



Dobór instalacji lutniowej jako środek do zmniejszenia kosztów przewietrzania drażonych wyrobisk górniczych

Selection of air-duct ventilation system as a means to reduce ventilation costs of the driven workings

Dr Józef Knechtel*

Treść: Rozpatruje się lutniociągi zbudowane z lutni elastycznych przeznaczone do wentylacji tłoczącej. Analizowano wpływ średnicy oraz jakości uszczelnienia lutniociągu na jego sprawność i opór aerodynamiczny. Zwrócono uwagę na zapotrzebowanie energii do przewietrzania drażonych wyrobisk. Z kolei wybrano 44 funkcjonujące na dole kopalni lutniociągi o jakości uszczelnienia gorszej od zadowalającej. Obliczono wartości dobowego zapotrzebowania na energię do przewietrzania tych wyrobisk dla stanu aktualnego i dla stanu charakteryzującego zadowalającą jakość uszczelnienia. Dokonano oceny oszczędności, jaką można uzyskać poprawiając jakość uszczelnienia lutniociągu.

Abstract: This paper presents air-duct lines made of flexible air pipes, intended for the forced ventilation system. The influence of diameter and the air-tightness of a duct line on its efficiency and aerodynamic resistance was investigated. Attention was drawn to the energy demand for ventilation of the workings being driven. While operating in underground coal mines, 44 duct lines of the air-tightness were selected. The values of daily energy demand for ventilation of those workings were calculated both for the current state and the state characterizing satisfactory level of the air-tightness. Cost savings that can be achieved by improving the air-tightness of a duct line were assessed.

Słowa kluczowe:

wentylacja odrębna, opór aerodynamiczny lutniociągu, sprawność lutniociągu, współczynnik wymiany masy, koszty przewietrzania

Key words:

auxiliary ventilation, aerodynamic resistance of air-duct, efficiency of air-duct, mass exchange coefficient, ventilation costs

1. Wprowadzenie

W Głównym Instytucie Górnictwa sporządzane są raporty roczne o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Rozdział 6 tego raportu dotyczy zagrożenia klimatycznego. Z przeprowadzonych analiz zagrożenia klimatycznego wynika, że w wyrobiskach z wentylacją odrębną trudniej jest zapewnić prawidłowe warunki klimatyczne aniżeli w wyrobiskach z opływowymi prądami powietrza. Jest to związane z mniejszą intensywnością przewietrzania wyrobisk ślepych. Głównym środkiem umożliwiającym uzyskanie prawidłowych warunków klimatycznych w drażonym wyrobisku górniczym (zwłaszcza kombajnowym) jest doprowadzenie do strefy przodkowej tego wyrobiska odpowiedniej ilości powietrza świeżego za pomocą instalacji lutniowej. O efektywności przewietrzania wyrobisk ślepych decyduje jakość instalacji lutniowej. Obecnie w polskim górnictwie węglowym stosowane są głównie lutniociągi zbudowane z lutni elastycznych z tworzyw sztucznych (o średnicach 0,6 m, 0,8 m, 1 m, 1,2 m a ostatnio również o średnicy 1,4 m), w mniejszym stopniu z lutni metalowych blaszanych (o średnicach 0,6 m, 0,8 m i 1 m), a także lutni metalowych typu „spiro” (o średnicach 0,8 m i 1 m). W niniejszym artykule

rozważania prowadzone są w odniesieniu do lutniociągów elastycznych „nie zbrojonych” przewidzianych do wentylacji tłoczącej. Omawia się wpływ parametrów aerodynamicznych lutniociągów na efektywność przewietrzania drażonych wyrobisk oraz na koszty przewietrzania. Badano wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu na jego sprawność i opór aerodynamiczny. Z kolei analizowano, jak wspomniane wielkości wpływają na potrzebne spiętrzenie wentylatora (lub układu wentylatorów) współpracującego z lutniociągiem. Parametr ten decyduje o zapotrzebowaniu mocy elektrycznej, a to z kolei ma przełożenie na koszty przewietrzania.

2. Parametry aerodynamiczne lutniociągów kopalnianych

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi jakość lutniociągu są jednostkowy opór aerodynamiczny r_0 oraz współczynnik wymiany masy Θ . Stosuje się również pojęcie jakości gładzi lutniociągu. Opierając się na wynikach wieloletnich badań H. Bystronia [2] wprowadził następujące kryteria jakości szczelności lutniociągów oparte na wartości współczynnika wymiany masy Θ , które podano w tabelicy 1.

Jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu zbudowanego z lutni elastycznych można wyznaczyć korzystając z tabelicy 2.

*1) Zakład Aerologii Górniczej Głównego Instytutu Górnictwa

Tablica 1. Kryteria jakości szczelności lutniociągów oparte na współczynniku wymiany masy Θ wg H. Bystronia [2]
Table 1. Criteria of the air-tightness of air-ducts based on the mass exchange coefficient Θ according to H. Bystronia [2]

Współczynnik wymiany masy, $m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$	Jakość uszczelnienia lutniociągu
$\Theta \leq 0,32$	doskonała (+5)
$0,32 < \Theta \leq 1,6$	bardzo dobra (5)
$1,6 < \Theta \leq 3,2$	dobra (4)
$3,2 < \Theta \leq 16$	prawie dobra (-4)
$16 < \Theta \leq 32$	dość dobra (+3)
$32 < \Theta \leq 160$	zadowalająca (3)
$160 < \Theta \leq 320$	zła (2)
$320 < \Theta \leq 1600$	bardzo zła (1)
$\Theta \geq 1600$	fatalna (0)

Tablica 2. Zestawienie oporów jednostkowych lutni nowych (nie używanych) wg wyników badań GIG [3]
Table 2. Summary of the values of unit resistance of new air pipes (never used) according to the results of tests carried out by GIG [3]

Rodzaj lutni	Średnica lutni – D , m	Fabryczny opór jednostkowy lutni r_o , kg/m^8
lutnie elastyczne niezbrojone, przewidziane do wentylacji tłoczącej	0,4	1,000
	0,5	0,237
	0,6	0,120
	0,8	0,039
	1,0	0,020
Lutnie elastyczne zbrojone, przewidziane do wentylacji ssącej	1,2	0,008
	0,2	75
	0,3	9
	0,5	1,5
	0,8	0,6
1,0	0,2	

Tablica 3. Kryteria jakości gładzi lutniociągów
Table 3. Criteria of air-ducts smoothness

Funkcja intensywności uszkodzeń lutni λ , %	Jakość gładzi lutniociągu
$\lambda \leq 0,32$	doskonała (+5)
$0,32 < \lambda \leq 1,6$	bardzo dobra (5)
$1,6 < \lambda \leq 3,2$	dobra (4)
$3,2 < \lambda \leq 16$	prawie dobra (-4)
$16 < \lambda \leq 32$	dość dobra (+3)
$32 < \lambda \leq 160$	mierna (3)
$160 < \lambda \leq 320$	zła (2)
$320 < \lambda \leq 1600$	bardzo zła (1)
$\lambda \geq 1600$	fatalna (0)

W Zakładzie Aerologii Górniczej GIG w roku 2013 badano również jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągów zbudowanych z lutni elastycznych o średnicy 1,4 m, [5, 6].

Uzyskane wartości były mniejsze od $0,002 kg/m^8$. Dlatego proponuje się do dalszych rozważań przyjmować tę wartość.

Jakość gładzi lutniociągu można natomiast ocenić na podstawie kryterium wprowadzonego przez H. Bystronia [2], opartym na wartości funkcji intensywności uszkodzeń lutni λ , podanego w tablicy 3.

Występująca w tablicy 3 funkcja intensywności uszkodzeń lutni λ określona jest wzorem

$$\lambda = 100(r/r_0 - 1), \quad (1)$$

w którym r oznacza faktyczny jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu, kg/m^8 .

3. Wpływ jakości uszczelnienia lutniociągu i jego średnicy na jego sprawność oraz opór aerodynamiczny

W rozważaniach brano pod uwagę lutniociągi elastyczne, przewidziane do wentylacji tłoczącej zbudowane z lutni o średnicach: 0,8 m, 1,0 m, 1,2 m oraz 1,4 m. Przyjęto, że długości drążonych wyrobisk nie będą większe od 3000 m. Uwzględniając również realia kopalniane [4], założono cztery wartości współczynnika wymiany masy Θ : 16, 32, 80 oraz $160 m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$. Ponadto przyjęto, że intensywność przewietrzania strefy przodkowej jest równa $6 m^3/s$. Korzystając z metody obliczania nie rozgałęzionych lutniociągów kopalnianych [1] wyznaczono dla przyjętych średnic: opór aerodynamiczny lutniociągu $-R$, jego sprawność $-\eta$, wydajność wentylatora lutniowego (lub układu wentylatorów lutniowych) $-V_o$. Korzystając z relacji

$$\Delta p_c = R V_o^2 \quad (2)$$

$$\text{oraz } N = V_o \Delta p_c \quad (3)$$

w następnych kolumnach podano wartości spiętrzenia wentylatora (lub układu wentylatorów) $-\Delta p_c$ oraz potrzebną moc wentylatora (zakładając 100% sprawność zespołu) $-N$. W ostatniej kolumnie podano dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną. W przypadku lutniociągu zbudowanego z lutni o średnicy 0,8 m obliczenia wykonano dla trzech wariantów długości lutniociągu: 1000 m, 1500 m oraz 2000 m, natomiast dla większych średnic lutniociągów wspomniane obliczenia wykonano dla czterech wariantów długości lutniociągu: 1000 m, 1500 m, 2000 m oraz 3000 m. Wyniki obliczeń podano w tablicach: 4, 5, 6 i 7.

Zgodnie z oczekiwaniami, w miarę pogarszania się jakości uszczelnienia lutniociągu jego sprawność maleje. Aby doprowadzić do strefy przodkowej potrzebną ilość powietrza należy zwiększyć wydajność wentylatora (lub układu wentylatorów). Wraz z pogorszeniem się jakości uszczelnienia lutniociągu maleje wprawdzie jego opór aerodynamiczny, ale potrzebne spiętrzenie wentylatora (lub układu wentylatorów) rośnie, ponieważ zależy ono od wydajności wentylatora w drugiej potędze, a od oporu aerodynamicznego w pierwszej potędze. Ze wzrostem spiętrzenia wentylatora rośnie jego moc, a to ma przełożenie na zapotrzebowanie energii elektrycznej. Ze wzrostem długości lutniociągu rosną jego opór aerodynamiczny oraz spiętrzenie i wydajność wentylatora (lub układu wentylatorów). W przypadku lutniociągu o średnicy 0,8 m, przy jego długości 1500 m zachodzi potrzeba stosowania układu wentylatorów, jeśli jakość uszczelnienia będzie równa $\Theta = 160 m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$. Natomiast poprawiając jakość uszczelnienia lutniociągu można uzyskać potrzebne parametry stosując jeden wentylator (tabl. 4). Ze wzrostem długości lutniociągu do 2000 m, stosując lutniociąg o średnicy 0,8 m, trzeba znacznie poprawić jakość jego uszczelnienia.

Tablica 4. Wpływ jakości uszczelnienia elastycznego lutniociągu tłoczącego o średnicy 0,8 m na jego parametry aerodynamiczne

jednostkowy opór aerodynamiczny: $r_0 = 0,039 \text{ kg/m}^8$; strumień objętości powietrza w strefie przodkowej: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Table 4. Influence of the air-tightness of a flexible forced duct line with a diameter of 0,8m on its aerodynamic parameters

unit aerodynamic resistance: $r_0 = 0,039 \text{ kg/m}^8$; air volume flow rate in the face zone: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Współczynnik wymiany masy	Opór aerodynamiczny	Sprawność	Wydajność wentylatora	Śpiętrzenie wentylatora	Moc wentylatora	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh
$\Theta, \text{m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5} \cdot 10^6$	$R, \text{kg}/\text{m}^7$	$\eta, \%$	$V_p, \text{m}^3/\text{s}$	$\Delta p_c, \text{Pa}$	N, kW	
$L = 1000 \text{ m}$						
16	38,731	84,023	7,141	1975	14,103	338,472
32	34,897	76,023	7,892	2174	17,155	411,720
80	28,070	60,915	9,850	2723	26,825	643,800
160	22,004	46,394	12,933	3680	47,597	1142,328
$L = 1500 \text{ m}$						
16	52,083	77,018	7,790	3161	24,624	590,976
32	45,065	66,286	9,052	3692	33,423	802,152
80	33,638	47,543	12,620	5357	67,611	1622,664
160	24,662	31,600	18,987	8891	168,816	4051,584
$L = 2000 \text{ m}$						
16	63,302	70,598	8,499	4572	38,860	932,640
32	52,796	57,796	10,381	5690	59,067	1417,608
80	37,029	37,106	16,170	9682	156,555	3757,320
160	25,896	21,524	27,876	20123	560,944	13462,656

Tablica 5. Wpływ jakości uszczelnienia elastycznego lutniociągu tłoczącego o średnicy 1,0 m na jego parametry aerodynamiczne

jednostkowy opór aerodynamiczny: $r_0 = 0,02 \text{ kg/m}^8$; strumień objętości powietrza w strefie przodkowej: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Table 5. Influence of the air-tightness of a flexible forced duct line with a diameter of 1,0 m on its aerodynamic parameters

unit aerodynamic resistance: $r_0 = 0,02 \text{ kg/m}^8$; air volume flow rate in the face zone: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Współczynnik wymiany masy	Opór aerodynamiczny	Sprawność	Wydajność wentylatora	Śpiętrzenie wentylatora	Moc wentylatora	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh
$\Theta, \text{m}^{2,5}/\text{kg}^{0,5} \cdot 10^6$	$R, \text{kg}/\text{m}^7$	$\eta, \%$	$V_p, \text{m}^3/\text{s}$	$\Delta p_c, \text{Pa}$	N, kW	
1	2	3	4	5	6	7
$L = 1000 \text{ m}$						
16	20,325	86,931	6,902	968	6,683	160,392
32	18,687	80,157	7,485	1047	7,837	188,088
80	15,620	66,852	8,975	1258	11,292	271,008
160	12,693	53,281	11,261	1610	18,126	435,024
$L = 1500 \text{ m}$						
16	27,891	81,052	7,403	1528	11,315	271,560
32	24,778	71,764	8,361	1732	14,482	347,568
80	19,373	54,660	10,977	2334	25,624	614,976
160	14,747	38,892	15,427	3510	54,146	1299,504
$L = 2000 \text{ m}$						
16	34,469	75,571	7,940	2173	17,252	414,048
32	29,660	64,251	9,338	2587	24,153	579,432
80	21,882	44,691	13,426	3944	52,954	1270,896
160	15,840	28,389	21,135	7076	149,540	3588,960
$L = 3000 \text{ m}$						
16	45,158	65,695	9,133	3767	34,402	825,648
32	36,710	51,501	11,650	4983	58,047	1393,128
80	24,681	29,877	20,082	9954	199,893	4797,432
160	16,734	15,126	39,667	26330	1044,440	25066,560

Tablica 6. Wpływ jakości uszczelnienia elastycznego lutniociągu tłoczącego o średnicy 1,2 m na jego parametry aerodynamiczne

jednostkowy opór aerodynamiczny: $r_0 = 0,008 \text{ kg/m}^8$; strumień objętości powietrza w strefie przodkowej: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Table 6. Influence of the air-tightness of a flexible forced duct line with a diameter of 1,2 m on its aerodynamic parameters

unit aerodynamic resistance: $r_0 = 0,008 \text{ kg/m}^8$; air volume flow rate in the face zone: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Współczynnik wymiany masy	Opór aerodynamiczny	Sprawność	Wydajność wentylatora	Śpiętrzenie wentylatora	Moc wentylatora	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh
$\Theta, \text{m}^2/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$	$R, \text{kg/m}^7$	$\eta, \%$	$V_{\rho}, \text{m}^3/\text{s}$	$\Delta p_c, \text{Pa}$	N, kW	
1	2	3	4	5	6	7
$L = 1000 \text{ m}$						
16	8,565	90,181	6,653	379	2,522	60,528
32	8,032	84,932	7,064	401	2,832	67,968
80	6,989	74,250	8,081	456	3,688	88,512
160	5,925	62,730	9,565	542	5,185	124,440
$L = 1500 \text{ m}$						
16	11,897	85,640	7,006	584	4,091	98,184
32	10,863	78,273	7,665	638	4,893	117,432
80	8,955	63,980	9,378	788	7,386	177,264
160	7,170	49,684	12,076	1046	12,627	303,048
$L = 2000 \text{ m}$						
16	14,901	81,327	7,378	811	5,984	143,616
32	13,267	72,135	8,318	918	7,635	183,240
80	10,414	55,130	10,883	1234	13,424	322,176
160	7,951	39,351	15,247	1848	28,184	676,416
$L = 3000 \text{ m}$						
16	20,053	73,342	8,181	1342	10,980	263,520
32	17,043	61,266	9,793	1635	16,008	384,192
80	12,303	40,934	14,658	2643	38,745	929,880
160	8,749	24,685	24,306	5169	125,634	3015,216

Tablica 7. Wpływ jakości uszczelnienia elastycznego lutniociągu tłoczącego o średnicy 1,4 m na jego parametry aerodynamiczne

jednostkowy opór aerodynamiczny: $r_0 = 0,002 \text{ kg/m}^8$; strumień objętości powietrza w strefie przodkowej: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Table 7. Influence of the air-tightness of a flexible forced duct line with a diameter of 1,4 m on its aerodynamic parameters

unit aerodynamic resistance: $r_0 = 0,002 \text{ kg/m}^8$; air volume flow rate in the face zone: $V_k = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

Współczynnik wymiany masy	Opór aerodynamiczny	Sprawność	Wydajność wentylatora	Śpiętrzenie wentylatora	Moc wentylatora	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh
$\Theta, \text{m}^2/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$	$R, \text{kg/m}^7$	$\eta, \%$	$V_{\rho}, \text{m}^3/\text{s}$	$\Delta p_c, \text{Pa}$	N, kW	
$L = 1000 \text{ m}$						
16	2,439	93,697	6,404	100	0,640	15,360
32	2,331	90,239	6,649	103	0,685	16,440
80	2,111	82,981	7,231	110	0,798	19,152
160	1,873	74,768	8,025	121	0,968	23,232
$L = 1500 \text{ m}$						
16	3,355	90,697	6,615	147	0,971	23,304
32	3,150	85,722	6,999	154	1,080	25,920
80	2,748	75,590	7,938	173	1,374	32,976
160	2,339	64,650	9,281	201	1,870	44,880
$L = 2000 \text{ m}$						
16	4,213	87,792	6,834	197	1,345	32,280
32	3,888	81,430	7,368	211	1,555	37,320
80	3,276	68,858	8,714	249	2,167	52,008
160	2,687	55,902	10,733	310	3,322	79,728
$L = 3000 \text{ m}$						
16	5,770	82,259	7,294	307	2,239	53,736
32	5,156	73,482	8,165	344	2,807	67,368
80	4,079	57,139	10,501	450	4,723	113,352
160	3,141	41,797	14,355	647	9,291	222,984

W przypadku, gdy $\Theta = 16 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$, wówczas do strefy przodkowej drążonego wyrobiska można będzie doprowadzić $6 \text{ m}^3/\text{s}$ powietrza stosując jeden wentylator.

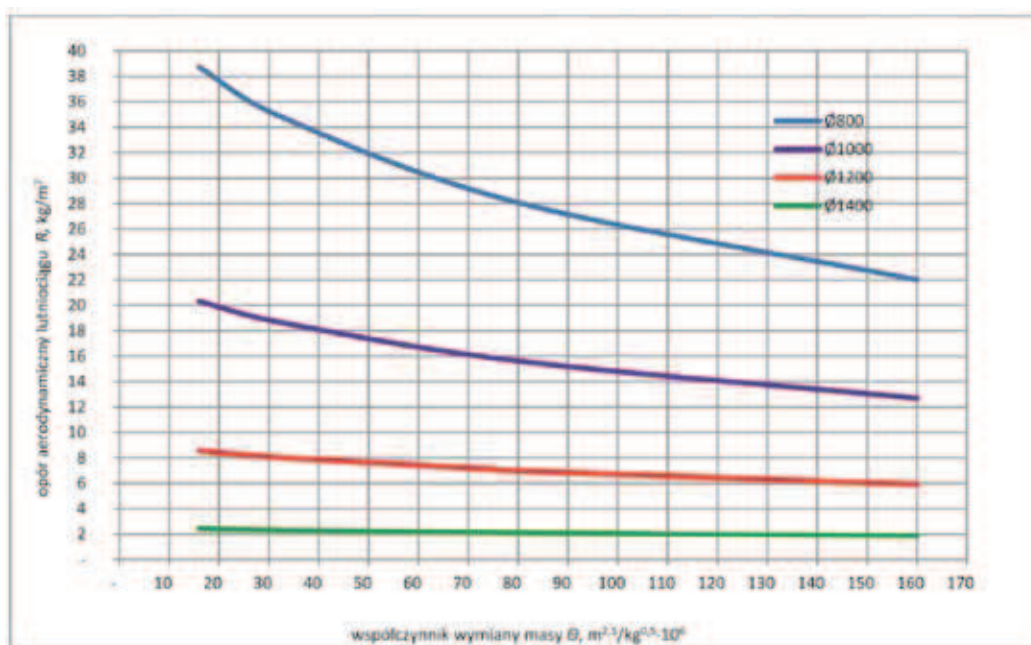
Z analizy kolejnych tablic: 5, 6 i 7 wynika, że ze wzrostem średnicy lutniociągu maleje jego opór aerodynamiczny, a rośnie jego sprawność. W przypadku lutniociągu o średnicy $1,0 \text{ m}$ i długości 1500 m (tablica 5) nawet przy niskiej jakości uszczelnienia lutniociągu: $\Theta = 160 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$ potrzebną intensywność przewietrzania wyrobiska można osiągnąć stosując jeden wentylator. Dla wyrobiska o długości 2000 m musi być lepsza jakość uszczelnienia: $\Theta = 80 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$. W przeciwnym przypadku trzeba zastosować układ wentylatorów. Przy jakości uszczelnienia lutniociągu: $\Theta = 16 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$ można uzyskać założoną intensywność przewietrzania nawet wtedy, gdy długość lutniociągu jest równa 3000 m .

Jeszcze lepsze efekty przewietrzania można osiągnąć stosując lutniociąg o średnicy $1,2 \text{ m}$ (tablica 6). Wymaganą intensywność przewietrzania można osiągnąć przy pomocy jednego wentylatora, gdy długość lutniociągu jest równa 2000 m . Dla długości 3000 m można osiągnąć podobne

rezultaty, jeśli współczynnik wymiany masy zastosowanego lutniociągu będzie nie większy od $\Theta = 80 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$ lub jeśli zastosuje się układ wentylatorów współpracujących z lutniociągiem.

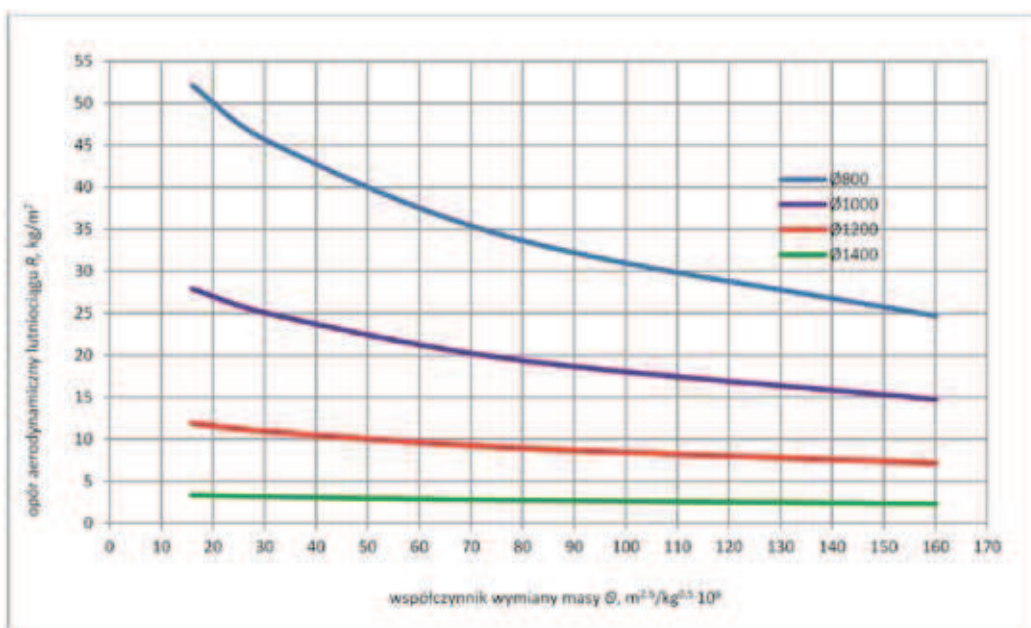
Producenci lutni wentylacyjnych oferują również lutnie wentylacyjne o średnicy $1,4 \text{ m}$. Lutniociągi zbudowane z lutni o takiej średnicy pozwalają uzyskać intensywność przewietrzania strefy przodkowej równą około $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (i większą), przy długości wyrobiska 3000 m i większej.

Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu na jego opór aerodynamiczny przedstawiono w sposób graficzny na rysunkach: 1, 2, 3 i 4. Rysunek 1 dotyczy lutniociągów o długości 1000 m , rys. 2 lutniociągów o długości 1500 m , rysunek 3 lutniociągów o długości 2000 m , zaś rysunek 4 lutniociągów o długości 3000 m . Linia koloru niebieskiego dotyczy lutniociągu o średnicy $0,8 \text{ m}$ ($\varnothing 800 \text{ mm}$), koloru fioletowego lutniociągu o średnicy $1,0 \text{ m}$ ($\varnothing 1000 \text{ mm}$), czerwonego lutniociągu o średnicy $1,2 \text{ m}$ ($\varnothing 1200 \text{ mm}$), a linia koloru zielonego lutniociągu o średnicy $1,4 \text{ m}$ ($\varnothing 1400 \text{ mm}$).



Rys. 1. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 1000 m na jego opór aerodynamiczny

Fig. 1. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 1000 m on its aerodynamic resistance

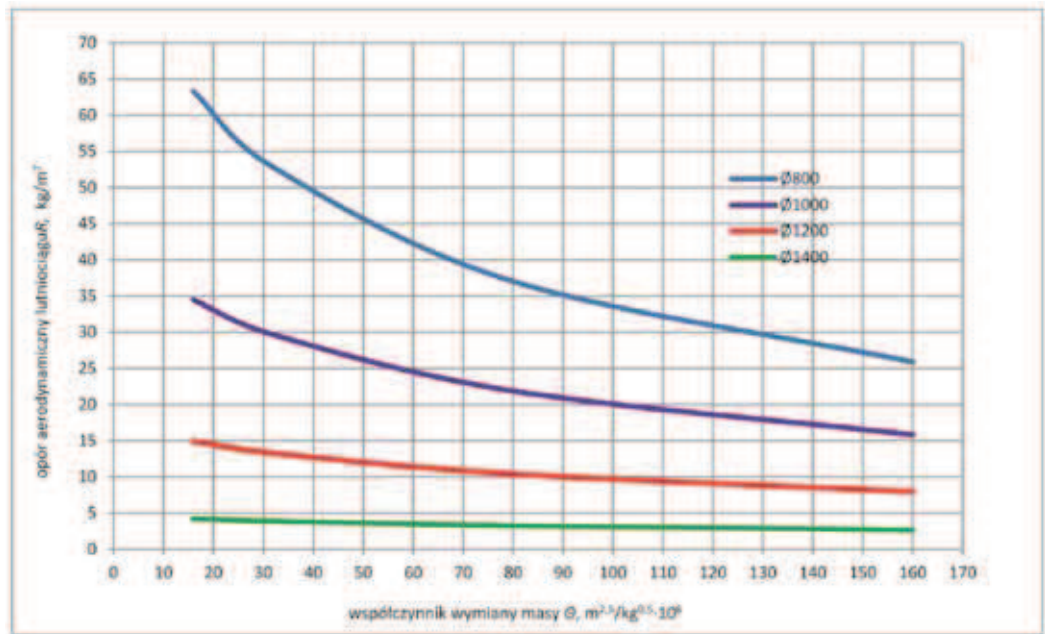


Rys. 2. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 1500 m na jego opór aerodynamiczny

Fig. 2. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 1500 m on its aerodynamic resistance

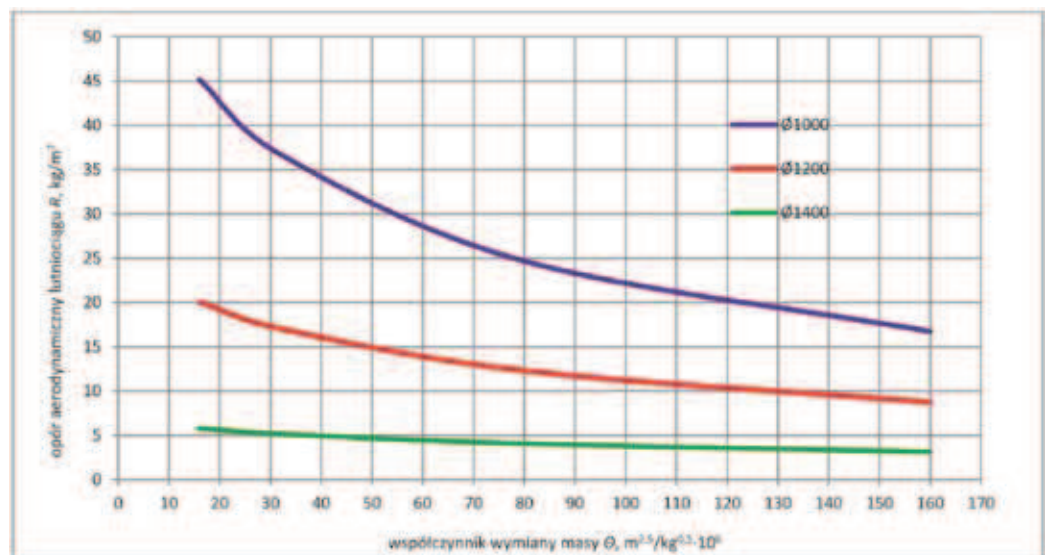
Rys. 3. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 2000 m na jego opór aerodynamiczny

Fig. 3. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 2000 m on its aerodynamic resistance



Rys.4. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 3000 m na jego opór aerodynamiczny

Fig. 4. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 3000 m on its aerodynamic resistance



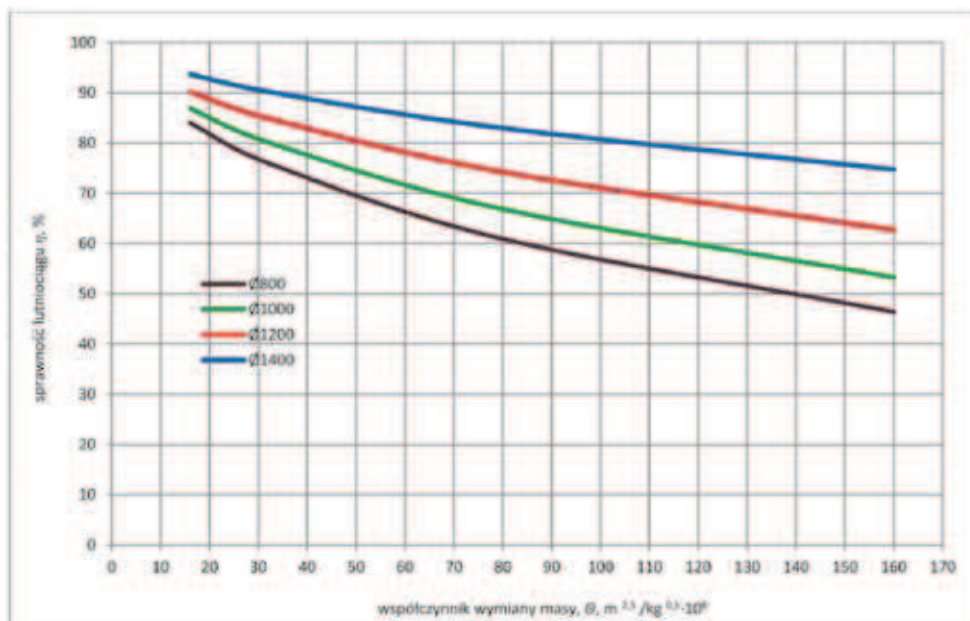
Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu na jego sprawność przedstawiono w sposób graficzny na rysunkach: 5, 6, 7 i 8. Rysunek 5 dotyczy lutniociągów o długości 1000 m, rysunek 6 lutniociągów o długości 1500 m, rysunek 7 lutniociągów o długości 2000 m, zaś rysunek 8 lutniociągów o długości 3000 m. Linia koloru brązowego dotyczy lutniociągu o średnicy 0,8 m ($\varnothing 800$ mm) koloru zielonego lutniociągu o średnicy 1,0 m ($\varnothing 1000$ mm), czerwonego lutniociągu o średnicy 1,2 m ($\varnothing 1200$ mm), a linia koloru niebieskiego lutniociągu o średnicy 1,4 m ($\varnothing 1400$ mm).

Przedstawione wyniki obliczeń, a także praktyka kopalniana wskazują, że dobra jakość uszczelnienia lutniociągów i duże ich średnice gwarantują intensywność przewietrzania drążonych wyrobisk z wentylacją odrębną adekwatną do występujących w tych wyrobiskach zagrożeń metanowego i klimatycznego.

4. Koszt przewietrzania drążonych wyrobisk z wentylacją odrębną

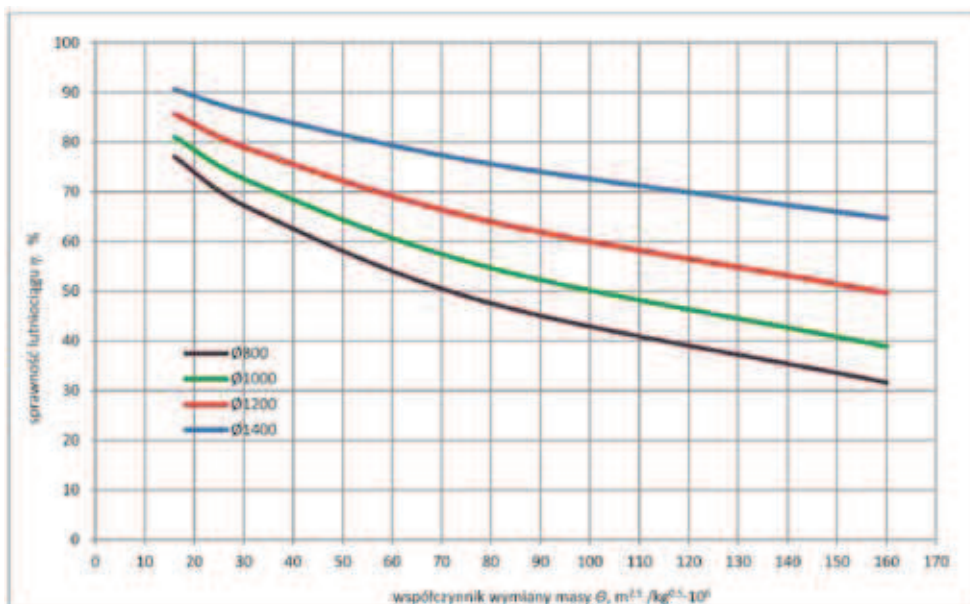
W tablicach 4, 5, 6 i 7 w ostatnich dwóch kolumnach podano zapotrzebowanie na energię elektryczną do przewietrzania drążonych wyrobisk. Założono, że wentylatory (lub stacje wentylatorów) pracują ze 100% sprawnością. Rozpatruje się wyrobisko o długości 1000 m oraz współczynnika wymiany masy $\Theta = 16 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$. Dla lutniociągu o średnicy 1,4 m dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną (zakładając 100% sprawność wentylatora) wynosi około 15 kW. Dla lutniociągu o średnicy 1,2 m zapotrzebowanie to jest blisko 4 razy większe, dla lutniociągu o średnicy 1,0 m ponad 10 razy większe, a dla lutniociągu o średnicy 0,8 m wspomniane zapotrzebowanie na energię jest ponad 22 razy większe.

Większy wpływ na zapotrzebowanie energii ma jakość uszczelnienia lutniociągu. Bada się stosunek zapotrzebowania na energię dla dwóch wartości współczynnika wymiany masy:



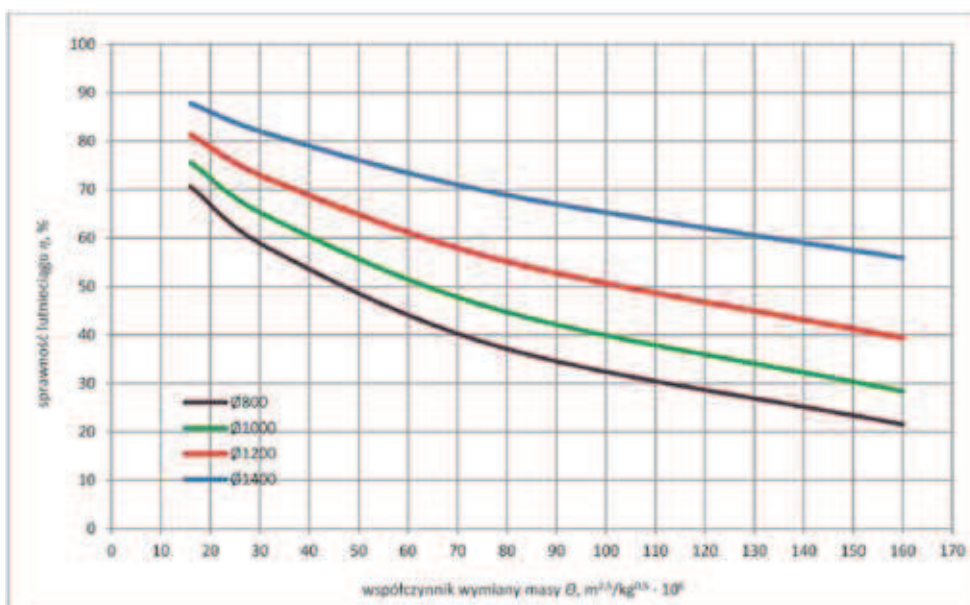
Rys. 5. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 1000 m na jego sprawność

Fig. 5. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 1000 m on its efficiency



Rys. 6. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 1500 m na jego sprawność

Fig. 6. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 1500 m on its efficiency

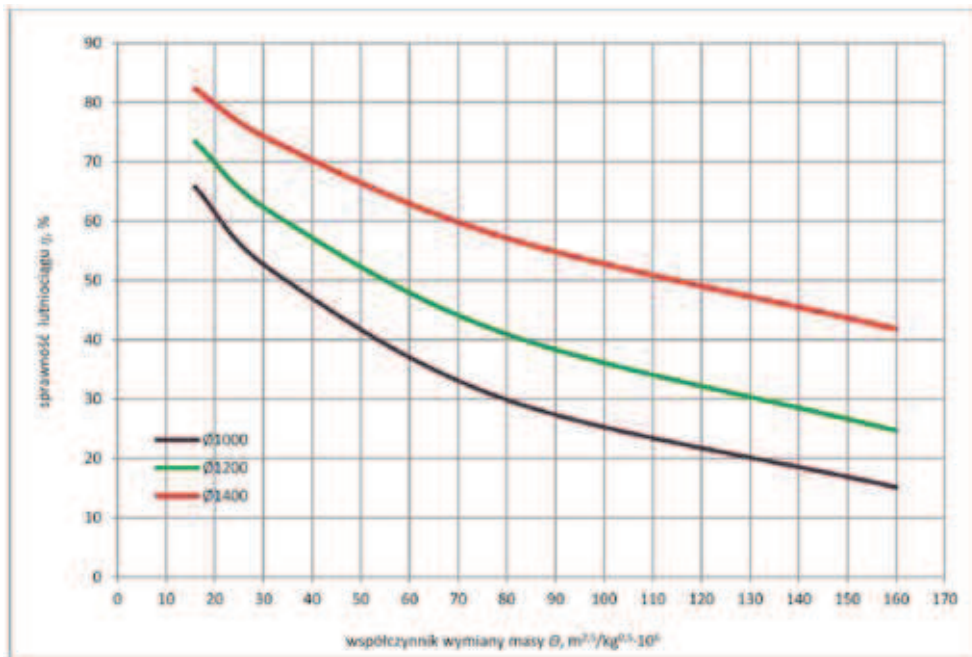


Rys. 7. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 2000 m na jego sprawność

Fig. 7. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 2000 m on its efficiency

Rys. 8. Wpływ średnicy i jakości uszczelnienia lutniociągu o długości 3000 m na jego sprawność

Fig. 8. Influence of diameter and the air-tightness of a duct line with a length of 3000 m on its efficiency



$\Theta_1 = 160 m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$ oraz $\Theta_2 = 16 m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$. Dla lutniociągu o średnicy 0,8 m wymieniony stosunek wynosi około 3,4, dla lutniociągu o średnicy 1,0 m ponad 2,7, dla lutniociągu o średnicy 1,2 m ponad 2,0, a dla lutniociągu o średnicy 1,4 m wspomniany stosunek wynosi 1,5. Zatem w przypadku współczynnika wymiany masy: $\Theta_1 = 160 m^{2.5}/kg^{0.5} \cdot 10^6$ dla przewietrzania wyrobiska o długości 1000 m potrzebna energia przy zastosowaniu lutniociągu o średnicy 1,4 m wynosi 23 kW. Dla lutniociągu o średnicy 1,2 m potrzeba już ponad 5 razy więcej energii, dla lutniociągu o średnicy 1,0 m prawie 19 razy więcej, a dla lutniociągu o średnicy 0,8 m potrzeba 49 razy więcej energii aniżeli przy zastosowaniu lutniociągu o średnicy 1,4 m. Opisana sytuacja przedstawiona jest graficznie na rysunku 9. Linia koloru niebieskiego dotyczy lutniociągu o średnicy 0,8 m ($\varnothing 800$ mm), koloru czerwonego lutniociągu o średnicy 1,0 m ($\varnothing 1000$ mm), koloru zielonego

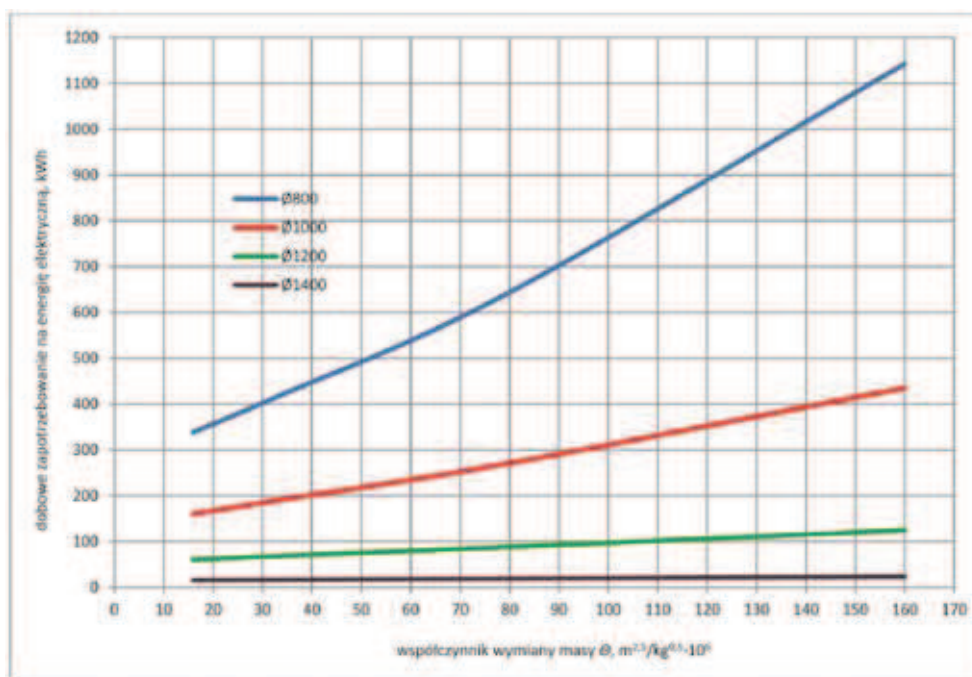
lutniociągu o średnicy 1,2 m ($\varnothing 1200$ mm), a linia koloru brązowego lutniociągu o średnicy 1,4 m ($\varnothing 1400$ mm).

W przypadku lutniociągu o średnicy 1,4 m wpływ współczynnika wymiany masy Θ na zapotrzebowanie energii nie jest tak duży jak w przypadku lutniociągów o mniejszych średnicach. W przypadku lutniociągu o średnicy 0,8 m wpływ ten jest bardzo duży. Korzystając z wyników zawartych w ostatnich kolumnach tablic 4, 5, 6 i 7 można podobne wykresy sporządzić dla wyrobisk o długości: 1500 m, 2000 m i 3000 m.

Badania własności aerodynamicznych funkcjonujących w kopalniach węgla kamiennego lutniociągów elastycznych wskazują, że wiele z tych lutniociągów charakteryzuje się złą jakością uszczelnienia [4]. Pomimo złej jakości uszczelnienia za pomocą lutniociągów tych do stref przodkowych drążonych wyrobisk dostarczana jest wymagana ilość powietrza. Nie uwzględniono jednak tutaj aspektu ekonomicznego.

Rys. 9. Dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną do przewietrzania drążonego wyrobiska o długości 1000 m

Fig. 9. Daily demand for electric power for ventilation of the driven working with a length of 1000 m



Tablica 8. Sprawności, jednostkowe opory aerodynamiczne oraz szczelności lufociągów kopalnianych o zlej jakości uszczelnienia
 Table 8. Values of efficiency, unit aerodynamic resistance and air-tightness of mine duct lines with low quality of air-tightness

Lp.	D, m	L, m	A, m ²	V ₀ , m ³ /s	V _p , m ³ /s	Δp _e , Pa	η, %	r _p , kg/m ⁸	Θ, m ^{2.5} / kg ^{0.5} ·10 ⁶	R, kg/m ⁷	N, kW	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh	Parametry dla zadowalającej jakości uszczelnienia lufociągu				Różnica wartości w kolumnach 13 i 17
													R _{zmf} , kg/m ⁷	η _{zmf} , %	V _{0,zmf} , m ³ /s	Dobowe zapotrzebowanie na energię, kWh	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,0	480	15,8	11,00	7,20	1891	65,5	0,05206	168,3	16,850	20,801	499,224	8,630	73,9	9,74	191,469	307,755
2	1,0	290	14,2	11,00	7,00	1850	63,6	0,08626	307,3	16,466	20,350	488,400	6,344	83,3	8,50	90,338	398,062
3	1,0	510	15,8	11,00	6,60	2580	60,0	0,07015	174,2	22,410	28,380	681,120	8,943	72,5	9,10	161,598	519,522
4	1,0	100	14,8	6,80	5,20	3030	76,5	0,86643	212,4	67,054	20,604	494,496	3,440	93,9	5,54	14,089	480,407
5	1,0	200	13,0	13,00	8,50	2500	65,4	0,11885	416,4	16,014	32,500	780,000	5,054	88,2	9,64	108,750	671,250
6	0,8	262	20,0	9,00	6,67	1207	74,1	0,09366	190,1	18,459	10,863	260,712	11,558	81,8	8,16	150,546	110,166
7	0,8	395	17,8	9,60	5,60	1768	58,3	0,08997	256,9	21,749	16,973	407,352	14,405	73,8	7,59	150,911	256,441
8	1,0	310	13,2	6,80	4,60	770	67,6	0,08337	226,0	17,932	5,236	125,664	6,611	82,3	5,47	25,993	99,671
9	1,0	300	17,8	7,30	4,50	2020	61,6	0,20306	206,5	39,034	14,746	353,904	6,478	82,8	5,32	23,343	330,561
10	1,0	130	17,8	6,60	4,40	1160	66,7	0,31308	449,0	27,883	7,656	183,744	3,946	92,1	5,97	20,199	163,545
11	1,0	230	17,8	7,16	5,50	1028	76,8	0,12079	161,0	21,589	7,360	176,640	5,500	86,5	6,36	33,870	142,770
12	1,0	164	17,8	9,33	6,50	892	69,7	0,09918	486,1	11,580	8,322	199,728	4,496	90,2	7,21	40,475	159,253
13	0,8	29	17,8	6,60	6,00	478	90,9	0,66032	335,9	17,435	3,155	75,720	4,930	97,8	6,14	27,387	48,333
14	1,0	120	18,0	14,22	11,32	3015	79,6	0,17157	289,2	16,532	42,873	1028,952	3,779	92,7	12,21	164,954	863,998
15	0,8	65	17,8	7,15	6,82	734	95,4	0,40795	1505,7	17,153	5,248	125,952	6,115	95,1	7,17	54,026	71,926
16	1,2	70	21,8	18,15	12,82	2047	70,6	0,13618	1389,8	6,870	37,153	891,672	1,312	96,8	13,25	73,112	818,560
17	1,0	86	17,8	8,33	7,17	350	86,1	0,09252	351,7	6,874	2,916	69,984	3,197	94,7	7,57	33,243	36,741
18	1,2	748	19,3	16,30	10,00	1992	61,3	0,01684	188,9	8,039	32,470	779,280	5,040	70,6	14,17	344,598	434,682
19	1,2	475	17,8	13,80	9,17	1398	66,4	0,02448	236,1	7,944	19,292	463,008	3,814	80,1	11,44	137,328	325,680
20	1,0	535	20,8	12,50	8,50	1543	68,0	0,02994	166,2	11,164	19,288	462,912	9,196	71,4	11,90	372,262	90,650
21	1,2	342	17,8	15,00	11,70	1308	78,0	0,02438	182,5	6,571	19,620	470,880	3,094	85,3	13,72	192,012	278,868
22	1,0	27	21,8	8,70	7,70	1511	88,5	0,91317	454,5	21,876	13,146	315,504	2,126	98,3	7,83	24,436	291,068
23	1,2	220	21,8	17,50	12,50	2463	71,4	0,05439	372,7	8,709	43,103	1034,472	2,351	90,3	13,85	149,912	884,560
24	1,0	66	17,8	11,70	10,30	1357	88,0	0,20271	271,6	11,810	15,877	381,048	2,843	95,9	10,74	84,522	296,526
25	1,0	25	14,8	8,30	7,50	344	90,4	0,30805	675,2	6,971	2,855	68,520	2,088	98,4	7,62	22,126	46,394
26	1,0	345	16,0	12,80	7,00	1870	54,7	0,06182	441,2	12,385	23,936	574,464	7,063	80,5	8,70	111,474	462,990
27	1,0	85	12,0	12,50	7,50	1364	60,0	0,18440	1641,9	9,819	17,050	409,200	3,179	94,8	7,91	37,788	371,412
28	1,0	230	12,0	10,80	6,50	1794	60,2	0,11405	451,7	16,475	19,375	465,000	5,500	86,5	7,51	55,897	409,103

Korzystając z niektórych wyników wspomnianej pracy postanowiono ocenić efekt ekonomiczny, jaki można byłoby osiągnąć poprawiając jakość uszczelnienia badanych lutniociągów do wartości $\Theta = 160 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$.

W tym celu opracowano tablicę 8. Dotyczy ona lutniociągów tłoczonych zbudowanych z lutni elastycznych. W tablicy tej w poszczególnych kolumnach podano: średnicę lutniociągu – D , długość lutniociągu – L , pole powierzchni przekroju poprzecznego wyrobiska – A , wydajność wentylatora lutniowego – V_{op} , strumień objętości powietrza w strefie przodkowej – V_k , spiętrzenie wentylatora – Δp_c , sprawność lutniociągu – η , jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągu – r_0 , współczynnik wymiany masy aktualnie funkcjonującego lutniociągu – Θ , całkowity opór aerodynamiczny funkcjonującego lutniociągu – R , moc wentylatora – N , dobowe zapotrzebowanie mocy na energię, parametry, jakie miałby lutniociąg po dokonaniu poprawy jakości jego uszczelnienia do wartości $\Theta = 160 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$: opór aerodynamiczny – R_{zad} , sprawność – η_{zad} , wydajność wentylatora – V_{0zad} , dobowe zapotrzebowanie na energię. W ostatniej kolumnie tablicy 8 podano różnicę dobowego zapotrzebowania na energię po dokonania operacji poprawy jakości uszczelnienia lutniociągu, przy założeniu, że intensywność przewietrzania strefy przodkowej nie ulega zmianie.

Z analizy kolumny 18 tablicy 8 wynika, że poprawa jakości uszczelnienia funkcjonującego lutniociągu może dać oszczędność setek kilowatogodzin w ciągu doby. Aktualnie cena jednej kilowatogodziny wynosi około 0,5 zł. W ciągu doby można zatem zaoszczędzić kilkaset złotych w odniesieniu do jednego drażzonego wyrobiska. Okres drażenia wyrobiska (w zależności od jego długości docelowej i postępu) to kilka miesięcy, a nawet rok. Zatem poprawa jakości uszczelnienia lutniociągu prowadzi do zmniejszenia kosztów przewietrzania wyrobisk ślepych.

5. Podsumowanie

Rozpatrywano lutniociągi elastyczne przewidziane do wentylacji tłoczącej. Przeprowadzone rozważania wykazały, że ze wzrostem średnicy lutniociągu maleje jego opór aerodynamiczny, natomiast wzrasta jego sprawność. W miarę pogorszenia jakości uszczelnienia lutniociągu (wzrostu współczynnika wymiany masy Θ) również maleje opór aerodynamiczny lutniociągu, ale znacznie spada jego sprawność. Obniżenie sprawności lutniociągu powoduje, że dla utrzymania wymaganej intensywności przewietrzania strefy przodkowej należy zapewnić większą wydajność wentylatora (lub układu wentylatorów) współpracującego z lutniociągiem. Wyższa wydajność wentylatora pociąga za sobą jego większe spiętrzenie, a to z kolei ma przełożenie na zapotrzebowanie mocy.

Analiza stanu przewietrzania drażonych wyrobisk z wentylacją odrębną [4] wykazała, że pomimo zapewnienia intensywności przewietrzania tych wyrobisk adekwatnej do istniejących zagrożeń (metanowego i klimatycznego), jakość uszczelnienia zastosowanych lutniociągów często była niezadowalająca. Ma to swoje przełożenie na wzrost kosztów

przewietrzania. Koszt przewietrzania maleje również ze wzrostem średnicy lutniociągu. Należy zatem stosować lutniociągi o dużych średnicach i dobrej jakości uszczelnienia. Wieloletnie badania parametrów aerodynamicznych lutniociągów (zarówno metalowych jak i elastycznych) prowadzone w Zakładzie Aerologii Górniczej GIG wykazały, że jest możliwe zapewnienie jakości uszczelnienia lutniociągu o współczynniku wymiany masy Θ nie większym od $40 \text{ m}^{2.5}/\text{kg}^{0.5} \cdot 10^6$. Przy odpowiednich staraniach można osiągnąć bardzo dobrą jakość uszczelnienia lutniociągu [4].

Stosowanie lutniociągów o dużych średnicach wymaga drażenia wyrobisk o dużych powierzchniach przekroju poprzecznego. Z praktyki kopalnianej wynika, że w wyrobisku o powierzchni przekroju poprzecznego równej $10,4 \text{ m}^2$ może zmieścić się lutniociąg o średnicy $0,8 \text{ m}$, w wyrobisku o powierzchni przekroju poprzecznego równej $12,0 \text{ m}^2$ może zmieścić się lutniociąg o średnicy $1,0 \text{ m}$, a w wyrobisku o powierzchni przekroju poprzecznego równej $14,8 \text{ m}^2$ może zmieścić się lutniociąg o średnicy $1,2 \text{ m}$. Obecnie w kopalniach węgla kamiennego drażone są wyrobiska o przekrojach poprzecznych równych 20 m^2 i większych. Pozwala to na umieszczenie w takim wyrobisku lutniociągu o średnicy $1,4 \text{ m}$, a nawet dwóch instalacji lutniowych.

W rozważaniach przyjęto wartości jednostkowych oporów aerodynamicznych lutniociągów (w zależności od ich średnicy) zgodnie z danymi literaturowymi [3]. Badania parametrów aerodynamicznych lutniociągów elastycznych prowadzone na stanowiskach badawczych u producentów lutni wykazały, że jednostkowe opory aerodynamiczne tych lutni r_0 są niższe od podanych w literaturze. Mniejszy opór jednostkowy ma przełożenie na mniejszy opór całkowity lutniociągu, a w konsekwencji na mniejsze parametry punktu pracy wentylatora współpracującego z lutniociągiem i mniejsze koszty przewietrzania.

Literatura

1. *Bystron H.*: Metody obliczania nie rozgałęzionych lutniociągów kopalnianych, Archiwum Górnicztwa, T34, nr 3, 1990 (a)
2. *Bystron H.*: Kryteria jakości aerodynamicznej nie rozgałęzionych lutniociągów kopalnianych, Wiadomości Górnicze, XLI, nr 1 1990 (b)
3. *Knechtel J.*: Jednostkowy opór aerodynamiczny lutniociągów zbudowanych z lutni elastycznych, Mechanizacja i Automatyzacja Górnicztwa, nr 2(480) 2011 (a)
4. *Knechtel J.*: Wyniki badań jakości uszczelnienia lutniociągów funkcjonujących w kopalniach węgla kamiennego, Przegląd Górniczy nr 12 2011 (b)
5. *Knechtel J.*: Przeprowadzenie badań dla wyznaczenia współczynnika jednostkowego oporu aerodynamicznego dla lutni wentylacyjnych o średnicy $\varnothing 1400 \text{ mm}$; dokumentacja prac GIG o symbolu komputerowym: 582 359 53 -112, wykonana na zlecenie DID, Sp. z o.o. GIG, Katowice, wrzesień 2013 (a)
6. *Knechtel J.*: Badania oporu aerodynamicznego elastycznych lutni wentylacyjnych tłoczonych: $\varnothing 200 \text{ mm}$, $\varnothing 400 \text{ mm}$, $\varnothing 500 \text{ mm}$, $\varnothing 600 \text{ mm}$, $\varnothing 800 \text{ mm}$, $\varnothing 1000 \text{ mm}$, $\varnothing 1200 \text{ mm}$, $\varnothing 1400 \text{ mm}$; dokumentacja prac GIG o symbolu komputerowym: 582 38313 -112, wykonana na zlecenie TESECO Sp. z o.o., GIG, Katowice, październik 2013 (b)