

prof. dr hab. inż. HENRYK BYSTRONĆ czł. rzecz. PAN  
Główny Instytut Górnictwa  
HENRYK BYSTRONĆ, D.Sc. Professor, Regular Member of the Polish Academy of Sciences  
Central Mining Institute

## **Zastosowanie temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego w badaniu termodynamicznym odwracania się prądów powietrznych bocznych i głównego w kopalni o schodzącym przewietrzaniu czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym**

### **Application of virtual temperature of dry mine air in the investigation of the reversal of lateral and main air currents in the mine with descending ventilation of active overhand mining during coal fires in the descending independent air current**

*Powietrze kopalniane traktowano jako mieszaninę pary wodnej, kropelek ciekłej wody i suchego powietrza kopalnianego, jego przepływy turbulentne – jako jednowymiarowe ustalone z wymianą masy i ciepła. Podano skład chemiczny suchego powietrza kopalnianego i jego temperaturę wirtualną. Wprowadzono ją w miejsce temperatury termometru suchego występującej w adekwatnych wzorach psychrometrycznych, metodzie termodynamicznej i teorii potencjału aerodynamicznego. Wobec braku adekwatnej rzeczywistej kopalni, za obiekt badania przyjęto siedem struktur topologicznych systemu wentylacji wirtualnej kopalni o schodzącym przewietrzaniu dwu grup czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych. Korzystano ze wcześniejszej pracy, w której traktowano powietrze kopalniane jako mieszaninę pary wodnej i czystego powietrza suchego, którego skład chemiczny nie zależy od miejsca. Dla wspomnianych struktur topologicznych wyprowadzono stopnie bezpieczeństwa oraz warunki zachowania pierwotnych kierunków prądów bocznych i głównego i ich bezruchu. Stopnie te i warunki przedstawiono graficznie za pomocą pięciokąta krzywoliniowego, który porównano z pięciokątem uzyskanym we wspomnianej wcześniejszej pracy.*

*Mine air was treated as a mixture of water vapour, liquid water droplets and dry mine air, while its turbulent flows – as unidimensional and steady with mass and heat exchange. The chemical composition of dry mine air and its virtual temperature have been given. This temperature was introduced in the place of dry bulb temperature appearing in appropriate psychrometric formulas, in the thermodynamic method and in the theory of aerodynamic potential. Due to the lack of an adequate, real mine, seven topological structures of a virtual mine ventilation system with descending ventilation of two groups of active overhand mining operations have been assumed to be the object of investigation. The results of the previous work were used in which dry mine air was considered to be a mixture of water vapour and clean dry air whose chemical composition does not depend on the location. For the topological structures mentioned above, the degrees of safety and conditions of maintaining original directions of lateral and main air currents as well as their standstill were introduced. These degrees and conditions have been graphically presented by means of a curvilinear pentagon which was compared with the pentagon obtained in the above mentioned previous work.*

## 1. WPROWADZENIE

Znane jest podejście termodynamiczne do odwracania się prądów powietrznych bocznego i głównego w kopalni o schodzącym przewietrzaniu projektowanych / czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym [7,8]. W podejściu tym przyjęto upraszczające założenie, iż powietrze kopalniane jest mieszaną pary wodnej, kropelek ciekłej wody i czystego powietrza suchego (czynnik termodynamiczny), którego skład chemiczny nie zależy od miejsca. Również znana jest temperatura wirtualna suchego powietrza kopalnianego [2] i jej zastosowanie w obliczeniach wentylacji kopalń [5, 6].

Wciąż jeszcze problemem otwartym jest badanie termodynamiczne wspomnianego odwracania się prądów powietrznych przy traktowaniu powietrza kopalnianego – zgodnie z rzeczywistością – jako mieszaniny pary wodnej, kropelek ciekłej wody i suchego powietrza kopalnianego, którego skład chemiczny zależy od miejsca. Zapewnienie tej luki jest celem niniejszej pracy.

## 2. ZAŁOŻENIA, OBIEKT BADANIA I METODA

Przepływy turbulentne powietrza kopalnianego traktujemy jako jednowymiarowe ustalone, z wymianą masy i ciepła, wentylator główny – jako bocznice systemu wentylacji, opory miejscowe i energię kinetyczną – jako pomijalnie małe, powietrze kopalniane – jako mieszaninę pary wodnej, kropelek ciekłej wody i suchego powietrza kopalnianego.

Temperatury wirtualne:  $T_v$  i  $t_v$  suchego powietrza kopalnianego określone są odpowiednio wzorem:  $T_v = M_a T / M_g$  [2] i następującym wzorem [5]:

$$t_v = \frac{M_a}{M_g} (273,15 + t) - 273,15 \quad (1)$$

gdzie:

- $T, t$  – temperatura termometru suchego, odpowiednio K i °C,  
 $M_a = 28,966$  – masa drobinowa czystego powietrza suchego,  
 $M_g$  – masa drobinowa suchego powietrza kopalnianego:

$$M_g = \sum_n (r_n M_n) \quad (2)$$

## 1. INTRODUCTION

There is common knowledge about the thermodynamic approach to the reversal of lateral and main currents in the mine with descending ventilation of planned or active overhand mining during coal fires in the descending independent current [7, 8]. In this approach, a simplified assumption has been adopted that the mine air is a mixture of water vapour, liquid water droplets and clean dry air (thermodynamic factor) whose chemical composition does not depend on the location. There is also knowledge about the temperature of dry mine air [2], and its use application in mine ventilation computations [5, 6].

There is one open issue, however – the thermodynamic investigations of the above mentioned reversal of air currents with the mine air treated, as it really is, as a mixture of water vapour, liquid water droplets and dry mine air whose chemical composition depends on the location. The objective of this paper is to fill this gap.

## 2. ASSUMPTIONS, OBJECT OF INVESTIGATION AND METHOD

Turbulent mine air flows are considered to be unidimensional and steady, with the exchange of mass and heat, the main fan – as a split of the ventilation system, local resistance and kinetic energy values – as negligibly small, mine air – as a mixture of water vapour, liquid water droplets and dry mine air.

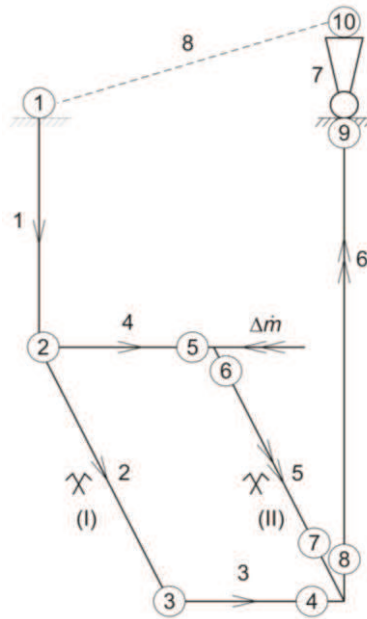
Virtual temperatures:  $T_v$  and  $t_v$  of dry mine air are given by the formula:  $T_v = M_a T / M_g$  [2] and the following formula [5], respectively:

$$t_v = \frac{M_a}{M_g} (273,15 + t) - 273,15 \quad (1)$$

where:

- $T, t$  – dry bulb temperature, K and °C respectively,  
 $M_a = 28,966$  – molecular mass of clean dry air,  
 $M_g$  – molecular mass of clean dry air:

$$M_g = \sum_n (r_n M_n) \quad (2)$$



Rys. 1. System wentylacji kopalni o schodzącym przewietrzaniu dwu grup (I), (II) czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych  
 Fig. 1: Ventilation system of the mine with descending ventilation of two groups (I), (II) of active overhand mining

gdzie:

$r_n$  – wskaźnik składnika suchego powietrza kopalnianego,

$r_n$  – udział objętościowy składnika  $n$ -tego powietrza,

$M_n$  – masa drobinowa składnika  $n$ .

Nadmieniamy, że korzystać będziemy z następujących mas drobinowych składników:  $M_1 = 32,00$  tlenu,  $O_2$ ,  $n = 1$ ;  $M_2 = 44,01$  dwutlenku węgla,  $CO_2$ ,  $n = 2$ ;  $M_3 = 16,04$  metanu,  $CH_4$ ,  $n = 3$ ;  $M_4 = 28,15$  azotu powietrznego,  $N_2$ ,  $n = 4$ .

Wobec braku adekwatnej rzeczywistej kopalni za obiekt badania przyjmujemy siedem struktur topologicznych (o określonych cechach) systemu wentylacji wirtualnej kopalni z dwiema grupami I, II czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych o schodzącym przewietrzaniu (rys. 1) [1, 7]. Po wprowadzeniu temperatury wirtualnej  $t_v$  w miejsce temperatury  $t$  termometru suchego występującej w adekwatnych związkach psychometrycznych [7,8] uzyskujemy związki od (3) do (7) określające odpowiednio następujące wielkości:  $e_{sw}$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze  $t_m$  (termometru mokrego),  $X_s$  – stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną przy temperaturze  $t_m$ ,  $L_w$  – ciepło utajone parowania wody przy temperaturze  $t_m$ ,  $X$  – stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną przy temperaturze  $t_m$ ,  $e$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze  $t_m$  termometru mokrego:

where:

$r_n$  – index of dry mine air component,

$r_n$  – volume fraction of the  $n$ -th component of the air,

$M_n$  – molecular of the  $n$ -th component.

It is to be noted that the following molecular masses of the components will be used:  $M_1 = 32,00$  of oxygen,  $O_2$ ,  $n = 1$ ;  $M_2 = 44,01$  of carbon dioxide,  $CO_2$ ,  $n = 2$ ;  $M_3 = 16,04$  of methane,  $CH_4$ ,  $n = 3$ ;  $M_4 = 28,15$  of aerial nitrogen,  $N_2$ ,  $n = 4$ .

In consequence of the lack of an adequate, real mine, seven topological structures (with specified characteristics) of virtual ventilation system of the mine with two groups, I and II, of active overhand mining with descending ventilation have been assumed to be the object of investigation (Fig. 1) [1, 7]. After the  $t_v$  virtual temperature has been introduced in place of the  $t$  dry bulb temperature occurring in appropriate psychrometric relationships [7, 8], the relations from (3) to (7) are obtained which specify, respectively, the following quantities:  $e_{sw}$  – partial pressure of saturated water vapour at the  $t_m$  temperature (wet bulb temperature),  $X_s$  – humidity degree of air saturated with water vapour at the  $t_m$  temperature,  $L_w$  – latent heat of water evaporation at the  $t_m$  temperature,  $X$  – humidity degree of air not saturated with water vapour at the  $t_m$  temperature,  $e$  – partial pressure of non-saturated water vapour at the  $t_m$  wet bulb temperature:

$$e_{sw} = 610,6 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot t_m}{237,3 + t_m}\right] \quad (3)$$

$$X_s = 0,622 \frac{e_{sw}}{p - e_{sw}} \quad (4)$$

$$L_w = (2502,5 - 2,386 t_m) \cdot 1000 \quad (5)$$

$$X = \frac{L_w X_s - 1005 \cdot (t_v - t_m)}{L_w + 1884 \cdot (t_v - t_m)} \quad (6)$$

$$e = \frac{pX}{0,622 + X} \quad (7)$$

Po wprowadzeniu temperatury wirtualnej,  $t_v$ , suchego powietrza kopalnianego w miejsce temperatury termometru suchego,  $t$ , występującej w adekwatnych wzorach stosowanych w metodzie termodynamicznej i teorii potencjału aerodynamicznego, otrzymujemy wzory od (8) do (11), określające odpowiednio następujące wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1):  $v$  – pozorna objętość właściwa czystego powietrza suchego (czynnik termodynamiczny) w przepływie politropowym,  $p_s$  – ciśnienie i  $v_s$  – objętość właściwa tego powietrza w przepływie izentropowym,  $\Phi$  – potencjał aerodynamiczny przypadający na jednostkę strumienia masy tegoż powietrza:

$$v = \frac{R_a(273,15 + t_v)}{p - e} \quad (8)$$

$$p_s = p_1 \left[ 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{1 + X_1}{p_1 v_1} \cdot g(z - z_1) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (9)$$

$$v_s = v_1 \left[ 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{1 + X_1}{p_1 v_1} \cdot g(z - z_1) \right]^{\frac{1}{1 - \kappa}} \quad (10)$$

$$\Phi = v_s (p - p_s) \quad (11)$$

Następującymi wzorami od (12) do (19) określone są odpowiednio wielkości dotyczące bocznic systemu wentylacji (rys. 1):  $n$  – wykładnik politropy,  $l_t$  i  $l_{ts}$  – jednostkowe prace techniczne w przepływach politropowym i izentropowym,  $e_n$  – lokalny ciąg naturalny generowany w bocznicy,  $e_u$  – energia użyteczna wentylatora głównego,  $e_f$  – dyssypacja energii mechanicznej,  $R_f$  – opór aerodynamiczny bocznicy:

$$e_{sw} = 610,6 \cdot \exp\left[\frac{17,27 \cdot t_m}{237,3 + t_m}\right] \quad (3)$$

$$X_s = 0,622 \frac{e_{sw}}{p - e_{sw}} \quad (4)$$

$$L_w = (2502,5 - 2,386 t_m) \cdot 1000 \quad (5)$$

$$X = \frac{L_w X_s - 1005 \cdot (t_v - t_m)}{L_w + 1884 \cdot (t_v - t_m)} \quad (6)$$

$$e = \frac{pX}{0,622 + X} \quad (7)$$

After introducing the  $t_v$  virtual temperature of dry mine air in the place of the  $t$  dry bulb temperature occurring in appropriate formulas of the thermodynamic method and theory of aerodynamic potential, formulas from (8) to (11) are obtained which determine the following quantities related to the nodes of the ventilation system (Fig. 1):  $v$  – apparent specific volume of clean dry air (thermodynamic factor) in the polytropic process,  $p_s$  – pressure, and  $v_s$  – specific volume of this air in the isentropic process,  $\Phi$  – aerodynamic potential per mass flow unit of this air, respectively:

$$v = \frac{R_a(273,15 + t_v)}{p - e} \quad (8)$$

$$p_s = p_1 \left[ 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{1 + X_1}{p_1 v_1} \cdot g(z - z_1) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (9)$$

$$v_s = v_1 \left[ 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{1 + X_1}{p_1 v_1} \cdot g(z - z_1) \right]^{\frac{1}{1 - \kappa}} \quad (10)$$

$$\Phi = v_s (p - p_s) \quad (11)$$

With the formulas from (12) to (19) there are defined the quantities referring to the splits of the ventilation system (Fig. 1):  $n$  – polytropic index,  $l_t$  and  $l_{ts}$  – single technical activities in the polytropic and isentropic processes,  $e_n$  – local natural draft generated in a split,  $e_u$  – effective energy of the main fan,  $e_f$  – mechanical energy dissipation,  $R_f$  – aerodynamic resistance of a split, respectively:

$$n = \frac{\ln(p_w/p_d)}{\ln(v_d/v_w)} \quad (12)$$

$$\delta\Phi = \Phi_d - \Phi_w \quad (13)$$

$$l_t = \frac{n}{1-n} (p_w v_w - p_d v_d) \quad (14)$$

$$l_{ts} = \frac{\kappa}{1-\kappa} p_d v_1 (p_1/p_d)^{\frac{1}{\kappa}} \left[ (p_w/p_d)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (15)$$

$$e_n = l_t - l_{ts} \quad (16)$$

$$e_u = -l_t + \left( 1 + \frac{1}{2}(X_d + X_w) \right) \cdot g (z_w - z_d) \quad (17)$$

$$e_f = \delta\Phi + e_n + e_u \quad (18)$$

$$R_f = \frac{e_f}{m\dot{\kappa}} \quad (19)$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie barometryczne (w przepływie politropowym),

$R_a = 287,04$  J/(kg p.s. K) – indywidualna stała gazowa czystego powietrza suchego,

$\kappa = 1,40$  – wykładnik izentropy tego powietrza,

$g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> – miejscowe przyspieszenie grawitacyjne,

$)_d$  i  $)_w$  – dolne indeksy wskazujące, że dana wielkość dotyczy odpowiednio przekroju dopływu,  $d$ , i przekroju wypływu,  $w$ , powietrza z bocznic,  $j$ , ( $d - w$ ),

$m\dot{\kappa}$  – strumień masy czystego powietrza suchego.

### 3. PIERWSZA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 2) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej (zestaw. 1); pierwotne kierunki prądów bocznego i głównego odpowiednio w bocznicach  $b$ ,  $w_1$  tejże struktury; stan samonagrzewania węgla określony punktem zagrożenia pożarowego o temperaturze 90°C [3]; brak strumienia masy wypływu bocznego:  $\Delta m\dot{\kappa} = 0$ .

#### 3.1. Podstawowe wielkości i związki

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): ciśnienie barometryczne

$$n = \frac{\ln(p_w/p_d)}{\ln(v_d/v_w)} \quad (12)$$

$$\delta\Phi = \Phi_d - \Phi_w \quad (13)$$

$$l_t = \frac{n}{1-n} (p_w v_w - p_d v_d) \quad (14)$$

$$l_{ts} = \frac{\kappa}{1-\kappa} p_d v_1 (p_1/p_d)^{\frac{1}{\kappa}} \left[ (p_w/p_d)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (15)$$

$$e_n = l_t - l_{ts} \quad (16)$$

$$e_u = -l_t + \left( 1 + \frac{1}{2}(X_d + X_w) \right) \cdot g (z_w - z_d) \quad (17)$$

$$e_f = \delta\Phi + e_n + e_u \quad (18)$$

$$R_f = \frac{e_f}{m\dot{\kappa}} \quad (19)$$

where:

$p$  – barometric pressure (in the polytropic flow),

$R_a = 287,04$  J/(kg dry air K) – individual gas constant of clean dry air,

$\kappa = 1,40$  – isentropic index of this air,

$g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> – local apparent gravity,

$)_d$  and  $)_w$  – low indexes indicating that a given quantity refers to the inflow section,  $d$ , outflow section,  $w$ , and air from a split,  $j$ , ( $d - w$ ), respectively,

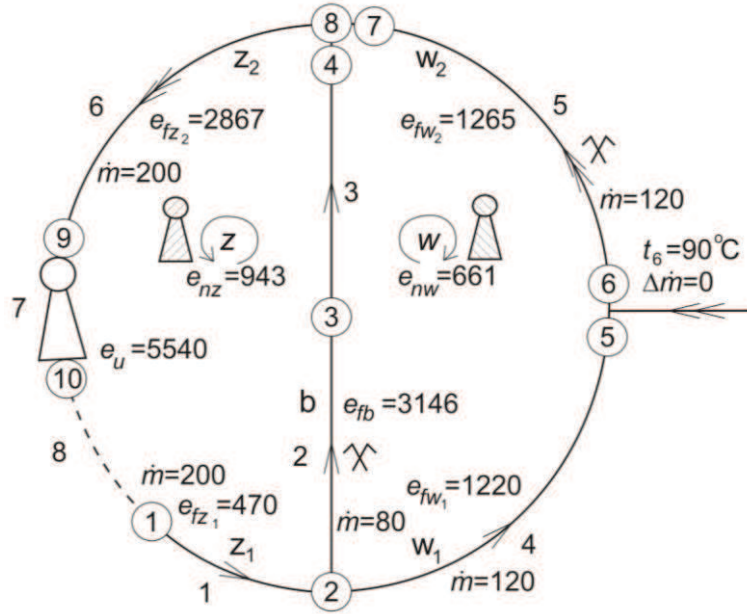
$m\dot{\kappa}$  – mass flux of clean dry air.

### 3. THE FIRST TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 2) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field (List 1); original directions of lateral and main current in the  $b$  and  $w_1$  splits of this structure, respectively; self-heating of coal defined by a fire-hazard point with the temperature of 90°C [3]; lack of mass flux of lateral outflow:  $\Delta m\dot{\kappa} = 0$ .

#### 3.1. Basic quantities and relations

Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): barometric pressure,



Rys. 2. Pierwsza struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
Fig. 2: The first topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

czne,  $p$ , temperatury:  $t_v$  i  $t_m$  odpowiednio wirtualna (zestaw. 1) i termometru mokrego (tab. 1), wysokości geodezyjne,  $z$  (tab. 2); strumienie masy czystego powietrza suchego,  $\dot{m}$ : 80, 120, 120, 200, 200 odpowiednio w bocznicach: b,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (rys. 2).

Korzystając z danych wejściowych i adekwatnych wzorów od (3) do (19), obliczyliśmy wielkości dotyczące węzłów:  $e_{sw}$ ,  $X_s$ ,  $L_w$ ,  $X$ ,  $e$  (tab. 1),  $v$ ,  $p_s$ ,  $v_s$ ,  $\Phi$  (tab. 2), wielkości dotyczące bocznic:  $n$ ,  $\delta\Phi$ ,  $l_t$ ,  $l_{ts}$ ,  $e_n$ ,  $e_u$ ,  $e_f$ ,  $R_f$  (rys. 1, tab. 3) oraz następujące wielkości dotyczące oczek zewnętrznego  $z$  i wewnętrznego  $w$  (rys. 2, tab. 3):

– wypadkowe ciągi naturalne generowane w oczkach:  $z$  i  $w$ :

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 943, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 661. \quad (20)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 5540 \quad (21)$$

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (rys. 2, tab. 3):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 1393 + 1753 = 3146 \\ e_{fw1} &= e_{f4} = 1220, \quad e_{fw2} = e_{f5} = 1265 \\ e_{fz1} &= e_{f1} = 470, \quad e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 2867 \end{aligned} \quad (22)$$

$p$ , temperatures:  $t_v$  and  $t_m$  – virtual temperature (List 1) and wet bulb temperature (Table 1), respectively, surveying height values, from (Table 2); mass fluxes of clean dry air,  $\dot{m}$ : 80, 120, 120, 200, 200, respectively, in the following splits: b,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (Fig. 2).

Using the input data and appropriate formulas from (3) to (19), we have calculated the quantities referring to the nodes:  $e_{sw}$ ,  $X_s$ ,  $L_w$ ,  $X$ ,  $e$  (Table 1),  $v$ ,  $p_s$ ,  $v_s$ ,  $\Phi$  (Table 2), quantities referring to the splits:  $n$ ,  $\delta\Phi$ ,  $l_t$ ,  $l_{ts}$ ,  $e_n$ ,  $e_u$ ,  $e_f$ ,  $R_f$  (Fig. 1, Table 3) as well as the following quantities referring to the external  $z$  loop and the internal  $w$  loop (Fig. 2, Table 3):

– resultant natural draughts generated in the  $z$  and  $w$  loops:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 943, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 661. \quad (20)$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 5540 \quad (21)$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (Fig. 2, Table 3):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 1393 + 1753 = 3146 \\ e_{fw1} &= e_{f4} = 1220, \quad e_{fw2} = e_{f5} = 1265 \\ e_{fz1} &= e_{f1} = 470, \quad e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 2867 \end{aligned} \quad (22)$$

Zestawienie 1 / List 1

**Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego,  
dotyczące pierwszej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1)  
Virtual temperature field of dry mine air  
referring to the first topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						<i>t</i>	<i>t<sub>v</sub></i>
1	20,52	0,14	0,00	79,34	28,962	8,0	8,04
2	20,51	0,20	0,10	79,18	28,956	15,6	15,70
3	20,12	0,80	0,30	78,78	29,023	18,1	17,53
4	19,50	0,22	0,30	79,98	28,907	19,7	20,30
5	20,48	0,44	0,28	78,80	28,982	17,2	17,04
6	20,48	0,44	0,28	78,80	28,982	90,0	89,80
7	9,80	2,10	2,40	85,70	28,578	50,0	54,39
8	13,68	1,84	1,56	82,92	28,788	37,9	39,82
9	13,40	2,12	1,84	82,64	28,787	28,7	30,58
10	13,40	2,12	1,84	82,64	28,787	31,7	33,60

Tabela 1 / Table 1

**Wyznaczenie pola ciśnienia cząstkowego pary wodnej nienasyconej  
dotyczącego pierwszej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1)  
Determining the field of partial pressure of non-saturated water vapour  
referring to the first topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze <i>t<sub>m</sub></i> Partial pressure of saturated water vapour at the temperature <i>t<sub>m</sub></i>	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze <i>t<sub>m</sub></i> Latent heat of water evaporation at the temperature <i>t<sub>m</sub></i>	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not satu- rated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze <i>t<sub>m</sub></i> Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature <i>t<sub>m</sub></i>
	<i>p</i> Pa	<i>t<sub>m</sub></i> °C	<i>e<sub>sw</sub></i> Pa	<i>X<sub>s</sub></i> kg/kg p.s.	<i>L<sub>w</sub></i> J/kg wody	<i>X</i> kg/kg p.s.	<i>e</i> Pa
i							
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006290	1001
2	111360	14,2	1619	0,009176	2468619	0,008556	1511
3	112756	16,8	1912	0,010729	2462415	0,010425	1859
4	110423	18,6	2142	0,012304	2458120	0,011594	2021
5	109747	16,2	1841	0,010612	2463847	0,010263	1781
6	109747	85,0	58040	0,698182	2299690	0,693356	57850
7	110693	44,0	9096	0,055688	2397516	0,050917	8376
8	110423	28,8	3958	0,023124	2433783	0,018416	3175
9	94176	27,5	3669	0,025214	2436885	0,023887	3483
10	99760	28,7	3935	0,025542	2434029	0,023430	3621

Tabela 2 / Table 2

Wielkości dotyczące węzłów pierwszej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1)  
Quantities referring to the nodes of the first topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Surveying height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic flow	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic flow		
i	z	v	p <sub>s</sub>	v <sub>s</sub>	Φ
	m	m <sup>3</sup> /kg p.s.	Pa	m <sup>3</sup> /kg p.s.	J/kg p.s.
1	0	0,815289	100000	0,815289	0
2	-950	0,754777	111983	0,751974	-468
3	-1200	0,752381	115300	0,736460	-1864
4	-1200	0,777033	115300	0,736460	-3592
5	-950	0,771503	111983	0,751974	-1681
6	-950	2,007460	111983	0,751974	-1681
7	-1200	0,918880	115300	0,736460	-3393
8	-1200	0,837637	115300	0,736460	-3592
9	0	0,961294	100000	0,815289	-4748
10	30	0,915856	99637	0,817408	100

Tabela 3 / Table 3

Wielkości dotyczące bocznic i oczek zewnętrznego, z, wewnętrznego, w,  
pierwszej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1)  
Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w,  
loops of the first topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1)

Bocznica Slipt	Wykładnik politropu Polytropic index	Spadek poten- cjału aerody- namicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techn. w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural draught	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mecha- nicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czyst. powietrza such. Mass flux of clean dry air	Opór aerodyna- miczny Aerodynamic resistance	
			politro- powym polytropic flow	izentro- powym isentropic flow						
j	d - w	n	δΦ	l <sub>t</sub>	l <sub>is</sub>	e <sub>n</sub>	e <sub>u</sub>	e <sub>f</sub>	ṁ	R <sub>f</sub>
		–	J/kg p. s.			J/kg p.s.		kg p. s./s	m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup> p. s.	
1	1-2	1,395197	468	-8907	-8909	2	–	470	200	0,011750
2	2-3	9,918823	1396	-10532	-1049	-3	–	1393	80	0,217656
3	3-4	0,648504	1728	1784	1759	25	–	1753	80	0,273906
4	2-5	0,665678	1213	1231	1224	7	–	1220	120	0,084722
5	6-7	0,009686	1911	-1160	-514	-646	–	1265	120	0,087847
6	8-9	1,155834	1156	14564	13049	11515	–	2671	200	0,066775
7	9-10	1,189603	-4848	-5239	-4654	-585	5540	107	200	0,002675
8	10-1	0,020658	100	-207	-196	-11	–	89	200	0,002225
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, z, with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8		0		943	0	943	5540	6483	–	–
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 2, 3, 5 i 4 Internal loop, w, with splits: 2, 3, 5 and 4		0		661	0	661	–	661	–	–



### 3.2. Równania oczkowe

Wielkościami określonymi za pomocą wzorów: (20), (21), (22) opisana jest pierwsza struktura topologiczna (rys. 2). Korzystając z jej oczek  $z$  i  $w$ , uzyskujemy równania oczkowe:

$$e_u + e_{nz} = e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (23)$$

$$e_{mw} = e_{fb} - e_{w1} - e_{fw2} \quad (24)$$

### 3.3. Warunek zachowania pierwotnego kierunku prądu bocznego i stopień bezpieczeństwa

Wynikiem podzielenia stronami równania (24) przez równanie (23) jest wyrażenie:

$$\frac{e_{mw}}{e_u + e_{nz}} = \frac{e_{fb} - e_{fw1} - e_{fw2}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (25)$$

i postępując tak samo jak w pracy [7], uzyskujemy wymieniony warunek i stopień bezpieczeństwa:

$$\sigma_b > 1 \quad (26)$$

$$\sigma_b = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (27)$$

Podstawiając do wzoru (27) wartości adekwatnych wielkości (rys. 2, tab. 3), obliczamy następującą wartość stopnia bezpieczeństwa:

$$\sigma_b = \frac{5540 + 943}{661} \cdot \frac{1220 + 1265}{470 + 2867} = 7,3037 \quad (27a)$$

### 3.4. Warunek zachowania pierwotnego kierunku prądu głównego i stopień bezpieczeństwa

Przekształcając wyrażenie (25) i postępując tak samo jak w pracy [7], otrzymujemy wymieniony warunek i stopień bezpieczeństwa:

$$\sigma_w > 1 \quad (28)$$

$$\sigma_w = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (29)$$

Podstawiając do wzoru (29) wartości adekwatnych wielkości (rys. 2, tab. 3), obliczamy następującą wartość stopnia bezpieczeństwa:

$$\sigma_w = \frac{5540 + 943}{661} \cdot \frac{3146}{3146 + 470 + 2867} = 4,7594 \quad (29a)$$

### 3.2. Loop equations

The first topological structure (Fig. 2) is described by quantities determined by formulas (20), (21), (22). Using its loops  $z$  and  $w$ , we obtain loop equations:

$$e_u + e_{nz} = e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (23)$$

$$e_{mw} = e_{fb} - e_{w1} - e_{fw2} \quad (24)$$

### 3.3. Condition to maintain the original direction of lateral current and safety degree

By dividing the sides of equation (24) by the corresponding sides of equation (23), we obtain the following expression:

$$\frac{e_{mw}}{e_u + e_{nz}} = \frac{e_{fb} - e_{fw1} - e_{fw2}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (25)$$

and following the procedure from [7], we obtain the mentioned condition and safety degree:

$$\sigma_b > 1 \quad (26)$$

$$\sigma_b = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (27)$$

By substituting the values of appropriate quantities (Fig. 2, Table 3) into formula (27), we calculate the following value of safety degree:

$$\sigma_b = \frac{5540 + 943}{661} \cdot \frac{1220 + 1265}{470 + 2867} = 7,3037 \quad (27a)$$

### 3.4. Condition to maintain the original direction of main current and safety degree

Transforming expression (25) and following the procedure from [7], we achieve the mentioned condition and safety degree:

$$\sigma_w > 1 \quad (28)$$

$$\sigma_w = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (29)$$

By substituting the values of appropriate quantities (Fig. 2, Table 3) into formula (29), we calculate the following value of safety degree:

$$\sigma_w = \frac{5540 + 943}{661} \cdot \frac{3146}{3146 + 470 + 2867} = 4,7594 \quad (29a)$$

## Zestawienie 2 / List 2

**Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego, dotyczące drugiej struktury topologicznej (rys. 3) systemu wentylacji (rys. 1)**

**Virtual temperature field of dry mine air**

referring to the second topological structure (Fig. 3) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass $M_g$	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						$t$	$t_v$
1	20,52	0,14	0,00	79,34	28,962	8,0	8,04
2	20,51	0,20	0,10	79,18	28,956	16,6	16,70
3	20,12	0,80	0,30	78,78	29,024	19,1	18,52
4	19,50	0,22	0,30	79,98	28,907	20,7	21,30
5	20,21	0,56	0,28	78,95	28,983	18,2	18,03
6	2,50	7,10	0,88	88,20	28,890	180,0	181,19
7	2,50	8,40	4,20	84,90	29,078	60,0	58,72
8	15,83	1,98	1,14	81,05	28,943	31,0	31,24
9	15,56	2,26	1,42	80,76	28,943	21,8	22,03
10	15,56	2,26	1,42	80,76	28,943	24,8	25,04

#### 4. DRUGA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 3) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej (zestaw. 2); pierwotny kierunek prądu bocznego płynącego w bocznicę wypadkowej b od węzła 2 do węzła 4, bezruch prądu głównego w bocznicę w<sub>1</sub>; stan samonagrzewania węgla określony punktem pirolizy o temperaturze 180°C; strumień masy wypływu bocznego:  $\Delta m = 30$ .

##### 4.1. Podstawowe wielkości i związki

Dane wejściowe:

a) opory aerodynamiczne:  $R_b, R_{z1}, R_{z2}$  bocznic wypadkowych: b, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> struktury topologicznej (rys. 3) – obliczone przy korzystaniu z ostatniej kolumny tabeli 3:

$$R_b = R_{f2} + R_{f3} = 0,217656 + 0,273906 = 0,491562$$

$$R_{z1} = R_{f1} = 0,011750, \quad R_{z2} = R_{f6} + R_{f7} + R_{f8} = (30) 0,066775 + 0,002675 + 0,002225 = 0,071675$$

b) wielkości dotyczące węzłów: temperatura wirtualna,  $t_v$ , (zestaw. 2), ciśnienie barometryczne,  $p$ , i temperatura,  $t_m$ , termometru mokrego (tab. 4) oraz wysokość geodezyjna,  $z$ , (tab. 5). Korzystając z tych wielkości i postępując tak samo jak w przypadku pierwszej struktury topologicznej, obliczyliśmy wielkości dotyczące: węzłów (tab. 4, tab. 5), bocznic (tab. 6) oraz następujące wielkości dotyczące oczek: zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, (rys. 3, tab. 6):

#### 4. THE SECOND TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 3) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field (List 2); original directions of lateral current in the b split from the node 2 to the node 4, standstill of main current in the w<sub>1</sub> split; self-heating of coal defined by a pyrolysis point with the temperature of 180°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta m = 30$ .

##### 4.1. Basic quantities and relations

Input data: a) aerodynamic resistance values:  $R_b, R_{z1}, R_{z2}$  of b, z<sub>1</sub>, and z<sub>2</sub> splits of the topological structure (Fig. 3) – calculated with the use of the last column of Table 3:

$$R_b = R_{f2} + R_{f3} = 0,217656 + 0,273906 = 0,491562$$

$$R_{z1} = R_{f1} = 0,011750, \quad R_{z2} = R_{f6} + R_{f7} + R_{f8} = (30) 0,066775 + 0,002675 + 0,002225 = 0,071675$$

b) quantities referring to nodes: virtual temperature,  $t_v$ , (List 2), barometric pressure,  $p$ , and wet bulb temperature,  $t_m$ , (Table 4) as well as geodetic height value,  $z$ , (Table 5). Using these quantities and following the procedure from the first topological structure, we have calculated the quantities referring to: nodes (Table 4, Table 5), splits (Table 6) as well as the following quantities referring to loops: external loop, z, and internal loop, w, (Fig. 3, Table 6):

Tabela 4 / Table 4

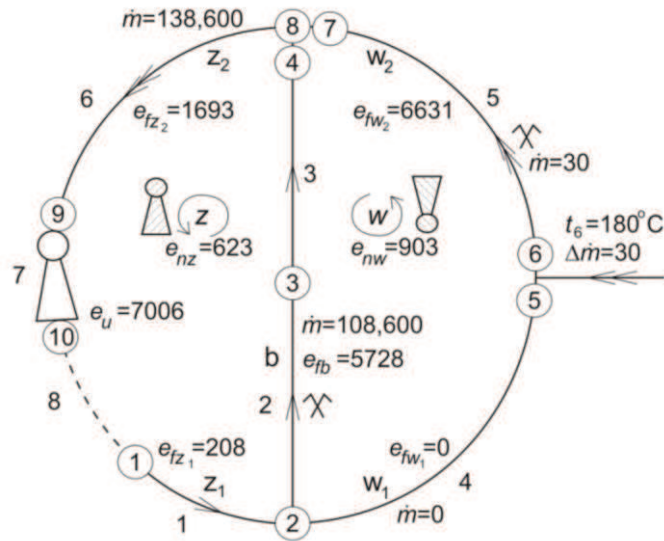
**Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej nienasyconej dotyczących drugiej struktury topologicznej (rys. 3) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Determining the fields of partial pressure of non-saturated water vapour referring to the second topological structure (Fig. 3) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg.s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006290	1001
2	111691	15,0	1704	0,009636	2466710	0,008932	1581
3	111574	18,1	2076	0,011796	2459313	0,011621	2046
4	107334	19,3	2238	0,013245	2456450	0,012412	2100
5	111691	16,9	1924	0,010902	2462177	0,010432	1842
6	111691	65,0	25025	0,179604	2347410	0,118783	17909
7	107334	50,0	12331	0,045871	2407060	0,041944	6758
8	107334	26,5	3460	0,020718	2439271	0,018697	3132
9	92262	18,3	2102	0,014501	2458836	0,012939	1880
10	99703	21,6	2579	0,016516	2450962	0,015066	2358

Tabela 5 / Table 5

**Wielkości dotyczące węzłów drugiej struktury topologicznej (rys. 3) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to the nodes of the second topological structure (Fig. 3) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Surveying height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic flow	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic flow		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815289	100000	0,815289	0
2	-950	0,755595	111983	0,751973	-220
3	-1200	0,764579	115300	0,736460	-2744
4	-1200	0,803152	115300	0,736460	-5867
5	-950	0,760865	111983	0,751973	-220
6	-950	1,391677	111983	0,751973	-220
7	-1200	0,947144	115300	0,736460	-5867
8	-1200	0,838488	115300	0,736460	-5867
9	0	0,937448	100000	0,815289	-6309
10	30	0,879269	99637	0,817408	54



Rys. 3. Druga struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
Fig. 3: The second topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

– wypadkowe ciągi naturalne generowane odpowiednio w oczku z i oczku w:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 623, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 903 \quad (31)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 7006 \quad (32)$$

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (rys. 3, tab. 6):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f_2} + e_{f_3} = 2524 + 3204 = 5728 \\ e_{fw_1} &= e_{f_4} = 0, \quad e_{fw_2} = e_{fw_5} = 6631 \\ e_{fz_1} &= e_{f_1} = 208, \\ e_{fz_2} &= e_{f_6} + e_{f_7} + e_{f_8} = 1465 + 183 + 45 = 1693 \end{aligned} \quad (33)$$

#### 4.2. Równania oczkowe

Dla oczek zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, drugiej struktury topologicznej opisanej wielkościami od (31) do (33) (rys. 3) ważne są równania oczkowe:

$$e_u + e_{nz} = e_{fb} + e_{fz_1} + e_{fz_2} \quad (34)$$

$$e_{nw} = e_{fw_2} - e_{fb} \quad (35)$$

#### 4.3. Warunek bezruchu prądu głównego i stopień bezpieczeństwa

Dzielimy stronami równanie (35) przez równanie (34); otrzymujemy wyrażenie:

– resultant natural series generated in the w and z loops respectively:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 623, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 903 \quad (31)$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 7006 \quad (32)$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (Fig. 3, Table 6):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f_2} + e_{f_3} = 2524 + 3204 = 5728 \\ e_{fw_1} &= e_{f_4} = 0, \quad e_{fw_2} = e_{fw_5} = 6631 \\ e_{fz_1} &= e_{f_1} = 208, \\ e_{fz_2} &= e_{f_6} + e_{f_7} + e_{f_8} = 1465 + 183 + 45 = 1693 \end{aligned} \quad (33)$$

#### 4.2. Loop equations

The below-quoted loop equations are important for the external z loop and the internal w loop of the second topological structure described by quantities from (31) to (33) (Fig. 3):

$$e_u + e_{nz} = e_{fb} + e_{fz_1} + e_{fz_2} \quad (34)$$

$$e_{nw} = e_{fw_2} - e_{fb} \quad (35)$$

#### 4.3. Condition of main current standstill and safety degree

We divide the sides of equation (35) by the corresponding sides of equation (34); we obtain the following expression:

**Wielkości dotyczące bocznic i oczek zewnętrznego, z, wewnętrznego, w, drugiej struktury topologicznej (rys. 3) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w, loops of the second topological structure (Fig. 3) of the ventilation system (Fig. 1)**

Bocznica Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodynamicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural draught	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politropowym polytropic flow	izentropowym isentropic flow				
j	d-w	n	$\delta\Phi$	$l_l$	$l_{ts}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$\dot{m}$
		–	J/kg p.s.			J/kg p.s.			kg p.s./s
1	1-2	1,449060	220	-9170	-9158	-12	–	208	108,600
2	2-3	0,090678	2524	88	88	0	–	2524	108,600
3	3-4	0,782991	3123	3322	3241	81	–	3204	108,600
4	2-5	0	0	0	0	0	–	0	0
5	6-7	-0,428232	5647	4313	3329	984	–	6631	30
6	8-9	1,356326	442	13351	12323	1023	–	1465	138,600
7	9-10	1,210596	-6363	-6708	-6249	-460	7006	183	138,600
8	10-1	0,039371	54	-251	-245	-9	–	45	138,600
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, z, with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8			0	623	0	623	7006	7629	–
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 2, 3, 5 i 4 Internal loop, w, with splits: 2, 3, 5 and 4			0	903	0	903	–	903	–

$$\frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} = \frac{e_{nw}}{e_u + e_{nz}} \quad (36)$$

$$\frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} = \frac{e_{nw}}{e_u + e_{nz}} \quad (36)$$

Z pomnożenia obu stron tego wyrażenia przez odwrotność jego prawej strony jest równość:

The multiplication of both sides of this expression by the inverse of its right side results in the following equality:

$$\frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} = 1$$

$$\frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} = 1$$

którą zapisujemy w postaci:

which is written down as:

$$\sigma_w = 1 \quad (37)$$

$$\sigma_w = 1 \quad (37)$$

$$\sigma_w = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (38)$$

$$\sigma_w = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw2} - e_{fb}}{e_{fb} + e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (38)$$

Równość (37) jest warunkiem bezruchu prądu głównego w bocznicy  $w_1$  (rys. 3),  $\sigma_w$  – stopniem bezpieczeństwa. Podstawiając do wzoru (38) wartości adekwatnych wielkości (tab. 6, rys. 3), obliczamy:

Equality (37) is the condition of main current standstill in the  $w_1$  split (Fig. 3),  $\sigma_w$  – safety degree. By substituting the values of appropriate quantities (Table 6, Fig. 3) into formula (38), we calculate:

$$\sigma_w = \frac{7006 + 623}{903} \cdot \frac{6631 - 5728}{5728 + 208 + 1693} = 1 \quad (38a)$$

$$\sigma_w = \frac{7006 + 623}{903} \cdot \frac{6631 - 5728}{5728 + 208 + 1693} = 1 \quad (38a)$$

#### 4.4. Strumień masy powietrza w bocznicach wypadkowych b, z<sub>1</sub> (rys. 3)

Korzystając ze wzoru (19) i oporów:  $R_b, R_{z1}$  (30), zapisujemy równanie (34) w postaci:

$$(R_b + R_{z1}) \cdot \dot{m}^2 = e_u + e_{nz} - e_{fz2}$$

z której wynika następujący wzór (38) określający strumień masy powietrza,  $\dot{m}$ , w bocznicach wypadkowych b, z<sub>1</sub>:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{e_u + e_{nz} - e_{fz2}}{R_b + R_{z1}}} \quad (39)$$

Podstawiając do wzoru (39) wartości adekwatnych wielkości oporów (30) i wielkości (rys. 3, tab. 6), obliczamy:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{7006 + 623 - 1693}{0,491562 + 0,011750}} = 108,600 \quad (39a)$$

W ostatniej kolumnie tabeli 6 zestawione są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach drugiej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1).

### 5. TRZECIA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 4) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej,  $t_v$  (zestaw. 3); bezruch prądu bocznego w bocznicach b; pierwotny kierunek prądu głównego płynącego bocznicą w<sub>1</sub> od węzła 2 do węzła 5; stan samonagrzewania węgla określony punktem pirolizy o temperaturze 180°C; strumień masy wypływu bocznego:  $\Delta \dot{m} = 30$ .

#### 5.1. Podstawowe wielkości i związki

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): ciśnienie barometryczne, p, i temperatura termometru mokrego,  $t_m$  (tab. 7), wysokości geodezyjne, z (tab. 8).

Korzystając z wymienionych wielkości i postępując tak samo jak w przypadku pierwszej struktury, obliczyliśmy wielkości dotyczące węzłów (tab. 7, tab. 8), wielkości dotyczące bocznic (tab. 9) oraz następujące wielkości dotyczące oczek z, w (rys. 4, tab. 9):

#### 4.4. Air mass flux in b and z<sub>1</sub> splits (Fig. 3)

Using formula (19) and resistance values:  $R_b, R_{z1}$  (30), we write down equation (34) as:

$$(R_b + R_{z1}) \cdot \dot{m}^2 = e_u + e_{nz} - e_{fz2}$$

which results in the following formula (38) defining the air mass flux,  $\dot{m}$ , in the b and z<sub>1</sub> splits:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{e_u + e_{nz} - e_{fz2}}{R_b + R_{z1}}} \quad (39)$$

By substituting the values of adequate resistance quantities (30) and quantities (Fig. 3, Table 6) into formula (39), we calculate:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{7006 + 623 - 1693}{0,491562 + 0,011750}} = 108,600 \quad (39a)$$

In the last column of Table 6 there is a list of air mass fluxes in all splits of the second topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1).

### 5. THE THIRD TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 4) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field,  $t_v$  (List 3); standstill of lateral current in the b split; the original direction of main current flowing in the w<sub>1</sub> split from the node 2 to the node 5; self-heating of coal defined by a pyrolysis point with the temperature of 180°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta \dot{m} = 30$ .

#### 5.1. Basic quantities and relations

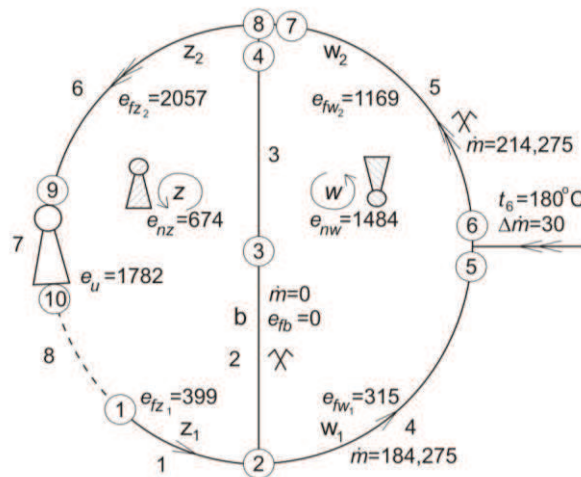
Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): barometric pressure, p, and wet bulb temperature,  $t_m$  (Table 7), surveying height values, z (Table 8).

Using the listed quantities and following the procedure from the first structure, we calculated the quantities referring to nodes (Table 7, Table 8), quantities referring to splits (Table 9), as well as the following quantities referring to the z and w loops (Fig. 4, Table 9):

Zestawienie 3 / List 3

**Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego dotyczące trzeciej struktury topologicznej (rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Virtual temperature field of dry mine air referring to the third topological structure (Fig. 4) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass $M_g$	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						$t$	$t_v$
1	20,52	0,09	0,00	79,39	28,962	8,0	8,04
2	20,52	0,09	0,05	79,34	28,948	16,6	16,78
3	20,40	0,10	0,06	79,44	28,944	19,1	19,32
4	20,30	0,12	0,08	79,50	28,941	20,7	20,95
5	20,26	0,11	0,09	79,54	28,936	18,2	18,50
6	20,10	0,49	0,10	78,31	29,067	180,0	178,42
7	20,00	1,76	0,41	77,83	29,149	60,0	57,91
8	20,00	1,76	0,41	77,83	29,149	31,0	29,09
9	19,60	1,80	0,44	78,16	29,137	21,8	20,07
10	19,60	1,80	0,44	78,16	29,137	24,8	23,05



Rys. 4. Trzecia struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
 Fig. 4: The third topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

– wypadkowe ciągi naturalne generowane w wymienionych oczkach:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 674, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 1484 \quad (40)$$

– resultant natural series generated in the mentioned loops:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 674, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 1484 \quad (40)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 1782 \quad (41)$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 1782 \quad (41)$$

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>: (rys. 4, tab. 9):

$$\begin{aligned} e_{fb} = e_{f2} + e_{f3} = 0, \quad e_{fw1} = e_{f4} = 315 \\ e_{w2} = e_{f5} = 1169, \quad e_{fz1} = 399 \\ e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_8 = 1738 + 216 + 103 = 2057 \end{aligned} \quad (42)$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>: (Fig. 4, Table 9):

$$\begin{aligned} e_{fb} = e_{f2} + e_{f3} = 0, \quad e_{fw1} = e_{f4} = 315 \\ e_{w2} = e_{f5} = 1169, \quad e_{fz1} = 399 \\ e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_8 = 1738 + 216 + 103 = 2057 \end{aligned} \quad (42)$$

Tabela 7 / Table 7

**Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej dotyczących trzeciej struktury topologicznej  
(rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Determining the fields of partial pressure of water vapour referring to the third topological structure  
(Fig. 4) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temp. $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg p.s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006290	1001
2	111427	15,0	1704	0,009660	2464801	0,008922	1576
3	114745	18,1	2076	0,011461	2459313	0,010952	1985
4	114745	19,3	2238	0,012373	2456450	0,011683	2116
5	111024	16,9	1924	0,010969	2462177	0,010303	1809
6	111024	65,0	25025	0,180997	2347410	0,121388	18129
7	114745	50,0	12731	0,077623	2383200	0,073826	12122
8	114745	26,5	3460	0,019339	2439271	0,018235	3268
9	98327	18,3	2102	0,013587	2458836	0,012846	1990
10	99772	21,6	2579	0,016505	2450962	0,015893	2486

Tabela 8 / Table 8

**Wielkości dotyczące węzłów trzeciej struktury topologicznej (rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to the nodes of the third topological structure (Fig. 4)**  
**of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Geodetic height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic process	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic process		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815289	100000	0,815289	0
2	-950	0,757585	111983	0,751973	-418
3	-1200	0,744507	115300	0,736460	-409
4	-1200	0,749527	115300	0,736460	-409
5	-950	0,766518	111983	0,751973	-721
6	-950	1,395324	111983	0,751973	-721
7	-1200	0,925986	115300	0,736460	-409
8	-1200	0,778232	115300	0,736460	-409
9	0	0,873661	100000	0,815289	-1364
10	30	0,873931	99637	0,817408	110



Tabela 9 / Table 9

Wielkości dotyczące bocznic oraz oczek zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, trzeciej struktury topologicznej (rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1)  
 Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w, loops of the third topological structure (Fig. 4) of the ventilation system (Fig. 1)

Bocznica Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodyna- micznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural series	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politro- powym polytropic flow	izentro- powym isentropic flow				
j	d-w	n	$\delta\Phi$	$l_t$	$l_{ts}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$\dot{m}$
		–		J/kg p.s.			J/kg p.s.		kg p.s./s
1	1-2	1,473969	418	-8977	-8958	-19	–	399	184,275
2	2-3	1,685050	0	-2478	-2478	0	–	0	0
3	3-4	0	0	0	0	0	–	0	0
4	2-5	0,309054	312	307	304	3	–	315	184,275
5	6-7	0,080400	-312	-4265	-2782	-1481	–	1169	214,275
6	8-9	1,334976	955	13591	12808	783	–	1738	214,275
7	9-10	-47,213864	-1483	-1269	-1186	-83	1782	216	214,275
8	10-1	0,0032863	110	-193	-186	-7	–	103	214,275
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1,2,3,6,7 i 8 External loop, z, with splits: 1,2,3, 6, 7 and 8			0	674	0	674	1782	2456	–
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 2,3,5 i 4 Internal loop, w, with splits: 2, 3, 5 and 4			0	1484	0	1484	–	1484	–

5.2. Równania oczkowe

Dla oczek zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, trzeciej struktury topologicznej (rys. 4) zapisujemy równania oczkowe:

$$e_u + e_{nz} = e_{fz1} + e_{fz2} \quad (43)$$

$$e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} \quad (44)$$

5.2. Loop equations

For the external z loop and the internal w loop of the third topological structure (Fig. 4) we write down the following loop equations:

$$e_u + e_{nz} = e_{fz1} + e_{fz2} \quad (43)$$

$$e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} \quad (44)$$

5.3. Warunek bezruchu prądu bocznego i stopień bezpieczeństwa

Z podzielenia stronami równania (44) przez (44) wynika wyrażenie:

$$\frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} = \frac{e_{nw}}{e_u + e_{nz}} \quad (45)$$

Mnożąc obie strony wyrażenia (45) przez odwrotność jego prawej strony, otrzymujemy równość:

$$\frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} = 1$$

5.3. Condition of lateral current standstill and safety degree

By dividing the sides of equation (44) by (44), we achieve the following expression:

$$\frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} = \frac{e_{nw}}{e_u + e_{nz}} \quad (45)$$

By multiplying both sides of expression (45) by the inverse of its right side, we achieve the following equality:

$$\frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} = 1$$

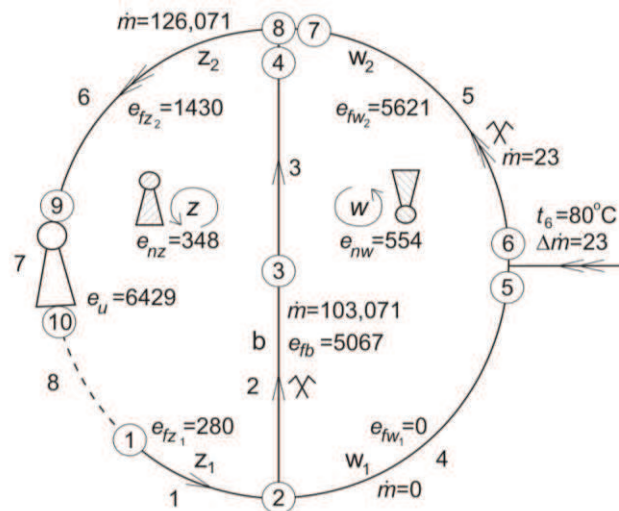
## Zestawienie 4 / List 4

Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego dotyczące  
czwartej struktury topologicznej (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1)

Virtual temperature field of dry mine air

referring to the fourth topological structure (Fig. 5) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						<i>t</i>	<i>t<sub>v</sub></i>
1	20,52	0,09	0,00	79,39	28,962	8,0	8,04
2	20,51	0,20	0,10	79,18	28,956	16,6	16,70
3	20,12	0,80	0,30	78,78	29,024	18,5	17,92
4	19,50	0,22	0,30	79,98	28,907	19,4	20,03
5	20,21	0,56	0,28	78,95	28,983	16,8	16,63
6	2,50	7,10	0,88	88,20	28,890	80,0	80,93
7	2,50	8,40	4,20	84,90	29,078	45,0	43,77
8	16,74	1,53	0,94	80,79	28,923	23,3	23,74
9	17,08	1,50	1,01	80,41	28,923	14,3	14,73
10	17,08	1,50	1,01	80,41	28,923	17,5	17,93



Rys. 5. Czwarta struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
Fig. 5: The fourth topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

Zapisujemy ją w postaci:

$$\sigma_b = 1 \quad (46)$$

$$\sigma_b = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (47)$$

Równość (46) jest warunkiem bezruchu prądu bocznego w bocznicach b struktury topologicznej (rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1), wielkość  $\sigma_b$  – stopniem bezpieczeństwa. Podstawiając do prawej strony wzoru (47) wartości adekwatnych wielkości (tab. 9, rys. 4), zapisujemy:

$$\sigma_b = \frac{1782 + 674}{1484} \cdot \frac{315 + 1169}{399 + 2057} = 1 \quad (47a)$$

Which is written down as:

$$\sigma_b = 1 \quad (46)$$

$$\sigma_b = \frac{e_u + e_{nz}}{e_{nw}} \cdot \frac{e_{fw1} + e_{fw2}}{e_{fz1} + e_{fz2}} \quad (47)$$

Equality (46) is the condition of lateral current standstill in the b split of the topological structure (Fig. 4) of the ventilation system (Fig. 1), quantity  $\sigma_b$  – safety degree. Substituting the values of adequate quantities (Table 9, Fig. 4) into the right side of formula (47), we write down the following:

$$\sigma_b = \frac{1782 + 674}{1484} \cdot \frac{315 + 1169}{399 + 2057} = 1 \quad (47a)$$

**5.4. Strumień masy powietrza w bocznicach  $w_1, z_1$  trzeciej struktury (rys. 4)**

Przekształcamy równanie (43) do postaci:

$$R_{fz1} \dot{m}^2 = e_u + e_{nz} - e_{fz2}$$

Korzystając z niej, zapisujemy następujący wzór (48) określający strumień masy czystego powietrza suchego w bocznicach  $w_1$  i  $z_1$ :

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{e_u + e_{nz} - e_{fz2}}{R_{z1}}} \quad (48)$$

Podstawiając do wzoru (48) wartości: oporu  $R_{z1}$  (30) i adekwatnych wielkości (tab. 9, rys. 4), zapisujemy:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{1782 + 674 - 2057}{0,011750}} = 184,275 \quad (48a)$$

W ostatniej kolumnie tabeli 9 zestawione są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach trzeciej struktury topologicznej (rys. 4) systemu wentylacji (rys. 1).

**6. CZWARTA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 5) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)**

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego,  $t_v$ , (zestaw. 4); pierwotny kierunek prądu bocznego płynącego bocznicą b od węzła 2 do węzła 4, bezruch prądu głównego w bocznicach  $w_1$ ; stan samonagrzewania węgla określony punktem zwrotnym o temperaturze 80°C; strumień masy wypływu bocznego:  $\Delta \dot{m} = 23$ .

**6.1. Podstawowe wielkości i związki**

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): ciśnienie barometryczne,  $p$ , i temperatura termometru mokrego,  $t_m$  (tab. 10), wysokości geodezyjne,  $z$ , (tab. 11) oraz następujące wielkości dotyczące oczek  $z, w$  (rys. 5, tab. 12):

– wypadkowe ciągi naturalne generowane odpowiednio w oczkach  $z, w$ :

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 348, \quad e_{mw} = \sum_{(w)} e_n = 554 \quad (49)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 6429 \quad (50)$$

**5.4. Air mass flux in  $w_1$  and  $z_1$  splits of the third structure (Fig. 4)**

We transform formula (43) into the following:

$$R_{fz1} \dot{m}^2 = e_u + e_{nz} - e_{fz2}$$

Then we use it to write down the following formula (48) which defines the mass flux of clean dry air in the  $w_1$  and  $z_1$  splits:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{e_u + e_{nz} - e_{fz2}}{R_{z1}}} \quad (48)$$

Substituting into formula (48) the values of resistance  $R_{z1}$  (30) and appropriate quantities (Table 9, Fig. 4), we write down the following:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{1782 + 674 - 2057}{0,011750}} = 184,275 \quad (48a)$$

In the last column of Table 9 there is a list of air mass fluxes in all splits of the third topological structure (Fig. 4) of the ventilation system (Fig. 1).

**6. THE FOURTH TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 5) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)**

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field of dry mine air,  $t_v$  (List 4); the original direction of lateral current flowing in the b split from the node 2 to the node 4; standstill of main current in the  $w_1$  split; self-heating of coal defined by a turning point with the temperature of 80°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta \dot{m} = 23$ .

**6.1. Basic quantities and relations**

Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): barometric pressure,  $p$ , and wet bulb temperature,  $t_m$  (Table 10), surveying height values,  $z$  (Table 11) as well as the following quantities referring to the  $z$  and  $w$  loops (Fig. 5, Table 12).

– resultant natural series generated in the  $z$  and  $w$  loops respectively:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 348, \quad e_{mw} = \sum_{(w)} e_n = 554 \quad (49)$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 6429 \quad (50)$$

Tabela 10 / Table 10

Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej dotyczących czwartej struktury topologicznej (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1)  
 Determining the fields of partial pressure of water vapour  
 referring to the fourth topological structure (Fig. 5) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temp. $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe nienasyconej pary wodnej przy temp. $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1004	0,006308	2484605	0,006087	969
2	111609	14,2	1446	0,008164	2468619	0,007133	1265
3	111850	16,8	1783	0,010076	2462415	0,009611	1702
4	108106	18,4	2046	0,011999	2458598	0,011318	1932
5	111609	16,0	1760	0,009966	2464324	0,009704	1714
6	111609	50,0	10174	0,062387	2383200	0,048166	8022
7	108106	38,2	6220	0,037972	2411355	0,035496	5836
8	108106	20,7	2259	0,013275	2453110	0,012002	2046
9	92741	13,8	1547	0,010552	2469573	0,009806	1439
10	99718	16,2	1770	0,012105	2463847	0,011759	1850

Tabela 11 / Table 11

Wielkości dotyczące węzłów czwartej struktury topologicznej (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1)  
 Quantities referring to the nodes of the fourth topological structure (Fig. 5) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Geodetic height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic process	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic process		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815025	100000	0,815025	0
2	-950	0,753992	111985	0,751723	-283
3	-1200	0,758513	115302	0,736212	-2541
4	-1200	0,792608	115302	0,736212	-5298
5	-950	0,756890	111985	0,751723	-283
6	-950	0,981157	111985	0,751723	-283
7	-1200	0,889496	115302	0,736212	-5298
8	-1200	0,803501	115302	0,736212	-5298
9	0	0,905052	100000	0,815025	-5916
10	30	0,853717	99637	0,817144	66

Tabela 12/ Table 12

**Wielkości dotyczące bocznicy i oczek zewnętrznych, z, i wewnętrznych, w, czwartej struktury topologicznej (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w, loops of the fourth topological structure (Fig. 5) of the ventilation system (Fig. 1)**

Bocznica Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodynamicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural series	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politropowym polytropic flow	izentropowym isentropic flow				
j	d-w	$n$	$\delta\Phi$	$l_t$	$l_{is}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$\dot{m}$
		–		J/kg p.s.			J/kg p.s.		kg p.s./s
1	1-2	1,411044	283	-9096	-9093	-3	–	280	103,071
2	2-3	-0,360812	2258	-182	-182	0	–	2258	103,071
3	3-4	0,774332	2757	2903	2851	52	–	2809	103,071
4	2-5	0	0	0	0	0	–	0	0
5	6-7	-0,325146	5015	3275	2669	606	–	5621	23
6	8-9	1,288097	618	13090	12500	590	–	1208	126,071
7	9-10	1,242203	-5982	-6132	-5846	-286	6429	161	126,071
8	10-1	0,060887	66	-235	-230	-5	–	61	126,071
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, z, with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8			0	348	0	348	6429	6777	–
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 4, 5, 3 i 2 Internal loop, w, with splits: 4, 5, 3 and 2			0	554	0	554	–	554	–

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (rys. 5, tab. 12):

$$\begin{aligned}
 e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 2258 + 2809 = 5067 \\
 e_{fw1} &= e_{fw4} = 0, e_{fw2} = e_{f5} = 5621 \\
 e_{fz1} &= e_{f1} = 280 \\
 e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1208 + 161 + 61 = 1430
 \end{aligned}
 \tag{51}$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (Fig. 5, Table 12):

$$\begin{aligned}
 e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 2258 + 2809 = 5067 \\
 e_{fw1} &= e_{fw4} = 0, e_{fw2} = e_{f5} = 5621 \\
 e_{fz1} &= e_{f1} = 280 \\
 e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1208 + 161 + 61 = 1430
 \end{aligned}
 \tag{51}$$

**6.2. Równania oczkowe, warunek bezruchu prądu głównego, stopień bezpieczeństwa**

Topologia czwartej struktury (rys. 5) jest taka sama jak drugiej struktury (rys. 3). Dla tych struktur słuszne są równania oczkowe: (34), (35), warunek (37) bezruchu prądu głównego, stopień bezpieczeństwa (38) i wzór (39). Podstawiając do wzorów (38) i (39) wartości wielkości określonych wzorami: (49), (50), (51) (rys. 5) i oporów R<sub>b</sub>, R<sub>z1</sub> (30) bocznicy b, z<sub>1</sub>, otrzymujemy:

– wartość stopnia bezpieczeństwa:

$$\sigma_w = \frac{6429 + 348}{554} \cdot \frac{5621 - 5067}{5067 + 280 + 1430} = 1 \tag{38b}$$

**6.2. Loop equations, condition of main current standstill, safety degree**

The topology of the fourth structure (Fig. 5) is the same as the one of the second structure (Fig. 3). The following refer to both these structures: loop equations (34) and (35), condition (37) of main current standstill, safety degree (38), and formula (39). By putting into formulas (38) and (39) the values of quantities defined by formulas (49), (50), (51) (Fig. 5) and resistance values R<sub>b</sub>, R<sub>z1</sub> (30) of the b and z<sub>1</sub> splits, we achieve the following:

– the value of safety degree:

$$\sigma_w = \frac{6429 + 348}{554} \cdot \frac{5621 - 5067}{5067 + 280 + 1430} = 1 \tag{38b}$$

– wartość strumienia masy powietrza w bocznicach: b i z<sub>1</sub> czwartej struktury (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1):

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{6429 + 348 - 1430}{0.491562 + 0.011750}} = 103,071 \quad (39b)$$

W ostatniej kolumnie tabeli 12 podane są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach czwartej struktury (rys. 5) systemu wentylacji (rys. 1).

## 7. PIĄTA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 6) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej,  $t_v$  (zestaw. 5); bezruch prądu bocznego w boczniczy b; pierwotny kierunek prądu głównego płynącego bocznicą w<sub>1</sub> od węzła 2 do węzła 5; stan samonagrzewania węgla określony punktem zwrotnym o temperaturze 80°C; strumień masy wypływu bocznego  $\Delta \dot{m} = 20$ .

### 7.1. Podstawowe wielkości i związki

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): ciśnienia barometryczne,  $p$ , i temperatura termometru mokrego,  $t_m$  (tab. 13), wysokości geodezyjne,  $z$ , (tab. 14) oraz następujące wielkości dotyczące oczek  $z$ ,  $w$  (rys. 6, tab. 12):

– wypadkowe ciągi naturalne generowane odpowiednio w oczkach  $z$ ,  $w$ :

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 1635, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 736 \quad (52)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 1558 \quad (53)$$

– dysypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (rys. 6, tab. 15):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 0, & e_{fw1} &= e_{f4} = 306 \\ e_{fw2} &= e_{f5} = 430, & e_{fz1} &= e_{f1} = 406 \\ e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 2881 - 182 + 88 = 2787 \end{aligned} \quad (54)$$

– the value of air mass flux in the b and z<sub>1</sub> splits of the fourth structure (Fig. 5) and the ventilation system (Fig. 1):

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{6429 + 348 - 1430}{0.491562 + 0.011750}} = 103,071 \quad (39b)$$

In the last column of Table 12 there is a list of air mass fluxes in all splits of the fourth topological structure (Fig. 5) of the ventilation system (Fig. 1).

## 7. THE FIFTH TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 6) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field,  $t_v$  (List 5); standstill of lateral current in the b split; the original direction of main current flowing in the w<sub>1</sub> split from the node 2 to the node 5; self-heating of coal defined by a turning point with the temperature of 80°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta \dot{m} = 20$ .

### 7.1. Basic quantities and relations

Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): barometric pressure,  $p$ , and wet bulb temperature,  $t_m$  (Table 13), geodetic height values,  $z$  (Table 14) as well as the following quantities referring to the  $z$  and  $w$  loops (Fig. 6, Table 12):

– resultant natural series generated in the  $z$  and  $w$  loops respectively:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 1635, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 736 \quad (52)$$

– effective energy of the main fan:

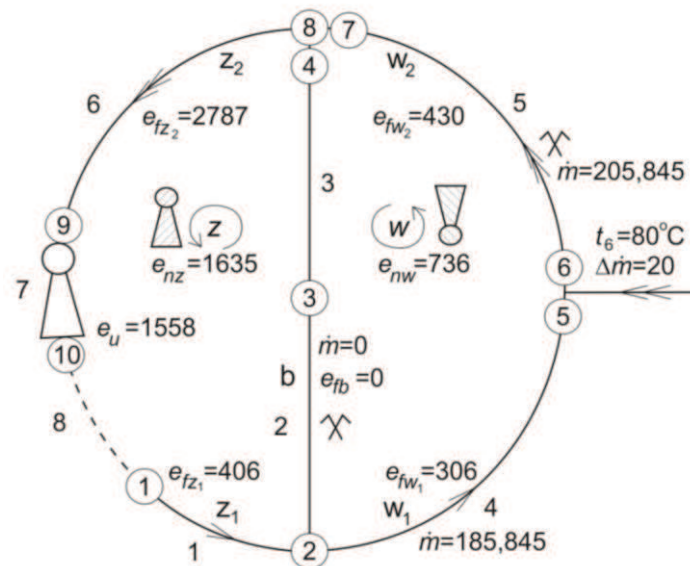
$$e_u = 1558 \quad (53)$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (Fig. 6, Table 15):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 0, & e_{fw1} &= e_{f4} = 306 \\ e_{fw2} &= e_{f5} = 430, & e_{fz1} &= e_{f1} = 406 \\ e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 2881 - 182 + 88 = 2787 \end{aligned} \quad (54)$$

**Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego dotyczące piątej struktury topologicznej (rys. 6) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Virtual temperature field of dry mine air referring to the fifth topological structure (Fig. 6) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Atomic mass $M_g$	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						$t$	$t_v$
1	20,52	0,09	0,00	79,39	28,962	8,0	8,04
2	20,52	0,09	0,05	79,34	28,948	16,6	16,78
3	20,40	0,10	0,06	79,34	28,944	18,5	18,72
4	20,30	0,12	0,08	79,50	28,941	20,1	20,33
5	20,26	0,11	0,09	79,54	28,936	17,5	17,80
6	20,15	0,33	0,10	79,42	28,966	80,0	80,80
7	20,05	1,25	0,30	78,40	28,084	45,0	43,71
8	20,05	1,25	0,30	78,40	28,084	45,0	43,71
9	19,60	1,20	0,34	78,86	29,054	34,0	33,07
10	19,60	1,20	0,34	78,86	29,054	37,0	36,06



Rys. 6. Piąta struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
 Fig. 6. The fifth topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

**7.2. Równia oczkowe, warunek bezruchu prądu bocznego, stopień bezpieczeństwa**

Topologia piątej struktury (rys. 6) jest taka sama jak trzeciej struktury (rys. 4). Dla ich obu dotyczą równania oczkowe (43), (44), warunek (46) bezruchu prądu bocznego w bocznicy b, stopień bezpieczeństwa  $\sigma_b$  określony wzorem (47) oraz wzór (48) określający strumień masy powietrza płynącego w bocznicach:  $w_1$  i  $z_1$ . Podstawiając do tych wzorów wartości adekwatnych wielkości dotyczących piątej struktury (rys. 5), otrzymujemy:

**7.2. Loop equations, condition of lateral current standstill, safety degree**

The topology of the fifth structure (Fig. 6) is the same as the one of the third structure (Fig. 4). The following refer to both these structures: loop equations (43) and (44), condition (46) of lateral current standstill in the b split, safety degree  $\sigma_b$  defined by formula (47), and formula (48) defining the mass flux of air in the  $w_1$  and  $z_1$  splits. By putting into these formulas the values of adequate quantities referring to the fifth structure (Fig. 5), we achieve the following:

Tabela 13 / Table 13

Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej dotyczących piątej struktury topologicznej (rys. 6) systemu wentylacji (rys. 1)

Determining the fields of partial pressure of water vapour referring to the fifth topological structure (Fig. 6) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg p.s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006288	1001
2	111404	15,2	1726	0,009788	2466233	0,009133	1612
3	115271	17,7	2024	0,011117	2460268	0,010692	1948
4	115271	19,8	2308	0,012708	2455257	0,012486	2268
5	111001	16,3	1852	0,010554	2463608	0,009931	1747
6	111001	50,0	12331	0,077733	2383200	0,063206	10239
7	115271	38,2	6693	0,038342	2411355	0,035741	6265
8	115271	38,2	6693	0,038342	2411355	0,035741	6265
9	98219	32,8	4972	0,033166	2424239	0,033347	4998
10	99763	35,2	5682	0,037566	2418513	0,037184	5301

Tabela 14/ Table 14

Wielkości dotyczące węzłów piątej struktury topologicznej (rys. 6) systemu wentylacji (rys. 1)  
Quantities referring to the nodes of the fifth topological structure (Fig. 6) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Geodetic height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic process	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic process		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815289	100000	0,815289	0
2	-950	0,757992	111983	0,751974	-435
3	-1200	0,739288	115300	0,736460	-435
4	-1200	0,745471	115302	0,736460	-435
5	-950	0,764405	111983	0,751974	-738
6	-950	1,008295	111983	0,751974	-738
7	-1200	0,834371	115300	0,736460	-435
8	-1200	0,824785	115300	0,736460	-435
9	0	0,942892	100000	0,815289	-1452
10	30	0,939591	99637	0,817408	103



Tabela 15 / Table 15

**Wielkości dotyczące bocznic oczek zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, piątej struktury topologicznej (rys. 6) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w, loops of the fifth topological structure (Fig. 6) of the ventilation system (Fig. 1)**

Bocznicia Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodynamicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural series	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politropowym polytropic flow	izentropowym isentropic flow				
j	d-w	n	$\delta\Phi$	$l_t$	$l_{ts}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$\dot{m}\&$
		-	J/kg p.s.			J/kg p.s.			kg p.s./s
1	1-2	1,481200	435	-8971	-8942	-29	-	406	185,845
2	2-3	1,365710	0	-2883	-2883	0	-	0	0
3	3-4	0	0	0	0	0	-	0	0
4	2-5	0,430155	303	307	304	3	-	306	185,845
5	6-7	0,199361	-303	-3920	-3187	-733	-	430	20
6	8-9	1,196200	1017	15150	13286	1864	-	2881	205,845
7	9-10	4,447495	-1555	-1453	-1268	-185	1558	-182	205,845
8	10-1	0,016721	103	-208	-193	-15	-	88	205,845
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, z, with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8			0	1635	0	1635	1558	3193	-
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 2, 3, 5 i 4 Internal loop, w, with splits: 2, 3, 5 and 4			0	736	0	736	-	736	-

$$\sigma_b = \frac{1558 + 1635}{736} \cdot \frac{306 + 430}{406 + 2787} = 1 \quad (47b)$$

$$\sigma_b = \frac{1558 + 1635}{736} \cdot \frac{306 + 430}{406 + 2787} = 1 \quad (47b)$$

$$\dot{m}\& = \sqrt{\frac{1558 + 1635 - 2787}{0,011750}} = 185,845 \quad (48b)$$

$$\dot{m}\& = \sqrt{\frac{1558 + 1635 - 2787}{0,011750}} = 185,845 \quad (48b)$$

W ostatniej kolumnie tabeli 15 zestawione są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach piątej struktury (rys. 6) systemu wentylacji (rys. 1).

In the last column of Table 15 there is a list of air mass fluxes in all splits of the fifth topological structure (Fig. 6) of the ventilation system (Fig. 1).

**8. SZÓSTA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 7) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)**

**8. THE SIXTH TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 7) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)**

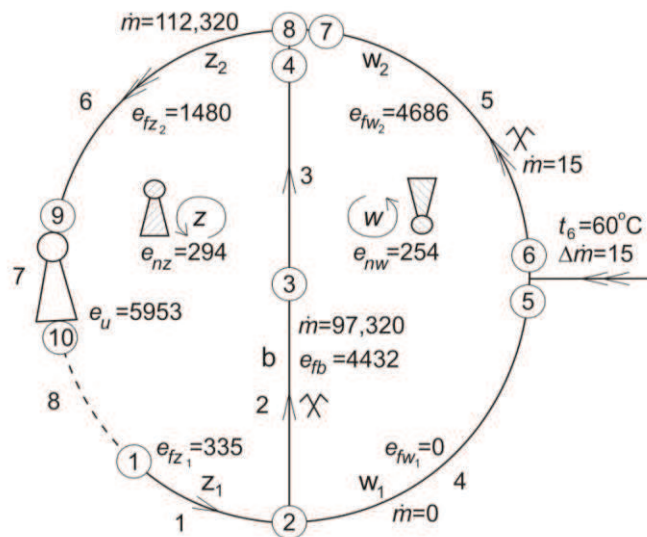
Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej,  $t_v$ , (zestaw. 6); pierwotny kierunek prądu bocznego płynącego w bocznicie wypadkowej b od węzła 2 do węzła 4, bezruch prądu głównego w bocznicie  $w_1$ ; stan samonagrzewania węgla określony punktem krytycznym o temperaturze 60°C; strumień masy wypływu bocznego:  $\Delta\dot{m}\& = 15$ .

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field,  $t_v$  (List 6); the original direction of lateral current flowing in the b split from the node 2 to the node 4; standstill of main current in the  $w_1$  split; self-heating of coal defined by a critical point with the temperature of 60°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta\dot{m}\& = 15$ .

## Zestawienie 6/ List 6

**Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego dotyczące  
szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1)  
Virtual temperature field of dry mine air  
referring to the sixth topological structure (Fig. 7) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						<i>t</i>	<i>t<sub>v</sub></i>
1	20,52	0,09	0,00	79,39	28,962	8,0	8,04
2	20,51	0,20	0,05	79,24	28,997	16,6	16,29
3	20,12	0,21	0,06	79,61	28,951	18,5	18,65
4	19,50	0,22	0,08	80,20	28,926	20,1	20,50
5	20,21	0,56	0,09	79,14	29,009	17,5	17,07
6	3,00	6,10	0,20	90,70	29,209	60,0	57,23
7	3,00	7,20	3,10	86,70	29,032	30,0	29,31
8	17,30	1,12	0,10	80,74	29,230	21,4	20,95
9	15,83	1,10	0,09	82,98	28,923	14,4	14,83
10	15,56	1,05	0,09	83,30	28,905	17,4	18,01



*Rys. 7. Szósta struktura topologiczna systemu wentylacji (rys.1)  
Fig. 7. The sixth topological structure of the ventilation system (Fig.1)*

### 8.1. Podstawowe wielkości i związki

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): pola: ciśnienia barometrycznego,  $p$ , temperatury termometru mokrego,  $t_m$ , (tab. 16) i wysokości geodezyjnej,  $z$ , (tab. 17) [7] oraz następujące wielkości dotyczące oczek  $z$ ,  $w$  (rys. 7, tab. 18):

– wypadkowe ciągi naturalne generowane odpowiednio w oczkach  $z$ ,  $w$ :

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_{nz} = 294, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 254 \quad (55)$$

### 8.1. Basic quantities and relations

Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): the fields of barometric pressure,  $p$ , and wet bulb temperature,  $t_m$  (Table 16), and of surveying height value,  $z$  (Table 17) [7], as well as the following quantities referring to the  $z$  and  $w$  loops (Fig. 7, Table 18).

– resultant natural draughts generated in the  $z$  and  $w$  loops, respectively:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_{nz} = 294, \quad e_{nw} = \sum_{(w)} e_n = 254 \quad (55)$$

Tabela 16 / Table 16

**Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej dotyczących szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1)**

**Determining the fields of partial pressure of water vapour referring to the sixth topological structure (Fig. 7) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg p.s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006290	1001
2	111525	14,8	1683	0,009530	2467187	0,009891	1576
3	112150	17,0	1937	0,010932	2461938	0,010246	1817
4	108877	18,8	2169	0,012643	2457643	0,011932	2049
5	111525	16,0	1817	0,010302	2464324	0,009858	1741
6	111525	45,0	9578	0,058437	2395130	0,052797	8726
7	108877	28,4	3867	0,022905	2434738	0,022514	3813
8	108877	19,2	2224	0,012970	2456689	0,012238	2101
9	93213	13,8	1577	0,010704	2469573	0,010277	1425
10	99673	15,0	1704	0,010819	2466710	0,009571	1510

Tabela 17 / Table 17

**Wielkości dotyczące węzłów szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1) dotyczące węzłów szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to the nodes of the sixth topological structure (Fig. 7) of the ventilation system (Fig. 1)**

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Surveying height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic flow	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic flow		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815287	100000	0,815289	0
2	-950	0,755631	111983	0,751973	-344
3	-1200	0,759141	115300	0,736460	-2320
4	-1200	0,7899019	115300	0,736460	-4730
5	-950	0,758806	111983	0,751973	-344
6	-950	0,922502	111983	0,751973	-344
7	-1200	0,826262	115300	0,736460	-4730
8	-1200	0,790613	115300	0,736460	-4730
9	0	0,900573	100000	0,815289	-5533
10	30	0,851386	99637	0,817408	0

Tabela 18 / Table 18

Wielkości dotyczące bocznicy i oczek zewnętrznej,  $z$ , i wewnętrznej,  $w$ , szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1)  
Quantities referring to splits as well as external,  $z$ , and internal,  $w$ , loops of the sixth topological structure (Fig. 7) of the ventilation system (Fig. 1)

Bocznica Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodynamicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural draught	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politropowym polytropic flow	izentropowym isentropic flow				
j	d-w	$n$	$\delta\Phi$	$l_t$	$l_{ts}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$m\dot{v}$
		–		J/kg p.s.			J/kg p.s.		kg p.s./s
1	1-2	1,435443	344	-9042	-9033	-9	–	335	97,320
2	2-3	-1,205877	1976	-473	-471	-2	–	1974	97,320
3	3-4	0,767260	2410	2533	2485	48	–	2458	97,320
4	2-5	0	0	0	0	0	–	0	0
5	6-7	-0,218102	4386	2314	2014	300	–	4686	0
6	8-9	1,192816	803	13204	12692	512	–	1315	15
7	9-10	1,193036	-5533	-5656	-5406	-250	5953	170	112,320
8	10-1	0,075603	0	-272	-267	-5	–	-5	112,320
Oczko zewnętrzne, $z$ , z bocznicy: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, $z$ , with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8			0	294	0	294	5953	6247	112,320
Oczko wewnętrzne, $w$ , z bocznicy: 4, 5, 3 i 2 Internal loop, $w$ , with splits: 4, 5, 3 and 2			0	254	0	254	-	254	–

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 5953 \text{ J/kg p.s.} \quad (56)$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 5953 \text{ J/kg p.s.} \quad (56)$$

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych:  $b$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (rys. 7, tab. 18):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 1974 + 2458 = 4432 \\ e_{fw1} &= e_{f4} = 0, e_{fw2} = e_{f5} = 4686, e_{fz1} = 335 \quad (57) \\ e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1315 + 170 - 5 = 1480 \end{aligned}$$

– mechanical energy dissipations in the following splits:  $b$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  (Fig. 7, Table 18):

$$\begin{aligned} e_{fb} &= e_{f2} + e_{f3} = 1974 + 2458 = 4432 \\ e_{fw1} &= e_{f4} = 0, e_{fw2} = e_{f5} = 4686, e_{fz1} = 335 \quad (57) \\ e_{fz2} &= e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1315 + 170 - 5 = 1480 \end{aligned}$$

## 8.2. Równania oczkowe, warunek bezruchu prądu głównego, stopień bezpieczeństwa i strumień masy powietrza w bocznicy $b$ , $z_1$

Topologia szóstej struktury (rys. 7) jest taka sama jak drugiej struktury (rys. 3). Struktur tych dotyczą równania oczkowe (34), (35), warunek (37) bezruchu prądu głównego, stopień bezpieczeństwa (38) i wzór (39), którym określony jest strumień masy powietrza w bocznicy  $b$ ,  $z_1$ .

## 8.2. Loop equations, condition of main current standstill, safety degree and air mass flux in $b$ and $z_1$ splits

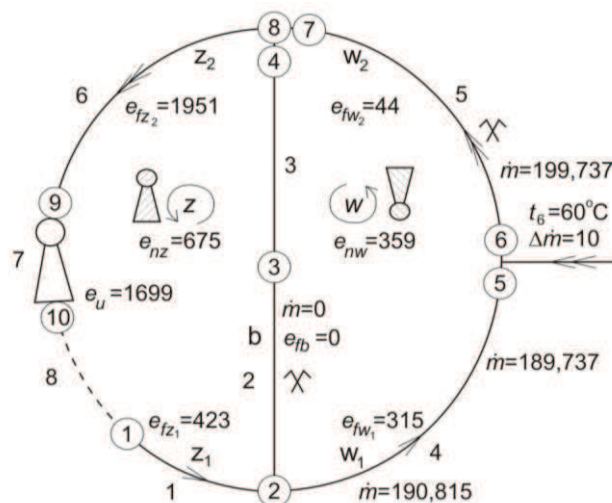
The topology of the sixth structure (Fig. 7) is the same as the one of the second structure (Fig. 3). The following refer to these structures: loop equations (34) and (35), condition (37) of main current standstill, safety degree (38), and formula (39) defining the mass flux of air in the  $b$  and  $z_1$  splits.

Zestawienie 7 / List 7

Pole temperatury wirtualnej suchego powietrza kopalnianego dotyczące siódmej struktury topologicznej (rys. 8) systemu wentylacji (rys. 1)  
Virtual temperature field of dry mine air referring to the seventh topological structure (Fig. 8) of the ventilation system (Fig. 1)

referring to the seventh topological structure (Fig. 8) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Procentowy udział objętościowy Percentage volume				Masa drobinowa Molecular mass	Temperatura Temperature	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		termometru suchego dry bulb temp.	wirtualna virtual temp.
						<i>t</i>	<i>t<sub>v</sub></i>
1	20,52	0,14	0,00	79,34	28,962	8,0	8,04
2	20,51	0,10	0,02	79,37	28,953	16,0	16,18
3	20,40	0,10	0,03	79,47	28,948	18,5	18,68
4	20,40	0,10	0,04	79,46	28,945	20,1	20,11
5	20,36	0,11	0,05	79,49	28,945	17,5	17,51
6	20,30	0,30	0,10	79,30	28,967	60,0	59,99
7	20,20	0,35	0,15	79,30	28,965	30,0	30,01
8	20,20	0,35	0,15	79,30	28,965	30,0	30,01
9	19,80	0,40	0,20	79,60	28,951	20,6	20,75
10	19,80	0,40	0,20	79,60	28,951	23,6	23,75



Rys. 8. Siódma struktura topologiczna systemu wentylacji (rys. 1)  
Fig. 8. The seventh topological structure of the ventilation system (Fig. 1)

Podstawiając do wzorów (38) i (39) wartości: adekwatnych wielkości podanych na schemacie (rys. 7) i oporów aerodynamicznych (30) bocznic b, z<sub>1</sub>, otrzymujemy następujące wartości wspomnianego stopnia i strumienia masy powietrza:

By substituting into formulas (38) and (39) the values of appropriate quantities given in the diagram (Fig. 7) and the values of aerodynamic resistance (30) of the b and z<sub>1</sub> splits, we achieve the following values of the mentioned degree and air mass flux:

$$\sigma_w = \frac{5953 + 294}{254} \cdot \frac{4686 - 4432}{4432 + 335 + 1480} = 1 \quad (38c)$$

$$\sigma_w = \frac{5953 + 294}{254} \cdot \frac{4686 - 4432}{4432 + 335 + 1480} = 1 \quad (38c)$$

$$\dot{m}\&= \sqrt{\frac{5953 + 294 - 1480}{0,491562 + 0,011750}} = 97,320 \quad (39c)$$

$$\dot{m}\&= \sqrt{\frac{5953 + 294 - 1480}{0,491562 + 0,011750}} = 97,320 \quad (39c)$$

Tabela 19 / Table 19

Wyznaczenie pól ciśnienia cząstkowego pary wodnej dotyczących siódmej struktury topologicznej (rys. 8) systemu wentylacji (rys. 1)  
 Determining the fields of partial pressure of water vapour referring to the seventh topological structure (Fig. 8) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Ciśnienie barometryczne Barometric pressure	Temperatura termometru mokrego Wet bulb temperature	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temp. $t_m$ Partial pressure of saturated water vapour at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nasyconego parą wodną Humidity degree of air saturated with water vapour	Ciepło utajone parowania wody przy temperaturze $t_m$ Latent heat of water evaporation at the temperature $t_m$	Stopień zawilżenia powietrza nienasyconego parą wodną Humidity degree of air not saturated with water vapour	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nienasyconej przy temperaturze $t_m$ Partial pressure of non-saturated water vapour at the temperature $t_m$
i	$p$ Pa	$t_m$ °C	$e_{sw}$ Pa	$X_s$ kg/kg p.s.	$L_w$ J/kg wody	$X$ kg/kg p.s.	$e$ Pa
1	100000	7,5	1036	0,006511	2484605	0,006290	1001
2	111394	15,0	1704	0,009662	2466710	0,009194	1644
3	114711	17,7	2024	0,011172	2460268	0,010764	1951
4	114711	19,1	2210	0,012219	2456927	0,011797	2135
5	110990	16,8	1912	0,010903	2462415	0,010607	1861
6	110990	40,0	7372	0,044253	2407060	0,035354	5969
7	114711	27,0	3564	0,019945	2438078	0,018661	3341
8	114711	27,0	3564	0,019945	2438078	0,018661	3341
9	98172	19,7	2294	0,014882	2455496	0,014441	2228
10	99766	22,2	2675	0,017137	2449531	0,016481	2575

Tabela 20

Wielkości dotyczące węzłów siódmej struktury topologicznej (rys. 8) systemu wentylacji (rys. 1)  
 Quantities referring to the nodes of the seventh topological structure (Fig. 8) of the ventilation system (Fig. 1)

Węzeł Node	Wysokość geodezyjna Surveying height	Pozorna objętość właściwa w przepływie politropowym Apparent specific volume in the polytropic flow	Ciśnienie Pressure	Objętość właściwa Specific volume	Potencjał aerodynamiczny Aerodynamic potential
			w przepływie izentropowym in the isentropic flow		
i	$z$ m	$v$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$p_s$ Pa	$v_s$ m <sup>3</sup> /kg p.s.	$\Phi$ J/kg p.s.
1	0	0,815289	100000	0,815289	0
2	-950	0,756582	111983	0,751973	-434
3	-1200	0,742878	115300	0,736460	-434
4	-1200	0,747738	115300	0,736460	-434
5	-950	0,764518	111983	0,751973	-747
6	-950	0,910527	111983	0,751973	-747
7	-1200	0,781351	115300	0,736460	-434
8	-1200	0,781351	115300	0,736460	-434
9	0	0,879274	100000	0,815289	-1490
10	30	0,876852	99637	0,817408	105

Tabela 21 / Table 21

**Wielkości dotyczące bocznic i oczek zewnętrznego, z, i wewnętrznego, w, siódmej struktury topologicznej systemu wentylacji (rys. 1)**  
**Quantities referring to splits as well as external, z, and internal, w, loops of the seventh topological structure of the ventilation system (Fig. 1)**

Bocznica Split		Wykładnik politropy Polytropic index	Spadek potencjału aerodynamicznego Aerodynamic potential decrease	Jednostkowa praca techniczna w przepływie: Unit technological work in:		Lokalny ciąg naturalny Local natural draught	Energia użyteczna wentylatora głównego Efficient energy of main fan	Dyssypacja energii mechanicznej Mechanical energy dissipation	Strumień masy czystego powietrza suchego Mass flux of clean dry air
				politropowym polytropic flow	izentropowym isentropic flow				
j	d-w	$n$	$\delta\Phi$	$l_t$	$l_{ts}$	$e_n$	$e_u$	$e_f$	$\dot{m}_k$
		J/kg p.s.				J/kg p.s.			kg p.s./s
1	1-2	1,443875	434	-8945	-8934	-11	-	423	189,737
2	2-3	1,605523	0	-2478	-2478	0	-	0	0
3	3-4	0	0	0	0	0	-	0	0
4	2-5	0,348201	313	307	305	2	-	315	189,737
5	6-7	0,215528	-313	-3140	-2783	-357	-	44	199,737
6	8-9	1,318642	1056	13696	12912	784	-	1840	199,737
7	9-10	5,839152	-1595	-1400	-1309	-91	1699	13	199,737
8	10-1	0,032182	105	-198	-191	-7	-	98	199,737
Oczko zewnętrzne, z, z bocznicami: 1, 2, 3, 6, 7 i 8 External loop, z, with splits: 1, 2, 3, 6, 7 and 8			0	675	0	675	1699	2374	-
Oczko wewnętrzne, w, z bocznicami: 2, 3, 5 i 4 Internal loop, w, with splits: 2, 3, 5 and 4			0	359	0	359	-	359	-

W ostatniej kolumnie tabeli 18 zestawione są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach szóstej struktury topologicznej (rys. 7) systemu wentylacji (rys. 1).

In the last column of Table 18 there is a list of air mass fluxes in all splits of the sixth topological structure (Fig. 7) of the ventilation system (Fig. 1).

**9. SIÓDMA STRUKTURA TOPOLOGICZNA (RYS. 8) SYSTEMU WENTYLACJI (RYS. 1)**

**9. THE SEVENTH TOPOLOGICAL STRUCTURE (FIG. 8) OF THE VENTILATION SYSTEM (FIG. 1)**

Znamienne cechy tej struktury: pole temperatury wirtualnej,  $t_v$ , (zestaw.7), bezruch prądu bocznego w bocznicie wypadkowej b, pierwotny kierunek prądu głównego płynącego w bocznicie  $w_1$  od węzła 2 do węzła 5; stan samonagrzewania węgla określony punktem krytycznym o temperaturze 60°C; strumień masy wypływu bocznego:  $\Delta\dot{m}_k=10$ .

The characteristics of this structure are the following: virtual temperature field,  $t_v$  (List 7); standstill of lateral current in the b split; the original direction of main current flowing in the  $w_1$  split from the node 2 to the node 5; self-heating of coal defined by a critical point with the temperature of 60°C; mass flux of lateral outflow:  $\Delta\dot{m}_k=10$ .

**9.1. Podstawowe wielkości i związki**

**9.1. Basic quantities and relations**

Dane wejściowe: wielkości dotyczące węzłów systemu wentylacji (rys. 1): pola: ciśnienia barometrycznego,  $p$ , temperatury termometru mokrego,  $t_m$ , (tab. 19), i wysokości geodezyjnej,  $z$ , (tab. 20) [7] oraz następujące wielkości dotyczące oczek  $z, w$  (rys. 8, tab. 21):

Input data: quantities referring to the nodes of the ventilation system (Fig. 1): the fields of barometric pressure,  $p$ , and wet bulb temperature,  $t_m$  (Table 19), and of surveying height value,  $z$  (Table 20) [7], as well as the following quantities referring to the  $z$  and  $w$  loops (Fig. 8, Table 21).

– wypadkowe ciągi naturalne generowane odpowiednio w oczkach  $z, w$ :

– resultant natural series generated in the  $z$  and  $w$  loops respectively:

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 675, e_{nw} = 359 \quad (58)$$

$$e_{nz} = \sum_{(z)} e_n = 675, e_{nw} = 359 \quad (58)$$

– energia użyteczna wentylatora głównego:

$$e_u = 1699 \quad (59)$$

– dyssypacje energii mechanicznej w bocznicach wypadkowych: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (rys. 8, tab. 21):

$$\begin{aligned} e_{fb} = e_{f2} + e_{f3} = 0, \quad e_{fw1} = e_{f4} = 315, \\ e_{fw2} = e_{f5} = 44, \quad e_{fz1} = e_{f1} = 423, \\ e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1840 + 13 + 98 = 1951 \end{aligned} \quad (60)$$

## 9.2. Równania oczkowe, warunek bezruchu prądu głównego, stopień bezpieczeństwa i strumień masy powietrza w bocznicach z<sub>1</sub>, w<sub>1</sub>

Topologia siódmej struktury (rys. 8) jest taka sama jak trzeciej struktury (rys. 4). Struktur tych dotyczą równania oczkowe (43) i (44), warunek (46) bezruchu prądu bocznego w bocznicach b, stopień bezpieczeństwa (47) oraz wzór (48) określający strumień masy czystego powietrza suchego w bocznicach z<sub>1</sub> i w<sub>1</sub>.

Podstawiając do wzorów (47) i (48) wartości: adekwatnych wielkości podanych na schemacie (rys. 8) i oporów aerodynamicznych (30) bocznic b, z<sub>1</sub>, uzyskujemy następujące wartości wspomnianego stopnia i strumienia masy powietrza:

$$\sigma_b = \frac{1699 + 675}{359} \cdot \frac{315 + 44}{423 + 1951} = 1 \quad (61)$$

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{1699 + 675 - 1951}{0,011750}} = 189,737 \quad (62)$$

W ostatniej kolumnie tabeli 21 zestawione są strumienie masy powietrza we wszystkich bocznicach siódmej struktury (rys. 8) systemu wentylacji (rys. 1).

## 10. GRAFICZNE PRZEDSTAWIENIE WARUNKÓW BEZRUCHU PRĄDÓW BOCZNEGO I GŁÓWNEGO

### 10.1. Krzywe dotyczące bezruchu prądów bocznego i głównego

Bezruch prądu bocznego przedstawiony jest w trzech strukturach topologicznych (rys. 4, rys. 6, rys. 8). Korzystając z nich, podaliśmy w ortogonalnym układzie współrzędnych  $\Delta n$ ,  $e_{mw}$  (rys. 9) punkty: B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> odpowiednio o współrzędnych:

$$\begin{aligned} \Delta n = 30, e_{mw} = 1484; \Delta n = 20, e_{mw} = 736; \\ \Delta n = 10, e_{mw} = 359 \end{aligned}$$

– effective energy of the main fan:

$$e_u = 1699 \quad (59)$$

– mechanical energy dissipations in the following splits: b, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> (Fig. 8, Table 21):

$$\begin{aligned} e_{fb} = e_{f2} + e_{f3} = 0, \quad e_{fw1} = e_{f4} = 315, \\ e_{fw2} = e_{f5} = 44, \quad e_{fz1} = e_{f1} = 423, \\ e_{fz2} = e_{f6} + e_{f7} + e_{f8} = 1840 + 13 + 98 = 1951 \end{aligned} \quad (60)$$

## 9.2. Loop equations, condition of main current standstill, safety degree and air mass flux in z<sub>1</sub> and w<sub>1</sub> splits

The topology of the seventh structure (Fig. 8) is the same as the one of the third structure (Fig. 4). The following refer to these structures: loop equations (43) and (44), condition (46) of lateral current standstill in the b split, safety degree (47), and formula (48) defining the mass flux of clean dry air in the z<sub>1</sub> and w<sub>1</sub> splits.

By substituting into formulas (47) and (48) the values of adequate quantities given in the diagram (Fig. 8) and the values of aerodynamic resistance (30) of the b and z<sub>1</sub> splits, we achieve the following values of the mentioned degree and air mass flux:

$$\sigma_b = \frac{1699 + 675}{359} \cdot \frac{315 + 44}{423 + 1951} = 1 \quad (61)$$

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{1699 + 675 - 1951}{0,011750}} = 189,737 \quad (62)$$

In the last column of Table 21 there is a list of air mass fluxes in all splits of the seventh topological structure (Fig. 8) of the ventilation system (Fig. 1).

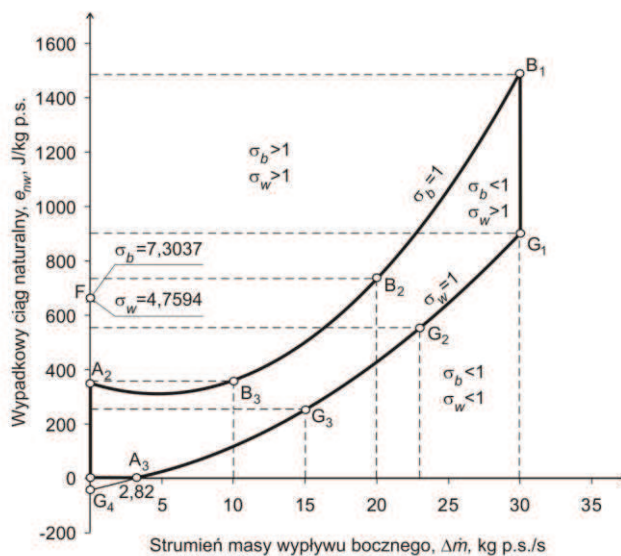
## 10. GRAPHIC PRESENTATION OF STANDSTILL CONDITIONS OF LATERAL AND MAIN CURRENTS

### 10.1. Curves referring to the standstills of lateral and main currents

The standstill of lateral current is presented in three topological structures (Fig. 4, Fig. 6, Fig. 8). Using these structures, we have given the following points in an orthogonal coordinate system  $\Delta n$ ,  $e_{mw}$  (Fig. 9): B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> with the following coordinates, respectively:

$$\begin{aligned} \Delta n = 30, e_{mw} = 1484; \Delta n = 20, e_{mw} = 736; \\ \Delta n = 10, e_{mw} = 359 \end{aligned}$$





Rys. 9: Pięciokąt krzywoliniowy – skład chemiczny suchego powietrza kopalnianego w każdej strukturze topologicznej systemu wentylacji (rys. 1) zależy od miejsca  
 Fig. 9: Curvilinear pentagon – chemical composition of dry mine air in each topological structure of the ventilation system (Fig. 1) depends on the location

Korzystając z tych współrzędnych i znanej metody [7], otrzymaliśmy równanie (63) paraboli dotyczące bezruchu prądu bocznego:

$$e_{nw} = 1,855 (\Delta m)^2 - 17,95 (\Delta m) + 353 \quad (63)$$

Bezruch prądu głównego przedstawiony jest w trzech strukturach topologicznych (rys. 3, rys. 5, rys. 7). Korzystając z nich, podaliśmy w układzie (rys. 9) punkty: G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub> odpowiednio o współrzędnych:

$$\begin{aligned} \Delta m &= 30, e_{nw} = 903; \Delta m = 23, e_{nw} = 554; \\ \Delta m &= 15, e_{nw} = 254 \end{aligned}$$

Na analogicznej drodze jak w przypadku prądu bocznego otrzymaliśmy następujące równanie (64) paraboli, które dotyczy bezruchu prądu głównego:

$$e_{nw} = 0,8237 (\Delta m)^2 + 6,191 (\Delta m) - 24 \quad (64)$$

### 10.2. Pięciokąt krzywoliniowy

Wierzchołkami pięciokąta krzywoliniowego (rys. 9) są punkty: O, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, G<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>. Odcinek A<sub>2</sub> – B<sub>1</sub> paraboli dotyczącej bezruchu prądu bocznego przedstawia warunek:  $\sigma_b = 1$  przy strumieniu masy wypływu bocznego  $\Delta m$  od 0 do 30 kg p.s./s. Odcinek osi odciętych O – A<sub>3</sub> oraz odcinek A<sub>3</sub> – G<sub>1</sub> paraboli dotyczącej bezruchu prądu głównego przedstawiają warunek:  $\sigma_w = 1$  przy strumieniu masy wypływu bocznego przy strumieniu masy wypływu bocznego  $\Delta m$  odpowiednio od 0 do 2,82 i od 2,82 do 30 kg p.s./s.

Using these coordinates and a known method [7], we have obtained a parabola equation (63) referring to the standstill of lateral current:

$$e_{nw} = 1,855 (\Delta m)^2 - 17,95 (\Delta m) + 353 \quad (63)$$

The standstill of main current is presented in three topological structures (Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7). Using these structures, we have given the following points in the diagram: G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, with the following coordinates, respectively:

$$\begin{aligned} \Delta m &= 30, e_{nw} = 903; \Delta m = 23, e_{nw} = 554; \\ \Delta m &= 15, e_{nw} = 254 \end{aligned}$$

Similarly to the method used with lateral current, we have received the following parabola equation (64) which refers to the standstill of main current:

$$e_{nw} = 0,8237 (\Delta m)^2 + 6,191 (\Delta m) - 24 \quad (64)$$

### 10.2. Curvilinear pentagon

The vertexes of the curvilinear pentagon (Fig. 9) are points: O, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, G<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>. The section A<sub>2</sub> – B<sub>1</sub> of the parabola referring to the standstill of lateral current gives the condition:  $\sigma_b = 1$  at the mass flux of lateral outflow  $\Delta m$  from 0 to 30 kg dry air/s. The section of the X-axis O- A<sub>3</sub> and the section A<sub>3</sub> – G<sub>1</sub> of the parabola referring to the standstill of main current give the condition:  $\sigma_w = 1$  at the mass flux of lateral outflow  $\Delta m$  from 0 to 2,82 and from 2,82 to 30 kg dry air/s respectively.

Zgodnie z drugim wzorem (20) i wzorami (27a), (29a) punktu F na osi rzędnych układu (rys. 9) dotyczą stopnie bezpieczeństwa:  $\sigma_b = 7,3037$ ,  $\sigma_w = 4,7594$  odnoszące się do pierwszej struktury topologicznej (rys. 2).

Wszystkich punktów obszaru powyżej paraboli bezruchu prądu bocznego ( $\sigma_b = 1$ ) dotyczą warunki:  $\sigma_b > 1$ ,  $\sigma_w > 1$ . W przypadku ich spełnienia zachowane są pierwotne kierunki obu prądów bocznego i głównego.

Do wszystkich punktów wnętrza pięciokąta odnoszą się warunki:  $\sigma_b < 1$ ,  $\sigma_w > 1$ . W przypadku ich spełnienia odwrócony jest prąd boczny, a zachowany pierwotny kierunek prądu głównego.

Wszystkich punktów obszaru poniżej paraboli bezruchu prądu głównego ( $\sigma_w = 1$ ) dotyczą warunki:  $\sigma_b < 1$ ,  $\sigma_w < 1$ . W przypadku ich spełnienia odwrócone są oba prądy boczny i główny.

## 11. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

**11.1.** Dla oczka pierwszej struktury topologicznej (rys. 2) systemu wentylacji (rys. 1), obejmującej bocznicę:  $w_1, w_2, z_1, z_2$ , ważne jest równanie oczkowe:

$$e_u + e_{nz} - e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (65)$$

Podstawiając do lewej L i prawej P strony równania (65) wartości adekwatnych wielkości podanych na rysunku 2, otrzymujemy:  $L = 5540+943-661=5822$ ,  $P = 1220+1265+2867+470 = 2822$ .

Wypadkowy ciąg naturalny określony drugim wzorem (20) jest dodatni, przeto znak minus występujący przed ostatnim składnikiem lewej strony równania (65) oznacza, że wymieniony ciąg naturalny pracuje niezgodnie z wentylatorem głównym.

**11.2.** Dla wymienionego oczka drugiej, czwartej i szóstej struktury topologicznej z bezruchem prądu głównego (rys. 3, rys. 5, rys. 7) oraz dla trzeciej, piątej i siódmej struktury topologicznej z bezruchem prądu bocznego (rys. 4, rys.6, rys. 8) słuszne jest równanie oczkowe:

$$e_u + e_{nz} + e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (66)$$

Na przykład podstawiając wartości adekwatnych wielkości dotyczących drugiej struktury (rys. 3) i trzeciej struktury (rys. 4) oraz postępując analogicznie jak w przypadku równania (65), otrzymujemy:

According to the second formula (20) and formulas (27a), (29a) the F point on the Y-axis of the system (Fig. 9) is referred to by safety degrees:  $\sigma_b = 7,3037$ ,  $\sigma_w = 4,7594$  which are related to the first topological structure (Fig. 2).

All points of the area above the parabola of lateral current ( $\sigma_b = 1$ ) are referred to by the conditions:  $\sigma_b > 1$ ,  $\sigma_w > 1$ . If these conditions are fulfilled, original directions of both lateral and main current are maintained.

All points inside the pentagon are referred to by the conditions:  $\sigma_b < 1$ ,  $\sigma_w > 1$ . If these conditions are fulfilled, lateral current is reversed, while the original direction of main current is maintained.

All points of the area below the parabola of main current standstill ( $\sigma_w = 1$ ) are referred to by the conditions:  $\sigma_b < 1$ ,  $\sigma_w < 1$ . If these conditions are fulfilled, both lateral and main current are reversed.

## 11. ANALYSIS OF RESULTS

**11.1.** The following loop equation is valid for the loop of the first topological structure (Fig. 2) of the ventilation system (Fig. 1) comprising the splits:  $w_1, w_2, z_1, z_2$ :

$$e_u + e_{nz} - e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (65)$$

By substituting appropriate quantities from Fig. 2 into the left L and the right P side of equation (65), we obtain the following:  $L = 5540+943-661=5822$ ,  $P = 1220+1265+2867+470 = 2822$ .

The resultant natural draught defined by the second formula (20) is positive, thus the minus standing before the last component of the left side of equation (65) means that the mentioned natural draught does not work in compliance with the main fan.

**11.2.** The following loop equation is valid for the mentioned loop of the second, fourth and sixth topological structure with main current standstill (Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7) and for the third, fifth and seventh topological structure with lateral current standstill (Fig. 4, Fig. 6, Fig. 8):

$$e_u + e_{nz} + e_{nw} = e_{fw1} + e_{fw2} + e_{fz1} + e_{fz2} \quad (66)$$

For example, introducing the values of adequate quantities referring to the second structure (Fig. 3) and the third structure (Fig. 4), and following the procedure from equation (65), we obtain the following:

- dla struktury (rys.3):  $L = 7006 + 623 + 903 = 8532$ ,  
 $P = 0 + 6631 + 208 + 1693 = 8532$ ,
- dla struktury (rys.4):  $L = 1782 + 674 + 1484 = 3940$ ,  
 $P = 315 + 1169 + 2057 + 399 = 3940$ .

Wypadkowe ciągi naturalne  $e_{nw}$  określone drugimi wzorami (31), (40) są dodatnie, wobec czego znak plus występujący przed ostatnim składnikiem lewej strony równania (66) oznacza, że wymieniony ciąg naturalny pracuje zgodnie z wentylatorem głównym.

Z analizy struktur topologicznych – opartej na zakreskowanych wentylatorach przedstawiających rozłożone wypadkowe ciągi naturalne jako wielkości skupione – wynika, że wypadkowy ciąg naturalny  $e_{nz}$  generowany w oczku zewnętrznym,  $z$ , struktur od rys. 3 do rys. 8, jak i wypadkowy ciąg naturalny  $e_{nw}$  generowany w oczku wewnętrznym,  $w$ , struktur od rys. 2 do rys. 8 pracują zgodnie z wentylatorem głównym.

**11.3.** Pięciokąt krzywoliniowy (rys. 9) oparty jest na założeniu, że powietrze kopalniane jest mieszaniną pary wodnej, kropelek ciekłej wody i suchego powietrza kopalnianego, którego skład chemiczny zależy od miejsca (zestaw. 1 do 7).

Korzystając z następującej jednostki miary pola w układzie współrzędnych (rys. 9):

$$(JP) = 2,5 \text{ kg p.s.} / \text{s} \cdot 100 \text{ J/kg p.s.} = 250 \text{ J/s} = 0,25 \text{ kW}$$

i całkując:

- a) prawą stronę równania (63) od  $\Delta r\&= 0$  do  $\Delta r\&= 30$ , otrzymujemy następujące pole obszaru poniżej krzywej bezruchu prądu bocznego:

$$P_b = 19207,5 (JP) \text{ oraz moc } N_b = 4801,875 \text{ kW},$$

- b) prawą stronę równania (64) od  $\Delta r\&= 2,82$  do  $\Delta r\&= 30$ , otrzymujemy następujące pole obszaru poniżej krzywej bezruchu prądu głównego:

$$P_w = 9516,156 (JP) \text{ oraz moc } N_w = 2379,039 \text{ kW}.$$

Wnętrze pięciokąta krzywoliniowego (rys. 9) dotyczy następujące pole  $P$  i moc  $N$ :

$$P = P_b - P_w = 19207,5 - 9516,156 = 9691,344 (JP) \quad (65)$$

$$N = N_b - N_w = 4801,875 - 2379,039 = 2422,836 \text{ kW} \quad (66)$$

**11.4.** Jeśli powietrze kopalniane jest traktowane jako mieszanina pary wodnej, kropelek ciekłej wody i czystego powietrza suchego [7], to w układzie współrzędnych  $\Delta r\&, e_{mw}$  (rys. 10)

- a) przez punkty  $B_1, B_2, B_3$  odpowiednio o współrzędnych:

$$\begin{aligned} \Delta r\&= 30, e_{mw} = 1486; \Delta r\&= 20, e_{mw} = 736; \\ \Delta r\&= 10, e_{mw} = 356 \end{aligned} \quad (67)$$

- for the structure (Fig. 3):  $L = 7006 + 623 + 903 = 8532$ ,  $P = 0 + 6631 + 208 + 1693 = 8532$ ,
- for the structure (Fig. 4):  $L = 1782 + 674 + 1484 = 3940$ ,  $P = 315 + 1169 + 2057 + 399 = 3940$ .

The resultant natural draughts  $e_{nw}$  defined by the second formulas (31), (40) are positive, thus the plus standing before the last component of the left side of equation (66) means that the mentioned natural draught works in compliance with the main fan.

The analysis of topological structures – based on shaded fans which present the distributed resultant natural draughts as lumped quantities – shows that both the resultant natural draught  $e_{nz}$  generated in the external loop,  $z$ , of the structures from Fig. 3 to Fig. 8, and the resultant natural draught  $e_{nw}$  generated in the internal loop,  $w$ , of the structures from Fig. 2 to Fig. 8 work in compliance with the main fan.

**11.3.** The curvilinear pentagon (Fig. 9) is based on the assumption that the mine air is a mixture of water vapour, liquid water droplets and dry mine air, whose composition depends on the location (Lists from 1 to 7).

Using the following field measurement unit in a coordinate system (Fig. 9):

$$(JP) = 2,5 \text{ kg dry air/s} \cdot 100 \text{ J/kg dry air} = 250 \text{ J/s} = 0,25 \text{ kW}$$

and integrating:

- a) the right side of equation (63) from  $\Delta r\&= 0$  to  $\Delta r\&= 30$ , we achieve the following area below the curve of lateral current standstill:

$$P_b = 19207,5 (JP) \text{ and power } N_b = 4801,875 \text{ kW},$$

- b) the right side of equation (64) from  $\Delta r\&= 2,82$  to  $\Delta r\&= 30$ , we achieve the following area below the curve of main current standstill:

$$P_w = 9516,156 (JP) \text{ and power } N_w = 2379,039 \text{ kW}.$$

The inside of the curvilinear pentagon (Fig. 9) is referred to by the following field  $P$  and power  $N$ :

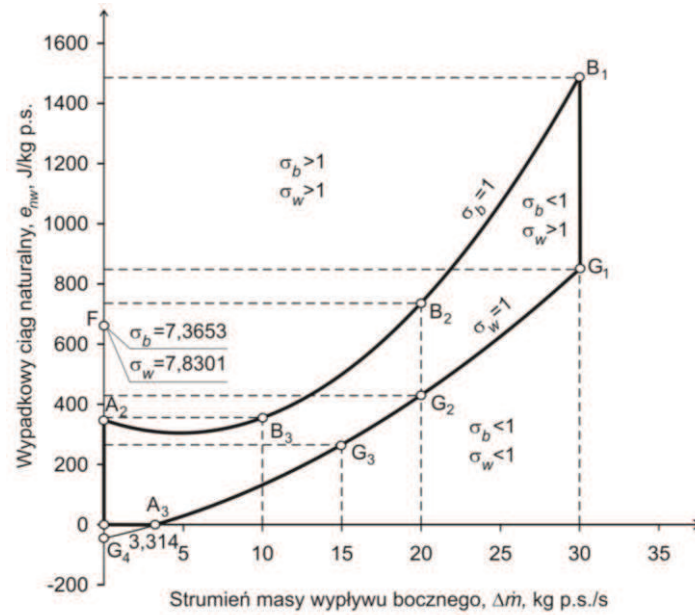
$$P = P_b - P_w = 19207,5 - 9516,156 = 9691,344 (JP) \quad (65)$$

$$N = N_b - N_w = 4801,875 - 2379,039 = 2422,836 \text{ kW} \quad (66)$$

**11.4.** If mine air is treated as a mixture of water vapour, liquid water droplets and clean dry air [7], then in the coordinate system  $\Delta r\&, e_{mw}$  (Fig. 10)

- a) through the points  $B_1, B_2, B_3$  with the following coordinates, respectively:

$$\begin{aligned} \Delta r\&= 30, e_{mw} = 1486; \Delta r\&= 20, e_{mw} = 736; \\ \Delta r\&= 10, e_{mw} = 356 \end{aligned} \quad (67)$$



Rys. 10. Pięciokąt krzywoliniowy – skład chemiczny czystego powietrza suchego w każdej strukturze topologicznej systemu wentylacji (rys. 1) nie zależy od miejsca  
 Fig. 10. Curvilinear pentagon – chemical composition of dry mine air in each topological structure of the ventilation system (Fig. 1) does not depend on the location

b) przez punkty  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  odpowiednio o współrzędnych:

$$\Delta m = 30, e_{mw} = 848; \Delta m = 20, e_{mw} = 429; \\ \Delta m = 15, e_{mw} = 265$$

przebiega krzywa bezruchu prądu głównego o równaniu:

$$e_{mw} = 0,60667(\Delta m)^2 + 11,567(\Delta m) - 45 \quad (68)$$

Całkując:

a) prawą stronę równania (67) od  $\Delta m = 0$  do  $\Delta m = 30$ , otrzymujemy następujące pole obszaru poniżej krzywej bezruchu prądu bocznego:

$$P_b = 19155,0 (JP) \text{ oraz moc } N_b = 4788,750 \text{ kW} \quad (69)$$

b) prawą stronę równania (68) od  $\Delta m = 3,314$  do  $\Delta m = 30$ , otrzymujemy pole obszaru poniżej krzywej bezruchu prądu głównego:

$$P_w = 9516,156 (JP) \text{ oraz moc } N_w = 2349,350 \text{ kW} \quad (70)$$

Wnętrze pięciokąta krzywoliniowego (rys. 10) dotyczą następujące pole  $P$  i moc  $N$ :

$$P = P_b - P_w = 19155,0 - 9393,4 = 9761,6 (JP) \quad (71)$$

$$N = N_b - N_w = 4788,750 - 2348,350 = 2440,400 \text{ kW} \quad (72)$$

b) through the points  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  with the following coordinates, respectively:

$$\Delta m = 30, e_{mw} = 848; \Delta m = 20, e_{mw} = 429; \\ \Delta m = 15, e_{mw} = 265$$

there runs a curve of main current standstill which has the following equation:

$$e_{mw} = 0,60667(\Delta m)^2 + 11,567(\Delta m) - 45 \quad (68)$$

Integrating:

a) the right side of equation (67) from  $\Delta m = 0$  to  $\Delta m = 30$ , we achieve the following area below the curve of lateral current standstill:

$$P_b = 19155,0 (JP) \text{ and power } N_b = 4788,750 \text{ kW} \quad (69)$$

b) the right side of equation (68) from  $\Delta m = 3,314$  to  $\Delta m = 30$ , we obtain the following area below the curve of main current standstill:

$$P_w = 9516,156 (JP) \text{ and power } N_w = 2349,350 \text{ kW} \quad (70)$$

The inside of the curvilinear pentagon (Fig. 10) is referred to by the following field  $P$  and power  $N$ :

$$P = P_b - P_w = 19155,0 - 9393,4 = 9761,6 (JP) \quad (71)$$

$$N = N_b - N_w = 4788,750 - 2348,350 = 2440,400 \text{ kW} \quad (72)$$

## 12. WNIOSKI

Pięciokąt krzywoliniowy (rys. 9) oparty jest – zgodnie z rzeczywistością – na składzie chemicznym suchego powietrza kopalnianego zależnym od miejsca, podanym w zestawieniach od 1 do 7. W przypadku pięciokąta krzywoliniowego (rys. 10) zamiast suchego powietrza kopalnianego korzysta się z czystego powietrza suchego (czynnika termodynamicznego), którego skład chemiczny nie zależy od miejsca. Toteż bliższy rzeczywistości jest pięciokąt (rys. 9) niż pięciokąt (rys. 10). Oba te pięciokąty dotyczą tylko powolnych turbulentnych ustalonych przepływów. Nie mają one miejsca w przypadku wyrzutów gazów.

Dla systemu wentylacji (rys. 1) wielkości (71), (72) są o 0,7127% większe od adekwatnych wielkości (65), (66). Zasadne jest podjęcie adekwatnych badań, zwłaszcza w kopalniach metanowych o schodzącym / wznoszącym przewietrzaniu robót wydobywczych.

### Literatura

1. *Budryk W.*: Znaczenie analizy wypadków pożarowych dla zmniejszenia katastrof górniczych. Przegląd Górniczy, nr 9, 1957, s. 401-406.
2. *Bystroń H.*: Podstawy schematu potencjalnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace GIG. Kom. nr 421. Wydaw. Śląsk. Katowice, 1969, s.1-123.
3. *Bystroń H.*: Stan pożaru, zapalenie i wybuch gazów podczas aktywnego i pasywnego gaszenia. Archiwum Górnictwa, t. 24, z. 1, 1997, s. 3-24.
4. *Bystroń H.*: An approach to mine ventilation based on the aerodynamic potential of ventilating air as a mixture of dry air, water vapour and liquid water droplets. Proceedings of the International Mine Ventilation Congress. Chapter 1. June 17-22, 2001. Cracow, Katowice, Poland.
5. *Bystroń H.*: Temperatura wirtualna suchego powietrza wentylacyjnego i jej zastosowanie w obliczeniach wentylacji kopalń. Przegląd Górniczy, nr 5, 2002, s. 8-17.
6. *Bystroń H.*: Zastosowanie temperatury wirtualnej suchego powietrza wentylacyjnego jako nieodzownej pomocy w obliczeniach wentylacji kopalń podczas otwartych pożarów ustalonych, wpływów metanu i dwutlenku węgla. Materiały czwartej konferencji: Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych. Duszniki Zdrój, 25-28 czerwca 2002, s.125-144.
7. *Bystroń H.*: Podejście termodynamiczne do odwracania się prądów powietrznych bocznego i głównego w kopalni o schodzącym przewietrzaniu projektowanych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, 2008, nr 10, s. 5-23.
8. *Bystroń H.*: Odwracanie się prądów powietrznych bocznego i głównego w systemie wentylacji kopalni o schodzącym przewietrzaniu czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, nr 11, 2009, s. 5-22.
9. *McPherson M.J.*: Psychrometry: the study of moisture in air. Subsurface ventilation and environmental engineering. London, New York 1993, p. 491-521.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Stanisław Wasilewski

## 12. CONCLUSIONS

In reality, the curvilinear pentagon (Fig. 9) is based on the chemical composition of dry mine air which depends on the location. The composition is presented in Lists from 1 to 7. In the case of the curvilinear pentagon (Fig. 10), clean dry air (thermodynamic factor) is used instead of dry mine air, and the composition of the former does not depend on the location.

Therefore, the pentagon (Fig. 9) is closer to reality than the pentagon (Fig. 10). Both pentagons refer only to slow turbulent steady flows. These do not happen in the case of gas outbursts.

For the ventilation system (Fig. 1), the quantities (71), (72) are 0,7127% higher than appropriate quantities (65), (66). It is justifiable to undertake appropriate research, particularly in methane mines with descending/ascending ventilation of mining work.

### References

1. *Budryk W.*: Znaczenie analizy wypadków pożarowych dla zmniejszenia katastrof górniczych. Przegląd Górniczy, No 9, 1957, pp. 401-406.
2. *Bystroń H.*: Podstawy schematu potencjalnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace GIG. Kom. No 421. Wydaw. „Śląsk”. Katowice, 1969, pp.1-123.
3. *Bystroń H.*: Stan pożaru, zapalenie i wybuch gazów podczas aktywnego i pasywnego gaszenia. Archiwum Górnictwa, vol.24, part 1, 1997, pp. 3-24
4. *Bystroń H.*: An approach to mine ventilation based on the aerodynamic potential of ventilating air as a mixture of dry air, water vapour and liquid water droplets. Proceedings of the International Mine Ventilation Congress. Chapter 1. June 17-22, 2001. Cracow, Katowice, Poland.
5. *Bystroń H.*: Temperatura wirtualna suchego powietrza wentylacyjnego i jej zastosowanie w obliczeniach wentylacji kopalń. Przegląd Górniczy, No 5, 2002, pp. 8-17.
6. *Bystroń H.*: Zastosowanie temperatury wirtualnej suchego powietrza wentylacyjnego jako nieodzownej pomocy w obliczeniach wentylacji kopalń podczas otwartych pożarów ustalonych, wpływów metanu i dwutlenku węgla. Materiały czwartej konferencji: Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych. Duszniki Zdrój, 25-28 June 2002, pp.125-144.
7. *Bystroń H.*: Podejście termodynamiczne do odwracania się prądów powietrznych bocznego i głównego w kopalni o schodzącym przewietrzaniu projektowanych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, No 10, 2008, pp. 5-23.
8. *Bystroń H.*: Odwracanie się prądów powietrznych bocznego i głównego w kopalni o schodzącym przewietrzaniu czynnych nadpoziomowych robót wydobywczych w czasie pożarów węgla w schodzącym prądzie niezależnym. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, No 11, 2009, pp. 5-22.
9. *McPherson M.J.*: Psychrometry: the study of moisture in air. Subsurface ventilation and environmental engineering. London, New York 1993, pp. 491-521.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СУХОГО ШАХТНОГО ВОЗДУХА  
В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ РЕВЕРСИРОВАНИЯ БОКОВОЙ  
И ОСНОВНОЙ СТРУЙ ВОЗДУХА В ШАХТЕ С НИСХОДЯЩИМ ПРОВЕТРИВАНИЕМ  
ДОБЫЧНЫХ РАБОТ ВЫШЕ ОТКАТОЧНОГО ГОРИЗОНТА ВО ВРЕМЯ ПОЖАРОВ УГЛЯ  
В НИСХОДЯЩЕЙ ОБОСОБЛЕННОЙ СТРУЕ

Шахтный воздух считали смесью водяного пара, капелек жидкой воды и сухого шахтного воздуха, его турбулентные течения – одномерными, определенными с обменом массы и тепла. Приведено химический состав сухого шахтного воздуха и его виртуальную температуру. Ее введено вместо температуры сухого термометра, существующей в адекватных психрометрических формулах, термодинамическом методе и теории аэродинамического потенциала. По поводу отсутствия адекватной реальной шахты, объектом испытания приняли семь топологических структур системы вентиляции виртуальной шахты с нисходящим проветриванием двух групп добычных работ выше откаточного горизонта. Воспользовались прежней работой, где считали шахтный воздух смесью водяного пара и чистого сухого воздуха, химический состав которого не зависит от места. Для названных топологических структур выведены степени безопасности, а также условия сохранения первичных направлений боковой и основной струй и их неподвижности. Эти степени и условия графически представлено с помощью криволинейного пятиугольника, который сравнено с пятиугольником, полученным в упомянутой ранней работе.