

*szyby zmiennosrednicowe,
opór aerodynamiczny*

Franciszek ROSIEK*, Marek SIKORA*, Jacek URBAŃSKI*

DOBÓR ŚREDNICY SZYBU DWUPRZEDZIAŁOWEGO Z UWAGI NA UWARUNKOWANIA WENTYLACYJNE

Przedstawiono możliwość wykorzystania szybu dwuprzędziałowego do dostarczania wymaganych ilości powietrza do kopalni. Podano metodę obliczenia średnicy takiego szybu, aby parametry aerodynamiczne każdego z przedziałów dały opór wypadkowy szybu odpowiadający oporowi niezabudowanej rury szybowej o średnicy 7,5 m.

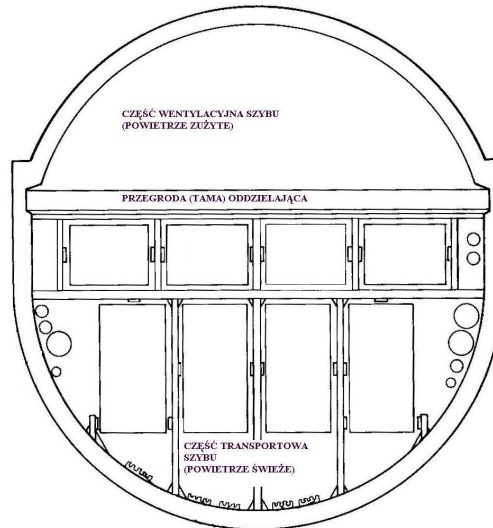
1. WSTĘP

Rozwiązania szybów dwuprzędziałowych są znane w świecie, a ich przykłady przedstawiono na rysunkach 1 i 2 [6].

Wykorzystuje się w nich pojedynczy szyb ale o dwóch funkcjach wentylacyjnych. Powietrze świeże sprowadza się na dół przedziałem transportowym, a przedziałem wentylacyjnym wyprowadza się powietrze zużyte na powierzchnię. Szyby te mają średnice przekraczające 10,5 m i są wykorzystywane do szybkiego udostępnienia złoża. Przegroda wentylacyjna jest zbudowana z płyt prefabrykowanych z betonu sprężonego. Płyty mają grubość 300 mm, wysokość 1,5 m, a długość zależną od średnicy szybu, zazwyczaj przekraczającą 10 m. Dla ograniczenia strat powietrza elementy przegrody są łączone na wpust i powlekanie masą uszczelniającą (*epoxy-mastic sealant*).

Szybami takimi przepływają różne ilości powietrza od 200 m³/s do 700 m³/s, zależnie od pola powierzchni przekroju poprzecznego jakie jest do dyspozycji. Przyjmuje się przy tym, że optymalna prędkość powietrza w części transportowej dowolnego szybu wyposażonego w dźwigary powinna wynosić około 10 m/s, ale nie powinna przekraczać 13m/s [6].

* Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii



Rys. 1. Przekrój dwuprzdziałowego szybu wdechowo–wydechowego [6]
 Fig. 1 Section through brattice walled shaft with downcast and upcast areas [6]

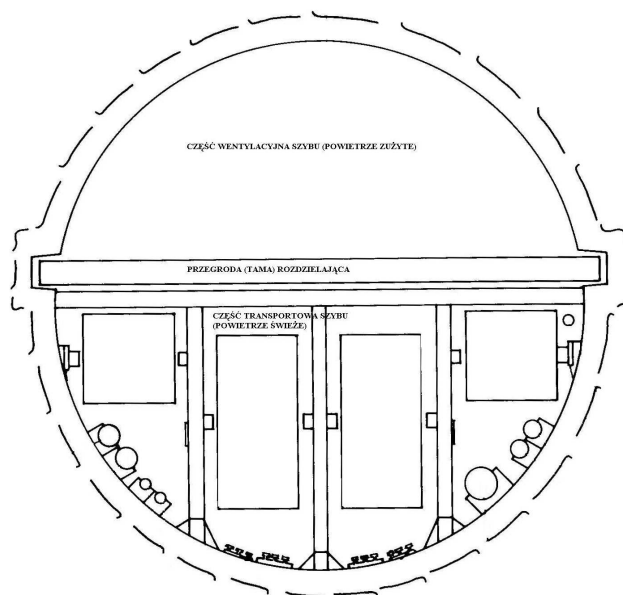
W stosunku do prędkości jazdy urządzeń wyciągowych prędkość względna powietrza nie powinna przekraczać 30 m/s. Dla szybów wentylacyjnych bez urządzeń wyciągowych zaleca się, aby maksymalna prędkość powietrza nie przekraczała 20 m/s, ponieważ powyżej tej wartości koszty przewietrzania gwałtownie rosną i łączny koszt budowy oraz eksploatacji szybu staje się nieoptymalny [4,5].

Plany rozwojowe kopalń rud miedzi zakładają budowę nowych szybów między innymi dla potrzeb przewietrzania robót górniczych na dużych głębokościach. Dotychczas wykonywane szyby wdechowe miały średnicę 7,5 m i były wykorzystywane do doprowadzania powietrza świeżego oraz transportu ludzi, materiałów i urobku. Szyby wydechowe były zazwyczaj przeznaczone wyłącznie do wentylacji. Ograniczeniem ilości powietrza w szybie wdechowym z funkcją zjazdową jest dopuszczalna prędkość powietrza wynosząca 12 m/s.

Nowe szyby powinny zapewniać dostarczenie do kopalni większych niż dotychczasowe, ilości powietrza, przy równoczesnym zapewnieniu transportu ludzi i materiałów. Konieczna będzie zatem budowa szybów, o średnicach większych niż 7,5 m.

Przyjęto założenie, że szyb taki może składać się z dwóch szczelnie oddzielonych przedziałów – transportowego i wentylacyjnego. Określając wymaganą średnicę takiego szybu można przyjąć, że jego opór wypadkowy powinien być co najwyżej równy oporowi gołej rury szybowej o średnicy 7,5 m. Ponadto należy przyjąć, że w przedziale transportowym powietrze będzie przepływać z prędkością nie większą niż 12 m/s.

Należy podkreślić, że nazwa „przedział wentylacyjny”, w tym przypadku, dotyczyć będzie części szybu sprowadzającej powietrze świeże do kopalni.

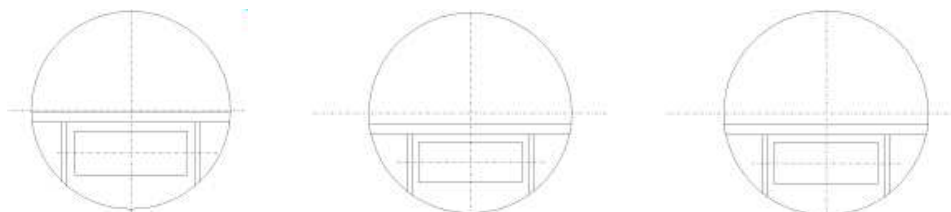


Rys. 2. Przekrój dwuprzędziowego szybu wdechowo–wydechowego[6]
Fig. 2 Section through brattice walled shaft with downcast and upcast areas [6]

2. WYZNACZENIE WIELKOŚCI PRZEKROJU POPRZECZNEGO SZYBU DWUPRZĘDZIAŁOWEGO

Dla określenia wielkości pola przekroju poprzecznego przyjęto, że opór wypadkowy szybu dwuprzędziowego) ma być równy oporowi szybu o średnicy 7,5 m. Propozycje możliwego podziału szybu na przedziały transportowy i wentylacyjny dla różnych jego średnic przedstawia rysunek na rysunku 3.

Problemem związanym z podziałem szybu jest to, że oba przedziały będą miały różne kształty (Rys. 3), zależne od ostatecznej średnicy szybu. Na podstawie rysunków tarczy szybu, dla planowanych do analizy średnic szybu (9,0 m, 9,5 m, 10,0 m) wyznaczono wszystkie parametry geometryczne niezbędne do obliczeń i zestawiono je w tabeli 1.



a) średnica szybu 9,0m b) średnica szybu 9,5m c) średnica szybu 10,0m

Rys. 3. Schemat podziału przekroju szybu o różnych średnicach na przedziały transportowy i wentylacyjny

Fig. 3. Chart with sections through brattice walled ventilation and transportation parts of the shaft with different diameters

Tabela 1. Parametry geometryczne przedziałów wentylacyjnego i transportowego szybu
Table 1. Geometric parameters of ventilation and transportation compartments of a shaft

Średnica szybu, m	9,0	9,5	10,0
Pole przekroju poprzecznego, m ²	63,62	70,88	78,54
Obwód, m	28,27	29,85	31,42
Pole przekroju poprzecznego przedziału wentylacyjnego, m ²	32,31	38,37	44,82
Pole przekroju poprzecznego przedziału transportowego, m ²	26,93	27,93	28,91
Pole przekroju poprzecznego klatki, m ²	10,05	10,05	10,05
Pole przekroju poprzecznego przeciwcieżaru, m ²	1,89	1,89	1,89
Pole przekroju poprzecznego dźwigarów, m ²	2,74	2,74	2,74
Wolne pole przekroju poprzecznego w przedziale transportowym, m ²	12,25	13,25	14,23
Średnica przedziału wentylacyjnego jak szyb okrągły, m	6,41	6,99	7,55
Średnica przedziału klatkowego jak szyb okrągły, m	5,86	5,96	6,07
Obwód przedziału wentylacyjnego, m	23,24	25,02	26,76
Obwód przedziału klatkowego, m	22,06	22,69	23,38
Długość przegrody od strony przedziału wentylacyjnego, m	9,00	9,48	9,94
Długość przegrody od strony przedziału transportowego, m	8,93	9,39	9,78
Średnica hydrauliczna przedziału wentylacyjnego jak szyb okrągły, m	5,56	6,13	6,70
Średnica hydrauliczna przedziału transportowego jak szyb okrągły, m	4,88	4,92	4,95
Współczynnik kształtu (SF) przedziału wentylacyjnego	4,088	4,039	3,997
Współczynnik kształtu (SF) przedziału transportowego	4,251	4,293	4,348
Względny współczynnik (RSF) przedziału kształtu wentylacyjnego	1,1532	1,1394	1,1276
Względny współczynnik (RSF) przedziału kształtu transportowego	1,1991	1,2111	1,2266

Projektowany opór szybu można wyznaczyć w oparciu o dane literaturowe [1, 2] lub wyliczyć znając geometrię i wyposażenie szybu. Opór przewodu określony jest zależnością:

$$R = \alpha \frac{BL}{A^3} \quad (1)$$

gdzie: α – współczynniki oporu aerodynamicznego wyrobiska (szybu), Ns^2/m^4 ,
 B – obwód wyrobiska, m,
 L – długość wyrobiska, m,
 A – pole powierzchni przekroju poprzecznego wyrobiska, m^2 .

Dla szybów bez wyposażenia, wykonanych w obudowie betonowej przyjmuje się wartość współczynnika oporu aerodynamicznego $\alpha = 0,00471 \text{ Ns}^2/\text{m}^4$, a dla szybów w obudowie tubingowej $\alpha = 0,009 \text{ Ns}^2/\text{m}^4$ [1]. Korzystając ze wzorów podanych w pracy [2] można wartości współczynników oporu α wyznaczyć dokładniej:

$$\alpha = \frac{0,147}{\left(1,74 + 2 \log \left(\frac{D}{2d_o} \right) \right)^2} \quad (2)$$

dla obudowy tubingowej:

$$\alpha = 0,981 \frac{1}{\left(0,151 + 0,22 \log \left(\frac{2A}{Bl} \right) \right)^2} \quad (3)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (1) oraz:

D – średnica szybu, m,
 d_o – średnia wielkość występów obudowy (szorstkość), m,
 l – odległość między środkami żeber obudowy tubingowej, m.

W literaturze anglosaskiej [3, 4, 5] jako powszechnie używana podawana jest zależność opracowana przez Von Karmana:

$$\alpha = \frac{0,147}{\left(1,74 + 2 \log \left(\frac{D}{2d_o} \right) \right)^2} \quad (4)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (1) oraz:

D – średnica szybu, m,
 e – wielkość występów obudowy (szorstkość), m.

Przy przepływach turbulentnych, z bardzo dużymi wartościami liczby Reynoldsa, a takie będą miały miejsce w szybie wdechowym, współczynnik α może być również wyznaczany z zależności:

$$\alpha = \frac{1}{\left(4 \log_{10} \left(\frac{D/e}{3.7} \right)\right)^2} \quad (5)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (4).

Dla szybu o średnicy $D = 7,5\text{m}$ i długości $L = 1290\text{m}$ wyznaczone wartości współczynników oporu aerodynamicznego wyznaczone ze wzorów (2) i (3) wynoszą odpowiednio dla części szybu w obudowie tubingowej (długość $L_1 = 650\text{m}$) $\alpha = 0,006475 \text{Ns}^2/\text{m}^4$ (dla odległości między żebrami tubingów $l = 0,5\text{m}$), a dla części szybu w obudowie betonowej (długość $L_2 = 640\text{m}$) $\alpha = 0,004941 \text{Ns}^2/\text{m}^4$ (dla szorstkości $e = 5,15 \text{cm}$). Powoduje to, że opór szybu o średnicy $D = 7,5 \text{m}$ ma wartość $R = 0,0020163 \text{Ns}^2/\text{m}^8$.

Dla tych samych danych, po przyjęciu wielkości występów obudowy (szorstkość) dla obudowy tubingowej $e = 0,35\text{m}$ uzyskano opór szybu $R = 0,00227375 \text{Ns}^2/\text{m}^8$ i taki opór, w zaokrągleniu $R = 0,002275 \text{Ns}^2/\text{m}^8$, przyjęto do dalszych rozważań.

Badania modelowe przepływu powietrza w przewodzie pokazują, że najmniejsze straty energii (opór) mają przewody okrągłe. Każdy inny kształt przewodu powoduje dodatkowe zakłócenie przepływu, co wiąże się ze wzrostem oporu przewodu i strat energii.

W badaniach nad oporami przewodów wprowadzono zatem pojęcie współczynnika kształtu [4,5] danego wzorem:

$$SF = \frac{B}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

Dla każdego przekroju współczynnik ten jest stały. Dla okręgu jego wartość wynosi $SF = 3,5449$. Wszystkie inne kształty wyrobisk mają współczynnik kształtu większy od tej wartości. Dlatego też wprowadzono pojęcie względnego współczynnika kształtu RSF odnoszącego współczynnik kształtu dla danego przekroju do współczynnika kształtu okręgu. Współczynnik RSF pokazuje również o ile większy jest opór jednostkowy wyrobiska o danym kształcie od wyrobiska okrągłego.

Jak widać w tabeli 1, wartość współczynnika RSF pokazuje, że sama zmiana kształtu przedziału wentylacyjnego z okrągłego na łukowy powoduje wzrost oporu o 12,7% do 15,3%, a dla przedziału transportowego wielkości te wynoszą odpowiednio od 19,9% do 22,7%.

W skład bocznic wentylacyjnej może wchodzić jedno, dwa lub więcej wyrobisk połączonych równolegle. Opór wypadkowy takiego połączenia można wyznaczyć z zależności

$$R_{fw} = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{R_{fi}}} \right)^2} \quad (7)$$

gdzie:

R_{fw} – opór wypadkowy bocznicy, Ns^2/m^8 ,
 R_{fi} – opór kolejnego (i-tego) wyrobiska wchodzącego w skład bocznicy, Ns^2/m^8 ,
 N – liczba wyrobisk wchodzących w skład bocznicy.

Na podstawie powyższej zależności możemy napisać, że opór wypadkowy szybu składającego się z dwóch przedziałów rozdzielonych szczelną przegrodą powinien być określony wzorem:

$$R_{fszybu} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_{f(\text{went})}}} + \frac{1}{\sqrt{R_{f(\text{trans})}}} \right)^2} \quad (8)$$

gdzie:

R_{fszybu} – opór wypadkowy szybu, Ns^2/m^8 ,
 $R_{f(\text{went})}$ – opór przedziału wentylacyjnego szybu, Ns^2/m^8 ,
 $R_{f(\text{trans})}$ – opór przedziału transportowego szybu, Ns^2/m^8 ,

Tak więc, jak już wspomniano we wstępie, zadanie sprowadza się do znalezienia takiej średnicy szybu dwuprziedziałowego, przy której opór wypadkowy szybu będzie niezmienny w stosunku do oporu gołej rury szybowej o średnicy 7,5 m. W oporze części transportowej będą uwzględnione wszystkie czynniki wpływające na jego wartość, a prędkość przepływu powietrza w tej części będzie mniejsza od dopuszczalnej wynoszącej 12 m/s przy założeniu, że szybem będzie dostarczane do kopalni powietrze świeże w ilości $V = 75000 \text{ m}^3/\text{min}$ ($1250 \text{ m}^3/\text{s}$).

Dla części wentylacyjnej i transportowej szybu założono, że opory ich ścian zostaną wyznaczone z zależności (1), przy czym współczynniki oporu będą określane w dwóch wariantach: w pierwszym wariantcie z zależności (2) i (3) a w drugim wariantcie z zależności (5) i (6) przy założeniu, że w części z obudową betonową szybu jego szorstkość wynosić będzie $d_o = e = 5,15 \text{ cm}$, a w części z obudową tubingową $e = 35,0 \text{ cm}$ oraz, że odległość między środkami żeber obudowy tubingowej wynosić będzie $l = 0,5 \text{ m}$.

W odniesieniu do części transportowej szybu, jej opór będzie wyznaczony jako suma oporu ścian szybu, oporu dźwigarów oraz oporu klatki z uwzględnieniem dodatkowego oporu dynamicznego wynikającego z ruchu klatki.

Przy powyższych założeniach, dla części wentylacyjnej szybów o średnicach 9,0 m; 9,5 m oraz 10,0 m wyznaczono współczynniki oporu dla obudowy betonowej i tubingowej oraz wartości ich oporów co pokazano w tabeli 2. W obliczeniach tych uwzględniono również, że na odcinku szybu, na którym będzie on wykonany w obudowie tubingowej, część jego ścian będzie stanowić przegroda betonowa. W związku z tym, na podstawie danych zawartych w tabeli 1, wyznaczono średnią ważoną współczynnika oporu dla tego fragmentu szybu przyjmując za wagę proporcje udziału długości przegrody wentylacyjnej w obwodzie poszczególnych przedziałów szybu.

Znając opór części wentylacyjnej szybu oraz całkowity wypadkowy opór szybu, z zależności (8) można wyznaczyć dopuszczalny maksymalny opór części transportowej szybu. Wartości te, jak również rozdział łącznej ilości powietrza i wynikające z tego prędkości przepływu w obu częściach szybu, pokazano również w tabeli 2. Wyznaczone strumienie objętości powietrza i jego prędkości wynikają z przyjętej łącznej ilości powietrza w takim szybie, gdyby miał on średnicę 7,5 m i dostarczał $V_{sz} = 75000 \text{ m}^3/\text{min}$. Rozdział tego powietrza będzie odwrotnie proporcjonalny do oporów obu części szybu. Prędkość przepływu powietrza w części transportowej będzie dodatkowo zależna od przekrojów czynnych wentylacyjnie (tabela 1) w tej części szybu. Należy nadmienić, że z obliczeń wynika, że opór części wentylacyjnej szybu o średnicy 10,0 m jest mniejszy od projektowanego oporu szybu o średnicy 7,5 m. W takim przypadku część transportowa może mieć dowolny opór, regulowany jedynie wymaganą prędkością przepływu powietrza podczas ruchu klatki.

Jak wynika z tabeli 2 średnica szybu $D = 9,0 \text{ m}$ jest zbyt mała, ponieważ wyznaczona konieczna prędkość przepływu powietrza w części transportowej przekracza $w = 12,0 \text{ m/s}$. Ograniczenie jej do wymaganej wielkości wymagać będzie dodatkowej regulacji, a to spowoduje zmniejszenie całkowitej ilości powietrza przepływającego tym szybem albo wywoła wzrost wymaganego spiętrzenia wentylatorów. Z tego powodu w dalszych obliczeniach brano pod uwagę jedynie średnice 9,5 m oraz 10,0 m.

W dalszych obliczeniach, dla danych przedstawionych w tabeli 1, wyznaczono opory części transportowej szybu i porównano je z maksymalnymi dla tej części przedstawionymi w tabeli 2. Dla poszczególnych odcinków części transportowej, w obudowie tubingowej i betonowej wyznaczono opory ścian szybu, a następnie wyznaczono opory dźwigarów, opory klatki oraz opór dynamiczny związany z ruchem klatki zgodnym lub przeciwnym do ruchu powietrza. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Opór ścian części transportowej szybu wyznaczono w sposób identyczny jak dla części wentylacyjnej, uwzględniając w części z obudową tubingową fakt, że część ociosów będzie stanowić przegroda betonowa.

Tabela 2. Wyniki obliczeń oporu części wentylacyjnej szybu i wynikającego z niego oporu części transportowej
 Table 2. Results of calculations of the shaft's ventilation parts' resistance and the consequent resistance of the shaft's transportation parts

Średnica szybu, m	9,0		9,5		10,0	
Opór szybu wyznaczany wg wzorów	(1),(2),(3)	(1),(4),(5)	(1),(2),(3)	(1),(4),(5)	(1),(2),(3)	(1),(4),(5)
Współczynnik oporu dla obudowy tubingowej, Ns^2/m^4	0,005298	0,007416	0,005192	0,007182	0,005099	0,006980
Współczynnik oporu dla obudowy betonowej, Ns^2/m^4	0,005181	0,004405	0,005039	0,004284	0,004930	0,004179
Opór ścian części wentylacyjnej w obudowie tubingowej $L = 650m$, Ns^2/m^8	0,002373	0,003325	0,001496	0,002070	0,000986	0,001350
Opór ścian części wentylacyjnej w obudowie betonowej $L = 640m$, Ns^2/m^8	0,002287	0,001944	0,001430	0,001216	0,000939	0,000796
Łączny opór części wentylacyjnej szybu $L = 1290m$, Ns^2/m^8	0,004662	0,005269	0,002926	0,003286	0,001922	0,002146
Maksymalny dopuszczalny opór części transportowej szybu, Ns^2/m^8	0,025035	0,019347	0,162731	0,080749		
	0,022191		0,121740			
Ilość powietrza przepływająca częścią wentylacyjną szybu, m^3/min	52390	49280	66130	62410	>75000	>75000
Prędkość powietrza w wentylacyjnej części szybu, m/s	27,03	25,42	28,73	27,11		
Ilość powietrza przepływająca częścią transportową szybu, m^3/min	22610	25720	8870	12590		
Prędkość powietrza w transportowej części szybu, m/s	13,99	15,92	5,29	7,51		

Opór dźwigarów można wyznaczyć ze wzoru [3,4]:

$$R_d = \frac{L}{S} C_D \frac{A_b}{2A^3} \left(0.0035 \frac{S}{W} + 0.44 \right) \quad (9)$$

gdzie: L – długość szybu, m,
 S – odległość między dźwigarami, m,
 A_b – powierzchnia dźwigarów, m^2 ,
 W – szerokość dźwigara, m,
 A – pole powierzchni przekroju poprzecznego szybu (części transportowej), m^2 ,
 C_D – bezwymiarowy współczynnik oporu dźwigara zależny od jego kształtu.

W obliczeniach przyjęto, że w szybie o długości $L = 1290m$ dźwigary będą instalowane co $S = 4,5m$, będą miały szerokość $W = 0,24 m$, a ich powierzchnia będzie wynosić $A_b = 2,74 m^2$. Do obliczeń przyjęto dwa skrajne przypadki zabudowy dźwigarów szybowych, najkorzystniejszy, gdy dźwigary będą miały aerodynamiczny kształt

skrzydła (np. odpowiednio obudowany dwuteownik) o współczynniku $C_D = 1,06$ i najmniej korzystny, gdy dźwigary będą zbudowane z dwuteowników skierowanych stopą w kierunku napływającego powietrza dla, których $C_D = 2,75$.

Tabela 3. Dane i wyniki obliczeń dla wyznaczenia oporu części transportowej szybu
Tab. 3. Data and results of calculations of resistance of the transportation parts of a shaft

Średnica szybu, m	9,5		10,0	
Opór ścian szybu wyznaczany wg wzorów	(1),(2),(3)	(1),(4),(5)	(1),(2),(3)	(1),(4),(5)
Współczynnik oporu dla obudowy tubingowej, Ns^2/m^4	0,005388	0,009649	0,005364	0,009569
Współczynnik oporu dla obudowy betonowej, Ns^2/m^4	0,005306	0,004512	0,005276	0,004486
Opór ścian części transportowej w obudowie tubingowej $L = 650m$, Ns^2/m^8	0,003651	0,0065383	0,003373	0,0060247
Opór ścian części transportowej w obudowie betonowej $L = 640m$, Ns^2/m^8	0,003540	0,0030099	0,003271	0,0027808
Łączny opór ścian części transportowej szybu $L = 1290m$, Ns^2/m^8	0,0071911	0,0095482	0,006648	0,0088055
Opór dźwigarów w szybie, Ns^2/m^8 dla $C_D = 1,06$	0,009661	0,009661	0,008711	0,008711
Opór dźwigarów w szybie, Ns^2/m^8 dla $C_D = 2,75$	0,025064	0,025064	0,022600	0,025064
Opór nieruchomej klatki szybowej, Ns^2/m^8	0,019381	0,019381	0,017155	0,017155
Opór części transportowej szybu, Ns^2/m^8	0,036983	0,0385902	0,033226	0,0346715
Opór klatki szybowej z uwzględnieniem jej ruchu w górę, Ns^2/m^8	0,093961	0,056388	0,446032	0,6527022
Opór klatki szybowej z uwzględnieniem jej ruchu w dół, Ns^2/m^8	-0,055200	-0,017627	-0,411722	-0,6183921
Maksymalny łączny opór części transportowej szybu przy ruchu klatki w górę, Ns^2/m^8 , przy oporze dźwigarów dla $C_D = 1,06$	0,110813	0,074160		
Minimalny łączny opór części transportowej szybu przy ruchu klatki w dół, Ns^2/m^8 , przy oporze dźwigarów dla $C_D = 1,06$	-0,038350	0,000145		
Maksymalny łączny opór części transportowej szybu przy ruchu klatki w górę, Ns^2/m^8 , przy oporze dźwigarów dla $C_D = 2,75$	0,126216	0,089563		
Minimalny łączny opór części transportowej szybu przy ruchu klatki w dół, Ns^2/m^8 , przy oporze dźwigarów dla $C_D = 2,75$	-0,022949	0,015547		
Maksymalny dopuszczalny opór części transportowej szybu, Ns^2/m^8	0,162731	0,080749		

Inne rodzaje dźwigarów (kształty ich przekrojów poprzecznych) mają współczynniki mieszczące się w tych granicach np. dwuteownik leżący $C_D = 2,05$, teownik $C_D = 2,00$, kwadrat $C_D = 2,00$, trójkąt lub kwadrat obrócony o 45° $C_D = 1,55$, kwadrat

zaokrąglony od strony napływu powietrza $C_D = 1,40$, a okrąg $C_D = 1,20$. Wartości współczynników dla różnych kształtów dźwigarów podane są w literaturze [3,4]. Dla podanych powyżej wartości wyznaczono opór dźwigarów $R_d = 0,009661 \text{ N s}^2/\text{m}^8$ dla szybu o średnicy 9,5m oraz $R_d = 0,008711 \text{ N s}^2/\text{m}^8$ dla szybu o średnicy 10,0m.

Opór klatki szybowej wyznaczono w oparciu o algorytm zaproponowany w pracy [3]. Algorytm ten pozwala wyznaczyć wartość współczynnika oporu X , który wpływa na opór miejscowy jaki stawia klatka przepływającemu powietrzu. Opór ten jest wyznaczany z zależności:

$$R_c = \frac{X}{2A_w^2} \quad (10)$$

gdzie:

A_w – wolne pole przekroju poprzecznego szybu transportowego, m^2 , przy czym $A_w = A - A_{kl}$,
 A – pole powierzchni przekroju poprzecznego szybu (części transportowej), m^2 ,
 A_k – pole powierzchni przekroju poprzecznego klatki, m^2 ,

Przyjęto dla potrzeb tych obliczeń, że klatka będzie miała wysokość $H_{kl} = 6,0\text{m}$, szerokość $W_{kl} = 1,975\text{m}$ oraz długość $L_{kl} = 5,09\text{m}$, a pole powierzchni czołowej (w stosunku do przepływającego powietrza) klatki wynosić będzie $A_{kl} = 10,05 \text{ m}^2$. Wyznaczone wg. algorytmu [3] opory klatki podano w tabeli 3.

Opór dynamiczny wywołany ruchem klatki powiększa (przy ruchu klatki przeciwnym do ruchu powietrza) lub pomniejsza (przy ruchu zgodnym z przepływem powietrza) opór klatki. Ostateczny wzór na opór klatki ma zatem postać [3, 4]:

$$R_d = R_c \left(1 \pm \frac{w_{kl}^2}{w_{pow}^2} \right) \quad (11)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (10) oraz:

w_{kl} – prędkość ruchu klatki, przyjęto $w_{kl} = 10,0 \text{ m/s}$,
 w_{pow} – prędkość przepływu powietrza, m/s .

Ostateczne wartości pokazano w tabeli 3, gdzie pokazano wypadkowe opory części transportowej szybów o średnicy 9,5 m oraz 10,0 m i porównano je z wartością wyznaczoną, jako dopuszczalną, z zależności (8), przyjmując z tabeli 2 wartości oporów części wentylacyjnej szybów. Z obliczeń wynika, że szyb o średnicy 9,5 m spełnia założenia wstępne. Jak już wcześniej wspomniano opór części wentylacyjnej szybu o średnicy 10,0 m jest mniejszy niż opór gołej rury szybowej o średnicy 7,5 m, w związku z czym taki szyb można wykonać bez żadnych dodatkowych ograniczeń.

3. PODSUMOWANIE

Wyznaczone opory szybu pozwalają przypuszczać, że zastosowanie szybu o średnicy 9,5 m z podziałem na część wentylacyjną i część transportową zgodnie z danymi podanymi w tabeli 1 będzie wystarczające dla spełnienia warunku aby opór wypadkowy takiego szybu był co najmniej równy oporowi szybu o średnicy 7,5 m wykorzystywanemu jedynie do celów wentylacyjnych. Należy również podkreślić, że dźwigary w części transportowej szybu powinny mieć kształty zapewniające współczynnik oporu nie większy niż $C_D = 1,75$, co zapewni, że niezależnie od przyjętej metody obliczeń, opór części transportowej będzie mniejszy od maksymalnego dopuszczalnego pokazanego w tabeli 2. Pewne rezerwy mogą tkwić również w przyjętej geometrii obudowy betonowej i tubingowej. Jeżeli uzyska się szorstkość tych obudów poniżej założonej w niniejszej pracy to opór części wentylacyjnej będzie jeszcze mniejszy, a to zapewni rezerwę w oporze części transportowej. W przykładach podawanych w literaturze [3, 4, 5] podawane są np. szorstkości obudowy betonowej o rząd mniejsze tzn. $e = 0,5$ cm. Dla obudowy tubingowej również podawane są przykłady szybów bez wyposażenia, dla których wyznaczone współczynniki oporu wynoszą od 0,0012 do 0,023.

LITERATURA

- [1] Uszakow K. Z., Sprawocznik po rudniczej wentylacji, Moskwa, Nedra 1977.
- [2] Uszakow K. Z., Rudnicznaja wentylacja, Sprawocznik, II izdanie, Moskwa, Nedra 1988.
- [3] McPherson M. J., An analysis of the resistance and airflow characteristics of mine shafts, Fourth International Mine Ventilation Congress, Brisbane, Queensland, July 1988.
- [4] McPherson M. J., Mine ventilation thermodynamics. Chapter 8. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. CH. London 1993.
- [5] Hartman H.L., „Mine ventilation and air conditioning”, New York, Wiley 1982.
- [6] Environmental Engineering in South African Mines: The Mine Ventilation Society of South Africa, 1989.

CHOICE OF DIAMETER OF A BRATTICE WALLED SHAFT IN THE CONTEXT OF VENTILATION CONDITIONS

An option of usage of a brattice walled shaft to provide required amount of air to a mine was presented in the paper. We present methodology to calculate a diameter of such a shaft so as to the aerodynamic parameters of every compartment resulted in a equivalent resistance of the shaft equal to resistance of unobstructed 7,5 m diameter shaft.