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

METOD ANALITIČKOG DEFINISANJA PROTIVUDARNIH VENTILA SA MEMBRANOM ZA REGULACIJU NATPRITISKA

UDC: 621.646.5:623.459.72

Rezime:

U radu je prikazan originalan metod analitičkog definisanja protivudarnih ventila sa membranom, namenjenih za zaštitu od prodora impulsa pritiska direktnog vazdušnoudarnog talasa, nastalog pri nuklearnoj eksploziji, u unutrašnjost objekta. Definisan je analitički izraz vremena zatvaranja ventila u zavisnosti od njegovih radnih i geometrijskih karakteristika. Primenom metoda matematičke statistike prikazan je originalan metod nalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora sličnih konstrukcija ventila, na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka za koeficijente otpora ventila u zavisnosti od karakterističnih veličina (prečnika i protoka vazduha) i metod provere adekvatnosti modela. Izvršen je izbor optimalnih karakteristika ventila.

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

METHOD OF ANALYTICAL DEFINITION OF ANTI-BLAST VALVES WITH MEMBRANE FOR OVERPRESSURE REGULATION

Summary:

The paper gives an original method of analytical definition of anti-blast valves with membrane for the protection against pressure penetration due to nuclear explosion direct ABWs (air-blast waves). The analytical expression of valves closing time is defined depending on operational and geometrical valve parameters. Mathematical statistics is applied to describe an original method for determining the analytical expression of resistance coefficients in similarly-designed valves, based on experimentally obtained data for valve resistance coefficients and depending on characteristic valve parameters (diameter and air-flow). The model adequacy has been checked and optimal valve characteristics have been chosen.

Key words: nuclear explosion, air blast wave, shelter, valves, mathematical modeling, mathematical statistics methods, randomization, aerodynamic characteristics, dynamic characteristics, optimal solution.

Uvod

Cilj istraživanja obuhvaćenog ovim radom jeste postavljanje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila pod dejstvom direktnog vazdušnoudarnog talasa

(VUT-a) u zavisnosti od radnih i geometrijskih parametara ventila, kao i analitičkih izraza koeficijenta otpora i otpora ventila u zavisnosti od protoka vazduha kroz ventile. Na osnovu analize teorijski definisanog kriterijuma izvršen je izbor

optimalnih i po otpornosti univerzalnih rešenja ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm, otpornosti 300, 600 i 900 kPa.

Da bi se to ostvarilo potrebno je sprovesti kompleksnu analizu koja obuhvata:

- definisanje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila pod direktnim dejstvom VUT-a nuklearne i klasične eksplozije;

- definisanje analitičkih izraza koeficijenata otpora i otpora ventila u zavisnosti od protoka vazduha kroz ventile i prečnika ventila.

Korišćene oznake:

T_z – vreme zatvaranja ventila u slučaju velikih uglova otklona membrane,

t_z – vreme zatvaranja ventila u slučaju malih uglova otklona membrane ventila,

J – moment inercije membrane ventila za obrtnu osu,

φ_0 – maksimalni ugao otklona membrane ventila,

φ – ugao otklona membrane ventila u trenutku t ,

J_0 – moment inercije membrane ventila za težišnu osu,

x_t – rastojanje težišta membrane od ose koja prolazi kroz obrtnu tačku,

ω – kružna frekvencija,

$\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – ugaono ubrzanje pokretnog sklopa ventila,

a, b, c, C_1, C_2 – konstante integracije,

p_f – pritisak u frontu vazdušnoudarnog talasa nastalog pri nuklearnoj eksploziji,

VUT – vazdušnoudarni talas,

p_r – reflektovani pritisak VUT-a pri nuklearnoj eksploziji,

τ – vreme trajanja pozitivne faze,

m – masa pokretnog sklopa ventila,

m_D – masa diska ventila,

m_d – masa držača diska ventila,

a_1 – rastojanje težišta držača diska ventila od ose koja prolazi kroz obrtnu tačku pokretnog sklopa ventila,

R_i, R_1, R_2 – odgovarajući poluprečnici ventila,

γ – zapreminska masa materijala pokretnog sklopa ventila,

g – ubrzanje Zemljine teže,

δ – debljina zida diska ventila,

δ_1 – debljina držača diska ventila,

J_d – moment inercije držača diska ventila,

R_3, R_4 – odgovarajući poluprečnici držača ventila,

ξ – koeficijent otpora ventila (pri $\Delta H_i = 0$),

v – brzina strujanja vazduha iza ventila,

p_d – dinamički pritisak,

Q – protok vazduha kroz ventil,

ρ – zapreminska masa vazduha,

D – nazivni prečnik ventila,

ΔH – otpor strujanju vazduha kroz ventile,

N – broj eksperimentalnih jedinica,

a – nivo faktora $D \equiv B$,

b – nivo faktora $Q \equiv A$,

n – broj ponovljenih očitavanja,

$G_{\max}$ – računaska vrednost za Cohrenov kriterijum,

$\max/S_{\xi_i}^2$ – maksimalna vrednost disperzije rezultata,

$S_{\xi_i}^2$ – disperzija eksperimentalnih podataka,

ξ – aritmetička sredina jedne kombinacije nivoa,

G – tabelarna vrednost za Cohrenov kriterijum,

$S_{\xi_{sr}}^2$ – srednja disperzija,

$\Sigma \xi_i$ – zbir jedne kombinacije nivoa koeficijenata otpora ventila,

$\Sigma S_{\xi_i}^2$ – zbir disperzija rezultata,

OS – opšta suma,

OSK – opšta suma kvadrata,

SKF – suma kvadrata za faktor,

SKAB – suma kvadrata za međudejstvo AB,
 SKG – suma kvadrata za grešku,
 SK – srednji kvadrat,
 ss – stepen slobode odgovarajućeg faktora,
 V_{0A} , V_{0B} – parametar koji definiše odnos srednjeg kvadrata faktora A, odnosno B i srednjeg kvadrata greške,
 F – Fisherov kriterijum,
 V_{01} – koeficijent odnosa disperzija,
 S_{nead}^2 – disperzija neadekvatnosti,
 d_1 – broj članova regresivnog polinoma,
 ΔH_{opt} – optimalni otpor ventila,
 ΔH_n – nominalni otpor ventila,
 Q_n – nominalni protok vazduha kroz ventile,
 ξ_{opt} – optimalni koeficijent otpora ventila,
 RHB – radiološko-hemijsko-biološka kontaminacija.

Namena i funkcionisanje protivudarnog ventila za regulaciju natpritiska u objektu

U svim uslovima ventilacije potrebno je u objektu održavati natpritisak u odnosu na spoljnu atmosferu. Natpritisak se održava radi sprečavanja prodora RHB-kontaminacije. Potrebno ga je održavati i između pojedinih prostorija u sklopu objekta, radi postizanja posredne ventilacije sporednih prostorija objekta. Upotrebljeni vazduh odvodi se iz objekta u spoljnu atmosferu kroz izduvne kanale. Protok vazduha kroz kanale uslovljen je natpritiskom u objektu. Da bi se natpritisak održavao u propisanim granicama na ovim otvorima postavljaju se ventili za njegovu regulaciju.

Predmet istraživanja su protivudarni ventili za regulaciju natpritiska, koji se ugrađuju na spoljnim zidovima objekta. Konceptcija i konstrukciona rešenja ovih

ventila trebalo bi da obezbede njihovu otpornost i funkcionalnost pri visokim udarnim opterećenjima, tj. njihovo zatvaranje pri dejstvu VUT-a, i otvaranje po prestanku njegovog dejstva. Na slici 1 šematski je prikazan izgled kombinovanog protivudarnog ventila sa membranom za regulaciju natpritiska.

Sl. 1 – Protivudarni ventil sa membranom za regulaciju natpritiska:

1 – telo ventila, 2 – disk, 3 – držač diska, 4 – osovinica, 5 – osovina, 6 – zaptivač, 7 – opruga, 8 – tanjir, 9 – O prsten, 10 – zaptivač, 11 navrtka

Pri nailasku VUT-a na objekat, usmereni talas, kroz kanal ventila za regulaciju natpritiska, dejstvom pritiska na površinu membrane, naglo zatvara otvor na izlaznom kanalu. Proces zatvaranja ventila odvija se u kratkom vremenskom intervalu zahvaljujući velikom udarnom impulsnom opterećenju i maloj masi pokretnog sklopa ventila. U procesu zatvaranja kroz ventil će proći izvestan impuls pritiska VUT-a. Ventil je zatvoren sve dok u spoljašnjoj atmosferi vlada natpritisak. Kada nastupi negativna faza VUT-

-a pokretni sklop ventila će se pod dejstvom natpritiska naglo pomeriti i prekinuti vezu sa spoljnom atmosferom. Po prestanku VUT-a membrana ventila se, pod dejstvom sile usled isticanja vazduha, dovodi u otvoreni položaj.

Analitički izraz vremena zatvaranja ventila

U eksploataciji ventila mogu da nastupe dva karakteristična slučaja:

– membrana ventila je u otvorenom položaju (za ugao φ_0) pod dejstvom sile nastale usled isticanja vazduha,

– membrana ventila je u zatvorenom položaju, u slučaju kada nastane prekid odvoda vazduha, tj. kada u objektu ne vlada natpritisak.

Dalje se razmatra nepovoljniji slučaj, tj. kada je membrana ventila u otvorenom položaju pri nailasku VUT-a nastalog pri nuklearnoj eksploziji.

Određivanje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila

Mehanički model ventila prikazan je na slici 2. Membrana ventila sa uglom otklona φ u trenutku t , pod dejstvom prinudne sile F_p se zatvara. Na membranu deluju momenti inercijalne sile $J\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$, mase pokretnog sklopa ventila $mgx_t \sin \varphi$ i prinudne sile $F_p x_T \cos \varphi$. Ako se postavi momentna jednačina za obrtnu tačku pokretnog sklopa ventila mase m (slika 2):

$$J\ddot{\varphi} + mgx_T \sin \varphi = -F_p x_T \cos \varphi \quad (1)$$

nakon sređivanja dobija se diferencijalna jednačina sistema oblika:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = -\frac{p_f A x_t}{J} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n \cos \varphi \quad (2)$$

pri čemu analitički izraz za prinudnu silu ima oblik: $F_p = p_f A \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n$, gde je

$n = 1,9p_f^{0,5}$ – eksponent koji karakteriše tok promene pritiska u frontu direktnog i reflektovanog VUT-a [1–9]. Kvadrat kružne frekvencije ω^2 definisan je izrazom: $\omega^2 = \frac{mgx_T}{J}$. U konkretnom slučaju

eksponentu n dodeljena je vrednost 3, što odgovara reflektovanom pritisku VUT-a $p = 9$ bar, odnosno ventilima otpornosti do 900 kPa. Pošto je $t/\tau \ll 1$, ovaj odnos se može zanemariti u odnosu na jedinicu, te se nameće zaključak da veličina eksponenta n nema uticaja na proces zatvaranja ventila, pa je svejedno koja se vrednost dodeljuje eksponentu n .

Diferencijalna jednačina (2) rešava se za slučajeve malih oscilacija (malih uglova otklona membrana ventila), i ve-

Sl. 2 – Mehanički model pokretnog sklopa protivudarnog ventila

likih oscilacija (velikih uglova otklona membrana ventila).

U slučaju malih oscilacija (malih uglova otklona) membrane ventila može se aproksimativno uzeti da je $\sin \varphi = \varphi$, pa diferencijalna jednačina (2) ima oblik:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = -\frac{p_f A x_T}{J} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^3 \cos \varphi \quad (3)$$

Opšte rešenje diferencijalne jednačine ima oblik:

$$\varphi = \varphi_h + \varphi_p \quad (4)$$

$$\varphi_h = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad (5)$$

$$\varphi_p = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (6)$$

gde je:

φ_h – homogeno rešenje diferencijalne jednačine (3),

φ_p – partikularno rešenje diferencijalne jednačine (3), koja moraju da zadovolje diferencijalnu jednačinu.

Opšte rešenje diferencijalne jednačine (3) ima oblik:

$$\varphi = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \frac{p_f A x_T}{J \omega^2} \left(-\frac{t^3}{\tau^3} - 3 \frac{t^2}{\tau^2} + 3 \frac{t}{\tau} - 6 \frac{t}{\omega^2 \tau^2} + \frac{6}{\omega^2 \tau^2} - 1 \right) \cos \varphi \quad (8)$$

Iz početnih uslova: 1. $t = 0$; $\varphi = \varphi_0$, dobija se konstanta integracije

$$C_1 = \varphi_0 - \frac{p_f A x_T}{J \omega^2} \left(\frac{6}{\omega^2 \tau^2} - 1 \right) \cos \varphi$$

2. $t = 0$; $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = 0$, dobija se $C_2 = 0$

Nakon uvođenja smene

$$\cos \omega t = 1 - \frac{\omega^2 t^2}{2}, \quad \sin \omega t = \omega t - \frac{\omega^3 t^3}{6} \quad i$$

vrednosti za integracione konstante C_1 i

Nakon sređivanja dobijaju se konstante integracije:

$$a = -\frac{p_f A x_T}{J \omega^2 \tau^3} \cos \varphi$$

$$b = -3 \frac{p_f A x_T}{J \omega^2 \tau^2} \cos \varphi$$

$$c = 3 \frac{p_f A x_T}{J \omega^2 \tau} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{\omega^2 \tau^2} \right) \cos \varphi$$

$$d = \frac{p_f A x_T}{J \omega^2} \left(\frac{6}{\omega^2 \tau^2} - 1 \right)$$

Partikularno rešenje diferencijalne jednačine (3) ima oblik:

$$\varphi_p = \frac{p_f A x_T}{J \omega^2} \left(-\frac{t^3}{\tau^3} - 3 \frac{t^2}{\tau^2} + 3 \frac{t}{\tau} - 6 \frac{t}{\omega^2 \tau^2} + \frac{6}{\omega^2 \tau^2} - 1 \right) \cos \varphi \quad (7)$$

C_2 , zanemarivanja članova u kojima figurišu veličine $\frac{t_3}{\tau^3}$; $\frac{t_2}{\tau^2}$; $\frac{t}{\tau}$; $\frac{t}{\tau^2} \ll 1$ nižeg reda

veličine, rešenjem dobijene jednačine po t uz granični uslov $\varphi = 0$; $t = t_z$, uvođenjem izraza $\omega^2 = \frac{mg x_T}{J}$ u dobijeni izraz,

dobija se analitički izraz vremena zatvaranja ventila u slučaju malih uglova otklona membrane ventila:

$$t_z = \left(\frac{2J\varphi_0}{mg x_T \varphi_0 + p_f A x_T \cos \varphi_0} \right)^{1/2} \quad (9)$$

U izrazu (9) figurišu veličine: J , m , x_T , φ_0 , p_f , koje je potrebno analitički definisati. Moment inercije J pokretnog sklopa određuje se po Steinerovoj teoremi (slika 3):

$$J = J_D + m_D a^2 + J_d + m_d a_1^2 \tag{10}$$

Na slici 3 šematski je prikazan izgled pokretnog sklopa ventila.

Analitički izraz momenta inercije diska ventila

Na slici 4 prikazan je disk membrane ventila.

Moment inercije membrane ventila, za osu koja prolazi kroz težište diska, definisan je izrazom na osnovu opšte definicije:

Sl. 3 – Pokretni sklop protivudarnog ventila

Sl. 4 – Membrana protivudarnog ventila

$$J_D = 2\pi\delta\gamma \left(\int_0^R r_1^3 dr_1 + \int_R^{R_1} \frac{1}{\cos\alpha} r_2^2 dr_2 + \int_{R_1}^{R_2} r_3^3 dr_3 \right)$$

$$J_D = 2\pi\delta\gamma \left[\frac{R^4}{4} + \frac{1}{4\cos\alpha} (R_1^4 - R^4) + \frac{1}{4} (R_2^4 - R_1^4) \right] \tag{11}$$

Analitički izraz momenta inercije držača diska ventila

Na slici 5 prikazan je držač diska ventila. Moment inercije držača diska

Sl. 5 – Držač membrane protivudarnog ventila

ventila za težišnu osu određuje se na osnovu opšte definicije izrazom:

$$J_d = \int_m r^2 dm = \gamma \delta_1 \int_{R_3}^{R_1} r^3 dr \int_0^{2\alpha_1} d\varphi_1$$

$$J_d = \frac{\gamma \delta_1 \alpha_1}{2} (R_4^4 - R_3^4) \quad (12)$$

Analitički izraz mase diska ventila

Masa membrane–diska ventila definisana je izrazom:

$$m_D = \pi \delta \gamma \left[R^2 + \frac{1}{\cos \alpha} (R_1^2 - R^2) + (R_2^2 - R_1^2) \right] \quad (13)$$

Analitički izraz mase držača diska ventila

Masa držača diska ventila definisana je izrazom:

$$m_d = \delta \gamma_1 (R_4^2 - R_3^2) \alpha_1 \quad (14)$$

Iz prethodna tri koraka lako je zapaziti sledeće:

– moment inercije držača diska ventila znatno je manji od momenta inercije diska $J_d \ll J_D$, pa se J_d može zanemariti;

– položajni moment inercije držača diska ventila znatno je manji od položajnog momenta inercije diska ventila $m_d a_1^2 \ll m_D a_1^2$, pa se $m_d a_1^2$ može zanemariti u odnosu na $m_D a_1^2 = m_D x_T^2$ (gde je $a = x_T$, slika 3);

– pošto je $m_d \ll m_D$, masa početnog sklopa ventila je $m = m_D$.

Nakon sređivanja, moment inercije pokretnog sklopa ventila, za osu koja prolazi kroz obrtnu tačku O_1 , iznosi:

$$J = J_D + m_D x_T^2 \quad (15)$$

Uvođenjem izraza (15) u jednačinu (9) dobija se analitički izraz vremena zatvaranja ventila u slučaju malih uglova otklona membrana ventila:

$$t_z = \left[\frac{2 (J_D + m_D x_T^2) \varphi_0^r}{m_D g x_T \varphi_0 + p_f \pi R_2^2 x_T \cos \varphi_0} \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$\text{pri čemu su } A = \pi R_2^2 \text{ i } \varphi_0^r = \frac{\pi}{180} \varphi_0^0 \quad (17)$$

Analitički izraz pritiska u frontu direktnog VUT-a

Pritisak u frontu direktnog VUT-a u funkciji reflektovanog pritiska [2,3,6,9] definisan je izrazom:

$$p_r = 2p_f + \frac{6p_f^2}{p_f + 7,2} [\text{bar}] \quad (18)$$

U jednačini (18) p_r je reflektovani pritisak VUT-a, koji u ovom slučaju predstavlja nivo otpornosti ventila. Za uslovljene otpornosti ventila 300, 600 i 900 kPa, prema jednačini (18) nalaze se odgovarajuće vrednosti p_f u frontu direktnog talasa i iznose 108000, 186000 i 253000 N/m², respektivno.

Analitički izraz vremena zatvaranja ventila u slučaju malih oscilacija definisan je analitičkim izrazima (11), (13), (15), (16), (17) i (18).

Definisanje analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila u slučaju velikih otklona uglova membrana ventila

Diferencijalna jednačina (2) može da se napiše u obliku:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (-p_f R_2^2 \pi x_T \cos \varphi - m g x_T \sin \varphi) \cdot \frac{1}{(J_D + m_D x_T^2)} \quad (19)$$

Nakon dvostruke integracije diferencijalne jednačine (19), uvođenjem početnih uslova $t=0$; $\varphi=\varphi_0$ i $t=0$; $\dot{\varphi}=\frac{d\varphi}{dt}=0$,

rešenjem diferencijalne jednačine po t , uz granični uslov $t = T_z$ za $\varphi = 0$, dobija se analitički izraz vremena zatvaranja ventila, oblika:

$$T_z = \left[\frac{2(J_D + m_D x_T^2) \varphi_0^{\text{rad}}}{m_D g x_T \sin \varphi_0 + p_f \pi R_2^2 x_T \cos \varphi_0} \right]^{1/2} \quad (20)$$

Upoređenjem analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila, pri malim uglovima otklona membrana ventila (9) i analitičkog izraza vremena zatvaranja ventila pri velikim uglovima otklona (20), može se zapaziti da su vremena zatvaranja računata po (20) duža, pošto $\sin \varphi$ sporije raste pri povećanju ugla od ugla φ .

Uporedna analiza vremena zatvaranja ventila

Pošto momenti $m_D g x_T \sin \varphi_0$, odnosno $m_D g x_T \varphi_0$, nemaju uticaja na vremena zatvaranja ventila, oni se mogu i zanemariti, a greška koja se pri tome čini iznosi 0,018% za ventile nazivnih prečnika 200 mm otpornosti 900 kPa.

Vreme zatvaranja ventila izračunava se po obrascu:

$$T_z = \left[\frac{2(J_D + m_D x_T^2) \varphi_0^{\text{rad}}}{p_f \pi R_2^2 x_T \cos \varphi_0} \right]^{1/2} \quad (21)$$

Analitički izrazi kojima je definisano vreme zatvaranja ventila

Na osnovu sprovedene analize, analitički izraz vremena zatvaranja ventila definisan je izrazom:

$$T_z = \left[\frac{2(J_D + m_D x_T^2) \varphi_0^{\text{rad}}}{p_f \pi R_2^2 x_T \cos \varphi_0} \right]^{1/2} \quad (21)$$

pri čemu su:

$$J_D = 2\pi\delta\gamma \left[\frac{R^4}{4} + \frac{1}{4 \cos \alpha} (R_1^4 - R^4) + \frac{1}{4} (R_2^4 - R_1^4) \right] \quad (11)$$

$$m_D = \pi\delta\gamma \left[R^2 + \frac{1}{\cos \alpha} (R_1^2 - R^2) + (R_2^2 - R_1^2) \right] \quad (13)$$

$$\varphi_0^{\text{rad}} = \frac{\pi}{180} \varphi_0^{\circ} \quad (17)$$

$$p_r = 2p_f + \frac{6p_f^2}{p_f + 7,2} [\text{bar}] \quad (18)$$

gde je:

δ [mm] – debljina materijala membrane – diska ventila;

γ [kg/m³] – zapreminska masa materijala diska ventila;

R, R_1 i R_2 [m] – odgovarajući poluprečnici diska ventila;

$\alpha = 30^\circ$ – ugao nagiba diska ventila;

m_D [kg] – masa diska ventila;

p_f [N/m²] – pritisak u frontu direktnog VUT-a;

φ_0 [°] – ugao otklona diska ventila u stepenima;

φ_0^{rad} [rad] – ugao otklona diska ventila u radijanima.

Potrebno je definisati i analitički izraz koeficijenta otpora ventila kako bi se postigao postavljeni cilj.

Metod nalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila sa membranom za regulaciju natpritiska

Koeficijent otpora ventila je funkcija nekoliko faktora [2,10,11,13,14] oblika:

$$\xi = f(D, Q, \rho, \varphi, k) \tag{22}$$

od kojih najveći uticaj imaju prečnik ventila i protok vazduha. Potrebno je doći do funkcije koja kvantitativno iskazuje uticaj dva pomenuta faktora na koeficijent otpora ventila.

Opis eksperimenta

Pad pritiska u ventilu $\Delta H' = \Delta H - \Delta H_1$ proporcionalan je dinamičkom pritisku ($p_d = \rho v^2/2$):

$$\Delta H - \Delta H_1 = \xi \frac{\rho v^2}{2} \tag{23}$$

Tabela 1

Oznake eksperimentalnih jedinica

D [mm]	Q [m³/h]	Merenje		
		1	2	3
100	188	1	10	19
	300	2	11	20
	750	3	12	21
150	188	4	13	22
	300	5	14	23
	750	6	15	24
200	188	7	16	25
	300	8	17	26
	750	9	18	27

Tabela 2

Tabela slučajnih brojeva

12	15	3
10	6	5
16	9	14
13	2	24
17	22	23
4	8	26
11	19	20
21	7	18
27	25	1

Ako se u jednačinu (23) brzina vazduha v iza ventila izrazi preko protoka Q i reši po ξ , dobija se:

$$\xi = \frac{\pi D^4 (\Delta H - \Delta H_1)}{8 \rho Q^2} \tag{24}$$

gde je:
 ΔH_1 [Pa] – natpritisak pri kome nastupa otvaranje ventila,
 ΔH [Pa] – pad pritiska u ventilu,
Q [m³/h] – zapreminski protok vazduha kroz ventil,
 ρ [kg/m³] – gustina vazduha,
D [m] – prečnik ventila.

Eksperiment se sastojao u tome da su za tri slična ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm, pri fiksnim protocima vazduha, merene odgovarajuće vrednosti otpora i na osnovu jednačine (24) izračunate odgovarajuće vrednosti koeficijenta ξ_i ventila. Ovde se radi o dvofaktornom eksperimentu. Randomizacija, planiranje i izvođenje eksperimenta izvršeno je po principu planiranog eksperimenta. Randomizacija je izvršena odabiranjem brojeva iz tabele slučajnih brojeva. Slučajnim izborom redosleda izvođenja eksperimentalnih jedinica izbegnut je uticaj sistemskih grešaka.

Rezultati eksperimenta

Sređeni rezultati eksperimentalnih istraživanja koeficijenta otpora ventila prikazani su u tabeli 3.

Broj eksperimentalnih jedinica iznosi:

$$N = abn \tag{25}$$

gde je:
a = 3 – nivo faktora Q;
b = 3 – nivo faktora D;

$n = 3$ – broj ponovljenih očitavanja
 $N = abn = 27$ – eksperimentalnih jedinica

Tabela 3

Rezultati merenja koeficijenta ξ_i ventila

Prečnik D [mm]	Protok vazduha Q [m³/h]	Koeficijent otpora ventila ξ_i			Aritme- tička – sredina ξ_i
		merenje			
		1	2	3	
100	188	4,20	4,10	4,20	4,17
	300	2,90	2,85	2,90	2,88
	750	1,40	1,42	1,41	1,41
150	188	7,20	7,20	7,10	7,17
	300	4,98	5,0	5,10	5,03
	750	2,50	2,45	2,44	2,46
200	188	10,70	10,80	10,70	10,73
	300	7,40	7,50	7,40	7,43
	750	3,65	3,65	3,70	3,67

Metode obrade eksperimentalnih podataka

Za nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila na osnovu eksperimentalnih podataka datih u tabeli 3 korišćene su metode matematičke statistike:

- provera jednorodnosti disperzija na osnovu Cohrenovog kriterijuma, tj. provera normalnosti raspodele izračunate veličine ξ_i ;
- disperziona analiza, tj. provera da li na koeficijent otpora ventila znatno utiču prečnik ventila i protok vazduha;
- regresiona analiza, pomoću koje se dolazi do analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom najmanjih kvadrata;
- provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila koja se sastoji u poređenju izračunatog koeficijenta odnosa disperzija V_0 sa Fisherovim kriterijumom F.

Ukoliko na koeficijent otpora ventila ξ znatno utiču prečnik ventila D i protok vazduha Q, onda ima smisla pristupiti nalaženju analitičkog izraza:

$$\xi = f_i(D, Q) \tag{26}$$

Da bi pokazali metode matematičke statistike, radi lakše analize, potrebno je uvesti pojam faktora i nivoa faktora.

Pri eksperimentalnom istraživanju odabrana su dva faktora za koje se pretpostavlja da znatno utiču na koeficijent otpora ξ ventila, a to su:
faktor B $\equiv$ D – prečnik ventila sa tri nivoa,
faktor A $\equiv$ Q – protok vazduha kroz ventile sa tri nivoa.

Tabela 4

Nivoi faktora

Faktor B D [mm]	Faktor A Q [m³/h]
100	188
	300
	750
150	188
	300
	750
200	188
	300
	750

Provera jednorodnosti disperzija

Da bi zaključci disperziona i regresiona analize bili dobri potrebno je proveriti normalnost raspodele izračunate veličine ξ_i . Normalnost raspodele za ξ_i proverava se preko Cohrenovog kriterijuma o jednorodnosti disperzija. Ukoliko je izračunata vrednost $G_{\max}$ za Cohrenov kriterijum manja od tabelarno dobijene vrednosti G_{tab} , disperzije su jednorodne i

raspodela rezultata za ξ može se smatrati normalnom.

Računska vrednost za Cohrenov kriterijum, na osnovu eksperimentalnih podataka, dobija se po [15,16] obrascu:

$$G_{\max} = \frac{\max|S_{\xi_i}^2|}{\Sigma S_{\xi_i}^2}$$

gde je:
 $\max|S_{\xi_i}^2|$ – maksimalna vrednost disperzije rezultata;
 $\Sigma S_{\xi_i}^2$ – zbir disperzija eksperimentalnih rezultata;
 $S_{\xi_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (\xi_i - \bar{\xi})^2$ – disperzija eksperimentalnih rezultata;
 $\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_1^n \xi_i$ – aritmetička sredina jedne kombinacije nivoa;
 $ss = (n-1)$ – stepen slobode.

Tabelarna vrednost za Cohrenov kriterijum G_{tab} određuje se iz odgovarajućih tabela [15,16] za stepene slobode: $n_1 = (n-1) = 3-1 = 2$ i $n_2 = ab(n-1) = 3 \cdot 3(3-1) = 18$, pri verovatnoći

95%. Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S_{\xi_i}^2$ prikazane su u tabeli 5.

Računska vrednost za Cohrenov kriterijum $G_{\max}$ na osnovu eksperimentalnih podataka iznosi:

$$G_{\max} = \frac{\max|S_{\xi_i}^2|}{\Sigma S_{\xi_i}^2} = \frac{6,70 \cdot 10^{-3}}{3,83 \cdot 10^{-2}} = 0,1749$$

Za verovatnoću od 95% Cohrenov kriterijum G_{tab} , prema [15] za stepene slobode $n_1 = (n-1) = 3-1 = 2$ i $n_2 = ab(n-1) = 3 \cdot 3(3-1) = 18$, iznosi $G_{\text{tab}} = 0,477$.

Kako je $G_{\max} < G_{\text{tab}}$ sledi da su disperzije jednorodne pa se može smatrati da je raspodela za koeficijent ξ_i ventila normalna. Dalje se može računati sa srednjom disperzijom ($S_{\xi_{sr}}^2$), koja je definisana izrazom:

$$S_{\xi_i}^2 = \frac{1}{ab} \Sigma S_{\xi_i}^2 = \frac{1}{3 \cdot 3} 3,83 \cdot 10^{-2} = 4,26 \cdot 10^{-3},$$

i stepenima slobode $n_1 = (n-1) = 2$ i $n_2 = ab(n-1) = 18$.

Disperziona analiza

Pomoću disperzione analize ispituje se da li na koeficijent otpora ventila znatno utiču prečnik ventila D (faktor B), protok vazduha Q kroz ventil (faktor A) i međudejstvo DQ (AB). Upoređenjem računskih vrednosti parametara V_{0A} , V_{0B} i V_{0AB} (koji definišu odnose srednjeg kvadrata faktora i srednjeg kvadrata greške) sa Fisherovim kriterijumom F , dobija se zavisnost koeficijenta otpora ventila, prečnika ventila i protoka vazduha kroz ventil.

Da bi se izvršila analiza potrebno je izračunati odgovarajuće sume kvadrata faktora A , B i međudejstva AB , greške,

Tabela 5

Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S_{\xi_i}^2$

D [mm]	Q [m³/h]	$\bar{\xi}_i$	$S_{\xi_i}^2$	Stepen slobode ss
100	188	4,17	$6,70 \cdot 10^{-3}$	2
	300	2,88	$1,70 \cdot 10^{-3}$	2
	750	1,41	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2
150	188	7,17	$6,70 \cdot 10^{-3}$	2
	300	5,03	$1,70 \cdot 10^{-3}$	2
	750	2,46	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2
200	188	10,76	$6,70 \cdot 10^{-3}$	2
	300	7,43	$1,70 \cdot 10^{-3}$	2
	750	3,67	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2
Ukupno: $3,83 \cdot 10^{-2}$				18

Tabela 6

Vrednosti za $\Sigma \xi_i$

D [mm]	Protok vazduha Q [m ³ /h]			ΣB
	188	300	750	
100	12,5	8,65	4,23	25,38
150	21,5	15,05	7,39	43,97
200	32,5	22,30	11,00	65,50
ΣA	66,20	46,03	22,69	134,85

srednje kvadrata faktora, i vrednosti parametara V_{0A} , V_{0B} i V_{0AB} [15]. U tabeli 6 prikazane su vrednosti za $\Sigma \xi_i$.

Opšta suma OS: OS = 134,85 (27)

Suma kvadrata:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \xi_{ijk}^2 = 882,8285 \quad (28)$$

Opšta suma kvadrata OSK:

$$OSK = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \xi_{ijk}^2 - \frac{(OS)^2}{N} \quad (29)$$

$$OSK = 205,68528$$

Suma kvadrata za faktor A, SKA:

$$SKA = \sum_{i=1}^a \frac{(SA)^2}{nb} - \frac{(OS)^2}{nab} \quad (30)$$

$$SKA = 105,70642, \text{ sa stepenom slobode } (a - 1) = 3 - 1 = 2$$

Suma kvadrata za faktor B, SKB:

$$SKB = \sum_{j=1}^b \frac{(SB)^2}{na} - \frac{(OS)^2}{nab} \quad (31)$$

$$SKB = 89,583088, \text{ sa stepenom slobode } (b - 1) = 3 - 1 = 2$$

Suma kvadrata za međudejstvo AB, SKAB:

$$SKAB = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{SAB}{n} - \left[SKA + SKB + \frac{(OS)^2}{nab} \right] \quad (32)$$

$$SKAB = 13,997627, \text{ sa stepenom slobode } (a - 1)(b - 1) = 4$$

Suma kvadrata za grešku SKG:

$$SKG = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \xi_{ijk}^2 - \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{SAB}{n} \quad (33)$$

$$SKG = 882,8285 - 882,78796 = 0,04543, \text{ sa stepenom slobode } ab(n - 1) = 18$$

Srednji kvadrat SK:

$$SK = \frac{SK \text{ Faktora}}{ss - 1} \quad (34)$$

Parametar V_0 :

$$V_0 = \frac{(\text{srednji kvadrat}) SK}{SKG} \quad (35)$$

Izračunate sume kvadrata za faktore A, B, međudejstvo AB, srednji kvadrati faktora, greške, parametar V_0 , Fisherov kriterijum F pri verovatnoći od 99% date su u tabeli 7.

F je vrednost parametra iz Fisherove raspodele. Fisherovi kriterijumi iz tabele za verovatnoću $V = 0,99$ i stepene slobode 2 i 18, odnosno 4 i 18 iznose: $F_1 = 6,01$ i $F_2 = 4,58$, pri čemu su: $n_1 = 2$ – stepen slobode faktora A i B; $n_2 = 4$ – stepen slobode međudejstva faktora AB; $n_3 = 18$ – stepen slobode greške.

Pošto su kriterijumi V_{0A} , V_{0B} i V_{0AB} mnogo veći od Fisherovih kriterijuma, faktori A i B i međudejstvo AB faktora

Disperziona analiza

Izvor promene	Stepen slobode	Suma kvadrata	Srednji kvadrat	Parametar V_0	F za $V = 0,99$
Faktor A	2	105,70642	105,70642	2607,4404	6,01
Faktor B	2	89,583088	89,583088	2209,7292	6,01
Međudejstvo AB	4	13,997627	13,997627	115,09228	4,58
Greška	18	0,0638667	0,0638667	–	–
Suma	27	–	–	–	–

A i B znatno utiču na koeficijent otpora ξ ventila sa membranom za regulaciju natpritiska. To znači da ima smisla pristupiti nalaženju analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila ξ u funkciji prečnika ventila D i protoka vazduha Q kroz ventil.

Regresiona analiza

Pošto je disperzionom analizom dokazano da na koeficijent otpora ventila ξ znatno utiču prečnik ventila i protok vazduha kroz ventil, regresionom analizom pokušaće se naći analitički izraz koeficijenta otpora ventila ξ u zavisnosti od D i Q , koristeći eksperimentalne rezultate za ξ date u tabeli 3.

Pogodna analitička pretpostavka [2,10] za ξ bila bi:

$$\xi = K_1 D^e Q^f \tag{36}$$

Određivanje konstanti (K_1 , e , f) vrši se numeričkom obradom eksperimentalnih rezultata, metodom najmanjih kvadrata. Ova metoda sastoji se u tome da se minimiziraju odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionog polinoma:

$$|\varepsilon(Y_i - a_0 - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i})^2|_{\min} = (\varepsilon^2)_{\min} \tag{37}$$

pri čemu su:

$$Y_i = \ln \xi; a_0 = \ln K_1; a_1 = e; X_{1i} = \ln D; a_f = f; X_{2i} = \ln Q_i \tag{38}$$

Minimalna odstupanja nalaze se diferenciranjem regresivnog polinoma po traženim parametrima i izjednačavanjem izvoda sa nulom:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_0} &= -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i}) = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_1} &= -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i}) X_{1i} = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_2} &= -2 \sum (Y_i - a_0 - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i}) X_{2i} = 0 \end{aligned} \tag{39}$$

Nakon sređivanja dobija se sistem jednačina:

$$\begin{aligned} Na_0 + a_1 \sum X_{1i} + a_2 \sum X_{2i} &= \sum Y_i \\ a_0 \sum X_{1i} + a_1 \sum X_{1i}^2 + a_2 \sum X_{2i} X_{1i} &= \sum X_{1i} Y_i \\ a_0 \sum X_{2i} + a_1 \sum X_{1i} X_{2i} + a_2 \sum X_{2i}^2 &= \sum X_{2i} Y_i \end{aligned} \tag{40}$$

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

$$\xi = 0,442 \frac{D^{1,36952}}{Q^{0,777025}} \tag{41}$$

Sl. 6 – Zavisnost koeficijenta otpora ventila ξ od prečnika ventila i protoka vazduha

Analitički izraz koeficijenta otpora ventila (41) prikazan je grafički na slici 6. Potrebno je izvršiti proveru adekvatnosti analitičkog izraza (41).

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} definisan je [2,11,12,15,17] izrazom

$$V_{01} = \frac{S_{\text{nead}}^2}{S_{\xi_{\text{sr}}}^2}$$

Disperzija neadekvatnosti S_{nead}^2 definisana je izrazom

$$S_{\text{nead}}^2 = \frac{1}{N - d_1} (\bar{\xi} - \xi_{\text{rač}})^2$$

Stepen slobode za disperziju neadekvatnosti je: $N - d_1 = 27 - 3 = 24$, pri čemu je N – broj eksperimentalnih jedinica, d_1 – broj članova regresionog polinoma, $\xi_{\text{rač}}$ – vrednost koeficijenta otpora ventila računata na osnovu analitičkog izraza (41).

Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ξ ventila izvršena je u tabeli 8.

Disperzija neadekvatnosti iznosi:

$$S_{\text{nead}}^2 = \frac{1}{27 - 3} 0,003733 = 1,5554 \cdot 10^{-4}$$

Koeficijent odnosa disperzija V_{01} iznosi:

$$V_{01} = \frac{S_{\text{nead}}^2}{S_{\xi_{\text{sr}}}^2} = \frac{1,5554 \cdot 10^{-4}}{2,461 \cdot 10^{-4}} = 0,60$$

Fisherov kriterijum F za verovatnoću od 99% i stepene slobode: $n_1 = N -$

Tabela 8

Provera adekvatnosti analitičkog izraza (41)

D [mm]	Q [m ³ /h]	$\bar{\xi}$	$\bar{\xi}_{\text{rač}}$	$\bar{\xi} - \bar{\xi}_{\text{rač}}$
100	188	4,17	4,17	0,0
	300	2,88	2,88	0,0
	750	1,41	1,41	0,0
150	188	7,17	7,22	0,0026
	300	5,03	5,02	0,0001
	750	2,46	2,46	0,0
200	188	10,76	10,71	0,000484
	300	7,43	7,45	0,000303
	750	3,67	3,65	0,000260
Ukupno:				0,003733

$d_1 = 24$, i $n_2 = ab(n - 1) = 18$, iz tabele, prema [15], iznosi $F = 3,02$. Pošto je koeficijent $V_{01} = 0,60 < 3,02 = F$ znatno manji od Fisherovog kriterijuma, znači da je dobijeni analitički izraz koeficijenta otpora ventila adekvatan sa verovatnoćom od 99%.

Protivudarni ventili sa membranom za regulaciju natpritiska u objektu definisani su analitičkim izrazima: (11), (13), (17), (18), (21) i (41).

Kriterijum za izbor rešenja

Cilj analize je da se predlože – propišu kriterijumi za izbor rešenja protivudarnih ventila sa membranom za regulaciju natpritiska u objektu. Analiza bi trebalo da pokaže da li su primenljivi isti kriterijumi za izbor univerzalnih rešenja ovih ventila kao kod protivudarnih ventila za dovod svežeg i odvod vazduha iz objekta. Da bi se to ostvarilo potrebno je za ventile nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm na osnovu analitičkih izraza kojima su definisani slični ventili, i postavljenog kriterijuma vremena zatvaranja od 2 ms za ventile otpornosti 900 kPa izvršiti proveru postavljene pretpostavke.

Tabelarni prikaz dimenzija i drugih podataka o ventilima nazivnih prečnika dat je u tabeli 9. Na osnovu analitičkih izraza (11), (13), (17), (18), (21) i (41), kojima su definisani ventili sa membranom za regulaciju natpritiska, i ulaznih podataka za ventile, prikazanih u tabeli 9, konstruisani su:

Tabela 9

Ulazni podaci za ventile

Oznaka i veličina		Oznaka i nazivni prečnik ventila		
		PUVRN100	PUVRN150	PUVRN200
Poluprečnik diska ventila	R [m]	0,0125	0,0210	0,0250
Poluprečnik diska ventila	R_1 [m]	0,0525	0,0775	0,100
Poluprečnik diska ventila	R_2 [m]	0,060	0,0875	0,112
Ugao nagiba diska	α [°]	30	30	30
Rastojanje težišta diska ventila od obrtne tačke	x_T [m]	0,078	0,105	0,148
Zapreminska masa diska ventila	ρ [kg/m ³]	2600	2600	2600
Debljina diska ventila	δ [mm]	2,50	2,50	2,0
Vreme zatvaranja ventila, otpornosti 900 kPa	T_z [s]	0,0020	0,0020	0,0020
Pritisak u frontu direktnog VUT-a (za otpornost ventila od 900 kPa)	P_f [N/m ²]	253 000	253 000	253 000
Pritisak u frontu direktnog VUT-a (za otpornost ventila od 600 kPa)	P_f [N/m ²]	186 000	186 000	186 000
Pritisak u frontu direktnog VUT-a (za otpornost ventila od 300 kPa)	P_f [N/m ²]	108 000	108 000	108 000
Ugao otklona membrane ventila	φ_0 [°]	40	30	30

– dijagram zavisnosti koeficijenta otpora ventila ξ od prečnika i protoka vazduha, prikazan na slici 6;

– dijagram zavisnosti vremena zatvaranja ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm od pritiska u frontu direktnog VUT-a, prikazan na slici 7.

Dijagram na slici 7 predstavlja zakon zatvaranja sličnih ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm pri dejstvu VUT-a nastalog pri nuklearnoj eksploziji.

Kriterijumi za izbor rešenja ventila su:

- otpori strujanju vazduha kroz ventile, tj. otpori ventila ($H \leq 200$ Pa);
- dinamički parametar – vreme zatvaranja ventila pri dejstvu VUT-a;
- nivo natpritiska pri kojem se ventil otvara,
- protok vazduha [18,19] kroz ventil ($Q \leq Q_{\text{nom}}$).

Analitički izrazi otpora ventila u funkciji protoka vazduha

Opšti analitički izraz otpora ventila ima oblik:

$$\Delta H - \Delta H_i = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \cdot \frac{Q^2}{3600^2} \xi \quad (42)$$

gde je:

ΔH [Pa] – otpor ventila;

D [m] – nazivni prečnik ventila;

ρ [kg/m³] – gustina vazduha koji protiče kroz ventil;

ΔH_i [Pa] – otpor ventila pri kom nastupa otvaranje;

Q [m³/h] – protok vazduha kroz ventil;

ξ – koeficijent otpora ventila.

Vrednost otpora ventila pri kojem nastupa trenutak njegovog otvaranja može da se izmeri eksperimentalno. Na osnovu tako izmerenih približnih vrednosti za otpor ΔH_i mogu da se postave

Sl. 8 – Zavisnost otpora ventila ΔH od prečnika i protoka vazduha Q

analitički izrazi otpora ventila u funkciji prečnika ventila i protoka vazduha.

Analitički izrazi optimalnih otpora ventila ΔH_{opt} dobijaju se uvođenjem odgovarajućih koeficijenata otpora ventila $\xi = \xi_{\text{opt}}$ (slika 6 i jednačina (41)). Analitički izrazi optimalnih otpora ventila nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm glase:

$$\Delta H_{\text{opt}|100} = 3,110 \cdot 10^{-3} Q^2 + 20 \quad (43)$$

$$\Delta H_{\text{opt}|150} = 6,2598 \cdot 10^{-4} Q^2 + 25 \quad (44)$$

$$\Delta H_{\text{opt}|200} = 1,7139736 \cdot 10^{-4} Q^2 + 30 \quad (45)$$

Analitički izrazi (43), (44) i (45) prikazani su na slici (8).

Prema [18] nominalni protoci vazduha kroz ventile iznose:

$Q_{\text{nom}} = 188 \text{ [m}^3/\text{h]}$ – za ventile nazivnog prečnika 100 mm,

$Q_{\text{nom}} = 375 \text{ [m}^3/\text{h]}$ – za ventile nazivnog prečnika 150 mm,

$Q_{\text{nom}} = 750 \text{ [m}^3/\text{h]}$ – za ventile nazivnog prečnika 200 mm.

Kriterijumi za izbor optimalnih karakteristika ventila

Do optimalnih karakteristika (rešenja) protivudarnih ventila sa membranom za regulaciju natpritiska dolazi se iz uslova:

- da vreme zatvaranja ventila otpornosti 900 kPa bude 2 ms;
- da protok vazduha kroz ventil bude nominalan, tj. $Q = Q_{\text{nom}}$;
- za nominalne protoke vazduha kroz ventile, koeficijent otpora ventila je optimalan, tj. $\xi = \xi_{\text{opt}}$.

Analitički izrazi kojima su definisane karakteristike ventila, glase:

$$T_z = \left[\frac{2(J_D + m_D x_T^2) \varphi_0^I}{p_f \pi R_2^2 x_T \cos \varphi_0} \right]^{1/2} \quad (21)$$

$$J_D = 2\pi\delta\gamma \left[\frac{R^4}{4} + \frac{1}{4\cos\alpha} (R_1^4 - R^4) + \frac{1}{4} (R_2^4 - R_1^4) \right] \quad (11)$$

$$m_D = \pi\delta\gamma \left[R^2 + \frac{1}{\cos\alpha} (R_1^2 - R^2) + (R_2^2 - R_1^2) \right] \quad (13)$$

$$\varphi_0^I = \frac{\pi}{180} \varphi_0^0 \quad (17)$$

$$\xi = 0,442 \frac{D^{1,36952}}{Q^{0,777025}} \quad (41)$$

$$\Delta H_{\text{opt}|100} = 3,110 \cdot 10^{-3} Q^2 + 20 \quad (43)$$

$$\Delta H_{\text{opt}|150} = 6,2598 \cdot 10^{-4} Q^2 + 25 \quad (44)$$

$$\Delta H_{\text{opt}|200} = 1,7139736 \cdot 10^{-4} Q^2 + 30 \quad (45)$$

gde je:

δ [mm] – debljina membrane ventila;

γ [kg/m³] – zapreminska masa materijala membrane ventila;

R , R_1 i R_2 [m] – odgovarajući prečnici membrane ventila;

α [°] – ugao nagiba membrane ventila;

m_D [kg] – masa pokretnog sloja ventila;

p_f [N/m²] – pritisak u frontu direktnog VUT-a;

φ_0 [°] – ugao otklona membrane – diska ventila.

Zaključak

U radu je prikazan originalan metod analitičkog definisanja sličnih protivudarnih ventila sa membranom, namenjenih za zaštitu od prodora impulsa pritiska direktnog VUT-a nastalog pri nuklearnoj

eksploziji u unutrašnjost objekta za regulaciju natpritiska u objektu i odvod korisnog vazduha iz objekta.

Postavljen je analitički izraz vremena zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom direktnog VUT-a nuklearne eksplozije u zavisnosti od radnih i geometrijskih karakteristika ventila.

Primenom metoda matematičke statistike dat je originalan metod nalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora sličnih konstrukcija ventila na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka za koeficijente otpora ventila u zavisnosti od karakterističnih veličina ventila (prečnika i protoka vazduha) i metod provere adekvatnosti analitički dobijenog izraza koeficijenta otpora ventila.

Modeli ventila su uopšteni, pa su primenljivi za familiju sličnih ventila.

Kao dinamički kriterijum o oceni valjanosti ventila usvojeno je vreme zatvaranja ventila. Izražen u opštem obliku, a zatim primenjen na ventile nazivnih prečnika 100, 150 i 200 mm otpornosti 300, 600 i 900 kPa.

Iz uslova vremena zatvaranja ventila od 2 ms za ventile otpornosti 900 kPa došlo se do optimalnih karakteristika ventila.

Analitički izrazi optimalnih otpora ventila ΔH_{opt} dobijeni su uvođenjem optimalnih vrednosti koeficijenata otpora ventila za normalne protoke vazduha, u opšti analitički izraz otpora ventila.

Kriterijumi za izbor optimalnih vremena zatvaranja protivudarnih ventila sa aksijalno pomičnim pokretnim sklopom, primenljivi su za protivudarne ventile sa membranom za regulaciju natpritiska, i to: $T_z = 2,0$ ms – za ventile otpornosti 900 kPa, $T_z = 2,4$ ms – za ventile otpornosti 600 kPa, $T_z = 3,2$ ms – za ventile otpornosti 300 kPa.

Postavljeni su novi, stroži kriterijumi – nova vremena zatvaranja ventila za ocenu valjanosti ventila umesto još uvek važećih, široko postavljenih [18]: $T_z = 3,0$ ms – za ventile otpornosti 600 kPa, $T_z = 5,0$ ms – za ventile otpornosti 300 kPa.

Literatura:

- [1] Knežević, D.: Metod analitičkog definisanja reprezentativnih ventila mehaničkih sistema za zaštitu od prodora udarnog talasa u unutrašnjost objekta, Vojnotehnički glasnik, 1999, br. 3–4, str. 60.
- [2] Knežević, M. D.: Prilog analitičkom definisanju pneumatičkih karakteristika sistema ventila specijalne namene, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1994.
- [3] Knežević, D.: Istraživanje optimalnih rešenja ventila za zaštitu od vazdušnouudarnih talasa nuklearne eksplozije u vazduhu i uporedna analiza teorijskih i eksperimentalnih rezultata, magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1983.
- [4] Knežević, D.: Analitički metod definisanja kombinovanog protivudarnog ventila za regulaciju nadpritiska, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXVI, 1986, br. 9, str. 13–24.
- [5] Mandić, J.: Simulatori impulsa pritiska, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1974.
- [6] Mandić, J.: Ostvarivanje udarnog kratkotrajnog impulsa pritiska u udarnim cevima izjednačavajućeg pritiska, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1976.
- [7] Oertel, H.: Stosshrohre, Springer, Wien, 1966.
- [8] Rahmaturin, H., A., Semenov, S., S.: Udarne trubi, Izdanje inostrane literature, Moskva, 1962.
- [9] Schardin, H.: Simulierung von Druckstossen beliebig langer Dauer in einem Stosswellenrohr, Wehrtechnische Monatschrift, 1966, 4.
- [10] Gurevič, A.: Proračun regulacijskih ventila, Lenjingrad, MAŠGIZ, Moskva, 1968.
- [11] Knežević, D.: Analitički metod definisanja ventila za regulaciju protoka vazduha, izgradnja skloništa i drugih zaštitnih objekata, Savez inženjera i tehničara Srbije, Zbornik radova, Beograd, 1985, str. 261–270.
- [12] Knežević, D.: Nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom potpunog eksperimenta, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXV, 1985., 7–8, str. 21–26.
- [13] Škoparija, V.: Teorija sličnih modela, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1980.
- [14] Voronjec, K., Obradović, N.: Mehanika fluida, Naučna knjiga, Beograd, 1970.
- [15] Pantelić, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1986.
- [16] Vukadinović, V.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, drugo izmenjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1978.
- [17] Knežević, D.: Metod iznalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora protivudarnih ventila, Naučno-tehnički pregled, Vol. XXXV, 1985, br. 10, str. 37–45.
- [18] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju skloništa (Sl. list SFRJ br. 11/1976)
- [19] Švajcarski propisi federalne službe za civilnu zaštitu od 15. oktobra 1966.