

Analiza numeryczna sieci wentylacyjnej kopalni dla określenie warunków przyłączenia urządzeń VAM w aspekcie bezpieczeństwa

WACŁAW DZIURZYŃSKI^{ID}, JERZY KRAWCZYK^{ID}

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

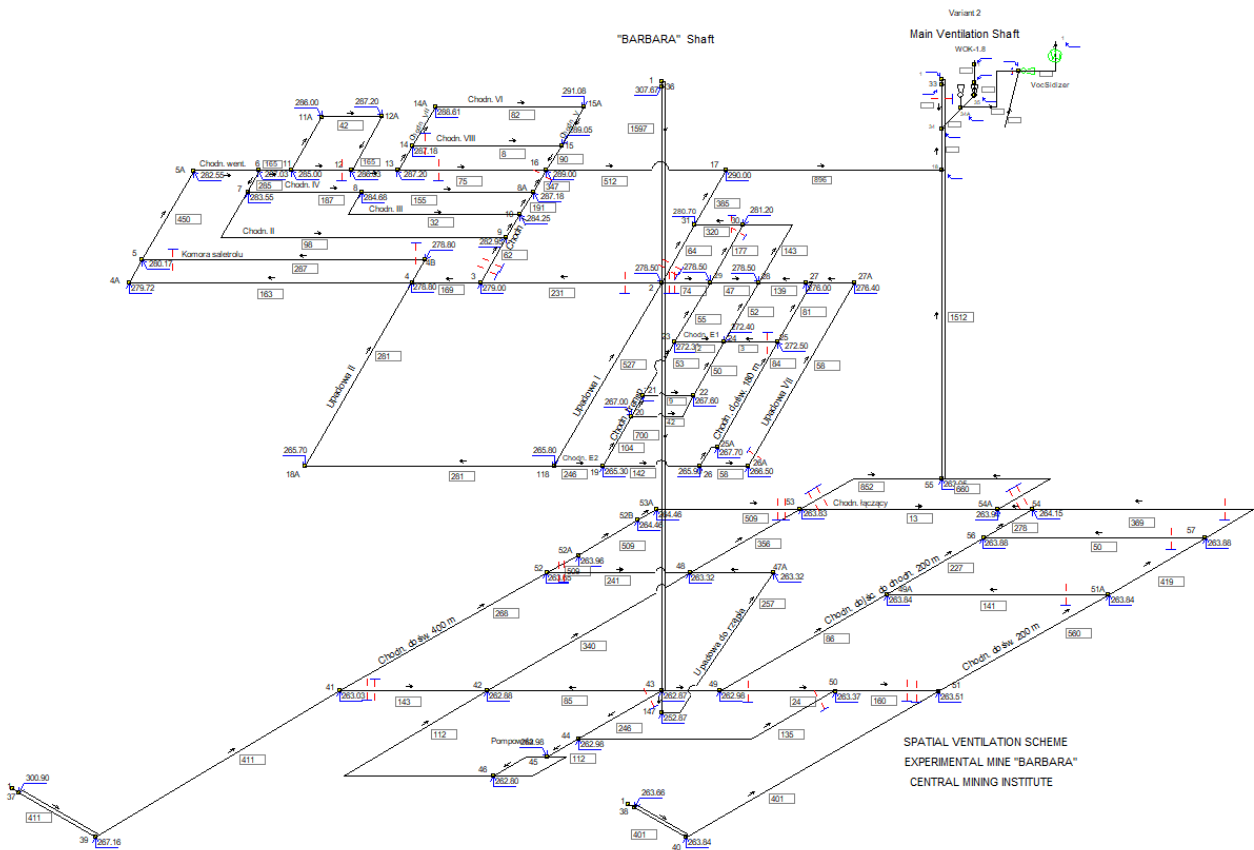
Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej współpracy modułu VAM z siecią wentylacyjną za pomocą programu komputerowego Ventgraph. Na podstawie dostępnych informacji, w szczególności dotyczących właściwości przepływowych reaktora VAM, zostaną określone zakresy zmian oporów sieci wentylacyjnej kopalni i powiązane z stabilnością pracy wentylatora jego sprawnością i bezpieczeństwem. Dla realizacji zadania wybrano sieć wyrobisk Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, której schematy przestrzenne pokazano na rysunku nr 1. Dla wybranej sieci wentylacyjnej pozyskano i zaktualizowano model numeryczny utworzony z wykorzystaniem programu Ventgraph. W obliczeniach rozważano ujęcie powietrza z dyfuzora szybu kopalni (Wariant 1) jak również z kanału zbiorczego stacji wentylatorów (Wariant 2), po czym obliczono wartości wskaźników bezpieczeństwa i efektywności pracy wentylatorów współpracujących z modułem VAM.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, stacja wentylatorów, VAM, bezpieczeństwo i stabilność przepływu

1. Wprowadzenie

W kopalniach podziemnych, metan z pokładów węgla w czasie procesu urabiania węgla, wydziela się do przepływającego powietrza w kopalni i ulega rozrzedzeniu, tworząc strumień mieszaniny powietrza i metanu (ang. Ventilation Air Methane, w skrócie VAM) zwierającą w polskich warunkach maksymalnie do 0,75% metanu w powietrzu odprowadzanym do szybów wydechowych. Metan z powietrza odprowadzanego szybami wydechowymi z kopalni na powierzchnię do atmosfery powinien być zutylicowany ze względów energetycznych, ekologicznych oraz finansowych. Rozwój nauki i techniki prowadzony na świecie doprowadził do powstania wielu technologii i urządzeń, które umożliwiają wykorzystanie metanu z powietrza wentylacyjnego jako paliwa. Realizując projekt pt. *Reduction of Ventilation Air Methane emissions in the Coal Mining Transformation Process* (ProVAM Project) zachodzi konieczność oceny zdolności wybranej sieci wentylacyjnej do stabilnej i zgodnej z przepisami górnictwem współpracy z urządzeniem utylizacji metanu typu VAM jak np. ciepły reaktor przepływowo-rewersyjny VOCSIDIZER (Rys. 2) (Dürr – Leading in Production Efficiency | EN – Dürr (durr.com)). Dla realizacji celu badań Autorzy przeprowadzili analizę numeryczną współpracy modułu VAM z siecią wentylacyjną za pomocą programu komputerowego Ventgraph [Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2021]. Na podstawie dostępnych informacji, w szczególności dotyczących właściwości przepływowych reaktorów VAM, zostaną określone zakresy zmian oporów sieci wentylacyjnej kopalni i powiązane ze sprawnością i bezpieczeństwem pracy wentylatorów. Dla realizacji zadania wybrano sieć wyrobisk Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, której schematy przestrzenne pokazano na rysunku nr 1. Dla wybranej sieci wentylacyjnych pozyskano i zaktualizowano model numeryczny utworzony z wykorzystaniem programu Ventgraph.



Rys. 1. Schemat przestrzenny połączeń wyrobisk kopalni KD "Barbara" odwzorowany w systemie Ventgraph

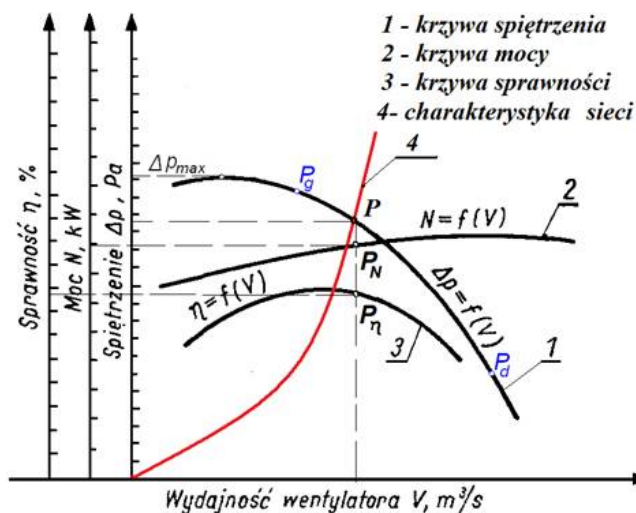
2. Zastosowanie modułu VAM i współpraca ze stacją wentylatorów

Dotychczasowe moduły VAM [Nawrat St. Gatnar K., 2008] pobierały powietrze wylotowe z kopalni poprzez wprowadzony do dyfuzora rurociąg, który zasysał mieszaninę powietrza i metanu (zawartość CH_4 nie większa niż 0,75%). Dla pilotażowych modułów VAM pobierane ilości powietrza nie przekraczają 20% wydajności stacji wentylatorów [Nawrat i in., 2009, Coal Mine Turns Greenhouse Gas into, Green Energy? | Process Heating (process-heating.com)].



Rys. 2. Moduł VAM – Vocsidizer w kopalni Thorsby, Anglia [10]

Zwiększenie ilości powietrza z metanem przeznaczonego do utylizacji i energetycznego jego wykorzystania wymaga zbadania możliwości takiego rozwiązania. Należy dokonać oceny ile mieszaniny powietrza i metanu w sposób efektywny i zgodny z obecnymi przepisami można pobrać z powietrza wypływającego z kopalni. Przyłączenie do istniejącej lub projektowanej stacji wentylatorów modułu VAM wprowadza zmianę w strukturze połączeń oraz dodatkowy opór aerodynamiczny na drodze wypływającego powietrza z kopalni (Rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyka wentylatora – krzywe czarne, charakterystyka sieci kopalni – krzywa czerwona

Praca wentylatora określona jest następującymi parametrami [1,5,7]: (wentylacja kopalni, przewietrzanie (czek.eu) [7]):

- wydajnością wentylatora,
- ciśnieniem wentylatora,
- mocą pobieraną przez silnik wentylatora,
- sprawnością zespołu wentylator – silnik;

gdzie:

Wydajność wentylatora (V) jest to ilość powietrza, jaką może przetłoczyć wentylator w zależności od oporów przepływu powietrza sieci przewietrzania. Wydajność wentylatora, jest to więc ilość (wydatek) powietrza dopływającego kanałem głównym do wentylatora, czyli ilość powietrza wypływającego z podziemnych wyrobisk kopalni szybem wydechowym powiększona o straty zewnętrzne (wszelkie nieszczelności w miejscu połączenia wentylatora z szybem np. zasuwę).

Śpiętrzenie wentylatora (Δp) jest to różnica ciśnień, jaką musi wytworzyć wentylator przed i za kołem roboczym (wirmikiem) w wyniku jego obrotu, aby pokonać opory ruchu przepływu określonej ilości powietrza przez sieć przewietrzania danej kopalni.

Moc wentylatora (N) jest to moc pobierana przez silnik wentylatora, aby wytworzyć określone ciśnienie i uzyskać odpowiadającą mu wydajność wentylatora.

Sprawność wentylatora (η) jest stosunkiem pracy użytecznej, wykonanej dla uzyskania przepływu powietrza, do pracy zużytej przez silnik wentylatora. Sprawność urządzenia wentylacyjnego jest jednym z czynników decydujących o ekonomicznej pracy wentylatora.

Przepisy górnicze zawierają wiele obostrzeń i rygorów dla stabilnej pracy stacji wentylatorów. Rozporządzenie ministra energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych, Dział III, Przewietrzanie, Rozdział 2: „Przewietrzanie za pomocą wentylatorów głównych” stanowi że:

- § 154. Wentylator główny dobiera się do sieci wentylacyjnej w sposób umożliwiający jego stabilną pracę.
- § 155. Punkty pracy wentylatorów głównych i rezerwowych zainstalowanych przy danym szybie, opisane wielkościami ciśnienia i wydajności, nie mogą różnić się o więcej niż 10% tych wielkości.

- § 156. Charakterystykę wentylatorów głównych aktualizuje się nie rzadziej niż raz na 5 lat oraz po zmianie konstrukcji wentylatorów.
- § 157. 1. Stacje wentylatorów głównych wyposaża się w urządzenia do regulacji wydajności i spiętrzenia.
- § 159. 1. Stacje wentylatorów głównych wyposaża się w przyrządy dokonujące ciągłych pomiarów:
 - 1) ciśnienia statycznego powietrza w kanale wentylacyjnym przed i za zasuwą (klapą);
 - 2) prędkości powietrza w kanale wentylacyjnym;
 - 3) ciśnienia statycznego powietrza w przekroju szybu wydechowego poniżej kanału wentylacyjnego.
- § 164. 1. Stan techniczny wentylatorów głównych, w tym zdolność do ruchu wentylatora rezerwowego i urządzeń do zmiany kierunku przepływu powietrza, oraz stan aparatury kontrolno-pomiarowej jest kontrolowany przez osoby dozoru ruchu działu energomechanicznego i wentylacji.
 2. Wyniki kontroli, o której mowa w ust. 1, dokumentuje się.
 3. Zakres i częstotliwość przeprowadzania kontroli, o której mowa w ust. 1, oraz sposób dokumentowania jej wyników są określane przez kierownika ruchu zakładu górniczego.

3. Metodyka badań, założenia

Analizując wymienione powyżej informacje celowym jest wyznaczenie poprzez, symulacje komputerowe na modelu numerycznym kopalni, zmienność ilości powietrza przepływającego przez stację wentylatora w zależności od dodatkowego połączenia (oporu) jaki stanowi włączenie modułu VAM. W takiej sytuacji pokazana na rysunku 2 krzywa czerwona oznaczająca charakterystykę sieci wyrobisk kopalni będzie ulegać zmianie, co powoduje przesuwanie się punktu pracy wentylatora po jego charakterystyce. Zespół Pracowni Wentylacji IMG PAN jest w posiadaniu wielu modeli numerycznych czynnych kopalń polskich. Daje to asumpt do wykonania wariantowych obliczeń rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni dla dodatkowego połączenia, który symuluje włączenie modułu VAM. Do obliczeń zastosowano profesjonalny system *VentGraph* wspomagających pracę Inżyniera wentylacji kopalni. [Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2021] jest stosowany w wielu polskich kopalniach węgla, również znalazł zastosowanie w górnictwie australijskim, Ameryki Północnej, w Wietnamie i Czeskiej Republice [Gillies A.D.S., Wala A.M., Wu H.W., 2005; Pritchard MS P.E, 2010].

Analizę stabilności pracy wentylatorów głównych pracujących przy szybach wydechowych przeprowadza się w oparciu o kumulacyjny i dysypacyjny warunek stabilnej pracy wentylatora. Dla uzupełnienia oceny pracy wentylatorów głównych rozpatrzono także warunek ekonomicznej pracy wentylatora.

Kumulacyjny warunek stabilnej pracy wentylatora przedstawia się następująco:

$$\Delta p_c < 0,9 * \Delta p_{c_{\max}} \quad (1)$$

gdzie:

Δp_c – aktualne spiętrzenie pracującego wentylatora, Pa,

$\Delta p_{c_{\max}}$ – spiętrzenie maksymalne według przebiegu charakterystyki, Pa.

Dysypacyjny warunek stabilnej pracy wentylatora określony jest zależnością:

$$R \leq \frac{R_{gr}}{K} \quad (2)$$

gdzie:

R – opór podsieci wentylacyjnej, której charakterystyka przecina charakterystykę pracującego wentylatora po prawej stronie jej malejącego przebiegu (dla aktualnego punktu pracy o spiętrzeniu Δp_c), kg/m^7 ,

R_{gr} – opór podsieci wentylacyjnej, której charakterystyka przecina charakterystykę wentylatora w punkcie odpowiadającym granicznej stabilności jego pracy (dla punktu pracy o spiętrzeniu $\Delta p_{c_{\max}}$), kg/m^7 ,

K – współczynnik rezerwy dławienia, przyjmowany jako $K = 1,2$.

Warunek ekonomicznej pracy wentylatora określony jest nierównością:

$$\eta \geq 0,8 \eta_{\max} \quad (3)$$

gdzie:

- η – sprawność wentylatora dla aktualnego punktu jego pracy, %,
- η_{\max} – sprawność maksymalna wentylatora dla wyznaczonej charakterystyki wentylatora, %.

Powyżej przedstawione możliwości wykonywania oceny stabilności systemów przewietrzania rejonów eksploatacyjnych pozwolą na poszerzenie analizy wpływu modułu VAM na bezpieczną i stabilną pracę stacji wentylatorów przewietrzania kopalni.

4. Symulacja numeryczna współpracy modułu VAM połączonego z szybem wentylacyjnym KD Barbara

Wyniki w zakresie oceny bezpieczeństwa pracy systemu wentylacji daje analiza systemów przewietrzania w oparciu o wskaźniki stabilności. Wykonanie szeregu obliczeń rozplywu powietrza dla wprowadzonego dodatkowego połączenia z modułem VAM pozwoli na pokazanie zakresu zmienności wydajności wentylatora z równoczesną oceną stabilności pracy stacji wentylatorów w oparciu o kumulacyjny i dysypacyjny warunek stabilnej pracy wentylatora. Dla każdego wariantu połączeń wyrobisk (Rys. 4 – Wariant 1, Rys. 5 – Wariant 2) obliczone zostaną wskaźniki (1), (2) i (3) przy założeniu poboru powietrza z szybu do urządzenia VAM (VocSidizera) w stosunku 10/20/30/40% do wydatku powietrza przepływającego przez łopatki wentylatora w badanym szybie. Ponadto, wg informacji uzyskanej od producenta urządzenia VAM (Dürr – Leading in Production Efficiency | EN – Dürr (durr.com)) dla którego wentylator modułu VAM (np. Vocsidizera) zaprojektowano tak, aby zapewnić ciśnienie wlotowe –500 Pa, co oznacza, że maksymalny spadek ciśnienia z wylotu kopalni do wlotu wentylatora może wynosić 500 Pa. Proponuje się prowadzenie obliczeń rozplywu powietrza dla dwu wariantowych połączeń modułu VAM w rejonie stacji wentylatorów:

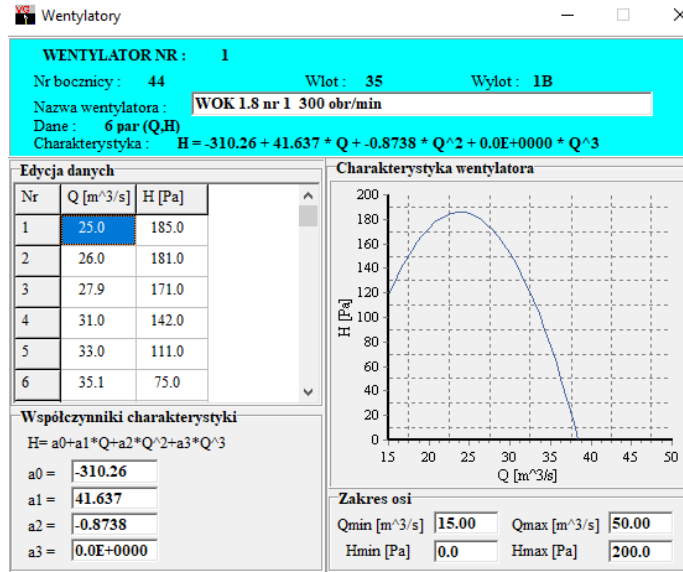
- wariant 1 pobór powietrza z dyfuzora wentylatora Rys. 4.,
- wariantu 2 pobór powietrza z kanału wentylatora Rys. 5.

Istotne jest wprowadzenie do obliczeń charakterystyki wentylatora pracującego na szybie KD Barbara, jest nim wentylator typu WOK-1.8. W tabeli 1 pokazano dane pomiarowe dla tego wentylatora nr 1 i dla obrotów 300 1/min. W tabeli 2 pokazano aproksymację charakterystyki wentylatora WOK-1.8 wielomianem drugiego stopnia odwzorowanego w modelu numerycznym kopalni KD Barbara.

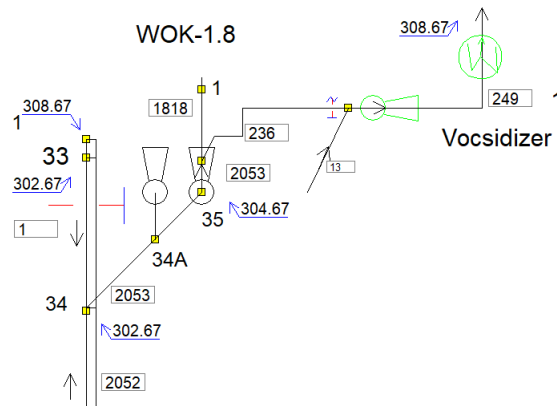
Tab. 1. Wyniki pomiarów i obliczeń parametrów współpracy wentylatora nr 1 typu WOK-1.8 dla $n = 300$ obr/min pracującym przy szybie wentylacyjnym KD “Barbara”

l.p.	parametr	symbol	wymiar	nr pomiaru					
				1	2	3	4	5	6
1	Śpięźnienie całkowite	Δp_c	Pa	185	181	171	142	111	75
2	Prędkość średnia powietrza w przekroju wypływu z dyfuzora	w_d	m/s	5,310	5,531	5,927	6,581	7,021	7,464
3	Wydajność objętościowa	V	m ³ /s	24,98	26,02	27,88	30,96	33,03	35,11
4	Temperatura powietrza mierzona termometrem suchym	t	°C	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
5	Temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym	t_ϕ	°C	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
6	Ciśnienie barometryczne	p	Pa	99000	99000	99000	99000	99000	99000
7	Wilgotność względna powietrza	ϕ	%	82	82	82	82	82	82
8	Stopień zawiłzenia powietrza	χ	kg pary/kg	0,005348	0,005348	0,005348	0,005348	0,005348	0,005348
9	Gęstość średnia powietrza	ρ_w	kg/m ³	1,2254	1,2254	1,2254	1,2254	1,2254	1,2254
10	Współczynnik $K=1,2/\Omega$	K		0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980
Analiza stabilności i ekonomiczności pracy wentylatora									
1	Wydajność wentylatora w punkcie jego	V	m ³ /s	30,96					
2	Śpięźnienie całkowite w punkcie jego	Δp_c	Pa	142					
3	Opór podsieci	R_f	kg/m ²	0,148					
4	Otwór równoznaczny podsieci	A_e	m ²	3,09					
5	Wydajność wentylatora w wierzchołku charakterystyki	V	m ³ /s	24,98					
6	Śpięźnienie wentylatora w wierzchołku charakterystyki	Δp_{\max}	Pa	185					
7	Opór podsieci	R_{fr}	kg/m ²	0,296					
8	0,9 * $\Delta p_{c,\max} = 166,5$ Pa warunek stabilności jest spełniony								

Tab. 2. Aproksymacja charakterystyki wentylatora WOK-1.8

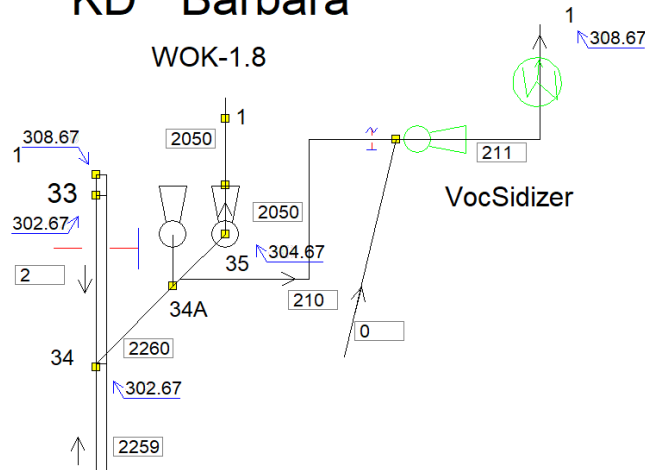


Wariant 1 KD "Barbara"



Rys. 4. Fragment rejonu sieci wentylacyjnej kopalni KD Barbara, przykładowe włączenie modułu VAM do stacji wentylatorów wg wariantu 1, w prostokątach – ilość powietrza [m³/min], opis węzła – kota niwelacyjna [m]

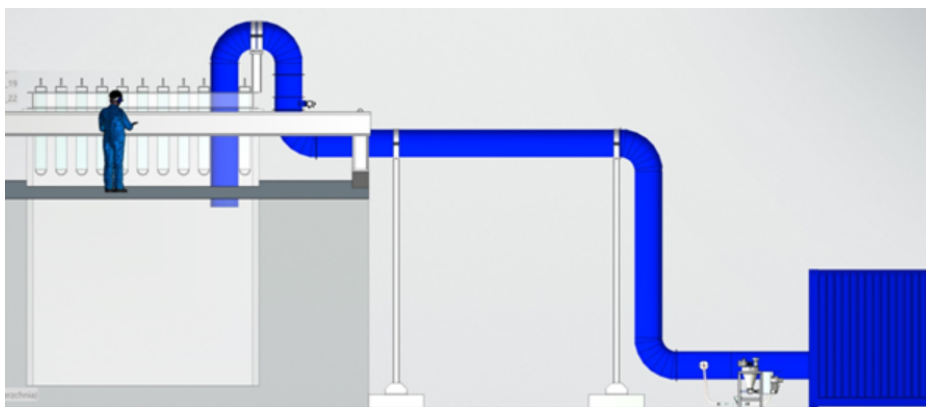
Wariant 2 KD "Barbara"



Rys. 5. Fragment rejonu sieci wentylacyjnej kopalni KD Barbara, przykładowe włączenie modułu VAM do stacji wentylatorów wg wariantu 2, w prostokątach – ilość powietrza [m³/min], opis węzła – kota niwelacyjna [m]

4.1. Obliczenia, wariant 1, wyniki

Obliczenia rozplywu powietrza wg. zalozen dla wariantu 1 przeprowadzono dla czterech wartosci pobieranego powietrza rurociagiem wprowadzonym do dyfuzora szybu kopalni, oraz dla dwu wartosci oporow dyfuzora, do ktorego wprowadzono rury odbierajace powietrze. Na rysunku 6 przedstawiono schematyczna konstrukcje instalacji powietrza wentylacyjnego, oznaczonego kolorem niebieskim, odbieranego z dyfuzora kopalni doswiadczalnej „Barbara” i wprowadzanego do urzadzenia VAM.



Rys. 6. Wariant 1 konstrukcji zabudowy czepni powietrza wentylacyjnego z przestrzeni dyfuzora wentylatora zabudowanego w KD „Barbara”

Zgodnie z zalozeniami wykonano wariantowe obliczenia, a uzyskane wyniki dla wariantu 1 przedstawiono w Tabeli 3 i Tabeli 4. Obliczenia wykonano zmieniajac opor rurociagu odbierajacego powietrze z dyfuzora (kolumna 2) srednica rurociagu doprowadzajaca powietrze z dyfuzora do wentylatora VAM wynosi 500 [mm]. W kolumnie 4 zestawiono ilosc powietrza doprowadzana do urzadzenia VAM. W tabeli 3 zamieszczono wyniki obliczen dla oporu aerodynamicznego dyfuzora $r = 0,0116 \text{ kg/m}^7$, a w tabeli 4 dla zwiekszonego oporu aerodynamicznego dyfuzora $r = 0,116 \text{ kg/m}^7$.

Tabela 3

opor dyfuzora fan = 0.0116 kg/m ⁷												
wskaznik wlotu powietrza %	opor 1 czesc [kg/m ⁷]	opor 2 czesc [kg/m ⁷]	ilosc powietrza do VAM [m ³ /min]	strata cisnienia w VAM (VocSidizer)	strata cisnienia czesc 1 [Pa]	strata cisnienia czesc 2 [Pa]	ilosc powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	ilosc powietrza w wentylatorze [m ³ /sek]	ilosc powietrza w wentylatorze [m ³ /min]	cisnienie wentylatora [Pa]	ilosc powietrza na wylocie wentylatora [m ³ /min]	obliczony wskaznik wlotu powietrza %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10%	41,5	0,0001	208,3	500	501	0	1844,7	34,2	2053,0	94,000	1818,0	10,15
20%	10,5	0,0001	414,4	500	501	0	1639,6	34,2	2054,0	94,000	1640,0	20,18
30%	4,7	0,0001	619	500	501	0	1436,0	34,3	2055,0	94,000	1435,0	30,12
40%	2,64	0,0001	825	500	501	0	1230,0	34,3	2055,0	94,000	1260,0	40,15

Tabela 4

opor dyfuzora = 0.116 kg/m ⁷												
wskaznik wlotu powietrza %	opor 1 czesc [kg/m ⁷]	opor 2 czesc [kg/m ⁷]	ilosc powietrza do VAM [m ³ /min]	strata cisnienia w VAM (VocSidizer)	strata cisnienia czesc 1 [Pa]	strata cisnienia czesc 2 [Pa]	ilosc powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	ilosc powietrza w wentylatorze [m ³ /sek]	ilosc powietrza w wentylatorze [m ³ /min]	cisnienie wentylatora [Pa]	ilosc powietrza na wylocie wentylatora [m ³ /min]	obliczony wskaznik wlotu powietrza %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10%	58,9	0,0001	175	500	501	0	1576,0	29,2	1750,0	153,0	1576,0	10,00
20%	14,6	0,0001	351	500	501	0	1337,0	29,2	1751,0	153,0	1337,0	20,05
30%	6,5	0,0001	526	500	501	0	1173,0	29,2	1751,0	153,0	1173,0	30,04
40%	3,64	0,0001	702,6	500	501	0	1049,0	29,2	1752,0	153,0	1049,0	40,10

W tabeli 5 i w tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczen wskazanikow dla oceny stabilnosci i ekonomicznosci pracy wentylatora WOK-1.8 w KD „Barbara”.

Tabela 5

Wariant 1 opór dyfuzora = 0.016 [kg/m ⁷]					
Wyszczególnienie	Jedn. miary	Fan WOK-1.8			
wychwyty VocSidizera w stosunku do wydatku powietrza wentylatora	%	~10%	~20%	~30%	~40%
	[m ³ /s]	208	414	619	825
Spiężnienie maksymalne - Δpc max	[Pa]	185	185	185	185
0,9* Δpc _{max} z charakterystyki	[Pa]	167	167	167	167
Δpc - spiężnienie wentylatora z obliczeń	[Pa]	94	94	94	94
Warunek Δpc < 0,9 Δpc max	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Ilość powietrza dla pkt. pracy	[m ³ /s]	34,2	34,2	34,2	34,2
	[m ³ /min]	2052	2052	2052	2052
Ilość powietrza dla spiężnienia Δpc max	[m ³ /s]	25	25	25	25
	[m ³ /min]	1500	1500	1500	1500
Opór podsięci aktualny - R	[kg/m ⁷]	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804
Opór podsięci maksymalny - R _{gr}	[kg/m ⁷]	0,2960	0,2960	0,2960	0,2960
R _{gr} / 1,2	[kg/m ⁷]	0,25	0,25	0,25	0,25
Warunek R ≤ R_{gr} / K	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Sprawność wentylatora w pkt. pracy	[%]	73	75	77	78
Sprawność wentylatora maksymalna - η max	[%]	88	88	88	88
0,8 η max	[%]	70,4	70,4	70,4	70,4
Warunek η ≥ 0,8 η max		spełniony	spełniony	spełniony	spełniony

Tabela 6

Wariant 1 opór dyfuzora = 0.16 [kg/m ⁷]					
Wyszczególnienie	Jedn. miary	Fan WOK-1.8			
wychwyty VocSidizera w stosunku do wydatku powietrza wentylatora	%	~10%	~20%	~30%	~40%
	[m ³ /s]	208	414	619	825
Spiężnienie maksymalne - Δpc max	[Pa]	185	185	185	185
0,9* Δpc _{max} z charakterystyki	[Pa]	167	167	167	167
Δpc - spiężnienie wentylatora z obliczeń	[Pa]	153	153	153	153
Warunek Δpc < 0,9 Δpc max	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Ilość powietrza dla pkt. pracy	[m ³ /s]	29,2	29,2	29,2	29,2
	[m ³ /min]	1752	1752	1752	1752
Ilość powietrza dla spiężnienia Δpc max	[m ³ /s]	25	25	25	25
	[m ³ /min]	1500	1500	1500	1500
Opór podsięci aktualny - R	[kg/m ⁷]	0,1794	0,1794	0,1794	0,1794
Opór podsięci maksymalny - R _{gr}	[kg/m ⁷]	0,2960	0,2960	0,2960	0,2960
R _{gr} / 1,2	[kg/m ⁷]	0,25	0,25	0,25	0,25
Warunek R ≤ R_{gr} / K	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Sprawność wentylatora w pkt. pracy	[%]	73	75	77	78
Sprawność wentylatora maksymalna - η max	[%]	88	88	88	88
0,8 η max	[%]	70,4	70,4	70,4	70,4
Warunek η ≥ 0,8 η max		spełniony	spełniony	spełniony	spełniony

Wentylator typu WOK-1.8 zlokalizowany na szybie KD „Barbara” współpracujący z podłączonym urządzeniem VAM spełniają dla rozpatrywanych podwariantów wszystkie warunki tj.:

- kumulacyjny warunek stabilnej pracy $\Delta pc < 0,9 \Delta pc_{\max}$,
- dysypacyjny warunek stabilnej pracy $R \leq R_{gr} / K$,
- warunek ekonomicznej pracy wentylatora $\eta 0,8 \eta_{\max}$.

4.2. Obliczenia, wariant 2, wyniki

Obliczenia rozplywu powietrza w wariacie 2 wykonano dla zmienionego sposobu poboru powietrza z szybu wentylacyjnego kopalni KD „Barbara” (Rys. 5). Rurociąg wprowadzono bezpośrednio do kanału stacji, przed wentylatorem WOK-1.8. Obliczenia rozplywu powietrza w wariacie 2 przeprowadzono podobnie jak dla warunków Wariantu 1. W tabeli 7 i tabeli 8 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźników dla oceny stabilności i ekonomiczności pracy wentylatora WOK-1.8 w KD „Barbara”.

Tabela 7

opór dyfuzora = 0.0116 kg/m ⁷												
wskaźnik wlotu powietrza %	opór 1 część [kg/m ⁷]	opór 2 część [kg/m ⁷]	ilość powietrza do VAM [m ³ /min]	strata ciśnienia w VAM (VocSidizer)	strata ciśnienia część 1 [Pa]	strata ciśnienia część 2 [Pa]	ilość powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	ilość powietrza w wentylatorze [m ³ /sek]	ilość powietrza w wentylatorze [m ³ /min]	ciśnienie wentylatora [Pa]	ilość powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	obliczony wskaźnik wlotu powietrza %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10%	33.5	0.0001	210	500	411	0	2255	34.1	2045	94.0	2045	10.27
20%	8.8	0.0001	404	500	399	0	2406	33.4	2002	106.0	2002	20.18
30%	4.1	0.0001	583	500	388	0	2543	32.7	1960	118.0	1960	29.74
40%	2.3	0.0001	766	500	377	0	2677	31.8	1910	130.0	1910	40.10

Tabela 8

opór dyfuzora = 0.116 kg/m ⁷												
wskaźnik wlotu powietrza %	opór 1 część [kg/m ⁷]	opór 2 część [kg/m ⁷]	ilość powietrza do VAM [m ³ /min]	strata ciśnienia w VAM (VocSidizer)	strata ciśnienia część 1 [Pa]	strata ciśnienia część 2 [Pa]	ilość powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	ilość powietrza w wentylatorze [m ³ /sek]	ilość powietrza w wentylatorze [m ³ /min]	ciśnienie wentylatora [Pa]	ilość powietrza na wlocie wentylatora [m ³ /min]	obliczony wskaźnik wlotu powietrza %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10%	52.5		174	500	434	0	1828	27.6	1654	174.0	1654	10.52
20%	14.5		328	500	426	0	1948	27.0	1620	177.0	1620	20.25
30%	7.89		473	500	426	0	2059	26.4	1586	180.0	1586	29.82
40%	3.9		623	500	420	0	2168	25.8	1545	183.0	1620	40.32

Istotą prowadzonych obliczeń było sprawdzenie wpływu wartości oporu wylotu z dyfuzora na wskaźniki pracy wentylatora WOK-8.1. W tabeli 9 zestawiono wyniki obliczeń wskaźników dla oporu wylotu równego $r = 0,0116 \text{ kg/m}^7$, a w tabeli 10 zestawiono wyniki obliczeń wskaźników dla oporu wylotu równego $r = 0,116 \text{ kg/m}^7$.

Z przedstawionych danych w tabeli 10, wynika że dla zwiększonego oporu wylotu dyfuzora wg Wariantu 2, kumulacyjny warunek stabilnej jest nie spełniony, oraz warunek dysypacyjny dla zwiększonego do 30% i 40% poboru powietrze, też nie jest spełniony, pozostałe warunki są spełnione.

5. Podsumowanie, wnioski

Na podstawie zasad współpracy reaktorów VAM z szybem wentylacyjnym kopalni wykonano wielowariantowe obliczenia numeryczne współpracy modułu VAM z siecią wentylacyjną za pomocą programu Ventgraph. Wyznaczono zakresy zmian oporów sieci wentylacyjnej kopalni w powiązane ze stabilnością, sprawnością i bezpieczeństwem pracy wentylatorów głównego przewietrzania kopalni. Do obliczeń rozplywu powietrza w całej sieci wentylacyjnej wybrano system wentylacji kopalni podziemnej KD „Barbara”, dla których badano współpracę modułu VAM. Przeprowadzono obliczenia rozplywu powietrza i ujęcia części strumienia wypływającego z badanej stacji wentylatorów, po czym obliczono wartości wskaźników bezpieczeństwa i efektywności pracy wentylatorów współpracujących z modułem VAM.

Tabela 9

Wariant 1 opór dyfuzora = 0.016 [kg/m ⁷]					
Wyszczególnienie	Jedn. miary	Fan WOK-1.8			
		~ 10%	~20%	~30%	~40%
wychwyty VocSidzera w stosunku do wydatku powietrza wentylatora	%				
	[m ³ /s]	210	404	584	768
Spiężnienie maksymalne - Δpc max	[Pa]	185	185	185	185
0,9* Δpc _{max} z charakterystyki	[Pa]	167	167	167	167
Δpc - spiężnienie wentylatora z obliczeń	[Pa]	94	106	118	130
Warunek Δpc < 0,9 Δpc max	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Ilość powietrza dla pkt. pracy	[m ³ /s]	34,1	33,4	32,7	31,8
	[m ³ /min]	2046	2004	1962	1908
Ilość powietrza dla spiężnienia Δpc max	[m ³ /s]	25	25	25	25
	[m ³ /min]	1500	1500		
Opór podsięci aktualny - R	[kg/m ⁷]	0,0808	0,0950	0,1104	0,1286
Opór podsięci maksymalny - Rgr	[kg/m ⁷]	0,2960	0,2960	0,2960	0,2960
Rgr / 1,2	[kg/m ⁷]	0,25	0,25	0,25	0,25
Warunek R ≤ Rgr / K	---	spełniony	spełniony	spełniony	spełniony
Sprawność wentylatora w pkt. pracy	[%]	73	75	77	78
Sprawność wentylatora maksymalna - η max	[%]	88	88	88	88
0,8 η max	[%]	70,4	70,4	70,4	70,4
Warunek η ≥ 0,8 η max		spełniony	spełniony	spełniony	spełniony

Tabela 10

Wariant 2 opór dyfuzora = 0.116 [kg/m ⁷]					
Wyszczególnienie	Jedn. miary	Fan WOK-1.8			
		~ 10%	~20%	~30%	~40%
wychwyty VocSidzera w stosunku do wydatku powietrza wentylatora	%				
	[m ³ /s]	210	404	584	768
Spiężnienie maksymalne - Δpc max	[Pa]	185	185	185	185
0,9* Δpc _{max} z charakterystyki	[Pa]	167	167	167	167
Δpc - spiężnienie wentylatora z obliczeń	[Pa]	174	177	180	183
Warunek Δpc < 0,9 Δpc max	---	nie spełniony	nie spełniony	nie spełniony	nie spełniony
Ilość powietrza dla pkt. pracy	[m ³ /s]	27,6	27,0	26,4	25,8
	[m ³ /min]	1656	1620	1584	1548
Ilość powietrza dla spiężnienia Δpc max	[m ³ /s]	25	25	25	25
	[m ³ /min]	1500	1500	1500	1500
Opór podsięci aktualny - R	[kg/m ⁷]	0,2284	0,2428	0,2583	0,2749
Opór podsięci maksymalny - Rgr	[kg/m ⁷]	0,2960	0,2960	0,2960	0,2960
Rgr / 1,2	[kg/m ⁷]	0,25	0,25	0,25	0,25
Warunek R ≤ Rgr / K	---	spełniony	spełniony	nie spełniony	nie spełniony
Sprawność wentylatora w pkt. pracy	[%]	73	75	77	78
Sprawność wentylatora maksymalna - η max	[%]	88	88	88	88
0,8 η max	[%]	70,4	70,4	70,4	70,4
Warunek η ≥ 0,8 η max		spełniony	spełniony	spełniony	spełniony

W obliczeniach rozważano ujęcie powietrza z dyfuzora szybu kopalni (Wariant 1) jak również z kanału zbiorczego stacji wentylatorów (Wariant 2). W obliczeniach rozważano ujęcie powietrza z szybu do urządzenia VAM (VocSidizera) w stosunku 10/20/30/40% do wydatku powietrza przepływającego przez łopatkę wentylatora w badanym szybie co pozwalało na zastosowanie do czterech urządzeń VAM na stacji wentylatorów. Na podstawie obliczeń sformułowano następujące wnioski:

- Ujęcie powietrza z dyfuzora kopalni poprzez wprowadzenie rur transportujących powietrze do wentylatorów aż do czterech urządzeń VAM spełnia warunki dane wzorami (1), (2) i (3) bezpieczeństwa i ekonomicznej współpracy ze stacją wentylatorów. Dane do obliczeń dla Wariantu 1 dla KD „Barbara” w tym opory dyfuzora i rurociągu dostarczającego powietrze do wentylatora VAM zestawiono w postaci tabel nr 3 i 4 oraz 5 i 6.
- Ujęcie powietrza z kanału zbiorczego stacji wentylatorów jest dla przypadku dla oporu dyfuzora $0,0116 \text{ [kg/m}^7\text{]}$ (Tabela 7 i 9) w KD „Barbara” bezpieczne i spełniające warunki dane wzorami (1), (2) i (3) bezpieczeństwa i ekonomicznej współpracy urządzenia projektowanego dla KD „Barbara” z wentylatorem typu WOK 1.8.
- Dla zwiększonego oporu wylotu dyfuzora, do wartości $0,116 \text{ [kg/m}^7\text{]}$, kumulacyjny warunek stabilnej jest nie spełniony (Tabela 8 i 10), oraz warunek dysypacyjny dla zwiększonego do 30 % i 40% poboru powietrze, też nie jest spełniony, pozostałe warunki są spełnione (pkt 4.2).
- Ujęcie powietrza z dyfuzora kopalni poprzez wprowadzenie rur transportujących powietrze do wentylatorów aż do czterech urządzeń VAM spełnia warunki dane wzorami (1), (2) i (3) bezpieczeństwa i ekonomicznej współpracy ze stacją wentylatorów.
- Możliwe jest zastosowanie wielu urządzeń typu VAM (obliczenia prowadzono dla czterech urządzeń VAM), przy czym opór rurociągu pobierającego powietrze winien nie przekraczać wartości pokazanych w tabeli 3 i 4 kolumna 2 dla kopalni KD „Barbara”.
- Rozważania w zakresie wpływu potencjalnych zmian związanych z zamknięciem kopalni pokazują, że wyłączenie kolejnych wyrobisk ze struktury kopalni wpływa na ilość powietrza dopływającą do szybu wentylacyjnego. Taki stan parametrów przepływu powietrza powoduje tendencje do niestabilnej pracy wentylatorów. Szczegółowe i bardziej dokładne badania w tym zakresie z uwzględnieniem dopływu metanu i podjętych regulacji w sieci wyrobisk pozwolą na precyzyjną prognozę zasygnalizowanych wniosków wynikających z prowadzonych rozważań [3,4].

Prezentowany artykuł jest wykonany w ramach projektu ProVAM i finansowany przez Unię Europejską funduszu RFCS oraz przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP, nr projektu 101112618 ProVAM-RFCS-2022-RPJ

Literatura

- [1] Budryk W., 1961: *Wentylacja kopalń część 1 Przewietrzanie kopalń*, Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice 1961.
- [2] Gillies A.D.S., Wala A.M., Wu H.W., 2005: *Simulation of the Effects of Inertisation of Fires on Mine Ventilation Systems*. Proceedings of the Eighth International Mine Ventilation Congress Brisbane, Australia pp 317-324.
- [3] Dziurzyński W., Krawczyk J., Pałka T., Krach A., 2018: *Wyłączenie przewietrzania kopalni Ruch „Anna” – symulacja numeryczna*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 20, nr 3, Wrzesień 2018, s. 189-196.
- [4] Dziurzyński W., Krawczyk J., Grzywacz M., *Analysis of Ventilation System and Assessment of Hazards in the Process of Progressing Liquidation of Workings in Mine.*, Proceedings of the 18th Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production. SWEMP 2018 – Selected Works. 6330 Cham: Springer. (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99903-6_20
- [5] Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., 2021: *Podręcznik użytkownika programu VentGraph Plus z przykładami*. Wydawnictwo IMG PAN, 2021, ISBN 978-83-953913-5-4, str. 264.
- [6] Pawiński J., Roszkowski J., Strzeмиński J., 1995: *Przewietrzanie kopalń*. Śląskie Wydawnictwa Techniczne, Katowice.
- [7] Pritchard C.J., 2010: *Validation of the Ventgraph program for use in metal/non-metal mines*. Proceedings of the 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, Sudbury, June Kanada 2010.
- [8] Roszczynialski W., Nawrat S., Szlązak J., Tomczyk J., 1999: *Bezpieczna kopalnia*. Kraków.
- [9] Rozporządzenie Ministra Energi z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.

- [10] Nawrat St., Gatnar K., 2008: *Ocena stanu i możliwości utylizacji metanu z powietrza wentylacyjnego podziemnych kopalń węgla kamiennego*. Polityka Energetyczna Tom 11, Zeszyt 2, 2008 PL ISSN 1429-6675.
- [11] Nawrat S., 2006 – *Możliwości wykorzystania metanu z powietrza wentylacyjnego podziemnych kopalń węgla.*, Miesięcznik WUG nr 5
- [12] Nawrat St., Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Napieraj S., Gatnar K., 2009: *Utylizacja metanu z pokładów węgla w polskich kopalniach podziemnych*. Wydawnictwo AGH, monografia, Kraków 2009, str. 103.

Numerical analysis of the mine ventilation network to determine the conditions for connecting VAM devices in terms of safety

Abstract

The article presents the results of the numerical analysis of the cooperation of the Ventilation Air Methane (VAM) utilisation module with the ventilation network using the Ventgraph computer program. Based on the available information, in particular regarding the flow properties of the VAM reactor, the ranges of changes in the mine ventilation network resistance have been determined and related to the stability of the fan operation, its efficiency and safety. To carry out the task, the network of the Experimental Mine “Barbara” was selected, the spatial diagrams of which are shown in Figure No. 1. For the selected ventilation network, a numerical model created using the Ventgraph program was obtained and updated. The calculations considered air intake from the mine shaft diffuser (Variant 1) as well as from the fan station collection channel (Variant 2), after which the values of the safety and efficiency indicators of the fans cooperating with the VAM module were calculated.

Keywords: numerical analysis, fan station, VAM equipment, safety and flow stability