

*Józef Knechtel**, *Jiři Zajdlik***

WYNIKI BADAŃ PARAMETRÓW AERODYNAMICZNYCH ELASTYCZNYCH LUTNIOCIĄGÓW O MAŁYCH ŚREDNICACH

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wykonanych na stanowiskach pomiarowych producenta zbrojonych lutni elastycznych DUFLEX s.r.o. (Republika Czeska). Badano lutnie elastyczne o małych średnicach, to znaczy: 0,2, 0,3 oraz 0,5 m. Wykazano, że lutnie charakteryzowały się bardzo dobrą jakością uszczelnienia.

The results of a laboratory study on aerodynamic parameters of elastic ducting of small diameters

Abstract

In the paper the results are presented of tests carried out on the laboratory stand of a manufacturer of flexible reinforced ductings DUFLEX s.r.o. in Baška, Czech Republic. In the frame of the study the flexible ductings of the following diameters have been tested: 0.2, 0.3 and 0.5 m. In this way, a gap in technical knowledge has been filled in regard to the values of specific aerodynamic resistances (r_0) of ductings of small diameters. Ductings tested showed very good quality of their seal.

1. WPROWADZENIE

Podczas wykonywania badań nad zwalczaniem zagrożenia klimatycznego w wyrobiskach ścianowych pojawiła się koncepcja zastosowania lutniociągu z chłodnym powietrzem wzdłuż frontu ściany. Ze względu na małe na ogół pole powierzchni przekroju poprzecznego wyrobiska ścianowego, średnica takiego lutniociągu nie mogłaby być zbyt duża. Przyjęto, że w zależności od grubości pokładu powinna ona wynosić od 0,2 do 0,6 m. W Polsce są produkowane lutniociągi zbudowane z lutni elastycznych o średnicach: 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 i 1,2 m. Nie produkuje się natomiast lutniociągów o mniejszych średnicach. Producentem lutni o średnicach: 0,2, 0,3 i 0,5 m jest czeska firma DUFLEX w miejscowości Baška na Morawach.

Badaniom poddano lutniociągi zbudowane z lutni elastycznych „zbrojonych”. Lutnie takie są przeznaczone głównie do wentylacji ssącej, ale mogą być stosowane również w wentylacji tłoczącej. W artykule przedstawiono wyniki badań lutniociągów zbudowanych z lutni o średnicach: 0,2, 0,3 i 0,5 m.

* Główny Instytut Górnictwa

** DUFLEX, Baška, Republika Czeska

2. METODA BADAŃ

Jakość gładzi i szczelność lutniociągów charakteryzują odpowiednio opór jednostkowy r_0 oraz współczynnik wymiany masy powietrza Θ . Parametry te przy projektowaniu lutniociągów muszą być znane. W przypadku natomiast, gdy jest określona jakość aerodynamiczna lutniociągów przewidzianych do pracy w kopalni, wówczas na podstawie wyników pomiarów wyznacza się opór jednostkowy r i współczynnik wymiany masy Θ . Najpierw oblicza się parametr wzrostu organicznego a , korzystając z zależności (Bystroń 1990a, 1990b)

$$a = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{V_w}{V_0} \right) \quad (1)$$

rzeczywisty opór jednostkowy r_0 oblicza się za pomocą wzoru (Bystroń 1990a, 1990b)

$$r_0 = \frac{2a}{1 - \exp(-2aL)} \left\{ \frac{\Delta p_c}{V_w^2} - \frac{\rho}{2A^2} [\zeta_w + \varepsilon + (\zeta_0 - \varepsilon) \exp(-2aL)] \right\} \quad (2)$$

zaś współczynnik wymiany masy, korzystając ze wzoru (Bystroń 1990a, 1990b)

$$\Theta = 10^6 aA \sqrt{\frac{2a}{r_0 A^2 + 2\varepsilon a}} \quad (3)$$

We wzorach (1), (2) i (3) zastosowano następujące oznaczenia:

a – parametr wzrostu organicznego, m^{-1} ;

L – długość lutniociągu, m;

V_w – wydatek powietrza (strumień objętości) na początku lutniociągu (za wentylatorem lutniowym współpracującym z lutniociągiem w przypadku wentylacji tłoczącej oraz przed wentylatorem w przypadku wentylacji ssącej), m^3/s ;

V_0 – wydatek powietrza (strumień objętości) na końcu lutniociągu (wylot z lutniociągu w przypadku wentylacji tłoczącej oraz wlot do lutniociągu w przypadku wentylacji ssącej), m^3/s ;

Δp_c – spiętrzenie całkowite wentylatora lutniowego, Pa;

ρ – gęstość powietrza, kg/m^3 ;

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego lutniociągu, m^2 ;

ε – symbol oznaczający rodzaj wentylacji lutniowej, przy czym: dla wentylacji ssącej $\varepsilon = 1$, a dla wentylacji tłoczącej $\varepsilon = -1$;

ζ_w – bezwymiarowy współczynnik oporu początku lutniociągu równy 1 dla wentylacji ssącej oraz 0,6 dla wentylacji tłoczącej;

ζ_0 – bezwymiarowy współczynnik oporu końca lutniociągu równy 0,6 dla wentylacji ssącej oraz 1 dla wentylacji tłoczącej;

Θ – współczynnik wymiany masy, $m^{2,5}/kg^{0,5}$.

3. POMIARY WENTYLACYJNE LUTNIOCIĄGÓW

Wykonano trzy serie pomiarów w lutniociągach o średnicach: 0,2, 0,3 i 0,5 m. Każdy z tych lutniociągów miał długość 100 m. Lutniociągi zabudowano na terenie firmy DUFLEX – producenta lutni elastycznych. Z każdym z lutniociągów współpracował wentylator lutniowy (produkcji czeskiej). W każdej z wymienionych serii pomiarowych w przekrojach dopływu powietrza i jego wypływu mierzono ciśnienie statyczne i dynamiczne. Ciśnienie dynamiczne mierzono wzdłuż dwóch, wzajemnie prostopadłych do siebie osi leżących w płaszczyźnie przekroju poprzecznego lutniociągu, w 11 punktach w przypadku lutniociągu o średnicy 0,5 m. Odległości między punktami wynosiły 5 cm. W przypadku lutniociągów o mniejszych średnicach odległości te wynosiły 2 cm, przy czym ciśnienie dynamiczne dla lutniociągu o średnicy 0,2 m mierzono w 11 punktach, a dla lutniociągu o średnicy 0,3 m w 16 punktach. Do pomiaru ciśnienia zastosowano sondę pomiarową Prandtla, połączoną węzami z mikromanometrem, pochyłym, o dokładności dziesiątych części paskala. Również za pomocą sondy Prandtla, połączonej węzłem z mikromanometrem, mierzono ciśnienie statyczne. Wzajemne odległości przekrojów pomiarowych w zależności od średnicy lutniociągu wynosiły: 80,0 m dla lutniociągu o średnicy 0,5 m, 90,05 m dla lutniociągu o średnicy 0,3 oraz 89,95 m dla lutniociągu o średnicy 0,2 m. W celu określenia gęstości powietrza w lutniociągu jego temperaturę mierzono termometrami suchym i wilgotnym o dokładności odczytu 0,2°C. Ciśnienie barometryczne mierzono za pomocą barometru typu THOMEN o dokładności 10 Pa.

Wyniki pomiarów zestawiono w tabelach 1 i 2. Tabela 1 dotyczy lutniociągu o średnicy 0,5 m, natomiast tabela 2 – lutniociągów o średnicach 0,3 i 0,2 m.

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów wentylacyjnych lutniociągu elastycznego (zbrojonego) o średnicy 0,5 m (miejsce i data pomiaru: stanowisko pomiarowe w firmie DUFLEX s.r.o., 4.06.2010 r., rodzaj lutniociągu: elastyczny tłoczący „zbrojony” o średnicy 0,5 m i długości 100 m; odległość między przekrojami pomiarowymi $L = 80$ m)

h_d mm	Lutniociąg ssący				Lutniociąg tłoczący			
	przekrój wypływu w		przekrój dopływu d		przekrój dopływu d		przekrój wypływu w	
	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel
1	33	32	26	28	38	48	50	47
2	51	53	50	44	62	74	92	71
3	62	63	68	56	72	84	98	82
4	65	67	72	63	72	85	98	87
5	71	69	76	65	77	82	88	89
6	69	65	75	68	79	80	79	88
7	66	62	68	63	81	75	67	87
8	58	66	58	63	81	70	57	80
9	52	62	52	62	77	62	48	69
10	40	47	45	45	72	52	43	53
11	17	27	8	13	41	22	18	22
h_{0d}	0		0		0		0	
β_d	2		2		2		2	
h_{st}	162		167		181		127	
β_{st}	1		2		1		2	
h_{0st}	0		0		0		0	
t , °C	16,6		16,6		19,6		19,6	
t_ϕ , °C	13,8		13,8		14,6		14,6	
p , Pa	97 720		97 720		97 660		97 660	

Objaśnienia: h_d – wysokości słupków cieczy manometrycznej odpowiadające ciśnieniu dynamicznemu, w poszczególnych punktach leżących w przekroju poprzecznym lutniociągu, h_{0d} – wysokość słupka cieczy manometrycznej dla stanu przed pomiarem, β_d – stała przełożenia mikromanometru dla ciśnienia dynamicznego, h_{st} – wysokość słupka cieczy manometrycznej odpowiadająca ciśnieniu statycznemu, β_{st} – stała przełożenia mikromanometru dla ciśnienia statycznego, h_{0st} – wysokość cieczy słupka manometrycznego przed pomiarem, t – temperatura powietrza w lutniociągu mierzona termometrem suchym, t_ϕ – temperatura powietrza w lutniociągu mierzona termometrem wilgotnym, p – ciśnienie barometryczne powietrza.

Tabela 2. Wyniki pomiarów parametrów wentylacyjnych lutniociągów elastycznych (zbrojonych) o średnicach 0,2 i 0,3 m (miejsce i data pomiaru: stanowisko pomiarowe w firmie DUFLEX s.r.o., 4.06. 2010 r., rodzaj lutniociągu: elastyczny ssący „zbrojony” o średnicy 0,3 m i 0,2 m)

h_d mm	Lutniociąg o średnicy 0,3 m i długości 90,05 m				Lutniociąg o średnicy 0,2 m i długości 89,95 m			
	przekrój dopływu d		przekrój wypływu w		przekrój dopływu d		przekrój wypływu w	
	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel	w osi \perp	w osi \parallel
1	17	14	13	14	12	9	10	11
2	25	27	23	22	17	16	19	15
3	33	29	26	26	18	19	20	18
4	35	33	30	29	19	19	21	18
5	38	35	32	32	20	20	22	19
6	37	34	34	34	20	19	23	21
7	37	36	35	34	19	20	23	22
8	36	36	36	36	18	21	21	22
9	35	37	35	37	18	19	18	21
10	33	36	36	36	17	17	15	19
11	32	35	33	34	10	10	7	13
12	30	34	30	33				
13	30	32	28	32				
14	28	28	26	31				
15	24	25	24	28				
16	12	14	17	24				
h_{0d}	0		0		2		2	
β_d	5		5		5		5	
h_{st}	71		206		47		171	
β_{st}	5		5		5		5	
h_{0st}	0		0		2		2	
$t, ^\circ\text{C}$	20,0		20,0		20,4		20,4	
$t_\phi, ^\circ\text{C}$	16,0		16,0		16,4		16,4	
ρ, Pa	97 720		97 720		97 720		97 720	

Objaśnienia: patrz Tabela 1.

W zastosowanej metodzie pomiarowej przekrój poprzeczny lutniociągu podzielono na półpłaszczyznę o szerokości po 5 cm, dla lutniociągu o średnicy 0,5 m oraz 2 cm, dla lutniociągów o średnicach 0,3 m i 0,2 m. Dla każdego z półpłaszczyzn wyznaczono ciśnienie dynamiczne, a następnie, korzystając ze wzoru na ciśnienie dynamiczne p_d

$$p_d = \rho \frac{w^2}{2} \quad (4)$$

obliczono średnią prędkość powietrza w danym półpłaszczyźnie, przekształcając wzór (4) (ρ oznacza gęstość powietrza płynącego lutniociągiem, zaś w jego prędkość). Mnożąc pole powierzchni półpłaszczyzn przez prędkość powietrza uzyskuje się strumień powietrza płynący przez dany półpłaszczyzn. Sumując strumienie objętości powietrza płynące przez wszystkie półpłaszczyznę uzyskuje się sumaryczny strumień objętości powietrza, który płynie danym przekrojem lutniociągu. Wzór (4) w tym przypadku służy do wyznaczania średniej prędkości powietrza. Aby wyznaczyć ciśnienie dynamiczne skorzystano z następującego wzoru

$$p_d = \rho_c g h_d / \beta_d \quad (5)$$

gdzie:

- ρ_c – gęstość cieczy manometrycznej (przyjęto $\rho_c = 810 \text{ kg/m}^3$),
- g – przyspieszenie siły ciężkości w polu grawitacyjnym Ziemi ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$),
- h_d – wysokość słupka cieczy manometrycznej,
- β_d – stała przełożenia mikromanometru.

Ciśnienie statyczne obliczono za pomocą wzoru analogicznego do wzoru (5), przy czym indeks d dotyczący ciśnienia dynamicznego zastąpiono indeksem st dotyczącym ciśnienia statycznego.

4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Korzystając z danych pomiarowych zestawionych w tabelach 1 i 2, za pomocą znanych wzorów (Roszczynialski, Trutwin, Waclawik 1992) obliczono takie wielkości, jak: różnica ciśnień statycznych w lutniociągu i na zewnątrz przewodu lutniowego Δp_{st} , średnie ciśnienie dynamiczne Δp_d , ciśnienie całkowite Δp_c , gęstość tego powietrza ρ , strumień objętości powietrza płynący przez dany przekrój pomiarowy V . Wynosiły one w przypadku:

- lutniociągu o średnicy 0,5 m, działającego w układzie ssącym:
 - a) w przekroju dopływowym: $\Delta p_{st} = 663,3 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 184,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 848,1 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,170 \text{ kg/m}^3$, $V = 3,490 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - b) w przekroju wypływowym: $\Delta p_{st} = 1286,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 198,1 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 1484,9 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,177 \text{ kg/m}^3$, $V = 3,592 \text{ m}^3/\text{s}$,
- lutniociągu o średnicy 0,5 m, działającego w układzie tłoczącym:
 - a) w przekroju dopływowym: $\Delta p_{st} = 1437,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 253,1 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 1690,9 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,172 \text{ kg/m}^3$, $V = 4,080 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - b) w przekroju wypływowym: $\Delta p_{st} = 1008,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 249,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 1258,6 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,162 \text{ kg/m}^3$, $V = 4,071 \text{ m}^3/\text{s}$,
- lutniociągu o średnicy 0,3 m, działającego w układzie ssącym:
 - a) w przekroju dopływowym: $\Delta p_{st} = 112,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 44,6 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 157,4 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,158 \text{ kg/m}^3$, $V = 0,621 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - b) w przekroju wypływowym: $\Delta p_{st} = 327,3 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 47,5 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 374,8 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,156 \text{ kg/m}^3$, $V = 0,641 \text{ m}^3/\text{s}$,
- lutniociągu o średnicy 0,2 m, działającego w układzie ssącym:
 - a) w przekroju dopływowym: $\Delta p_{st} = 71,5 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 22,8 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 94,3 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,153 \text{ kg/m}^3$, $V = 0,198 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - b) w przekroju wypływowym: $\Delta p_{st} = 268,5 \text{ Pa}$, $\Delta p_d = 23,7 \text{ Pa}$, $\Delta p_c = 292,2 \text{ Pa}$,
 $\rho = 1,156 \text{ kg/m}^3$, $V = 0,201 \text{ m}^3/\text{s}$.

Korzystając z podanych wyników, za pomocą wzorów (1) i (2) wyznaczono wartości: parametru wzrostu organicznego a oraz jednostkowego oporu aerodynamicznego lutni r_0 . Wynosiły one:

- a) dla lutniociągu o średnicy 0,5 m, działającego w układzie ssącym:

parametr wzrostu organicznego $a = 1,05639 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$, jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu $r_0 = 1,1411 \text{ kg/m}^8$,

b) dla lutniociągu o średnicy 0,5 m, działającego w układzie tłoczącym:

parametr wzrostu organicznego $a = 2,58679 \cdot 10^{-5} \cdot \text{m}^{-1}$, jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu $r_0 = 0,9706 \text{ kg/m}^8$,

c) dla lutniociągu o średnicy 0,3 m, działającego w układzie ssącym:

parametr wzrostu organicznego $a = 3,45386 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$, jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu $r_0 = 8,2915 \text{ kg/m}^8$,

d) dla lutniociągu o średnicy 0,2 m, działającego w układzie ssącym:

parametr wzrostu organicznego $a = 1,84632 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^{-1}$, jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu $r_0 = 71,1447 \text{ kg/m}^8$.

Wyznaczone wartości jednostkowych oporów aerodynamicznych r_0 dotyczyły lutni elastycznych „zbrojonych”, przeznaczonych głównie do wentylacji ssącej, chociaż mogą być również wykorzystywane w wentylacji tłoczącej.

Na podstawie analizy wyników uzyskanych dla lutniociągu o średnicy 0,5 m stwierdzono, że jednostkowy opór aerodynamiczny dla tego samego lutniociągu był mniejszy w przypadku, gdy lutniociąg pracował w układzie tłoczącym. Należy jednak nadmienić, że w przypadku wentylacji tłoczącej, zawirowania przepływu powietrza były większe niżeli dla wentylacji ssącej. Zatem wartości r_0 wyznaczone w przypadku wentylacji tłoczącej były obciążone większym błędem. Dlatego też proponuje się, aby ostatecznie przyjąć wartości r_0 wyznaczone dla lutniociągów pracujących w układzie ssącym.

Następnie za pomocą wzoru (3) wyznaczono współczynnik wymiany masy Θ dla badanych lutni. Wyniósł on odpowiednio:

- dla lutni o średnicy 0,5 m działającej w układzie tłoczącym $\Theta_7(500) = 0,189 \text{ m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5}$,
- dla lutni o średnicy 0,5 m działającej w układzie ssącym $\Theta_5(500) = 1,433 \text{ m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5}$,
- dla lutni o średnicy 0,3 m działającej w układzie ssącym $\Theta_5(300) = 3,123 \text{ m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5}$,
- dla lutni o średnicy 0,2 m działającej w układzie ssącym $\Theta_5(200) = 0,419 \text{ m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5}$.

Wynika stąd, że elastyczne lutnie „zbrojone” produkcji DUFLEX charakteryzują się bardzo małym współczynnikiem wymiany masy. Według bardzo surowych kryteriów, wprowadzonych przez Bystronia (1990a), są to lutnie o bardzo dobrej jakości uszczelnienia.

5. STWIERDZENIA I WNIOSKI

1. Badania aerodynamiczne elastycznych lutniociągów „zbrojonych”, zbudowanych z lutni wyprodukowanych w firmie DUFLEX s.r.o., o średnicach: 0,2, 0,3 i 0,5 m, przeprowadzono na stanowiskach badawczych w ich siedzibie.
2. Zbadano trzy odcinki lutniociągów, o długości po około 100 m, przy czym w celu zachowania wymogu odległości 12 średnic od miejsca zaburzenia przepływu, efektywna długość między przekrojami krańcowymi dla każdego z lutniociągów wynosiła: 80 m w przypadku lutniociągu o średnicy 0,5 m, 90,05 m w przypadku lutniociągu o średnicy 0,3 m oraz 89,95 m w przypadku lutniociągu o średnicy 0,2 m.

3. Jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągów zbudowanych z badanych lutni wynosił odpowiednio: $1,1411 \text{ kg/m}^8$ dla lutniociągu o średnicy 0,5 m, $8,2915 \text{ kg/m}^8$ dla lutniociągu o średnicy 0,3 m oraz $71,1447 \text{ kg/m}^8$ dla lutniociągu o średnicy 0,2 m.
4. Wyznaczone wartości jednostkowego oporu aerodynamicznego lutniociągów pozwolą na obliczanie rozplywów powietrza w wyrobiskach ścianowych, w których przewiduje się zabudowanie takich lutniociągów z chłodnym powietrzem.
5. Badane lutniociągi charakteryzowały się bardzo dobrą jakością uszczelnienia. Wynosiła ona $0,4 \text{ m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5}$ dla lutniociągu o średnicy 0,2 m, $3,1 \text{ kg/m}^8$ dla lutniociągu o średnicy 0,3 m oraz $1,4 \text{ kg/m}^8$ dla lutniociągu o średnicy 0,5 m.

Literatura

1. Bystroń H. (1990a): Kryteria jakości aerodynamicznej nie rozgałęzionych lutniociągów kopalnianych. Wiadomości Górnicze nr 1.
2. Bystroń H. (1990b): Metody obliczania nie rozgałęzionych lutniociągów kopalnianych i oceny ich jakości aerodynamicznej. Archiwum Górnictwa t. 35, z. 3.
3. Bystroń H., Jaroń S., Markefka P., Strumiński A., Wojtyczka A. (1974): Poradnik Górnika. T. 3, Dział I – Przewietrzanie kopalń. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
4. Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J. (1992): Kopalniane pomiary wentylacyjne. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trenczek