eksperimentalnih rezultata vremena zatvaranja protivudarnih ventila usled dejstva vazdušnog talasa.

Metod analitičkog definisanja protivudarnih ventila za zaštitu od prodora impulsa pritiska vazdušnog talasa nuklearne eksplozije u unutrašnjost objekta

Rad obuhvata jedan od mogućih pristupa analitičkog definisanja protivudarnih ventila namenjenih za zaštitu od prodora impulsa pritiska VUT-a nuklearne eksplozije u unutrašnjost objekta. Cilj istraživanja je da se izvedu analitički izrazi kojima su definisani ventili, odnosno da se definišu analitički izrazi vremena zatvaranja ventila i koeficijenata otpora i otpora ventila u zavisnosti od otpornosti, geometrijskih karakteristika,

karakteristika elastičnih elemenata, odnosno od protoka vazduha kroz ventile i prečnika ventila. Na osnovu analize teorijski izvedenih analitičkih izraza, kojima su definisani protivudarni ventili, uslova da su vremena zatvaranja ventila 2 ms za otpornosti 900 kPa, izvršiće se izbor optimalnih i univerzalnih rešenja ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm, otpornosti 300, 600 i 900 Pa.

Korišćene oznake:

C – krutost opruge ventila,
 x – veličina pomeranja pokretnog sklopa ventila,
 x_n – veličina ugiba opruge ventila,
 ω – kružna frekvencija,
 m – masa pokretnog sklopa ventila,
 m_m – masa membrane ventila,
 m_n – masa steznog sklopa membrane ventila,
 A – napadna površina pokretnog sklopa ventila,
 F_p – prinudna sila,
 p_f – pritisak u frontu direktnog VUT-a,
 t – vreme za koje se odvija kretanje pokretnog sklopa ventila pod dejstvom pritiska p_f na putu x,
 τ – vreme trajanja pozitivne faze VUT-a,
 n – eksponent zavisn od nivoa pritiska u frontu VUT-a,
 p_r – reflektovani pritisak VUT-a,
 t_z – vreme zatvaranja ventila,
 D_1 – spoljnji prečnik membrane ventila,
 d_2 – prečnik osovine ventila,
 ρ_m – zapreminska masa materijala membrane ventila,
 δ – debljina membrane ventila,
 $x_0 = h$ – hod pokretnog sklopa ventila,
 v – brzina strujanja vazduha neposredno ispred ventila,

ρ_v – gustina vazduha,
 Q_1 – protok vazduha kroz ventil,
 d_1 – prečnik cilindričnog dela membrane,
 ΔH – otpor strujanju vazduha kroz ventile – otpor ventila,
 Q – zapreminski protok vazduha kroz ventil,
 ξ – koeficijent otpora ventila,
 ϕ – relativna vlažnost vazduha,
 t_v – temperatura vazduha,
 a_0, a_1, a_2, d i K_1 – konstante,
 S_{nead}^2 – disperzija neadekvatnosti,
 d_1 – broj članova regresionog polinoma,
 N – broj eksperimentalnih jedinica,
 n_1 i n_2 – stepeni slobode.

Uloga, namena i funkcionisanje protivudarnog ventila

Zadatak ventila je da spreči protok VUT-a u objekat kroz otvor za dovod svežeg vazduha i time spreči oštećenja koja bi mogao izazvati impuls pritiska VUT-a u sistemu ventilacije.

Koncepcija i konstrukciona rešenja ovih ventila trebalo bi da obezbede njihovu otpornost i funkcionalnost pri dejstvu impulsa pritiska VUT-a i otvaranje po prestanku njegovog dejstva, čime se obezbeđuje slobodan protok vazduha. Na slici 1 prikazan je šematski izgled protivudarnog ventila (PUV).

Pri nailasku VUT-a na objekat, usmereni talas kroz kanal protivudarnog ventila dejstvom impulsa pritiska na konkavnu površinu membrane naglo je pomena i zatvara otvor na izlaznom kanalu. Kada nastupi negativna faza VUT-a pokretni sklop ventila pod dejstvom potpritiska naglo će se pokrenuti u suprotnom smeru i prekinuti vezu sa spoljnom atmosferom.

Sl. 1 – Protivudarni ventil:

1 – telo ventila, 2 – izlazni kanal, 3 – membrana, 4 – navrtka membrane, 5 – osovina ventila, 6 – opruga ventila, 7 – opruga za negativnu fazu, 8 – vođica membrane ventila, 9 – cev za odvod kondenzata iz ventila, 10 – šipka za armiranje ventila

Pri ventilaciji skloništa ventil je otvoren, odnosno membrana se posredstvom opruga nalazi na rastojanju $x = h$ od krajnjeg položaja, kada je ventil zatvoren. Rastojanje $x_0 = h$ membrane pri normalnoj ventilaciji uslovljeno je maksimalnim dozvoljenim padom pritiska u ventilu, koji ne sme da pređe 200 Pa, što se postiže konstrukcijom ventila. Pri normalnoj ventilaciji (pri brzinama strujanja vazduha od 12 m/s), konstrukcija ventila trebalo bi da obezbedi stabilno strujanje vazduha.

Za protivudarne ventile, domaći i strani propisi nalažu da:

- otpor strujanju vazduha kroz ventil pri normalnoj ventilaciji ne sme biti veći od 200 Pa;

- ventili zatvaraju ka objektu pri natpritisku u frontu direktnog VUT-a od 30 kPa, a pri potpritisku od 10 kPa u suprotnom smeru;

- vreme zatvaranja ventila iznosi 2 ms za ventile otpornosti 900 kPa.

Nalaženje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila

Mehanički model protivudarnog ventila prikazan je na slici 2. Masa (m) pokretnog sklopa ventila predstavljena je kao materijalna tačka, koja se pod dejstvom prinudne sile (F_p) kreće po horizontalnoj glatkoj ravni O_x . Na tačku deluje inercijalna sila $m\ddot{x} = m(d^2x/dt^2)$, sila u opruzi ventila $C(x + x_n)$, koja je proporcionalna rastojanju mase (m) od ravnotežnog položaja (x) i veličini ugiba (x_n) za koji je opruga prethodno sabijena u ravnotežnom položaju (radi sticanja stabilnog strujanja vazduha kroz ventil pri normalnoj ventilaciji). Iz uslova ravnoteže sila koje deluju na pokretni sklop ventila mase (m) [1, 2, 3, 4]:

$$m\ddot{x} + C(x + x_n) = F_p \quad (1)$$

dobija se diferencijalna jednačina sistema, oblika

Sl. 2 – Mehanički model protivudarnog ventila

$$\ddot{x} + \omega^2 \left(x + x_n - \frac{F_p}{C} \right) = 0 \quad (2)$$

Prinudna sila F_p može da se izrazi preko impulsa pritiska direktnog VUT-a:

$$F_p = p_f A \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^n \quad (3)$$

gde je:

p_f – pritisak u frontu direktnog VUT-a,
 t – vreme za koje se odvija kretanje pokretnog sklopa ventila pod dejstvom pritiska p_f (reda milisekunda),

τ – vreme trajanja pozitivne faze VUT-a (u sekundama),

n – eksponent zavisen od nivoa pritiska u frontu direktnog VUT-a.

Eksponent n , određen eksperimentalnim putem [1, 5], definisan je izrazom:

$$n = 1,9 p_f^{1/2} \quad (4)$$

Prema [1, 2, 5, 6] za reflektovane pritiske VUT-a od 3, 6 i 9 bara, odgovarajuće vrednosti pritiska u frontu direktnog VUT-a, računane na osnovu funkcionalne veze [1, 5, 7]:

$$p_r = 2p_f + \frac{6p_f^2}{p_f + 7,2} \text{ [bar]} \quad (5)$$

iznose $p_{f1} = 1,08$; $p_{f2} = 1,86$ i $p_{f3} = 2,53$ bar, respektivno.

Diferencijalna jednačina (2) rešava se iz uslova da se zatvaranje pokretnog sklopa ventila obavlja pod dejstvom impulsa pritiska, čije je vreme (τ) znatno duže od vremena zatvaranja ventila, tj. $t/\tau \ll 1$. Odnos $t/\tau \ll 1$ može da se zanemari u odnosu na jedinicu. Iz ove analize sledi da ventil zatvara prinudna sila F_p koja ima konstantnu vrednost

$$F_p = p_f \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_2^2).$$

Opšte rešenje diferencijalne jednačine (2) ima oblik:

$$x = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \frac{F_p}{C} - x_n \quad (6)$$

Iz početnih uslova određuju se konstante integracije C_1 i C_2 :

1. $t = 0$; $x = -x_n$, dobija se konstanta integracije $C_1 = -F_p/C$

2. $t = 0$; $dx/dt = \dot{x} = 0$, dobija se konstanta integracije $C_2 = 0$

Nakon uvođenja vrednosti za integracione konstante C_1 i C_2 u izraz za x , dobija se:

$$x = \frac{F_p}{C} (1 - \cos \omega t) - x_n \quad (7)$$

Rešenjem jednačine (7) po vremenu t i uvođenjem izraza za prinudnu silu, dobija se:

$$t = \left(\frac{m}{C} \right)^{1/2} \arccos \left[1 - \frac{C(x + x_n)}{p_f \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_2^2)} \right]$$

Iz graničnog uslova: $t = t_z$, $x = x_0$ i nakon dimenzionalnog sređivanja dobija se analitički izraz vremena zatvaranja ventila t_z , oblika:

$$t_z = \left(\frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[1 - \frac{4000C(x + x_n)}{p_f \pi (D_1^2 - d_2^2)} \right] \quad (8)$$

gde je:

$t_z[s]$ – vreme zatvaranja ventila;

$m[kg]$ – masa pokretnog sklopa ventila;

$x_0[m]$ – hod pokretnog sklopa ventila;

$x_n[m]$ – veličina za koju je opruga pret-hodno napregnuta;

$C[N/mm]$ – krutost opruge ventila;

$p_f[N/m^2]$ – pritisak u frontu direktnog VUT-a;

$D_1[m]$ – spoljni prečnik membrane ventila;

$d_2[m]$ – prečnik osovine ventila.

U analitičkom izrazu vremena zatvaranja ventila figurišu veličine: masa pokretnog sklopa ventila m i ugib x_n , koje je potrebno analitički definisati.

Analitički izraz mase pokretnog sklopa

Masa pokretnog sklopa ventila sastoji se od mase membrane i steznog sklopa, tj:

$$m = m_m + m_n \quad (9)$$

Šematski izgled membrane ventila prikazan je na slici 3.

Masa membrane ventila definisana je izrazom:

$$m_m = \rho_m \frac{\pi \delta}{4000} \left[\frac{1}{\cos \alpha} (D_1^2 - d_1^2) + (d_1^2 - d_2^2) \right] [kg] \quad (10)$$

gde je:

$\rho_m[kg/m^3]$ – zapreminska masa materijala membrane ventila,

$\delta[mm]$ – debljina membrane ventila,

$D_1, d_1, d_2[m]$ – odgovarajući prečnici membrane ventila.

Sl. 3 – Membrana protivudarnog ventila

Masa steznog sklopa membrane ventila [1, 2] data je u funkciji nazivnog prečnika ventila (tabela 1).

Analitičko definisanje izraza ugiba x_n opruga ventila

Za stabilno strujanje vazduha kroz ventile pri normalnoj ventilaciji potrebno je da sila u opruzi bude jednaka ili veća od sile koja deluje na pokretni sklop ventila, pri brzini strujanja vazduha kroz ventil, $v = 12 \text{ m/s}$ [1, 2, 8], odnosno:

$$Cx_n \geq \rho Q_1 v \quad (11)$$

odakle je:

$$x_n \geq \frac{\rho_v Q_1 v}{C} \quad (12)$$

Ulazni podaci za protivudarne ventile

Veličina i oznaka		Nazivni prečnik ventila		
		PUV-100	PUV-150	PUV-200
Spoljni prečnik membrane ventila	D_1 [m]	0,158	0,230	0,306
Prečnik cilindričnog dela membrane	d_1 [m]	0,053	0,060	0,074
Prečnik otvora membrane ventila	d_2 [m]	0,024	0,032	0,036
Ugao nagiba membrane	α [°]	30	30	30
Masa steznog sklopa ventila	m_n [kg]	0,105	0,175	0,277
Zapreminska masa materijala membrane	ρ_m [kg/m ³]	2600	2600	2600
Debljina membrane ventila	δ [mm]	2,5	2,5	2,5
Krutost opruge ventila	C [N/mm]	2,4	2,4	2,4
Vreme zatvaranja ventila (pri $p_f = 253000$ N/m ²)	t_2 [s]	0,0020	0,0020	0,0020
Pritisak u frontu direktnog VUT-a	p_f [N/m ²]	253000	253000	253000

gde je:

$F_v = \rho_v Q_1 v$ – sila u struji vazduha,

$Q_1 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_2^2) v$ – protok vazduha kroz ventil.

Nakon uvođenja Q_1 u nejednačinu (12) i dimenzionalnog sređivanja dobija se analitički izraz ugiba x_n opruge ventila, kojim se obezbeđuje stabilno strujanje vazduha kroz ventil [1, 8]:

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (D_1^2 - d_2^2) v^2 \tag{13}$$

gde je:

ρ_v [kg/m³] – gustina vazduha ($\rho_v = 1,2$ kg/m³),

C [N/mm] – krutost opruge ventila,

D_1 i d_2 [m] – odgovarajući prečnici ventila,

v [m/s] – brzina strujanja vazduha neposredno ispred membrane ventila ($v = 12$ m/s).

Analitički izrazi kojima je definisano vreme zatvaranja ventila

Analitički izrazi kojima je definisan problem određivanja vremena zatvaranja protivudarnih ventila su:

$$t_z = \left(\frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[1 - \frac{4000C(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_1^2 - d_2^2)} \right]$$

$$m = m_m + m_n$$

$$m_m = \rho_m \frac{\pi \delta}{4000} \left[\frac{1}{\cos \alpha} (D_1^2 - d_1^2) + (d_1^2 - d_2^2) \right]$$

m_n = vidi tabelu 1

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (D_1^2 - d_2^2) v^2$$

Da bi se postigao postavljeni cilj, potrebno je doći do funkcionalne veze između koeficijenta otpora, odnosno otpora ventila, prečnika ventila i protoka vazduha kroz ventil.

Metod nalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora i otpora protivudarnih ventila

Analiziran je uticaj prečnika protivudarnog ventila na koeficijent otpora ξ ventila. Cilj je da se dođe do funkcionalne veze koja bi kvalitativno i kvantitativno iskazala uticaj dva pomenuta faktora na koeficijent otpora ventila. Koeficijent otpora ventila je funkcija nekoliko faktora:

$$\xi = f(D, h, \rho, \varphi, v, t_v) \quad (14)$$

od kojih najveći uticaj imaju prečnik ventila i hod pokretnog sklopa ventila.

Opis eksperimenta

Pad pritiska ΔH u ventilu proporcionalan je dinamičkom pritisku [1, 9, 10, 11, 12]:

$$\Delta H = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (15)$$

Ako se u jednačinu (14) brzina strujanja vazduha v iza ventila izrazi preko protoka Q i reši po ξ , dobija se izraz koeficijenta otpora ventila za fiksirani položaj pokretnog sklopa ventila, oblika:

$$\xi = \frac{\pi^2 D^4 \Delta H}{8 \rho Q^2} \quad (16)$$

gde je:

D [m] – nazivni prečnik ventila,

ΔH [Pa] – otpor strujanju vazduha kroz ventil,

ρ [kg/m³] – zapreminska masa vazduha,

Q [m³/s] – zapreminski protok vazduha.

Analizom jednačine (16) lako je uočiti da su pri fiksnom hodu pokretnog sklopa ventila koeficijent otpora ventila

i odnos H/Q^2 konstantni, pri bilo kojem protoku. Promenom hoda pokretnog sklopa ventila direktno se utiče na otpor strujanju vazduha kroz ventil, definisan izrazom:

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \xi Q^2 \quad (17)$$

U izrazu za ΔH ne figuriše hod h pokretnog sklopa, pa analizom izraza (17) nije moguća kvalitativna ocena uticaja hoda na otpor ventila, već samo logička. Cilj je da se dođe do analitičkog izraza, koji bi kvalitativno iskazao uticaj prečnika ventila i hoda pokretnog sklopa ventila na koeficijent otpora ventila, odnosno na otpor ventila. U tom smislu bilo je potrebno izvršiti eksperimentalna istraživanja. Eksperiment se sastoji u tome da su za tri slična ventila nazivnih prečnika 100; 150 i 200 mm, pri hodu pokretnog sklopa ventila od 26; 40 i 48 mm, mereni otpori ΔH ventila i dinamički pritisak ($p_d = \rho v^2/2$), odnosno protok Q vazduha kroz ventile. Na osnovu izmerenih podataka za otpore ΔH ventila i protoke Q vazduha kroz ventile, na osnovu izraza (16) računata su odgovarajuće vrednosti za koeficijente otpora ξ_i ventila. Ovde se radi o dvotraktornom eksperimentu, pošto su veličine (φ, ρ, v, t_v) funkcionalne veze (14) konstantni. Randomizacija, planiranje i izvođenje eksperimenta izvršeno je po principima planiranog eksperimenta.

Rezultati eksperimenta

Sređeni rezultati merenja za koeficijente otpora ξ_i ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm, pri hodu pokretnog sklopa ventila od 26, 40 i 48 mm dati su u tabeli 2.

Tabela 2

Rezultati za koeficijent otpora ventila ξ

D [mm]	h [mm]	Koeficijent otpora ξ_i ventila			ξ
		Merenje			
		1	2	3	
100	26	3,70	3,72	3,71	3,71
	40	2,70	2,68	2,70	2,693
	48	2,40	2,42	2,41	2,41
150	26	4,20	4,25	4,16	4,2033
	40	3,10	3,15	3,10	3,1169
	48	2,70	2,65	2,70	2,6833
200	26	5,0	4,90	4,80	4,90
	40	3,70	3,6	3,55	3,617
	48	3,10	3,15	3,20	3,15

Broj eksperimentalnih jedinica iznosi $N = abn$, gde je:

$a = 3$ – nivo faktora D;

$b = 3$ – nivo faktora h i

$n = 3$ – broj ponovljenih očitavanja.

$N = abn = 27$ eksperimentalnih jedinica.

Obrada eksperimentalnih rezultata istraživanja

Za nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila, na osnovu eksperimentalnih podataka datih u tabeli 2, korišćene su metode matematičke statistike:

1. Provera jednorodnosti disperzija na osnovu Cohrenovog kriterijuma, tj. provera normalnosti raspodele eksperimentalno dobijenih podataka ξ_i koeficijenta otpora ventila;

2. Disperziona analiza, tj. provera da li na koeficijent otpora ventila znatno utiču prečnik ventila i hod pokretnog sklopa ventila;

3. Regresiona analiza, pomoću koje se metodom najmanjih kvadrata dolazi

do analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

4. Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

Detaljnije o ovim metodama razmatra se u literaturi [1, 9, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Postupak provere jednorodnosti disperzija i disperziona analiza su, zbog obimnosti materije, izostavljeni, ali su dati zaključci.

Disperzije su jednorodne sa verovatnoćom od 95%, tj. raspodela rezultata za koeficijente otpora ventila ξ_i je normalna.

Na koeficijent otpora ventila ξ znatno utiču prečnik ventila D i hod pokretnog sklopa ventila h. To znači da ima smisla pristupiti nalaženju analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila u funkciji prečnika i hoda pokretnog sklopa ventila.

Regresionom analizom, metodom najmanjih kvadrata, dolazi se do analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila, koristeći eksperimentalne podatke za ξ , date u tabeli 2. Postoji više analitičkih pretpostavki za ξ . Jedna od njih, pogodna za primenu, bila bi da je [1, 22, 24, 25, 26]:

$$\xi = KD^c h^d \quad (18)$$

Ako se jednačina (18) logaritmuje:

$$\ln \xi = \ln K + c \ln D + d \ln h \quad (19)$$

i uvede smena:

$$\begin{aligned} Y &= \ln \xi; \quad a_0 = \ln K; \quad a_1 = c; \\ X_1 &= \ln D; \quad a_2 = d; \quad X_2 = \ln h \end{aligned} \quad (20)$$

dobija se jednačina linearne regresije oblika $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$.

Ako se uzme u obzir greška eksperimenta ε dobiće se izraz oblika:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \varepsilon \quad (21)$$

Određivanje konstanti (a_0 , a_1 , a_2) vrši se obradom eksperimentalnih podataka metodom najmanjih kvadrata.

Metoda se sastoji u minimiziranju odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionog polinoma, oblika:

$$[\varepsilon(Y_i - a_0 - a_1X_{1i} - a_2X_{2i})^2] = (\varepsilon^2)_{\min} \quad (22)$$

Minimalna odstupanja nalaze se diferenciranjem prethodne funkcije po traženim parametrima i izjednačavanjem izvoda sa nulom:

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_0} = -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1X_{1i} - a_2X_{2i}) = 0$$

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_1} = -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1X_{1i} - a_2X_{2i}) X_{1i} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_2} = -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1X_{1i} - a_2X_{2i}) X_{2i} = 0$$

Nakon sređivanja dobija se sistem jednačina:

$$Na_0 + a_1 \sum X_{1i} + a_2 \sum X_{2i} = \sum Y_i$$

$$a_0 \sum X_{1i} + a_1 \sum X_{1i}^2 + a_2 \sum X_{2i} X_{1i} = \sum X_{1i} Y_i \quad (24)$$

$$a_0 \sum X_{2i} + a_1 \sum X_{1i} X_{2i} + a_2 \sum X_{2i}^2 = \sum X_{2i} Y_i$$

Nakon obrade eksperimentalnih podataka i rešenja sistema jednačina dobija se analitički izraz koeficijenta otpora ventila, oblika:

$$\xi = 6,0865 \cdot \frac{D^{0,398}}{h^{0,718}} \quad (25)$$

Grafički prikaz analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila dat je na slici

4. Potrebno je izvršiti proveru adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

Sl. 4 – Grafički prikaz analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila

Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila

Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila vrši se upoređenjem koeficijenta odnosa disperzija V_{01} sa Fisherovim kriterijumom F . Koeficijent odnosa disperzija V_{01} računa se po obrascu:

$$V_{01} = \frac{S_{nead}^2}{S_{\xi sr}^2} \quad (26)$$

gde je:

S_{nead}^2 – disperzija neadekvatnosti;
 $S_{\xi sr}^2$ – srednja disperzija.

Disperzija neadekvatnosti računa se po obrascu:

$$S^2_{nead} = \frac{1}{N - d_1} (\bar{\xi}_i - \xi_{rač})^2 \tag{27}$$

Stepen slobode za disperziju neadekvatnosti je: $N - d_1 = 27 - 3 = 24$,
gde je:
 N – broj eksperimentalnih jedinica;
 d_1 – broj članova regresivnog polinoma;
 $\xi_{rač}$ – vrednost koeficijenta otpora ventila, računata na osnovu dobijenog analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ξ ventila izvršena je i prikazana u tabeli 3.

Tabela 3

Provera adekvatnosti

D [mm]	h [mm]	$\bar{\xi}$	$\xi_{rač}$	$(\bar{\xi} - \xi_{rač})^2$
100	26	3,71	3,6690	$1,6783 \cdot 10^{-3}$
	40	2,6933	2,6929	0,0
	48	2,410	2,3625	$2,2480 \cdot 10^{-3}$
150	26	4,2033	4,3116	$1,1733 \cdot 10^{-2}$
	40	3,1169	3,1646	$2,2786 \cdot 10^{-3}$
	48	2,6833	2,7763	$8,6609 \cdot 10^{-3}$
200	26	4,90	4,8347	$4,2649 \cdot 10^{-3}$
	40	3,617	3,5486	$4,6838 \cdot 10^{-3}$
	48	3,15	3,1132	$1,3552 \cdot 10^{-3}$
Ukupno:				$3,6903 \cdot 10^{-2}$

Disperzija neadekvatnosti iznosi:

$$S^2_{nead} = 0,6151 \cdot 10^{-2}$$

Koeficijent odnosa disperzije V_{01} iznosi:

$$V_{01} = \frac{S^2_{nead}}{S^2_{\xi sr}} = \frac{0,6151 \cdot 10^{-2}}{0,467 \cdot 10^{-2}} = 1,317,$$

pri čemu je srednja disperzija $S^2_{\xi sr}$ definisana izrazom:

Tabela 4
Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S^2_{\xi i}$

D [mm]	h [mm]	$\bar{\xi}_i$	$S^2_{\xi i}$	Stepen slobode
100	26	3,71	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2
	40	2,6933	$0,0134 \cdot 10^{-2}$	2
	48	2,410	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2
150	26	4,2033	$0,2045 \cdot 10^{-2}$	2
	40	3,1169	$0,0834 \cdot 10^{-2}$	2
	48	2,6833	$0,048 \cdot 10^{-2}$	2
200	26	4,90	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2
	40	3,617	$0,5689 \cdot 10^{-3}$	2
	48	3,15	$0,25 \cdot 10^{-3}$	2
Ukupno:			$4,2032 \cdot 10^{-2}$	18

$$S^2_{\xi sr} = \frac{1}{ab} \sum S^2_{\xi i} \tag{28}$$

gde je:

$$S^2_{\xi i} = \frac{1}{n - 1} \sum_1^n (\xi_i - \bar{\xi})^2 - \text{disperzija eksperimentalnih rezultata,}$$

$$\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_1^n \xi_i - \text{aritmetička sredina jedne kombinacije nivoa,}$$

$\sum S^2_{\xi i}$ – zbir disperzija.

Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S^2_{\xi i}$ date su u tabeli 4.
Srednja disperzija iznosi:

$$S^2_{\xi sr} = \frac{1}{ab} \sum S^2_{\xi i} = \frac{1}{3 \cdot 3} 4,2032 \cdot 10^{-2} = 0,467$$

Fisherov kriterijum F za verovatnoću od 99% i stepene slobode: $n_1 = N - d_1 = 27 - 3 = 24$, i $n_2 = ab(ne - 1) = 3 \cdot 3(3 - 1) = 18$, iz tablice prema [1, 22] iznosi: $F = 4,01$. Pošto je koeficijent $V_{01} = 1,317 < 4,01 = F$, znatno manji od Fisherovog kriterijuma, sledi za-

ključak da je dobijeni analitički izraz koeficijenta otpora ventila adekvatan verovatnoći od 99%.

Analitički izrazi kojima su definisani protivudarni ventili

Protivudarni ventili definisani su analitičkim izrazima:

$$t_z = \left(\frac{m}{1000C} \right)^{1/2} \arccos \left[1 - \frac{4000C(x + x_n)}{p_f \pi (D_1^2 - d_2^2)} \right] \quad (8)$$

$$m = m_m + m_n \quad (9)$$

$$m_m = \rho_m \frac{\pi \delta}{4000} \left[\frac{1}{\cos \alpha} (D_1^2 - d_1^2) + (d_1^2 - d_2^2) \right] \quad (10)$$

$$m_n = \text{vidi tabelu 1}$$

$$x_n \geq \frac{\rho_v \pi}{4000C} (D_1^2 - d_2^2) v^2 \quad (13)$$

$$\xi = 6,0865 \cdot \frac{D^{0,398}}{h^{0,718}} \quad (25)$$

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \xi Q^2 \quad (17)$$

Rešenje diferencijalne jednačine (2) u [1, 2, 8] glasi:

$$T_z = 2 \left[\frac{2m(x_0 + x_n)}{p_f \pi (D_1^2 - d_2^2) - 4000C(x_0 + x_n)} \right]^{1/2} \quad (29)$$

Izbor optimalnih karakteristika ventila

Do optimalnih karakteristika (rešenja) protivudarnih ventila dolazi se iz uslova:

– da vremena zatvaranja ventila otpornosti 900 kPa budu 2 ms;

– da protok vazduha kroz ventile bude nominalan, tj. $Q = Q_{nom}$;

– za proračunate vrednosti hoda pokretnog sklopa ventila, koeficijent otpora ventila je optimalan.

Na osnovu jednačina (8), (9), (10), (13), (17) i (25) konkretnih geometrijskih veličina, datih u tabeli 1, i postavljenog kriterijuma vremena zatvaranja ventila 2 ms za ventile otpornosti 900 kPa, izračunate su optimalne karakteristike ventila: $x_0 = h$; m_m , x_n , ξ_{opt} , Q_n i ΔH_n , nazivnih prečnika 100; 150 i 200 mm i prikazane su u tabeli 5.

Na osnovu analitičkih izraza (8) i (29) vremena zatvaranja ventila i ulaznih podataka za protivudarne ventile, datih u tabeli 1, konstruisan je dijagram zavisnosti vremena zatvaranja ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm od pritiska u frontu direktnog VUT-a (slika 5).

Dijagram na slici 5 predstavlja zakonitost zatvaranja sličnih ventila, definisan analitičkim izrazima (8) i (29), prečnika 100, 150 i 200 mm, pri dejstvu impulsa pritiska VUT-a nastalog pri nuklearnoj eksploziji.

Analitički izrazi optimalnih otpora ventila u funkciji protoka vazduha kroz ventile

Ako se u opšti izraz (17) koeficijenta otpora ventila uvrsti protok Q [m^3/h], dobija se izraz oblika:

$$\xi = \frac{\pi^2 D^4}{8\rho} \frac{\Delta H}{Q^2} 3600^2 \quad (30)$$

Rešenjem izraza za ξ po ΔH dobija se opšti oblik analitičkog izraza otpora ventila:

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \frac{Q^2}{3600^2} \xi \quad (31)$$

Optimalne karakteristike protivudarnih ventila

Veličina	Oznaka	Oznaka i tip ventila		
		PUV-100	PUV-150	PUV-200
Nazivni prečnik ventila	D [mm]	100	150	200
Vreme zatvaranja ventila	t_z [s]	0,0020	0,0020	0,0020
Ugib opruge ventila	x_n [m]	0,0015	0,0030	0,0050
Hod pokretnog sklopa ventila – optimalni	α [°]	0,037	0,040	0,040
Spoljni prečnik membrane ventila	D_1 [m]	0,158	0,230	0,306
Prečnik otvora membrane ventila	d_2 [m]	0,024	0,032	0,036
Krutost opruge ventila	C [N/mm]	2,4	2,4	2,4
Pritisak u frontu direktnog VUT-a	p_f [N/m ²]	253000	253000	253000
Masa pokretnog sklopa ventila	m [kg]	0,247	0,479	0,818
Koeficijent otpora ventila	ξ_{opt}	2,79	3,0	3,26
Protok vazduha kroz ventil – nominalni	Q_n [m ³ /h]	188	375	750
Otpor ventila – nominalni	ΔH_n [N/m ²]	74,10	62,54	86

Analitički izrazi optimalnih otpora ventila ΔH_{opt} dobijaju se uvođenjem odgovarajućih optimalnih vrednosti koeficijenta otpora ventila $\xi = \xi_{opt}$ (tabela 5) u jednačinu (31). Analitički izrazi optimalnih otpora ventila PUV-100, PUV-150 i PUV-200 glase:

$$\Delta H_{opt} = 2,0962 \cdot 10^{-3} Q^2 \tag{32}$$

$$\Delta H_{opt} = 4,4476 \cdot 10^{-4} Q^2 \tag{33}$$

$$\Delta H_{opt} = 1,5292 \cdot 10^{-4} Q^2 \tag{34}$$

respektivno, gde je:

Sl. 5 – Zavisnost vremena zatvaranja (t_z , T_z) protivudarnih ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm od pritiska u frontu direktnog VUT-a

Sl. 6 – Zavisnost otpora ventila (ΔH) od prečnika i protoka vazduha (Q) kroz ventile

$Q[\text{m}^3/\text{h}]$ – protok vazduha kroz ventil,
 $\Delta H[\text{N}/\text{m}^2]$ – optimalni otpor ventila.

Analitički izrazi (32), (33) i (34) prikazani su na slici 6.

Na osnovu izvedene analize analitičkih izraza, kojima su definisani ventili kao kriterijumi za ocenu njihove valjanosti, predlažu se vremena zatvaranja ventila u funkciji otpornosti na dejstvo impulsa pritiska VUT (tabela 6).

Izvedena analiza ukazuje na neodrživost još uvek važećih široko postavljenih kriterijuma [27]:

Tabela 6

Predlog vremena zatvaranja ventila

Vreme zatvaranja ventila t_z [s]	Otpornost ventila p_r [kPa]	Pritisak u frontu direktnog VUT-a p_f [N/m ²]
2,0	900	253000
2,40	600	186000
3,10	300	108000

$T_z = 3,0$ ms – za ventile otpornosti 600 kPa, i

$T_z = 5,0$ ms – za ventile otpornosti 300 kPa.

Zaključak

Na originalan način analitički su definisani protivudarni ventili za zaštitu od prodora VUT-a u unutrašnjost objekta osnovne zaštite.

Analitički izrazi definisani su u zavisnosti od otpornosti ventila na dejstvo impulsa pritiska VUT-a nuklearne eksplozije, geometrijskih karakteristika, karakteristika elastičnih elemenata i aerodinamičkih karakteristika sličnih ventila željenih nazivnih prečnika.

Kao kriterijum o oceni valjanosti ventila usvojeno je vreme zatvaranja. Izražen je u opštem obliku, a zatim pri-

menjen na ventile nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm, otpornosti 300, 600 i 900 kPa.

Na osnovu vremena zatvaranja od 2 ms za ventile otpornosti 900 kPa, izvršen je izbor optimalnih konstrukcija ventila.

Modeli ventila su uopšteni, pa su primenljivi na familiju sličnih ventila željenih karakteristika.

Na osnovu optimalnih vrednosti koeficijenta otpora ventila ξ_{opt} definisani su analitički izrazi optimalnih otpora ventila 100, 150 i 200 mm u funkciji protoka vazduha kroz njih.

Postavljeni su kriterijumi (nova vremena zatvaranja ventila) za ocenu valjanosti ventila (tabela 6) umesto još uvek važećih široko postavljenih [27].

Literatura:

- [1] Knežević, M.D.: Prilog analitičkom definisanju pneumatičkih karakteristika sistema ventila specijalne namene, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1994.
- [2] Knežević, D.: Nalaženje analitičkog izraza vremena zatvaranja protivudarnih ventila, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXV, 1985., br. 9, str. 6–13.
- [3] Rašković, D.: Teorija oscilacija, Naučna knjiga, Beograd, 1965.
- [4] Vujanović, B.: Dinamika, Naučna knjiga, Beograd, 1976.
- [5] Mandić, J.: Ostvarivanje udarnog kratkotrajnog impulsa pritiska u udarnim cevima izjednačavajućeg pritiska, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1976.
- [6] Knežević, D.: Interna ispitivanja prototipova ventila tipa PPUV-400, PPUV-600 i HV-400 na dejstvo pritiska vazdušnog talasa nuklearne eksplozije, III deo, Vojnotehnički institut KoV, 07-01.0109, Beograd, 1988., strana 9.
- [7] Schardin, H.: Simulierung von Druckstößen beliebig langer Dauer in einem Stosswellenrohr, Wehrtechnische Monatshefte, 1966., 4.
- [8] Knežević, D.: Analitičko definisanje kriterijuma za ocenu valjanosti ventila namenjenih za zaštitu od prodora impulsa pritiska vazdušnog talasa nuklearne eksplozije u unutrašnjost objekta, Naučno-tehnički pregled, Vol. XLI, 1991., br. 4, str. 47–52.
- [9] Knežević, D.: Nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom potpunog eksperimenta, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXV, 1985., br. 7–8, str. 21–26.
- [10] Pečornik, M.: Mehanika fluida, Strojarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1982.
- [11] Voronjec, K., Obradović, N.: Mehanika fluida, Naučna knjiga, Beograd, 1970.
- [12] Zrnić, V.: Pneumatika, III izdanje, Tehnička knjiga, Beograd, 1986.
- [13] Duduković, B., Milosavljević, Đ.: Planiranje eksperimenta i optimizacija procesa, IHTM Centar za tehnokonomiku i programiranje, Beograd, 1976.
- [14] Freund, J., E.: Mathematical Statistics, New York, 1971.
- [15] Ivanović, B.: Teorijska statistika, Naučna knjiga, Beograd, 1973.
- [16] Ivković, Z.: Matematička statistika, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [17] Knežević, D.: Analitički metod definisanja ventila za regulaciju protoka vode, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXVI, 1986., br. 5, str. 11–17.
- [18] Knežević, D.: Analitički metod definisanja kombinovanog protivudarnog ventila za regulaciju nadpritiska, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXVI, 1986., br. 9, str. 13–24.
- [19] Milošević, V.: Teorijska statistika, Naučna knjiga, Beograd, 1983.
- [20] Nenadović, M.: Metode optimizacije sistema, SANU, Beograd, 1980.
- [21] Nenadović, M.: Matematička obrada podataka dobijenih merenjem, SANU, posebno izdanje, knjiga DLXXXVII, Odeljenje tehničkih nauka, knjiga 29, Beograd, 1988.
- [22] Pantelić, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1986.
- [23] Stojanović, S.: Matematička statistika, Naučna knjiga, Beograd, 1970.
- [24] Vukadinović, V.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, drugo izmenjeno izdanje, Privredni pregled Beograd, 1978.
- [25] Gurevič, A.: Proračun regulacijskih ventila, Lenjingrad, MAŠGIZ, Moskva, 1968.
- [26] Knežević, D.: Metod iznalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora protivudarnih ventila, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXV, 1985., br. 10, str. 37–45.
- [27] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju skloništa (Sl. list SFRJ br. 11/1976).