

Metod analitičkog definisanja otpora sličnih pneumatskih ventila

Dr Dragan Knežević, dipl.inž.¹⁾

Primenom metoda matematičke statistike definisan je algoritam matematičkog modeliranja aerodinamičkih karakteristika pneumatskih ventila, ocene saglasnosti modela i eksperimentalnih rezultata istraživanja. Na osnovu algoritma definisani su analitički izrazi koeficijenata otpora ventila u funkciji radnih i geometrijskih karakteristika ventila i karakterističnih graničnih načina ugradnje ventila u objekat. Korišćenjem analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila, dobijenih na osnovu potpunog eksperimenta, prikazan je originalan metod definisanja koeficijenata otpora i otpora sličnih ventila koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika ventila tretiranih u eksperimentu. Kvalitativna ocena metoda (definisanja koeficijenata otpora i otpora sličnih ventila) i dobijenih modela izvršena je na osnovu numeričkih iznosa koeficijenata višestruke i parcijalne korelacije. Definisani su optimalni koeficijenti otpora i otpori ventila.

Ključne reči: Pneumatski ventili, aerodinamičke karakteristike, matematičko modeliranje, plan eksperimenta, metode matematičke statistike, metod najmanjih kvadrata, adekvatnost modela, koeficijent otpora ventila, otpor ventila, ocena modela.

Korišćene oznake i simboli

| | | | |
|----------------------|--|----------------------------|--|
| ξ | – koeficijent otpora ventila, | V_{0A}, V_{0B}, V_{AB} | – parametar koji definiše odnos srednjeg kvadrata faktora A, B , međudejstva AB i srednjeg kvadrata greške, respektivno, |
| D | – nazivni prečnik ventila, | F | – Fisherov kriterijum, |
| h | – hod pokretnog sklopa ventila, | V_{01} | – koeficijent odnosa disperzija, |
| φ | – vlažnost vazduha, | S_{nead}^2 | – disperzija neadekvatnosti, |
| ρ | – gustina vazduha, | c, d, c_1, a_1, a_2 | – konstante integracije, |
| t_v | – temperatura vazduha, | f | – broj članova regresionog polinoma, |
| ΔH | – otpor strujanju vazduha kroz ventile, | ξ_{opt} | – optimalni koeficijent otpora ventila, |
| Q | – zapreminski protok vazduha kroz ventil, | $r_{11}, r_{12}, r_{12.1}$ | – koeficijent parcijalne korelacije, |
| v | – brzina strujanja vazduha iza ventila, | $R_{11.2}$ | – koeficijent višestruke korelacije, |
| N | – broj eksperimentalnih jedinica, | h_n | – nominalna vrednost hoda pokretnog sklopa ventila, |
| a | – nivo faktora $h \equiv A$, | A_i | – protočni presek ventila (površina svetlog otvora), |
| b | – nivo faktora $D \equiv B$, | D_m | – prečnik membrane ventila, |
| n | – broj ponovljenih očitavanja, | D_g | – prečnik glavčine ventila, |
| G_{max} | – računska vrednost za Cochrenov kriterijum, | n_1 | – broj rebra ventila, |
| G_{tab} | – tabelarna vrednost za Cochrenov kriterijum, | δ_1 | – debljina rebra ventila, |
| $\max/S_{\xi_i}^2$ | – maksimalna vrednost disperzije rezultata, | h_{ni} | – hod pokretnog sklopa ventila (prečnik membrane D_{mi} površine svetlog otvora A_{i_j}) |
| $S_{\xi_i}^2$ | – disperzija eksperimentalnih podataka, | h_{Rn} | – nominalna vrednost hoda pokretnog sklopa ventila, koji je uzet za reper |
| $\bar{\xi}$ | – aritmetička sredina jedne kombinacije nivoa, | ξ_{iA} | – koeficijent otpora ventila sa adapterom, |
| $S_{\xi_{sr}}^2$ | – srednja disperzija, | ξ_{iBA} | – koeficijent otpora ventila bez adaptera, |
| $\Sigma \xi_i$ | – zbir jedne kombinacije nivoa koeficijenata otpora ventila, | h | – proračunski hod pokretnog sklopa ventila, |
| $\Sigma S_{\xi_i}^2$ | – zbir disperzija rezultata, | ΔH | – otpor strujanju vazduha kroz ventile, |
| OS | – opšta suma, | $\xi_{opt A}$ | – optimalni koeficijent otpora ventila sa adapterom, |
| OSK | – opšta suma kvadrata, | $\xi_{opt BA}$ | – optimalni koeficijent otpora ventila bez adaptera, |
| SKF | – suma kvadrata za faktor, | ΔH_A | – otpor strujanju vazduha kroz ventile sa adapterom, |
| $SKAB$ | – suma kvadrata za međudejstvo AB faktora A i B | | |
| SKG | – suma kvadrata za grešku, | | |
| SK | – srednji kvadrat, | | |
| ss | – stepen slobode odgovarajućeg faktora, | | |

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

| | |
|---------------------|--|
| ΔH_{BA} | – otpor strujanju vazduha kroz ventile bez adaptera, |
| $\Delta H_{opt A}$ | – optimalni otpor strujanju vazduha kroz ventile sa adapterom, |
| $\Delta H_{opt BA}$ | – optimalni otpor strujanju vazduha kroz ventile bez adaptera, |
| Q_A | – protok vazduha kroz ventile sa adapterom, |
| Q_{BA} | – protok vazduha kroz ventile bez adaptera. |

Uvod

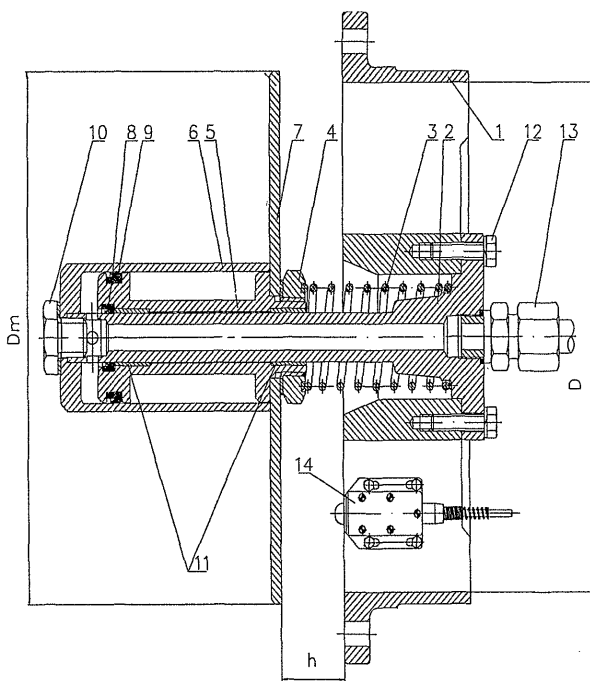
U radu se tretira metod analitičkog definisanja koeficijenta otpora ξ protivudarnih ventila sistema automatskog zatvaranja ventilacionih otvora zaštitnih objekata, u funkciji nazivnog prečnika ventila i hoda h pokretnog sklopa mehanički sličnih konstrukcija ventila.

Cilj istraživanja, obuhvaćenog ovim radom, je analitičko definisanje koeficijenta otpora ξ strujanju vazduha kroz slične konstrukcije ventila zavisno od nazivnog prečnika D ventila i veličine hoda h pokretnog sklopa sličnih konstrukcija ventila, načina ugradnje ventila, na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka.

Dalji cilj je da se analitički definiše postupak za nalaznje koeficijenta otpora ξ sličnih konstrukcija ventila radi postizanja pouzdanog postupka prognoze aerodinamičkih karakteristika konstrukcija ventila i -tog prečnika.

Analiziran je uticaj prečnika D ventila i veličine hoda h pokretnog sklopa ventila na koeficijent otpora ξ ventila za brzine strujanja vazduha (neposredno ispred ventila) do 30 m/s.

Šematski izgled ventila dat je na sl.1.



Slika 1. Šematski izgled ventila tipa PPUV: 1- telo ventila, 2- nosač pokretnog sklopa ventila, 3- opruga, 4- navrtka, 5-klip ventila, 6-cilindar ventila, 7- membrana, 8- manžetna, 9- manžetna, 10- vijak, 11- čaura, 12- vijak, 13- priključak, 14- signalni prekidač

Pokretni sklop ventila može da se pomera u aksijalnom pravcu osovine pod dejstvom pritiska u instalaciji sistema

i/ili impulsa pritiska vazdušnodarnog talasa (VUT). Ventil je u zatvorenom položaju sve dok je klip pokretnog sklopa ventila pod dejstvom pritiska u instalaciji sistema i/ili dok se spoljašnja atmosfera nalazi pod natpritiskom. Kada prestane dejstvo pritiska u instalaciji sistem i/ili kada nastupi negativna faza VUT-a, pokretni sklop ventila dolazi, pod dejstvom potpritiska i opruge u suprotnom smeru, u otvoreni položaj. Po prestanku dejstva VUT-a, pokretni sklop ventila dolazi pod dejstvom opruge u otvoreni položaj, čime se obezbeđuje slobodan protok vazduha kroz ventilacioni otvor objekta.

Konceptija i konstrukciona rešenja ovih ventila trebalo bi da obezbede njihovu otpornost i funkcionalnost pri visokim udarnim impulsnim opterećenjima, tj. njihovo zatvaranje pri dejstvu impulsa pritiska VUT-a, i otvaranje po prestanku njegovog dejstva, a u slučaju da spoljna atmosfera nije kontaminirana, čime se obezbeđuje slobodan protok svežeg vazduha u zaštitni objekat. Da bi ostvario navedene funkcije, ventil mora ispunjavati niz tehničkih zahteva. Od posebnog značaja je da vreme zatvaranja ventila pod dejstvom VUT-a (u slučaju eventualnog otkaza funkcija detektora sistema) bude što kraće i da otpori strujanju vazduha kroz ventil u uslovima ventilacije objekta budu što manji.

Opis eksperimentalnih istraživanja

Da bi se postigao postavljeni cilj, potrebno je naći funkcionalnu vezu između koeficijenta otpora ξ ventila, prečnika D ventila i hoda h pokretnog sklopa ventila. Koeficijent otpora ventila je, u opštem slučaju, funkcija nekoliko faktora [1-9]:

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

od kojih najveći uticaj imaju prečnik D ventila i hod h pokretnog sklopa ventila. Tokom eksperimenta parametri (φ, ρ, t_v) su konstantni. Pad pritiska ΔH proporcionalan je dinamičkom pritisku $(p_d = \rho v^2 / 2)$:

$$\Delta H = \xi \frac{\rho v^2}{2}$$

Ako se u jednačini za ΔH brzina vazduha v iza ventila izrazi preko Q i reši po ξ , dobija se:

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

pri čemu je: ΔH [Pa]- pad pritiska u ventilu, Q [m³/h]- zapreminski protok vazduha kroz ventil, ρ [kg/m³]- gustina vazduha.

Za dva slična ventila nazivnih prečnika 400 mm i 600 mm pri hodu pokretnog sklopa ventila od 25; 50; 75; 100 i 120 mm mereni su otpori ΔH strujanju vazduha kroz ventile i dinamički pritisak $(p_d = \rho v^2 / 2)$, odnosno protok vazduha kroz ventile. Na osnovu jednačine za ξ , računata su odgovarajuće vrednosti koeficijenta otpora ξ_i ventila.

Uticaj prečnika ventila na koeficijent otpora ventila

Potražiće se u kom odnosu stoje koeficijenti otpora (ξ/ξ_i) ventila za prečnike D i D_i pri istom protoku vazduha kroz ventile. Odgovarajući analitički izrazi koeficijenta otpora ventila glase:

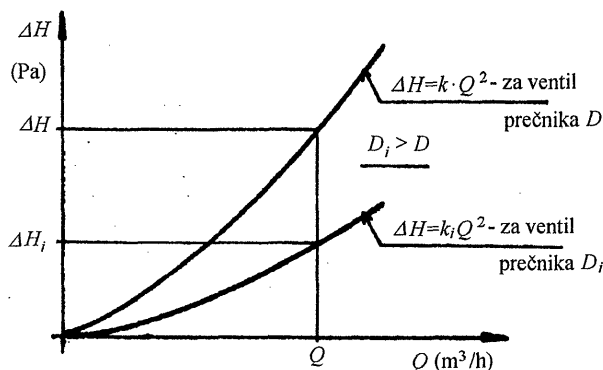
$$\xi = \frac{\pi^2 D^4 \Delta H}{8 \rho Q^2} \quad \xi_i = \frac{\pi^2 D_i^4 \Delta H_i}{8 \rho Q^2} \quad (1)$$

Ako se potraži odnos koeficijenata otpora ventila, dobija se:

$$\frac{\xi}{\xi_i} = \left(\frac{D}{D_i}\right)^4 \frac{\Delta H}{\Delta H_i} \quad (2)$$

Otpori ventila ΔH i ΔH_i mogu se analitički izraziti u opštem obliku (sl.2):

$$\Delta H = K Q^2 \quad \Delta H_i = K_i Q^2 \quad (3)$$



Slika 2. Zavisnost otpora ventila od protoka vazduha

Ako se izrazi za ΔH i ΔH_i uvrste u (2), rešenjem jednačine po ξ_i , dobija se:

$$\xi_i = \xi \frac{K_i}{K} \left(\frac{D_i}{D}\right)^4 \quad (4)$$

Pošto je $D_i > D$, sledi da je $\Delta H > \Delta H_i$, odnosno $K > K_i$. Analizom izraza (4) dolazi se do zaključka: povećanjem prečnika ventila raste i koeficijent otpora ventila, i obrnuto.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja

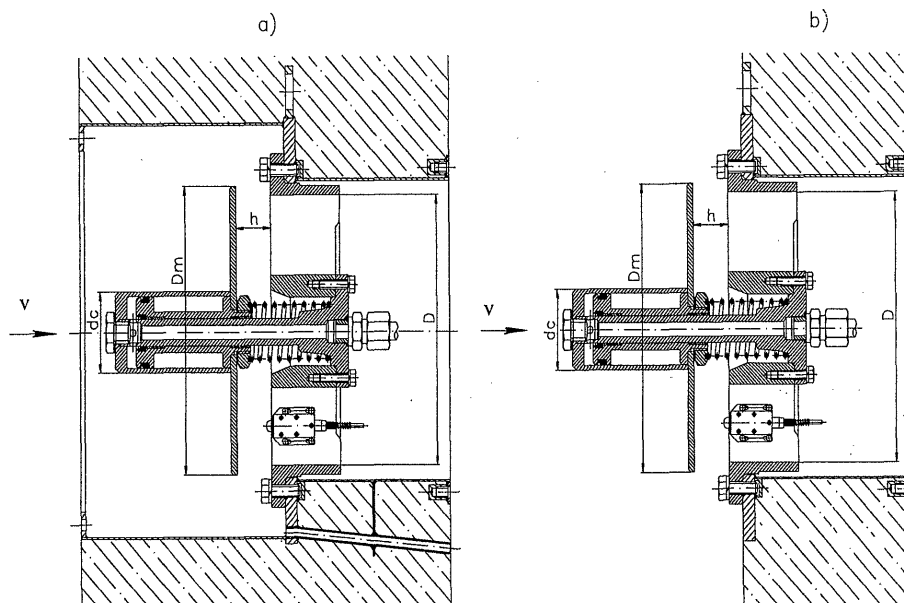
Randomizacija, planiranje i izvođenje eksperimenta izvršeno je po principima planiranog eksperimenta. Sredeni rezultati merenja za koeficijent otpora ξ_i ventila nazivnih prečnika 400 mm i 600 mm sa adapterom i bez adaptera (sl.3), respektivno su dati u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Rezultati merenja koeficijenta ξ_i ventila sa adapterom

| D (mm) | h (mm) | Koeficijent otpora ventila ξ_i | | | $\bar{\xi}_i$ |
|-----------|-----------|------------------------------------|-------|---------|---------------|
| | | merenje | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | |
| 400 | 25 | 29,40 | 29,45 | 29,37 | 29,4064 |
| | 50 | 12,90 | 12,95 | 13,15 | 13,0 |
| | 75 | 8,20 | 8,16 | 8,168 | 8,1760 |
| | 100 | 5,82 | 5,831 | 5,83 | 5,8270 |
| | 120 | 4,713 | 4,72 | 4,70 | 4,7110 |
| 600 | 25 | 52,90 | 52,86 | 52,9019 | 52,8873 |
| | 50 | 23,20 | 23,10 | 23,12 | 23,1414 |
| | 75 | 14,40 | 14,28 | 14,33 | 14,33654 |
| | 100 | 11,48 | 11,50 | 11,51 | 11,49743 |
| | 120 | 8,90 | 8,88 | 8,90 | 8,8933 |

Tabela 2. Rezultati merenja koeficijenta ξ_i ventila bez adaptera

| D (mm) | h (mm) | Koeficijent otpora ventila ξ_i | | | $\bar{\xi}_i$ |
|-----------|-----------|------------------------------------|--------|--------|---------------|
| | | merenje | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | |
| 400 | 25 | 27,10 | 27,13 | 27,13 | 27,12 |
| | 50 | 10,30 | 10,26 | 10,241 | 10,267 |
| | 75 | 5,95 | 6,0 | 5,987 | 5,979 |
| | 100 | 3,96 | 3,95 | 3,9622 | 3,9574 |
| | 120 | 3,0 | 3,10 | 3,0988 | 3,0666 |
| 600 | 25 | 43,82 | 43,84 | 43,89 | 43,850 |
| | 50 | 16,80 | 16,84 | 16,76 | 16,80 |
| | 75 | 9,50 | 9,5132 | 9,50 | 9,5044 |
| | 100 | 6,43 | 6,4175 | 6,45 | 6,4325 |
| | 120 | 5,06 | 5,0502 | 5,05 | 5,0534 |



Slika 3. Karakteristični granični načini ugradnje pneumatičkih ventila: a) sa adapterom i b) bez adaptera

Broj eksperimentalnih jedinica iznosi:

$$N = abn \quad (5)$$

gde je: $a=5$ - nivo faktora Q ; $b=2$ - nivo faktora D ; $n=3$ - broj ponovljenih očitavanja; $N = abn = 30$ - broj eksperimentalnih jedinica po opitu.

Metode matematičke statistike za obradu eksperimenta

Za nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ξ_i ventila (sa adapterom i bez adaptera) na osnovu eksperimentalnih podataka datih u tabelama 1 i 2, korišćene su metode matematičke statistike [1,8,10,11,13,14]:

1. Provera jednorodnosti disperzija na osnovu Cochrenovog kriterijuma, tj. provera normalnosti raspodele izračunate veličine ξ_i ;
2. Disperziona analiza, pomoću koje se na osnovu Fisherovog kriterijuma proverava da li na koeficijent otpora ξ ventila značajno utiču prečnik D ventila i hod h pokretnog sklopa ventila;
3. Regresiona analiza, pomoću koje se dolazi do analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom najmanjih kvadrata. Metoda se sastoji u minimizaciji odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionog polinoma pretpostavljenog oblika i
4. Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila koja se sastoji u poređenju izračunatog koeficijenta odnosa disperzija V_0 sa Fisherovim kriterijumom F .

Ako na koeficijent otpora ξ ventila značajno utiču prečnik D ventila i hod h pokretnog sklopa ventila, ima smisla pristupiti nalaženju analitičkog izraza:

$$\xi = f_i(D, h) \quad (6)$$

Za primenu metoda matematičke statistike potrebno je uvesti pojam faktora i nivoa faktora.

Faktori i nivoi faktora

U eksperimentalnom istraživanju odabrana su dva faktora za koje se pretpostavlja da značajno utiču na koeficijent otpora ξ ventila, a to su:

- faktor $A \equiv h$ - hod pokretnog sklopa ventila, sa pet nivoa i
- faktor $B \equiv D$ - prečnik ventila, sa dva nivoa.

Tabela 3. Nivoi faktora

| Prečnik ventila D (mm) | Hod pokretnog sklopa ventila h (mm) |
|--------------------------|---------------------------------------|
| 400 | 25 |
| | 50 |
| | 75 |
| | 100 |
| | 120 |
| 600 | 25 |
| | 50 |
| | 75 |
| | 100 |
| | 120 |

Provera jednorodnosti disperzija

Da bi zaključci disperziona i regresiona analize bili dobri, potrebno je proveriti normalnost raspodele izračunate veličine ξ_i . Provera se vrši Cochrenovim kriterijumom o jednorodnosti disperzija. Ukoliko je izračunata vrednost G_{\max} za Cochrenov kriterijum manja od propisanog G_{tab} (tabelarno dobijen podatak), disperzije su jednorodne i raspodela rezultata za ξ_i može se smatrati normalnom. Računska vre-

dnost za Cochrenov kriterijum, na osnovu eksperimentalnih podataka, računa se po izrazu:

$$G_{\max} = \frac{\max |S_{\xi_i}^2|}{\sum S_{\xi_i}^2} \quad (7)$$

pri čemu su: $\max |S_{\xi_i}^2|$ - maksimalna vrednost disperzije rezultata; $\sum S_{\xi_i}^2$ - zbir disperzija eksperimentalnih rezultata;

$S_{\xi_i}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi})^2$ - disperzija eksperimentalnih rezultata; $\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i$ - aritmetička sredina jedne kombinacije nivoa; $ss = (n-1)$ - stepen slobode.

Tabelarna vrednost za Cochrenov kriterijum G_{\max} određuje se iz odgovarajućih tabela [8,14] za stepene slobode $n_1 = (n-1) = 2$ i $n_2 = ab(n-1) = 5 \cdot 2(3-1) = 20$, pri verovatnoći 95%. Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S_{\xi_i}^2$ date su u tabelama 4 i 5.

Tabela 4. Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S_{\xi_i}^2$

| D (mm) | h (m) | $\bar{\xi}_i$ | $S_{\xi_i}^2$ | Stepen slobode |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------------------|----------------|
| 400 | 25 | 29,4064 | $3,26688 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 50 | 13,0 | $3,499 \cdot 10^{-2}$ | 2 |
| | 75 | 8,1760 | $6,4 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| | 100 | 5,8270 | $7,3999 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| | 120 | 4,7110 | $2,05999 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| 600 | 25 | 52,8873 | $1,11974 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 50 | 23,1414 | $5,60588 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 75 | 14,33654 | $7,2667147 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 100 | 11,497435 | $4,6843707 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| | 120 | 8,8933 | $4,489 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| UKUPNO: $5,3116541 \cdot 10^{-2}$ | | | | 20 |

Tabela 5. Vrednosti aritmetičkih sredina $\bar{\xi}_i$ i disperzija rezultata $S_{\xi_i}^2$

| D (mm) | h (m) | $\bar{\xi}_i$ | $S_{\xi_i}^2$ | Stepen slobode |
|---------------------------------|---------|---------------|---------------------------|----------------|
| 400 | 25 | 27,12 | $6,40 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| | 50 | 10,267 | $1,814 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 75 | 5,979 | $1,346 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 100 | 3,957 | $8,456 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| | 120 | 3,0666 | $4,7335999 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| 600 | 25 | 43,850 | $2,60 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| | 50 | 16,80 | $3,19999 \cdot 10^{-3}$ | 2 |
| | 75 | 9,5044 | $1,161599 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| | 100 | 6,4325 | $5,3749999 \cdot 10^{-4}$ | 2 |
| | 120 | 5,0534 | $6,5360 \cdot 10^{-5}$ | 2 |
| UKUPNO: $1,33355 \cdot 10^{-2}$ | | | | 20 |

Cochrenov kriterijum G_{\max} , računat po jednačini (7), iznosi:

$$G_{\max 1} = \frac{\max |S_{\xi_{i1}}^2|}{\sum S_{\xi_{i1}}^2} = \frac{3,499 \cdot 10^{-2}}{5,3116541 \cdot 10^{-2}} = 0,1225; \text{ odnosno}$$

$$G_{\max 2} = \frac{\max |S_{\xi_{i2}}^2|}{\sum S_{\xi_{i2}}^2} = \frac{3,1999 \cdot 10^{-3}}{1,33355 \cdot 10^{-2}} = 0,240$$

Za verovatnoću od 95%, Cochrenov kriterijum G_{tab} za stepene slobode $n_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$ i $n_2 = ab(n - 1) = 5 \cdot 2(3 - 1) = 20$ iznosi, prema [8], $G_{tab} = 0,270$.

Kako je $G_{max} < G_{tab}$, sledi zaključak da su disperzije jednorodne, te se može smatrati da je raspodela za koeficijent otpora ξ_i ventila normalna. Dalje se može računati sa srednjim disperzijama:

$$S_{\xi_{s1}}^2 = \frac{1}{ab} \sum S_{\xi_{i1}}^2 = \frac{1}{5 \cdot 2} 5,312 \cdot 10^{-2} \cong 5,312 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{\xi_{s2}}^2 = \frac{1}{ab} \sum S_{\xi_{i2}}^2 = \frac{1}{5 \cdot 2} 1,33355 \cdot 10^{-2} = 1,33 \cdot 10^{-3}$$

i stepenima slobode $n_1 = 2$ i $n_2 = 20$.

Disperziona analiza

Pomoću disperzione analize ispituje se da li na koeficijent otpora ξ ventila značajno utiču hod h pokretnog sklopa (faktor A), prečnik D ventila (faktor B) i međudejstvo hD (AB). Poređenjem 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 odgovor na pitanje o zavisnosti koeficijenta otpora ventila, hoda pokretnog sklopa i prečnika ventila.

Da bi se izvršila napred navedena analiza, potrebno je izračunati odgovarajuće sume kvadrata faktora, greške, srednje kvadrata faktora, pa vrednosti parametara V_{0A} , V_{0B} i V_{0AB} .

U tabelama 6 i 7 date su vrednosti za $\sum \xi_i$.

Tabela 6. Vrednosti za $\sum \xi_i$

| Prečnik ventila D (mm) | Hod pokretnog sklopa ventila (mm) | | | | | $\sum B$ |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|
| | 25 | 50 | 75 | 100 | 120 | |
| 400 | 88,22 | 8,65 | 24,528 | 17,481 | 14,133 | 183,362 |
| 600 | 158,6619 | 15,05 | 43,01 | 34,49 | 26,88 | 332,2619 |
| $\sum A$ | 246,8819 | 108,42 | 67,538 | 51,971 | 40,813 | 515,6239 |

Tabela 7. Vrednosti za $\sum \xi_i$

| Prečnik ventila D (mm) | Hod pokretnog sklopa ventila (mm) | | | | | $\sum B$ |
|--------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 25 | 50 | 75 | 100 | 120 | |
| 400 | 81,36 | 30,8010 | 17,937 | 11,8722 | 9,19980 | 151,170 |
| 600 | 131,55 | 50,40 | 28,5132 | 19,2975 | 15,1602 | 244,9209 |
| $\sum A$ | 212,910 | 81,210 | 46,4502 | 31,1697 | 24,360 | 396,0909 |

Opšta suma, OS :

$$OS_1 = 515,6239 \quad OS_2 = 396,0909$$

Suma kvadrata:

$$\left(\sum_1^a \sum_1^b \sum_1^n \xi_{ijk}^2 \right)_1 = 14718,286$$

$$\left(\sum_1^a \sum_1^b \sum_1^n \xi_{ijk}^2 \right)_2 = 9792,0984$$

Opšta suma kvadrata, OSK :

$$OSK = \sum_1^a \sum_1^b \sum_1^n \xi_{ijk}^2 - \frac{(OS)^2}{N}$$

$$OSK_1 = 5856,0191; \quad OSK_2 = 4562,4984$$

Suma kvadrata za faktor A, SKA :

$$SKA = \sum_1^a \frac{(SA)^2}{nb} - \frac{(OS)^2}{nab}$$

$SKA_1 = 4743,3391$ i $SKA_2 = 4044,8751$; sa stepenom slobode $(a - 1) = 5 - 1 = 4$

Suma kvadrata za faktor B, SKB :

$$SKB = \sum_1^b \frac{(SB)^2}{na} - \frac{(OS)^2}{nab}$$

$SKB_1 = 89,583088$ i $SKB_2 = 293,97436$; sa stepenom slobode $(b - 1) = 2 - 1 = 1$

Suma kvadrata za međudejstvo AB, $SKAB$:

$$SKAB = \sum_1^a \sum_1^b \frac{SAB}{n} - \left[SKA + SKB + \frac{(OS)^2}{nab} \right]$$

$(SKAB)_1 = 373,58662$ i $(SKAB)_2 = 224,63823$; sa stepenom slobode $(a - 1)(b - 1) = 4$

Suma kvadrata za grešku, SKG :

$$SKG = \sum_1^a \sum_1^b \sum_1^n \xi_{ijk}^2 - \sum_1^a \sum_1^b \frac{SAB}{n}$$

$(SKG)_1 = 0,05405$; $(SKG)_2 = 0,01080$; sa stepenom slobode $ab(n - 1) = 20$

Srednji kvadrat, SK :

$$SK = \frac{SK \text{ faktora}}{ss - 1}$$

Parametar, V_0 :

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

Izračunate sume kvadrata za faktore A, B i međudejstvo AB, srednji kvadrati faktora, greške, parametar V_0 , Fisherov kriterijum F pri verovatnoći od 99%, dati su u tabelama 8 i 9.

Tabela 8. Disperziona analiza

| Izvor promene | Stepen slobode | Suma kvadrata | Srednji kvadrat | Parametar V_0 | F za $V = 0,99$ |
|----------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| faktor A | 4 | 4743,3391 | 1581,1130 | 29252,785 | 4,43 |
| faktor B | 1 | 739,03933 | 739,03933 | 13673,253 | 8,10 |
| međudejstvo AB | 4 | 373,58662 | 124,52887 | 2303,9569 | 4,43 |
| greška | 20 | 0,05405 | 0,0027025 | 0,050 | / |
| suma | 29 | / | / | / | / |

Tabela 9. Disperziona analiza

| Izvor promene | Stepen slobode | Suma kvadrata | Srednji kvadrat | Parametar V_0 | F za $V = 0,99$ |
|----------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| faktor A | 4 | 4044,8751 | 1348,2917 | 124841,82 | 4,43 |
| faktor B | 1 | 292,97436 | 292,97436 | 27127,255 | 8,10 |
| međudejstvo AB | 4 | 224,63823 | 74,879410 | 6933,2787 | 4,43 |
| greška | 20 | 0,01080 | / | / | / |
| suma | 29 | / | / | / | / |

Fisherovi kriterijumi (F) iz tabele u [12] za verovatnoću $V = 0,99$ i stepene slobode 4 i 20, odnosno 1 i 20, iznose: $F_1 = 4,43$, $F_2 = 8,10$ i $F_3 = 4,43$ za međudejstvo AB .

Pošto su parametri V_{0A} , V_{0B} i V_{0AB} mnogo veći od Fisherovih kriterijuma, to faktori A i B i međudejstvo AB faktora A i B značajno utiču na koeficijent otpora ξ ventila. Znači, može se pristupiti nalaženju analitičkog izraza koeficijenta otpora ξ ventila u funkciji hoda h pokretnog sklopa ventila i prečnika D ventila.

Regresiona analiza

Disperzionom analizom je dokazano da na koeficijent otpora ξ ventila značajno utiču hod h pokretnog sklopa, prečnik D ventila, kao i međudejstvo hD . Korišćenjem eksperimentalnih rezultata za ξ , datih u tabelama 1 i 2, regresionom analizom pokušaće se naći analitički izraz koeficijenta otpora ξ ventila zavisno od h i D .

Postoji više analitičkih pretpostavki [1-5, 12,14,15] za ξ . Jedna od njih, pogodna za primenu, bila bi:

$$\begin{aligned}\xi_1 &= K_1 D^c h^d \\ \xi_2 &= K_2 D^{c_1} h^{d_1}\end{aligned}\quad (8)$$

Ako se jednačine (8) logaritmuju:

$$\begin{aligned}\ln \xi_1 &= \ln K_1 + c \ln D + d \ln h \\ \ln \xi_2 &= \ln K_2 + c_1 \ln D + d_1 \ln h\end{aligned}\quad (9)$$

i uvedu smene:

$$\begin{aligned}Y &= \ln \xi_1; a_0 = \ln K_1; a_1 = c; X_1 = \ln D; a_2 = d; X_2 = \ln h \\ Y_1 &= \ln \xi_2; a_{01} = \ln K_2; a_3 = c_1; X_1 = \ln D; a_4 = d_1; X_2 = \ln h\end{aligned}$$

dobijaju se jednačine linearne regresije oblika:

$$\begin{aligned}Y &= a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 \\ Y_1 &= a_{01} + a_3 X_1 + a_4 X_2\end{aligned}\quad (10)$$

Ako se u obzir uzmu greške eksperimenta ε i ε_1 , dobiće se izrazi:

$$\begin{aligned}Y &= a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \varepsilon \\ Y_1 &= a_{01} + a_3 X_1 + a_4 X_2 + \varepsilon_1\end{aligned}\quad (11)$$

Određivanje konstanti (a_0, a_1, a_2) i (a_{01}, a_3, a_4) vrši se obradom eksperimentalnih rezultata, metodom najmanjih kvadrata [1,3,4,8,13,16-22]. Metoda se sastoji u minimiziranju odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionih polinoma:

$$\left| \varepsilon(Y_1 - a_0 - a_1 X_1 - a_2 X_2) \right|_{\min} = (\varepsilon^2)_{\min} \quad (12)$$

$$\left| \varepsilon(Y_1 - a_{01} - a_3 X_1 - a_4 X_2) \right|_{\min} = (\varepsilon_1^2)_{\min} \quad (13)$$

Minimalna odstupanja nalaze se diferenciranjem gornjih funkcija po traženim parametrima i izjednačavanjem izvoda sa nulom. Nakon sređivanja dobija se sistem jednačina:

$$\begin{aligned}Na_0 + a_1 \Sigma X_{1i} + a_2 \Sigma X_{2i} &= \Sigma Y_i \\ a_0 \Sigma X_{1i} + a_1 \Sigma X_{1i}^2 + a_2 \Sigma X_{2i} X_{1i} &= \Sigma X_{1i} Y_i \\ a_0 \Sigma X_{2i} + a_1 \Sigma X_{1i} X_{2i} + a_2 \Sigma X_{2i}^2 &= \Sigma X_{2i} Y_i\end{aligned}\quad (14)$$

odnosno:

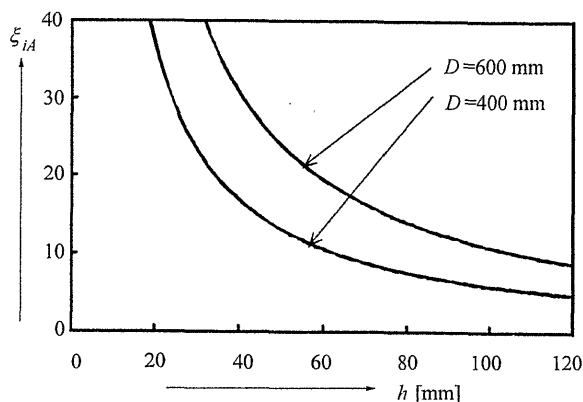
$$\begin{aligned}Na_{01} + a_3 \Sigma X_{1i} + a_4 \Sigma X_{2i} &= \Sigma Y_i \\ a_{01} \Sigma X_{1i} + a_3 \Sigma X_{1i}^2 + a_4 \Sigma X_{2i} X_{1i} &= \Sigma X_{1i} Y_i \\ a_{01} \Sigma X_{2i} + a_3 \Sigma X_{1i} X_{2i} + a_4 \Sigma X_{2i}^2 &= \Sigma X_{2i} Y_i\end{aligned}\quad (15)$$

Posle obrade eksperimentalnih podataka datih u tabelama 1 i 2 (rešenja sistema jednačina) dobijaju se analitički izrazi koeficijenata otpora ventila sa adapterom i bez adaptera, oblika:

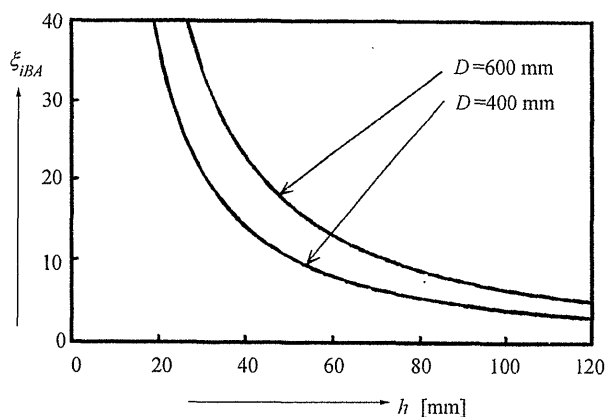
$$\xi_{iA} = 0,1431 \cdot D^{1,4996} \cdot h^{-1,1440} \quad (16)$$

$$\xi_{iAB} = 1,8095 \cdot D^{1,1945} \cdot h^{-1,3837} \quad (17)$$

Grafički prikazi analitičkih izraza (16 i 17) koeficijenata otpora ventila dati su na slici 4 i 5, respektivno.



Slika 4. Zavisnost koeficijenata otpora ξ_{iA} ventila sa adapterom od hoda h pokretnog sklopa ventila i prečnika D ventila



Slika 5. Zavisnost koeficijenata otpora ξ_{iBA} ventila bez adaptera od hoda h pokretnog sklopa ventila i prečnika D ventila

Potrebno je izvršiti proveru adekvatnosti analitičkih izraza (16 i 17) koeficijenata otpora ventila.

Provera adekvatnosti analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila

Provera adekvatnosti analitičkih izraza koeficijenta otpora ξ_i ventila vršiće se poređenjem koeficijenata odnosa disperzija V_{01} sa Fisherovim kriterijumom F .

$$V_{01} = \frac{S_{nead}^2}{S_{\xi, sr}^2} \quad (18)$$

gde su: S_{nead}^2 - disperzija neadekvatnosti; $S_{\xi, sr}^2$ - srednja disperzija.

Disperzija neadekvatnosti računa se po izrazu:

$$S_{\text{nead}}^2 = \frac{1}{N-f} (\bar{\xi} - \xi_{\text{rač}})^2 \quad (19)$$

Stepen slobode za disperziju neadekvatnosti je $N - f = 30 - 3 = 27$, gde su N - broj eksperimentalnih jedinica, f - broj članova regresionog polinoma a $\xi_{\text{rač}}$ - vrednosti koeficijenata otpora ventila računati na osnovu analitičkih izraza (16 i 17).

Podaci za $\bar{\xi}$, $\xi_{\text{rač}}$, $(\bar{\xi} - \xi_{\text{rač}})^2$ izračunati su i dati u tabelama 10 i 11.

Tabela 10. Provera adekvatnosti analitičkog izraza (16)

| D (mm) | h (mm) | $\bar{\xi}$ | $\xi_{\text{rač}}$ | $(\bar{\xi} - \xi_{\text{rač}})^2$ |
|----------|----------|-------------|--------------------|------------------------------------|
| 400 | 25 | 29,4064 | 28,730428 | 0,45693687 |
| | 50 | 13,0 | 13,0 | $7,8138528 \cdot 10^{-7}$ |
| | 75 | 8,1760 | 8,1757912 | $4,3581572 \cdot 10^{-8}$ |
| | 100 | 5,8270 | 5,8830650 | $3,1432888 \cdot 10^{-3}$ |
| | 120 | 4,7110 | 4,7755422 | $4,1657059 \cdot 10^{-3}$ |
| 600 | 25 | 52,8873 | 52,772419 | $1,3197637 \cdot 10^{-2}$ |
| | 50 | 23,1414 | 23,880188 | 0,54580875 |
| | 75 | 14,33645 | 15,017397 | 0,46356652 |
| | 100 | 11,497435 | 10,806088 | 0,47795984 |
| | 120 | 8,8933 | 8,8935181 | 0,014767906 |
| UKUPNO: | | | | 1,9795473 |

Tabela 11. Provera adekvatnosti analitičkog izraza (17)

| D (mm) | h (mm) | $\bar{\xi}$ | $\xi_{\text{rač}}$ | $(\bar{\xi} - \xi_{\text{rač}})^2$ |
|----------|----------|-------------|--------------------|------------------------------------|
| 400 | 25 | 27,12 | 27,012074 | $1,165385 \cdot 10^{-2}$ |
| | 50 | 10,267 | 10,352182 | $7,2559731 \cdot 10^{-3}$ |
| | 75 | 5,979 | 5,9071746 | $5,158888 \cdot 10^{-3}$ |
| | 100 | 3,9574 | 3,9673991 | $9,9982 \cdot 10^{-5}$ |
| | 120 | 3,0666 | 3,0827990 | $2,624076 \cdot 10^{-4}$ |
| 600 | 25 | 43,850 | 43,843655 | $6,3450 \cdot 10^{-3}$ |
| | 50 | 16,80 | 16,802764 | $7,6396959 \cdot 10^{-6}$ |
| | 75 | 9,5044 | 9,5880134 | $6,9912006 \cdot 10^{-3}$ |
| | 100 | 6,4325 | 6,4395381 | $4,9534851 \cdot 10^{-5}$ |
| | 120 | 5,0534 | 5,0037320 | $2,4669102 \cdot 10^{-3}$ |
| UKUPNO: | | | | $4,0291386 \cdot 10^{-2}$ |

Disperzija neadekvatnosti računata po (19) iznosi:

$$S_{\text{nead}_1}^2 = \frac{1}{30-3} 1,9795473 = 7,33 \cdot 10^{-2}$$

$$S_{\text{nead}_2}^2 = \frac{1}{30-3} 4,0291386 \cdot 10^{-2} = 1,49 \cdot 10^{-3}$$

Koeficijent odnosa disperzija V_{0i} , definisan sa (18), iznosi:

$$V_{01} = \frac{S_{\text{nead}_1}^2}{S_{\xi_{i1}}^2} = \frac{7,3316569 \cdot 10^{-2}}{5,311654 \cdot 10^{-2}} = 1,380$$

$$V_{02} = \frac{S_{\text{nead}_2}^2}{S_{\xi_{i2}}^2} = \frac{1,4922736 \cdot 10^{-3}}{1,33355 \cdot 10^{-2}} = 0,112$$

Fisherov kriterijum za verovatnoću od 99% i stepene slobode $n_1 = N - f = 27$ i $n_2 = ab(n-1) = 20$, prema [8] iznosi $F = 2,63$. Kako su koeficijenti V_{01} i V_{02} znatno manji od Fisherovog kriterijuma, može se zaključiti da su dobijeni analitički izrazi koeficijenata otpora ventila adekvatni verovatnoći od 99%.

Numerička ocena saglasnosti dobijenih analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila sa eksperimentalnim rezultati-

ma dobija se preko koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije.

Numerička ocena adekvatnosti analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila

Numerička ocena saglasnosti analitičkih izraza koeficijenata otpora ξ_i ventila, dobijenih metodom najmanjih kvadrata, sa eksperimentalnim rezultatima dobija se preko koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije.

Regresionom analizom, metodom najmanjih kvadrata, nađeni su analitički izrazi (16 i 17) koeficijenata otpora ventila zavisno od prečnika D ventila i hoda h pokretnog sklopa ventila, na osnovu eksperimentalnih rezultata za ξ_i . Za slučaj trodimenzionalne zavisnosti koeficijenta otpora $\xi_i = K_1 D^c h^c$ ventila (slučaj dve nezavisno promenljive D i h), koeficijent višestruke korelacije $R_{i,12}$, izražena pomoću koeficijenata parcijalne korelacije r_{i1} , r_{i2} , r_{12} i $r_{i2,1}$, ima oblik [1,14]:

$$R_{i,12} = \sqrt{1 - [(1 - r_{i1}^2)(1 - r_{i2,1}^2)]} \quad (20)$$

Koeficijenti parcijalne korelacije definišu se na osnovu sistema normalnih jednačina (14).

Za potrebe analize, koeficijentu otpora ventila ξ dodeljuje se indeks „1”, prečniku D ventila indeks „1” i hodu h pokretnog sklopa ventila indeks „2”: $\xi_i = K_1 D_1^c h_2^d$.

Koeficijenti parcijalne korelacije $r_{i2,1}$, r_{i1} , r_{i2} i r_{12}

Koeficijent parcijalne korelacije $r_{i2,1}$ definisan je izrazom:

$$r_{i2,1} = \frac{r_{i2} - r_{i1}r_{21}}{\sqrt{(1 - r_{i1}^2)(1 - r_{21}^2)}} \quad (21)$$

Koeficijent parcijalne korelacije $r_{i2,1}$ definiše korelaciju između koeficijenta otpora ξ_i ventila i hoda h pokretnog sklopa ventila pri konstantnom prečniku ventila ($D = \text{const}$).

Koeficijenti parcijalne korelacije r_{i1} , r_{i2} i r_{12} definisani su izrazima:

$$r_{i1} = \frac{\sum X_{1i} Y_i}{\sqrt{(\sum X_{1i}^2)(\sum Y_i^2)}} = \frac{B(1)}{\sqrt{(X(1,1))C(0)}} \quad (22)$$

$$r_{i2} = \frac{\sum X_{2i} Y_i}{\sqrt{(\sum X_{2i}^2)(\sum Y_i^2)}} = \frac{B(2)}{\sqrt{(X(2,2))C(0)}}$$

$$r_{12} \equiv r_{21} = \frac{\sum X_{1i} X_{2i}}{\sqrt{(\sum X_{1i}^2)(\sum X_{2i}^2)}} = \frac{X(1,2)}{\sqrt{(X(1,1))(X(2,2))}} \quad (23)$$

Sistem jednačina (14) matricno predstavljen, ima oblik:

$$\begin{bmatrix} N & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{2i} X_{1i} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{1i} X_{2i} & \sum X_{2i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(0) \\ B(1) \\ B(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{1i} Y_i \\ \sum X_{2i} Y_i \end{bmatrix} \quad (24)$$

Na osnovu opšteg oblika funkcionalne veze koeficijenta otpora ξ_i ventila, sistema jednačina (14 i 15), analitičkih izraza koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije, izrađen je program KNEZ 1 [1] za pronalaženje analitičkih izraza koeficijenata otpora ξ_i ventila i numeričkih iznosa koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije. Na osnovu eksperimentalnih podataka datih u tabelama 1 i 2, pomoću programa KNEZ 1 nađeni su analitički izrazi koeficijenata ot-

pora ventila i numerički iznosi koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije. Koeficijenti parcijalne korelacije i koeficijenti višestruke korelacije za podatke date u tabelama 1 i 2 iznose: $r_{12,1} = 0,9949$; $R_{1,12} = 0,9997$ i $r'_{12,1} = 0,9996$; $R'_{1,12} = 0,9999$, respektivno.

Definisanje analitičkih izraza koeficijenata otpora i otpora sličnih ventila koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika ventila tretiranih u eksperimentu

Cilj je da se na osnovu analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila, dobijenih na osnovu potpunog eksperimenta, definiše metod pronalazjenja analitičkih izraza koeficijenata otpora i otpora sličnih ventila koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika ventila razmatranih u eksperimentu.

Potrebno je da se na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka definišu analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila, i na osnovu numeričkih iznosa karakterističnih koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije izvrši kvalitativna ocena nivoa saglasnosti dobijenih modela sa teorijsko-eksperimentalnim podacima, odnosno sa eksperimentalno dobijenim podacima, datim u tabelama 1 i 2.

Definisanje protočnih veličina ventila

Veličina hoda pokretnog sklopa ventila određuje se na osnovu jednačine kontinuiteta $Av = \text{const}$, iz koje sledi [1]:

$$h_n = \frac{A_1}{\pi D_m} \quad (25)$$

gde je: A_1 - protočni presek ventila (površina svetlog otvora); D_m - prečnik membrane ventila.

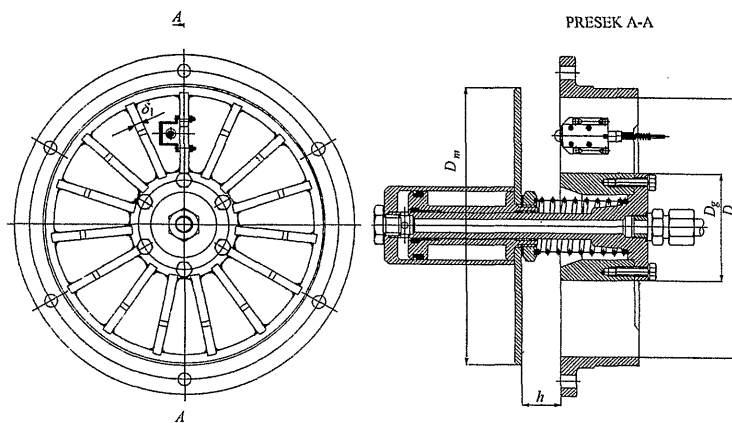
Površina A_1 svetlog otvora ventila definisana je jednačinom [1]:

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} - \left[\frac{\pi D_g^2}{4} + n_1 \delta_1 \frac{D - D_g}{2} \right] \quad (26)$$

gde je: D - prečnik svetlog otvora (nazivni prečnik ventila); D_g - prečnik glavčine ventila; n_1 - broj rebara ventila i δ_1 - debljina reba ventila.

Na slici 6 dat je šematski izgled ventila sa veličinama koje definišu napred date izraze kojima je definisan hod pokretnog sklopa ventila.

Za ventile nazivnih prečnika 300; 350; 400; 500 i 600 mm, na osnovu jednačine kontinuiteta i geometrijskih veličina ventila, izračunate su nominalne vrednosti hoda pokretnog sklopa ventila. U tabeli 12 dat je prikaz geometrij-



Slika 6. Šematski izgled pneumatičkog protivudarnog ventila tipa PPUV

skih veličina ventila i nominalnih vrednosti hoda pokretnog sklopa ventila.

Tabela 12. Geometrijske veličine ventila zavisno od nazivnog prečnika ventila

| Veličina, oznaka i dimenzije | Nazivni prečnik ventila D (mm) | | | | |
|--|----------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 |
| prečnik glavčine ventila D_g (mm) | 130 | 130 | 130 | 130 | 140 |
| broj rebara ventila n | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| debljina rebara ventila δ_1 (mm) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| površina svetlog otvora ventila A_1 (mm ²) | 44622,61 | 66438,05 | 92140,48 | 155326,31 | 232849,53 |
| prečnik membrane ventila D_m (mm) | 320 | 370 | 420 | 520 | 620 |
| hod pokretnog sklopa ventila, nominalni h_n (mm) | 45 | 57 | 70 | 95 | 120 |

Na osnovu jednačine kontinuiteta, odnosa protočnih površina sličnih ventila, hod h_i pokretnog sklopa ventila definisan je izrazom:

$$h_i = h_n \frac{A_{1i} D_m}{A_1 D_{mi}} \quad (27)$$

gde su: h_i - hod pokretnog sklopa ventila (prečnika membrane D_m , površine svetlog otvora A_{1i}), h_n - hod pokretnog sklopa ventila (prečnika membrane D_m , površine svetlog otvora A_1).

Definisanje analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila

Na osnovu analitičkih izraza (16 i 17) koeficijenata otpora ventila i nominalnih vrednosti hoda pokretnog sklopa ventila, definisani su analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila.

Analitički izraz (16) koeficijenta otpora ventila prečnika 400 mm, sa adapterom, u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila, ima oblik:

$$\xi_{iA} = \frac{1141,6771}{h^{1,1440}} \quad (28)$$

Analitički izraz (16) koeficijenta otpora ventila prečnika 600 mm, sa adapterom, u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila, glasi:

$$\xi_{iA} = \frac{2097,0470}{h^{1,1440}} \quad (29)$$

Iz uslova da ventili imaju isti koeficijent otpora ventila pri nominalnom hodu pokretnog sklopa ventila, dobija se analitički izraz proračunskog hoda pokretnog sklopa ventila:

$$h = \frac{h_{Rn}}{h_n} h_i \quad (30)$$

gde su: h_{Rn} - nominalna vrednost hoda pokretnog sklopa ventila koji je uzet za reper; h_n - nominalna vrednost hoda pokretnog sklopa ventila za koji se želi definisati koeficijent otpora; h_i - vrednost hoda pokretnog sklopa ventila.

U tabeli 12 date su numeričke vrednosti nominalnog hoda pokretnog sklopa ventila prečnika 300 mm; 350 mm; 400 mm; 500 mm i 600 mm.

Analitički izraz (17) koeficijenta otpora ventila prečnika 400 mm i 600 mm, bez adaptera, u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila, ima oblik:

$$\xi_{iBA} = \frac{2321,9071}{h^{1,3837}} \quad (31)$$

$$\xi_{iBA} = \frac{3768,7182}{h^{1,3837}} \quad (32)$$

Analitičkim izrazima (28-30) definisani su koeficijenti otpora sličnih ventila sa adapterom; koeficijenti otpora sličnih ventila bez adaptera definisani su analitičkim izrazima (30-32).

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila

U odeljku su dati analitički izrazi koeficijenata otpora ventila sa adapterom za slučajeve da su za reper uzeti ventili prečnika 400, odnosno 600 mm.

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila prečnika 300 mm

Analitički izrazi kojima je definisan koeficijent otpora ventila prečnika 300 mm u odnosu na ventil prečnika 400 mm, glase:

$$\xi_{iA} = \frac{1141,6771}{h^{1,1440}} \quad (33)$$

$$h = \frac{70}{45} h_i$$

Analitički izrazi kojima je definisan koeficijent otpora ventila prečnika 300 mm u odnosu na ventil prečnika 600 mm, glase:

$$\xi_{iA} = \frac{2097,0470}{h^{1,1440}} \quad (34)$$

$$h = \frac{120}{45} h_i$$

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila prečnika 350 mm

Koeficijenti otpora ventila prečnika 350 mm sa adapterom, u odnosu na ventile prečnika 400 mm i 600 mm, definisani su analitičkim izrazima (28 i 29) i izrazima:

$$h = \frac{70}{57} h_i \quad (35)$$

$$h = \frac{120}{57} h_i \quad (36)$$

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila prečnika 400 mm

Koeficijent otpora ventila prečnika 400 mm sa adapterom u odnosu na ventil prečnika 600 mm, definisan je analitičkim izrazom (29) i izrazom:

$$h = \frac{120}{70} h_i \quad (37)$$

odnosno samo analitičkim izrazom (28).

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila prečnika 500 mm

Koeficijenti otpora ventila prečnika 500 mm sa adapterom u odnosu na ventile prečnika 400 i 600 mm, definisani su analitičkim izrazima (28 i 29) i izrazima:

$$h = \frac{70}{95} h_i \quad (38)$$

$$h = \frac{120}{95} h_i \quad (39)$$

Analitički izrazi koeficijenata otpora ventila prečnika 600 mm

Koeficijent otpora ventila prečnika 600 mm sa adapterom u odnosu na ventil prečnika 400 mm, definisan je analitičkim izrazom (28) i izrazom:

$$h = \frac{70}{120} h_i \quad (40)$$

odnosno samo analitičkim izrazom (29).

Analogno prikazanom, definišu se i analitički izrazi koeficijenata otpora ventila bez adaptera za slučajeve da se za reper uzimaju ventili prečnika 400 mm, odnosno 600 mm.

Teorijsko-eksperimentalni podaci koeficijenata otpora sličnih ventila

Na osnovu napred definisanih analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila sa adapterom i bez adaptera, izračunati su numerički iznosi koeficijenata otpora ventila za slučajeve da je ventil prečnika 400 mm, odnosno 600 mm uzet kao reper. Podaci su sređeni i prikazani u tabelama 13 i 14.

Pronalaženje analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila

Analitički izrazi (16 i 17) dobijeni su metodom najmanjih kvadrata, koja se sastoji u minimiziranju odstupanja eksperimenalnih rezultata od regresionih polinoma (12 i 13). Analitički izrazi (16 i 17) koeficijenata otpora ventila sa adapterom i bez adaptera definišu koeficijente otpora sličnih ventila prečnika razmatranih u eksperimentalnim istraživanjima.

Na osnovu opšteg oblika funkcionalne veze koeficijenta otpora ξ_i ventila, analitičkih izraza koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije, sistema jednačina (24) i analitičkih izraza (28 i 29); (30, 31 i 32), izrađen je program za pronalaženje analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila i numeričkih iznosa koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije.

Cilj je da se na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka, datih u tabelama 13 i 14, metodom najmanjih kvadrata definišu analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila; zatim da se, na osnovu numeričkih iznosa koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije, izvrši kvalitativna ocena nivoa saglasnosti dobijenih analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila sa teorijsko-eksperimentalnim podacima; i na kraju da se nađe nivo saglasnosti dobijenih analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila sa eksperimentalno dobijenim podacima, datim u tabelama 1 i 2.

Analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila, koji većom korelacijom koreliraju teorijsko-eksperimentalne podatke, date u tabelama 13 i 14, odnosno eksperimentalne podatke date u tabelama 1 i 2, usvojiće se kao merodavni radi dalje analize.

Tabela 13. Koeficijenti otpora ξ_{iA} ventila s adapterom računati preko analitičkih izraza (28 i 29) koeficijenata otpora ventila prečnika 400 i 600 mm i izraza (30)

| Prečnik ventila D (mm) | Hod pokretnog sklopa h_i (mm) | Koeficijenti otpora ventila ξ_{iA} | | Aritmetička sredina $\bar{\xi}_{iA}$ |
|--------------------------|---------------------------------|--|-----------|--------------------------------------|
| | | 1 | 2 | |
| 300 | 25 | 17,183499 | 17,331288 | 17,257393 |
| | 45 | 8,7771767 | 8,8472198 | 8,8094982 |
| | 50 | 7,7757516 | 7,8426282 | 7,8091899 |
| | 75 | 4,8898922 | 4,9319486 | 4,9109204 |
| | 100 | 3,5186263 | 3,548888 | 3,5337575 |
| | 120 | 2,8562235 | 2,8807889 | 2,8685062 |
| 350 | 25 | 22,519266 | 22,712946 | 22,617106 |
| | 50 | 10,190253 | 10,277896 | 10,234074 |
| | 57 | 8,7717767 | 8,8472198 | 8,8094982 |
| | 75 | 6,4082864 | 6,4634019 | 6,4358441 |
| | 100 | 4,6112192 | 4,6508787 | 4,6310489 |
| | 120 | 3,7431291 | 3,7753225 | 3,7592258 |
| 400 | 25 | 28,485435 | 28,730428 | 28,607931 |
| | 50 | 12,890021 | 13,0 | 12,945010 |
| | 70 | 8,7717767 | 8,8472198 | 8,8094982 |
| | 75 | 8,1060736 | 8,1060736 | 8,1060736 |
| | 100 | 5,8328982 | 5,883065 | 5,8579816 |
| | 120 | 4,7348196 | 4,775542 | 4,7551808 |
| 500 | 25 | 40,396385 | 40,743820 | 40,570102 |
| | 50 | 18,279877 | 18,437096 | 18,358486 |
| | 75 | 11,495561 | 11,594430 | 11,544995 |
| | 95 | 8,7717767 | 8,8472198 | 8,8094982 |
| | 100 | 8,2718765 | 8,3430201 | 8,3074483 |
| | 120 | 6,7146455 | 6,7723959 | 6,7435207 |
| 600 | 25 | 52,772416 | 53,226294 | 52,999355 |
| | 50 | 23,880188 | 24,085574 | 23,982881 |
| | 70 | 16,250685 | 16,390452 | 16,320569 |
| | 75 | 15,017397 | 15,146556 | 15,081976 |
| | 100 | 10,806088 | 10,899028 | 10,852558 |
| | 120 | 8,7717767 | 8,8472198 | 8,8094982 |

- 1) Koeficijenti otpora ventila s adapterom računati preko analitičkog izraza (29) koeficijenta otpora ventila prečnika 600 mm i izraza (30), odnosno (34,36,37 i 39).
- 2) Koeficijenti otpora ventila s adapterom računati preko analitičkog izraza (28) koeficijenta otpora ventila prečnika 400 mm i izraza (30), odnosno (33,34 i 38,40).

Na osnovu numeričkih iznosa koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije, daje se kvalitativna ocena analitičkog metoda definisanja analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila.

Analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila s adapterom definisani na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka datih u tabeli 13

Pomoću programa KNEZ I [1], a na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka datih u tabeli 13 nađeni su analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila. Nakon obrade teorijsko-eksperimentalnih podataka datih u tabeli 13, kolona 1, dobija se analitički izraz koeficijenta otpora sa adapterom, oblika:

$$\xi_{i1A} = 0,0680 \cdot D^{1,6178} \cdot h^{-1,1427} \quad (41)$$

koji verovatnoćom 99,90% (odnosno 98,63% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13, kolona 1, a eksperimentalne podatke date u tabeli 1 korelira verovatnoćom 99,88%, odnosno 98,13% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$.

Tabela 14. Koeficijenti otpora ξ_{iBA} ventila bez adaptera računati preko analitičkih izraza (31) i (32) koeficijenata otpora ventila prečnika 400 i 600 mm i izraza (30)

| Prečnik ventila D (mm) | Hod pokretnog sklopa h_i (mm) | Koeficijenti otpora ventila ξ_{iBA} | | Aritmetička sredina $\bar{\xi}_{iBA}$ |
|--------------------------|---------------------------------|---|-----------|---------------------------------------|
| | | 1 | 2 | |
| 300 | 25 | 14,523373 | 14,657225 | 14,590299 |
| | 45 | 6,4395381 | 6,4988873 | 6,4692127 |
| | 50 | 5,5659779 | 5,617260 | 5,5916269 |
| | 75 | 3,1760649 | 3,2053367 | 3,1907008 |
| | 100 | 2,1331208 | 2,1527804 | 2,1429506 |
| | 120 | 1,6575047 | 1,6727809 | 1,6651428 |
| 350 | 25 | 20,142725 | 20,328368 | 20,235546 |
| | 50 | 7,7195542 | 7,7907006 | 7,7551274 |
| | 57 | 6,4395381 | 6,4987857 | 6,4691619 |
| | 75 | 4,4049413 | 4,4455389 | 4,4252401 |
| | 100 | 2,9584634 | 2,9857297 | 2,9720965 |
| | 120 | 2,2988230 | 2,3200098 | 2,3094164 |
| 400 | 25 | 26,765393 | 27,012074 | 26,888733 |
| | 50 | 10,257644 | 10,352182 | 10,304913 |
| | 70 | 6,4395381 | 6,4988873 | 6,4692127 |
| | 75 | 5,8532291 | 5,9071746 | 5,8802018 |
| | 100 | 3,9311680 | 3,9673991 | 3,9492835 |
| | 120 | 3,0546463 | 3,0827990 | 3,0687226 |
| 500 | 25 | 40,839797 | 41,216192 | 41,027994 |
| | 50 | 15,651557 | 15,795808 | 15,723682 |
| | 75 | 8,9311106 | 9,0134230 | 8,9722668 |
| | 95 | 6,4395381 | 6,4987857 | 6,4691619 |
| | 100 | 5,9983465 | 6,0536295 | 6,025988 |
| | 120 | 4,6609117 | 4,7038684 | 4,682390 |
| 600 | 25 | 43,843654 | 44,247734 | 44,045694 |
| | 50 | 16,802764 | 16,957624 | 16,880194 |
| | 70 | 10,548430 | 10,645648 | 10,597039 |
| | 75 | 9,5880134 | 9,6763801 | 9,6321968 |
| | 100 | 6,4395381 | 6,4988873 | 6,4692127 |
| | 120 | 5,0037320 | 5,0498483 | 5,0267902 |

- 1) Koeficijenti otpora ventila bez adaptera računati preko analitičkog izraza (32) koeficijenta otpora ventila prečnika 600 mm i izraza (30), odnosno (34,36,37 i 39).
- 2) Koeficijenti otpora ventila bez adaptera računati preko analitičkog izraza (31) koeficijenta otpora ventila prečnika 400 mm i izraza (30), odnosno (33, 35 i 38 i 40).

Analitički izraz koeficijenta otpora ventila sa adapterom, na osnovu podataka datih u tabeli 13, kolona 2 glasi:

$$\xi_{i2A} = 0,0685 \cdot D^{1,6180} \cdot h^{-1,1428} \quad (42)$$

koji verovatnoćom 99,90% (odnosno 98,64% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13, kolona 2, a eksperimentalne podatke date u tabeli 1 korelira verovatnoćom 99,88%, odnosno 98,14% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$.

Analitički izraz koeficijenta otpora ventila s adapterom, na osnovu podataka datih u tabeli 13, kolone 1 i 2, glasi:

$$\xi_{iA} = 0,0682 \cdot D^{1,6179} \cdot h^{-1,1428} \quad (43)$$

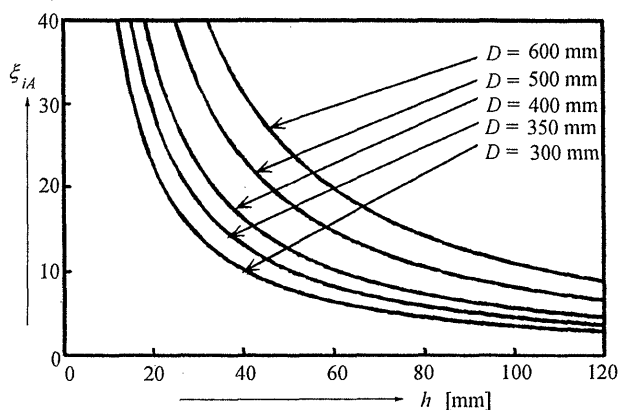
koji verovatnoćom 99,90% (odnosno 98,63% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13, kolone 1 i 2, a eksperimentalne podatke date u tabeli 1 korelira verovatnoćom 99,88%, odnosno 98,13% u dijagramu ξ_i/h pri $D=\text{const}$.

Analitički izraz koeficijenta otpora ventila s adapterom, na osnovu podataka za $\bar{\xi}_{iA}$ datih u tabeli 13, glasi:

$$\bar{\xi}_{iA} = 0,0682 \cdot D^{1,6179} \cdot h^{-1,1428} \quad (44)$$

koji verovatnoćom 99,90% (odnosno 98,63% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13, kolona $\bar{\xi}_{iA}$, a eksperimentalne podatke date u tabeli 1 korelira verovatnoćom 99,88%, odnosno 98,63% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$.

Pošto dobijeni analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila istom verovatnoćom koreliraju teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13 i eksperimentalne podatke date u tabeli 1, ravnopravni su za dalje analize. Grafički prikaz analitičkog izraza (43) dat je na sl.7.



Slika 7. Zavisnost koeficijenta otpora ξ_{iA} sličnih ventila s adapterom od hoda pokretnog sklopa ventila i prečnika ventila

Analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila bez adaptera definisani na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka datih u tabeli 14

Analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila bez adaptera nađeni su pomoću programa KNEZ 1 [1], a na osnovu teorijsko-eksperimentalnih podataka datih u tabeli 14. Analitički izraz koeficijenta otpora ventila bez adaptera na osnovu podataka datih u tabeli 14, kolona 1, glasi:

$$\xi_{iBA} = 0,1027 \cdot D^{1,6561} \cdot h^{-1,3750} \quad (45)$$

koji verovatnoćom 99,83% (odnosno 98,72% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14, kolona 1, a eksperimentalne podatke date u tabeli 2 korelira verovatnoćom 99,83%, odnosno 98,68% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$.

Analitički izraz koeficijenta otpora sličnih ventila bez adaptera, na osnovu podataka datih u tabeli 14, kolona 2, glasi:

$$\xi_{i2AB} = 0,1032 \cdot D^{1,6560} \cdot h^{-1,3755} \quad (46)$$

koji verovatnoćom 99,834% (odnosno 98,72% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14, kolona 2, a eksperimentalne podatke date u tabeli 2 korelira verovatnoćom 99,83%, odnosno 98,69% u ravni $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$.

Analitički izraz koeficijenta otpora sličnih ventila bez adaptera, na osnovu podataka datih u tabeli 14, kolone 1 i 2, glasi:

$$\xi_{iBA} = 0,1028 \cdot D^{1,6564} \cdot h^{-1,3755} \quad (47)$$

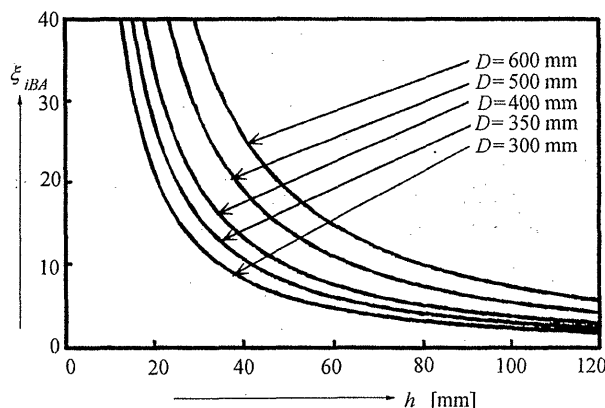
koji verovatnoćom 99,83% (odnosno 98,72% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14, kolone 1 i 2, a eksperimentalne podatke date u tabeli 2 korelira verovatnoćom 99,83%, odnosno 98,68% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$.

Analitički izraz koeficijenta otpora sličnih ventila bez adaptera, na osnovu podataka za $\bar{\xi}_{iBA}$ datih u tabeli 14, glasi:

$$\bar{\xi}_{iBA} = 0,1028 \cdot D^{1,6564} \cdot h^{-1,3755} \quad (48)$$

koji verovatnoćom 99,83% (odnosno 98,72% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$) korelira teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14, kolona $\bar{\xi}_{iBA}$, a eksperimentalne podatke date u tabeli 2 korelira verovatnoćom 99,82%, odnosno 98,68% u dijagramu $\xi_i h$ pri $D=\text{const}$.

Pošto dobijeni analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila bez adaptera približno istom verovatnoćom koreliraju teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14 i eksperimentalne podatke date u tabeli 2, ravnopravni su za dalje analize. Grafički prikaz analitičkog izraza (47) dat je na sl.8.



Slika 8. Zavisnost koeficijenta otpora ξ_{iBA} sličnih ventila bez adaptera od hoda pokretnog sklopa ventila i prečnika ventila

Pošto dobijeni analitički izrazi (41, 42, 43 i 44) koeficijenata otpora sličnih ventila sa adapterom verovatnoćom od 99,90% koreliraju teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 13 i eksperimentalne podatke date u tabeli 1 verovatnoćom 99,88%, ravnopravno se mogu koristiti za dalje analize.

Dobijeni analitički izrazi (45, 46, 47 i 48) koeficijenata otpora sličnih ventila bez adaptera verovatnoćom od 99,83% korelišu teorijsko-eksperimentalne podatke date u tabeli 14 i eksperimentalne podatke date u tabeli 2 verovatnoćom 99,82%, ravnopravno se mogu koristiti za dalje analize.

Prezentirani teorijsko-eksperimentalni metod definisanja analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila daje visok stepen saglasnosti teorijski dobijenih podataka sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja datim u tabelama 1 i 2, te predstavlja pouzdan put definisanja koeficijenta otpora sličnih ventila, koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika razmatranih u eksperimentalnim istraživanjima.

Analički izrazi (16 i 17) koeficijenata otpora sličnih ventila s adapterom i bez adaptera verovatnoćom od 99,967% i 99,9996%, respektivno, korelišu eksperimentalno dobijene podatke date u tabelama 1 i 2, istom verovatnoćom definišu koeficijente otpora sličnih ventila prečnika u dijapazonu razmatranom u teorijsko-eksperimentalnim istraživanjima

Analički izrazi optimalnih otpora ventila u funkciji protoka vazduha kroz ventila

Ako se u opšti izraz (1) koeficijenta otpora ventila uvrsti protok Q u m^3/h , dobija se jednačina oblika:

$$\xi = \frac{\pi^2 D^4}{8\rho} \frac{\Delta H}{Q^2} 3600^2 \quad (49)$$

Rešenjem jednačine (49) po ΔH , dobija se opšti oblik analitičkog izraza otpora ventila:

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \frac{Q^2}{3600^2} \xi \quad (50)$$

Na osnovu jednačine kontinuiteta definisane su nominalne vrednosti hoda pokretnog sklopa sličnih ventila prečnika 300; 350; 400; 500 i 600 mm. Za proračunate nominalne vrednosti hoda pokretnog sklopa sličnih ventila, koeficijenti otpora ventila su optimalni. Analički izrazi optimalnih otpora ventila ΔH_{opt} s adapterom i bez adaptera dobijaju se uvođenjem odgovarajućih analitičkih izraza optimalnih koeficijenata otpora sličnih ventila u analitički izraz (50):

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \frac{Q^2}{3600^2} \xi_{opt} \quad (51)$$

Analički izraz optimalnih koeficijenata otpora sličnih ventila s adapterom, ima oblik:

$$\xi_{opt|A} = 0,0682 \cdot D^{1,6180} \cdot h_{ni}^{-1,1428} \quad (52)$$

Analički izraz optimalnih koeficijenata otpora sličnih ventila bez adaptera, ima oblik:

$$\xi_{opt|BA} = 0,1028 \cdot D^{1,6564} \cdot h_{ni}^{-1,3755} \quad (53)$$

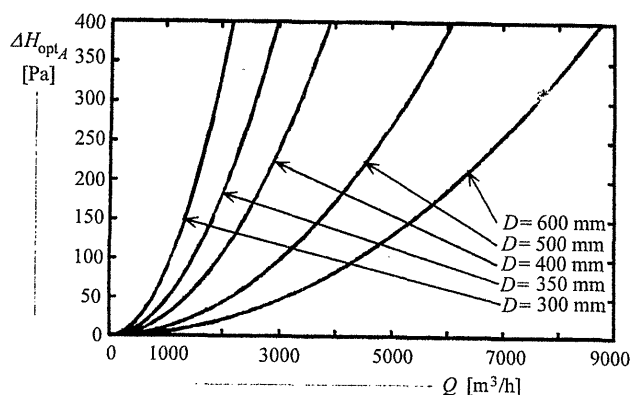
Analički izraz optimalnih otpora $\Delta H_{opt|A}$ sličnih ventila sa adapterom, ima oblik:

$$\Delta H_{opt|A} = \frac{1}{3600^2} \cdot \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \xi_{opt|A} \cdot Q^2 \quad (54)$$

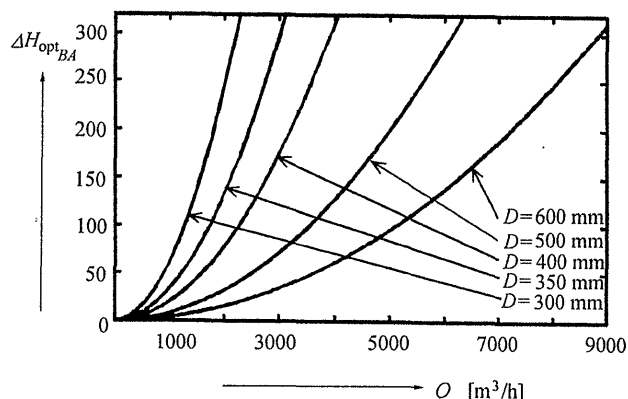
Analički izraz optimalnih otpora $\Delta H_{opt|BA}$ sličnih ventila bez adaptera, ima oblik:

$$\Delta H_{opt|BA} = \frac{1}{3600^2} \cdot \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \xi_{opt|BA} \cdot Q^2 \quad (55)$$

Grafički prikazi analitičkih izraza (54 i 55) optimalnih otpora sličnih ventila s adapterom i bez adaptera u funkciji protoka vazduha kroz ventile dati su na slikama 9 i 10.



Slika 9. Zavisnost optimalnih otpora $\Delta H_{opt|A}$ sličnih ventila s adapterom od prečnika ventila i protoka vazduha kroz ventile



Slika 10. Zavisnost optimalnih otpora $\Delta H_{opt|BA}$ sličnih ventila bez adaptera od prečnika ventila i protoka vazduha kroz ventile

Uporedna analiza karakteristika ventila

Cilj analize je da se nađu relativni odnosi protoka vazduha kroz ventile i otpora sličnih ventila s adapterom i bez adaptera u funkciji prečnika i hoda pokretnog sklopa ventila na osnovu analitički definisanih koeficijenata otpora ventila: Rešenjem jednačine (1) po ΔH dobija se opšti izraz otpora ventila:

$$\Delta H = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \cdot \xi \cdot Q^2 \quad (56)$$

Opšti izrazi otpora ventila s adapterom i bez adaptera, glase:

$$\Delta H_A = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \cdot \xi_A \cdot Q_A^2 \quad (57)$$

$$\Delta H_{BA} = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} \cdot \xi_{BA} \cdot Q_{BA}^2$$

Iz uslova jednakosti protoka vazduha kroz ventile dobija se:

$$\left(\frac{\Delta H_{BA}}{\Delta H_A} \right) = \frac{\xi_{BA}}{\xi_A} \quad (58)$$

Iz uslova jednakosti otpora ventila dobija se:

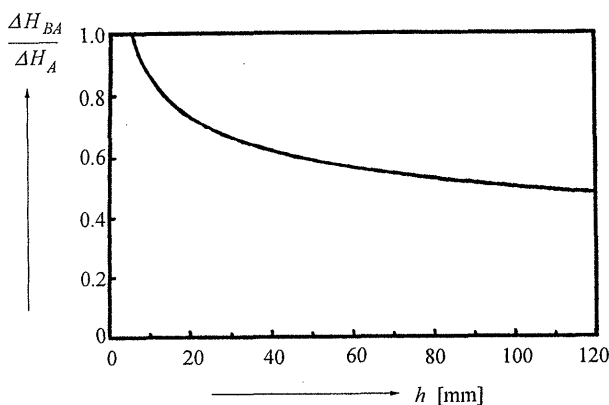
$$\left(\frac{Q_A}{Q_{BA}} \right) = \frac{\xi_{BA}}{\xi_A} \quad (59)$$

Uvođenjem analitičkih izraza (52 i 53) optimalnih koeficijenata otpora ventila u izraze (58 i 59) dobijaju se relativni odnosi otpora ventila i protoka vazduha kroz ventile u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila i prečnika sličnih ventila, oblika:

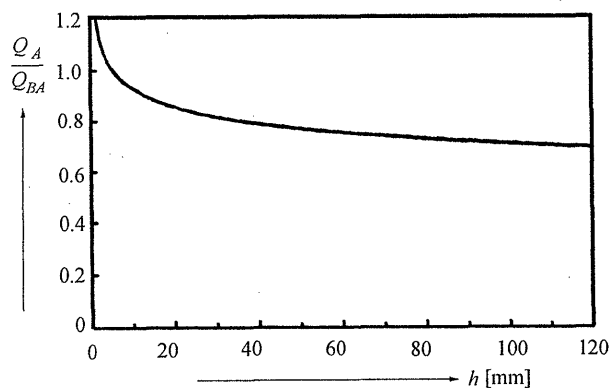
$$\left(\frac{\Delta H_{BA}}{\Delta H_A}\right) = 1,5061 \frac{D^{0,0385}}{h^{0,2332}} \quad (60)$$

$$\left(\frac{Q_A}{Q_{BA}}\right) = 1,2272 \frac{D^{0,0192}}{h^{0,1166}} \quad (61)$$

Grafički prikazi analitičkih izraza (60 i 61) dati su na slikama 11 i 12.



Slika 11. Zavisnost relativnih odnosa otpora ($\Delta H_{BA} / \Delta H_A$) sličnih ventila od hoda pokretnog sklopa i prečnika ventil



Slika 12. Zavisnost relativnih odnosa otpora (Q_A / Q_{BA}) sličnih ventila od hoda pokretnog sklopa i prečnika ventila

Dijagram na sl.11 predstavlja zakon promene relativnih odnosa optimalnih otpora sličnih ventila bez adaptera i s adapterom u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila i prečnika ventila, definisan analitičkim odnosom (60). Dijagram na sl.12 predstavlja zakon promene relativnih odnosa protoka vazduha kroz slične ventile s adapterom i bez adaptera u funkciji hoda pokretnog sklopa ventila i prečnika ventila, definisan analitičkim odnosom (61). Iz dijagrama datih na slikama 11 i 12 vidi se da relativni odnosi otpora ventila i protoka vazduha kroz slične ventile nisu funkcija prečnika ventila, tj. postoji slaba veza između prečnika ventila i relativnih odnosa otpora ventila i relativnih odnosa protoka vazduha kroz slične ventile.

Zaključak

Dat je metod analitičkog definisanja koeficijenta otpora pneumatičkih ventila u funkciji karakterističnih veličina ventila i karakterističnih graničnih načina ugradnje ventila u objekat.

Koeficijenti otpora ventila analitički su definisani u funkciji karakterističnih veličina ventila za karakteristične načine ugradnje ventila u objekat. Analiziran je uticaj karakterističnih veličina ventila (prečnik i hod pokretnog sklopa) na koeficijent otpora ventila za brzine strujanja vazduha neposredno ispred ventila, do 30 m/s.

Detaljno su opisane funkcije konceptijskih rešenja pneumatičkih protivudarnih ventila tipa PPUV i HV i definisani zahtevi koje ventili mehaničkopneumatičkih sistema treba da zadovolje u cilju ostvarenja propisanih zahteva:

- da otpori strujanju vazduha kroz ventile u uslovima ventilacije budu što manji i
- vremena zatvaranja pod neposrednim dejstvom VUT-a budu što kraća (u slučaju eventualnog otkaza funkcija detektorskog i električnog sistema).

Za potrebe definisanja analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila nazivnih prečnika 400 i 600 mm, hoda pokretnog sklopa ventila 25; 50; 75; 100 i 120 mm, mereni su otpori strujanju vazduha kroz ventile u funkciji protoka vazduha kroz ventile. Na osnovu opšteg analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila, izračunate su odgovarajuće vrednosti koeficijenata otpora ventila. Na osnovu opšte funkcionalne veze koeficijenata otpora ventila, izrađen je originalni plan eksperimentalnih istraživanja. Randomizacija, planiranje i izvođenje eksperimentalnih istraživanja izvršeno je po principima planiranog eksperimenta. Za pronalaženje analitičkih izraza koeficijenta otpora sličnih ventila korišćene su metode matematičke statistike:

- provera jednorodnosti disperzija na osnovu Cochrenovog kriterijuma, tj. provera normalnosti raspodele izračunate veličine ξ_i ;
- disperziona analiza, pomoću koje se na osnovu Fisherovog kriterijuma proverava da li na koeficijent otpora ξ ventila značajno utiču prečnik D ventila i hod h pokretnog sklopa ventila;
- regresiona analiza, pomoću koje se dolazi do analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom najmanjih kvadrata. Metoda se sastoji u minimizaciji odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionog polinoma pretpostavljenog oblika i
- provera adekvatnosti analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila, koja se sastoji u poređenju izračunatog koeficijenta odnosa disperzija V_0 sa Fisherovim kriterijumom F .

Provera adekvatnosti dobijenih analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila izvršena je i preko numeričkih iznosa karakterističnih koeficijenata parcijalne korelacije i koeficijenta višestruke korelacije funkcionalne veze, oblika $\xi_i = K_1 D_i^c h_i^d$.

Koristeći eksperimentalne rezultate istraživanja koeficijenata otpora ventila, nađeni su analitički izrazi koeficijenata otpora sličnih ventila i numerički iznosi koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije.

Poređenjem koeficijenata odnosa disperzija sa Fisherovim kriterijumom i na osnovu numeričkih iznosa odgovarajućih koeficijenata parcijalne i višestruke korelacije, konstatovano je da su analitički izrazi koeficijenata otpora ventila adekvatni sa verovatnoćom od 99%.

Imajući u vidu da postoji visoka korelacija dobijenih analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila i eksperimentalnih podataka, dat je metod definisanja analitičkih izraza koeficijenata otpora ventila koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika ventila razmatranih u eksperimentalnim istraživanjima.

Prikazani originalni teorijsko-eksperimentalni metod daje visok stepen saglasnosti teorijskih podataka sa eksperimentalnim podacima, te predstavlja pouzdan metod nalaženja analitičkih izraza koeficijenata otpora sličnih ventila koji su u dijapazonu i van dijapazona prečnika ventila razmatranih u eksperimentalnim istraživanjima.

Za proračunate nominalne vrednosti hoda pokretnog sklopa sličnih ventila, definisani su analitički izrazi optimalnih koeficijenata otpora ventila, a na osnovu ovih i analitički izrazi optimalnih otpora ventila za karakteristične granične načine ugradnje, koji imaju praktičnu primenu.

Izvedena je uporedna analiza aerodinamičkih karakteristika ventila za karakteristične granične načine ugradnje koja je od praktične vrednosti.

Za pneumatičke ventile potrebno je definisati analitičke izraze vremena zatvaranja sličnih ventila pod neposrednim dejstvom pritiska u frontu direktnog VUT-a nastalog pri eksploziji, zavisno od otpornosti, geometrijskih karakteristika i karakteristika elastičnih elemenata sličnih ventila.

Na osnovu analize teorijski izvedenih analitičkih izraza vremena zatvaranja sličnih ventila, potrebno je dati opšte kriterijume za izbor optimalnih karakteristika ventila, s aspekta zatvaranja ventila pod neposrednim dejstvom pritiska u frontu direktnog VUT-a nastalog pri eksploziji.

Literatura

- [1] KNEŽEVIĆ, M.D. *Prilog analitičkom definisanju pneumatičkih karakteristika sistema ventila specijalne namene*. doktorska disertacija. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1994.
- [2] KNEŽEVIĆ, D.: Nalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila metodom potpunog eksperimenta. *Naučno-tehnički pregled*, 1985, vol.XXXV, no.7-8, p.21-26.
- [3] GUREVIĆ, A. *Proračun regulacijskih ventila*. Lenjingrad, MAŠGIZ, Moskva, 1968.
- [4] KNEŽEVIĆ, D. Metod iznalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora protivudarnih ventila. *Naučno-tehnički pregled*, 1985, vol.XXXV, no.10, p.37-45.
- [5] KNEŽEVIĆ, D. Analitički metod definisanja ventila za regulaciju protoka vode. *Naučno-tehnički pregled*, 1986, vol.XXXVI, no.5, p.11-17.
- [6] KNEŽEVIĆ, D. Analitički metod definisanja kombinovanog protivudarnog ventila za regulaciju nadpritiska. *Naučno-tehnički pregled*, 1986, vol.XXXVI, no.9, p.13-24.
- [7] KNEŽEVIĆ, D. *Analitičko definisanje protivudarnih ventila namenjenih zaštiti od prodora vazdušnoudarnih talasa nuklearne eksplozije u objekat*. Hidraulika, pneumatika, fluidika, Izdanje SMEITS, zbornik radova, Beograd, 1990.
- [8] PANTELIĆ, I. *Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta*. Radnički univerzitet „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1986.
- [9] VORONJEC, K., OBRADOVIĆ, N. *Mehanika fluida*. Naučna knjiga, 1970.
- [10] DUDUKOVIĆ, B., MILOSAVLJEVIĆ, Đ. *Planiranje eksperimenta i optimizacija procesa*. IHTM Centar za tehnokonomiku i programiranje, Beograd, 1976.
- [11] FERGUSON, S. *Mathematical Statistics*. New York, 1967.
- [12] FREUND, J.E. *Mathematical Statistics*. New York, 1971.
- [13] IVKOVIĆ, Z. *Matematička statistika*. Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [14] VUKADINOVIĆ, S. *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike*, drugo izmenjeno izdanje. *Privredni pregled*, Beograd, 1978.
- [15] ŠIKOPARIJA, V. *Teorija sličnih modela*. Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 1980.
- [16] ANDONOVIĆ, J. *Osnovi računa verovatnoće i teorije najmanjih kvadrata*. Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [17] MILOŠEVIĆ, V. *Teorijska statistika*. Naučna knjiga, Beograd, 1983.
- [18] KNEŽEVIĆ, D., BAJC, P., ALIBUNOVIĆ, I. *Uticao kompenzacione zapremine cevovoda i radnog pritiska na vreme zatvaranja specijalnih pneumatskih ventila sa metodom nalaženja matematičkog modela ventila*. Hidraulika, pneumatika, fluidika, Izdanje SMEITS, zbornik radova, Beograd, 1984, p.287-300.
- [19] IVANOVIĆ, B. *Teorijska statistika*. Naučna knjiga, Beograd, 1973.
- [20] KNEŽEVIĆ, D. *Istraživanje optimalnih rešenja ventila za zaštitu od vazdušnoudarnih talasa nuklearne eksplozije u vazduhu i uporedna analiza teorijskih i eksperimentalnih rezultata*. magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1983.
- [21] NENADOVIĆ, M. *Metode optimizacije sistema*. SANU, Beograd, 1980.
- [22] NENADOVIĆ, M. *Matematička obrada podataka dobijenih merenjem*. SANU, posebno izdanje, knjiga DLXXII, Odeljenje tehničkih nauka, Beograd, 1988.

Rad primljen: 11.3.1999.god.