

Ryszard FRACZEK

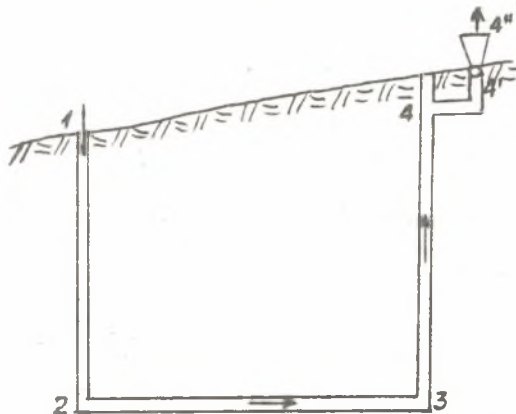
Wydział Górniczy
Politechniki Śląskiej

PRZYGOTOWANIE DANYCH DO OBLICZENIA DEPRESJI CIEPLNEJ
W PROJEKTOWANEJ KOPALNI

Streszczenie. W pracy omówiono metody BUDRYKA i BYSTRONIA dotyczące obliczeń depresji cieplnej kopalni, a następnie podano wkład St. OCHĘDUSZKI w zakresie interpretacji depresji w metodzie BUDRYKA.

1. Sposób wyznaczania depresji cieplnej

Wymiana powietrza w wyrobiskach górniczych odbywa się za pomocą wentylatorów lub z wykorzystaniem depresji naturalnej (ciągu naturalnego). Znaczenie depresji naturalnej jako źródła ruchu powietrza wzrasta wraz ze wzrostem głębokości kopalni, gdyż większa głębokość wyrobiska powoduje wzrost wymiany ciepła między coraz cieplejszym górotworem a przepływającym powietrzem. Problem wpływu czynników termicznych na przewietrzanie kopalń był znany i wykorzystany bardzo dawno, ale dopiero prace Budryka [1, 2, 3] oparte na prawach termodynamiki stanowią ogromny postęp w światowej nauce wentylacji kopalń. W myśl teorii Budryka depresję cieplną będącą podstawowym składnikiem depresji naturalnej występującą w określonym oczku (obwodzie zamkniętym) kopalnianej sieci wentylacyjnej można wyrazić za pomocą pewnego pola w układzie (v_t, p) , gdzie: v_t - objętość właściwa powietrza, p - ciśnienie statyczne, bezwzględne (rys. 2). Teoria Budryka została rozwinięta przez Bystronia [4, 5], który podał sposób wyznaczania depresji cieplnej przy zastosowaniu układu (s, T) ; s - entropia właściwa, T - temperatura bezwzględna powietrza. Natomiast Barczyk [1] podał sposób wyznaczania depresji cieplnej przy użyciu układu (t, p) ; t - temperatura powietrza w skali Celsjusa. Zagadnieniu tzw. depresji cieplnej w aerologii górniczej poświęcił też pracę St. Ochęduszko [9]. W tym celu, stosując I i II zasadę termodynamiki do nierozgałęzionej sieci wentylacyjnej (rys.1), wykazał, że pole prawobieżnego obiegu termodynamicznego, któremu podlega powietrze przy przewietrzaniu naturalnym kopalni, wyraża pracę tarcia w układzie (v, p) lub przedstawił ciepło tarcia w układzie (s, T) . Jeśli ruch powietrza w kopalni intensyfikuje się w wyniku zastosowania wentylatora głównego, to wspomniane pole obiegu wyraża tylko różnicę między pracą tarcia a wkładem pracy wentylatora. Idąc dalej za myślą Prof. Ochęduszki na-



Rys. 1. Schemat nierozgałęzionej sieci wentylacyjnej.

leży sądzić, że tylko część tego pola stanowić będzie źródło ruchu powietrza w sieci wentylacyjnej.

Depresję cieplną Budryk traktował jako fikcję, dla której określa się wartość depresji mechanicznej, przy której przez dany przewód przepływa taka sama ilość powietrza jak i skutkiem wpływów cieplnych [3]. Wyznaczenie wartości depresji cieplnej w kopalni czynnej polega na wykonaniu pomiarów temperatury i ciśnienia powietrza na drodze od wlotu do kopalni do jej wylotu. Następnie wykonuje się obliczenie wykładników politropy:

$$m_{1-2} = \frac{1}{1 - \frac{\lg T_1 - \lg T_2}{\lg p_1 - \lg p_2}} \quad (1)$$

oraz pracę techniczną

$$L_{1-2} = - \left(\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{T} \right)_{m_{1-2}} = \frac{m_{1-2}}{m_{1-2} - 1} R(T_1 - T_2), \quad \text{J/kg} \quad (2)$$

Dla odcinków, gdzie ruch powietrza przebiega izotermicznie

$$L = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3)$$

gdzie:

m_{1-2} - wykładnik politropy,

R - stała gazowa powietrza, J/kgK,

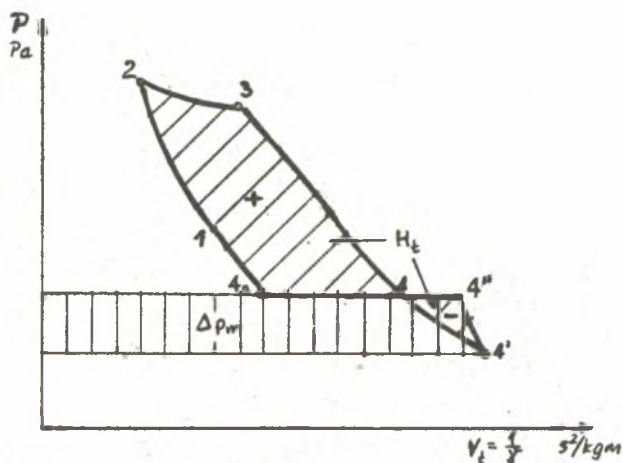
p_1, p_2 - ciśnienie statyczne powietrza na wlocie i wylocie odcinka, Pa,

ρ - gęstość powietrza, kg/m³.

Depresja cieplna wyniesie:

$$H_t = -\sum \int \frac{dp}{\rho} = \sum L. \quad (4)$$

Obliczenie depresji cieplnej można także przeprowadzić metodą graficzną. W tym celu nanosi się punkty pomiarowe na wykres (v, p) a następnie oblicza powierzchnie (pracę techniczną) - rys. 2. W pracy Bystronia [5] za-



Rys. 2. Wykres depresji cieplnej H_t i depresji mechanicznej Δp

miast pracy technicznej określa się dla każdego odcinka wyrobiska różnicę ciśnień powietrza wynikającą z różnicy gęstości powietrza, korzystając z uproszczonego równania Bernoulliego:

$$p = -(p_{sw} - p_{sd}) - g \cdot \rho_m (z_w - z_d), \quad \text{Pa} \quad (5)$$

gdzie:

p_{sw}, p_{sd} - ciśnienie (statyczne bezwzględne) powietrza suchego na wlocie i wylocie wyrobiska, Pa,

z_w, z_d - wysokość niwelacyjna wlotu i wylotu odcinka wyrobiska, m,

ρ_m - średnia gęstość powietrza, kg/m³.

Ciśnienie statyczne wyznacza się z zależności:

$$p_s = p_o \left[1 + \frac{g}{c_p T_v} (z_o - z) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (6)$$

gdzie:

- p_o - ciśnienie (statyczne) w powietrzu na zrębie szybu, Pa,
- c_p - ciepło właściwe powietrza, J/kgK,
- T_v - temperatura wirtualna (zastępcza) powietrza na zrębie szybu, K,
- $z_o - z$ - różnica wysokości niwelacyjnej między danym punktem a zrębem szybu, m,
- κ - wykładnik izentropy powietrza suchego.

Metoda ta pozwala określić wielkość depresji cieplnej w wyrobiskach pionowych lub nachylonych. W kopalni istnieje szereg wyrobisk poziomych lub słabo nachylonych, gdzie zachodzi intensywna wymiana ciepła mająca także wpływ na ruch powietrza, czego nie uwzględnia powyższa metoda. W podanych metodach podstawową daną wejściową stanowi temperatura powietrza. Dla kopalni projektowanej wyznaczenie depresji cieplnej jest trudniejsze, gdyż wymaga wcześniejszego wyznaczenia temperatury i ciśnienia powietrza [4, 5, 8, 10]. Dlatego w oparciu o najnowsze wyniki badań podana zostanie metoda prognozy temperatury i wilgotności powietrza w wyrobisku górniczym.

2. Obliczanie temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach górniczych

W literaturze światowej podany jest szereg metod prognozowania temperatury powietrza. Zastosowanie każdej z nich wymaga przygotowania odpowiednich danych wejściowych. Najlepsze wyniki uzyskuje się stosując metody, w których uwzględniono wymianę wilgoci między płynącym powietrzem a otoczeniem (górotworem, wodą zalegającą na ściankach wyrobiska czy wodą użytą w procesie zraszania). W celu uchwycenia ilościowego procesu wymiany wilgoci autor [6] przeprowadził szereg badań w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, dzięki którym uzyskał potrzebne dane wejściowe do metody Woropajewa i Szczerbania. Przyrost temperatury powietrza w wyrobisku górniczym przy zastosowaniu metody Woropajewa oblicza się zależnością [7,9],

$$t_2 = t_1 e^{-cb} + e \cdot G \cdot \sin \beta + (1 - e^{cb}) \left(v - \frac{s \cdot G \cdot \sin \beta}{cb} + \frac{\Delta t_d}{b} \right), \quad ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

gdzie:

- c - współczynnik określający procentowy udział energii powodującej przyrost temperatury powietrza,
- s - długość wyrobiska, m,
- G - gradient geotermiczny, K/m,
- β - kąt nachylenia wyrobiska, °,
- v - temperatura pierwotna skał, °C,
- Δt_d - przyrost temperatury powietrza spowodowany istnieniem dodatkowych źródeł ciepła, K.

Liczbę bezwymiarową b oblicza się z zależności:

$$b = \frac{s \cdot \beta \cdot \lambda}{m \cdot c_p \cdot r_w} \frac{(1 + 0,27 \sqrt[4]{Fo})}{0,9 \sqrt{Fo} + 1/Bi} \quad (8)$$

gdzie:

- B - obwód wyrobiska, m,
- λ - współczynnik przewodności cieplnej skał, W/mK,
- m - strumienia masy powietrza, kg/s,
- r_w - promień wyrobiska, m,
- Fo - liczba Fouriera,
- Bi - liczba Biota.

Współczynnik określający procentowy udział energii powodującej wzrost temperatury powietrza obliczyć można z zależności empirycznej [6]:

szyby:

$$c = \frac{1}{1 + \frac{x_1 r}{t_1 c_p} \left[\exp\left(1,9 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m_p} \text{Re} \text{Gu}^{-0,1}\right) - 2 \right]} \quad \text{gdy } K < 0 \quad (9)$$

wyrobiska kamienne:

$$c = \frac{1}{1 + \frac{x_1 r}{t_1 c_p} \left[\exp\left(4,3 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m_p} \text{Re}^{0,9} \text{Gu}^{0,5} (d/s)^{0,9}\right) - 2 \right]} \quad \text{gdy } K < 0 \quad (10)$$

wyrobiska węglowe

$$c = \frac{1}{1 + \frac{r x_1}{c_p t_1} \left[\exp\left(9,7 \cdot 10^{-7} \frac{s}{m_p} \text{Re}^{0,9} K^{-0,1} (d/s)^{0,95} (z/d)^{0,65}\right) - 2 \right]} \quad K < 0 \quad (11)$$

ściany:

$$c = \frac{1}{1 + \frac{r}{c_p t_1} x_1 \left[\exp \left(4,8 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m_p} Re^{0,73} \left(\frac{z}{d} \right)^{0,34} \left(\frac{d}{s} \right)^{0,84} \right) - 2 \right]} \quad \text{gdy } K < 0 \quad (12)$$

gdzie:

x_1 - wilgotność właściwa powietrza, g/kg,

Re - liczba Reynoldsa,

Gu - liczba Guchmana,

$K = \frac{t - v}{t_s + 273}$ - parametr temperaturowy,

d - średnica hydrauliczna wyrobiska, m,

z - głębokość zalegania wyrobiska, m,

r - ciepło parowania wody, kJ/kg.

Podane zależności (9-12) słuszne są dla warunku $K < 0$, tzn. dla przypadku, gdy temperatura skał jest wyższa od temperatury płynącego w wyrobisku powietrza. Warunek ten realizuje się w kopalniach głębokich. Ponadto skorzystać z tych zależności można w przypadku, gdy znana jest wilgotność właściwa powietrza (x_1) na wlocie do wyrobiska. Z tego względu równolegle z obliczeniem temperatury powietrza należy liczyć zmianę wilgotności powietrza z zależności podanych w pracy [6]:

szyby:

$$\Delta x = x_1 \left[\exp \left(2 \cdot 10^{-7} (Re)^K \left(\frac{s}{m_p} \right)^{0,1} \right) - 2 \right] \quad \text{gdy } K < 0 \quad (13)$$

wyrobiska kamienne:

$$\Delta x = x_1 \left[\exp \left(1 \cdot 10^{-4} Re^{0,95} Gu^{0,45} \left(\frac{d}{s} \right)^{0,85} \left(\frac{s}{m_p} \right) \right) - 2 \right] \quad \text{gdy } K < 0 \quad (14)$$

wyrobiska węglowe:

$$\Delta x = x_1 \left(\exp 4,9 \cdot 10^{-5} Re^{0,87} \frac{d}{m_p} - 2 \right), \quad \text{gdy } K < 0 \quad (15)$$

ściany:

$$\Delta x = x_1 \left[\exp 4,9 \cdot 10^{-5} Re^{0,76} \left(\frac{d}{s} \right)^{0,9} \left(\frac{z}{d} \right)^{0,2} \frac{s}{m_p} - 2 \right], \quad \text{gdy } K < 0 \quad (16)$$

Wilgotność właściwa powietrza na końcu wyrobiska wyniesie:

$$x_2 = x_1 + \Delta x$$

Ponieważ przy obliczeniu depresji cieplnej w podanych metodach używa się tzw. temperatury wirtualnej, można ją obliczyć mając daną wilgotność, m.in. z zależności [4]:

$$T_v = T_s + \varphi \cdot \xi$$

gdzie:

φ - wilgotność względna powietrza, %,

ξ - poprawka na temperaturę wirtualną, którą wyznacza się z tablicy.

Wilgotność względna można określić z zależności:

$$\varphi = \frac{x p}{(622 + x) p_p}, \quad (17)$$

gdzie:

p - ciśnienie powietrza, Pa,

p_p - ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia, Pa.

Pozostałe dane dotyczące: właściwości termicznych skał, wymiarów geometrycznych wyrobisk, dodatkowych źródeł ciepła, okresu przewietrzania wyrobisk należy przyjmować wg wskazówek podanych w pracach [7, 9].

Obliczenie temperatury i wilgotności powietrza w kopalni projektowanej jest o tyle skomplikowane, że wymaga wcześniejszego określenia strumieni powietrza płynących w poszczególnych bocznicach sieci wentylacyjnej. Dopiero zastosowanie EMC pozwala stosunkowo dokładnie obliczyć rozpiływ powietrza w sieci, temperaturę i ciśnienie bezwzględne powietrza [8]:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1_s + g \Delta z}{R_g \Delta T}}, \quad \text{Pa} \quad (18)$$

gdzie:

1_s - energia zużyta na pokonanie oporów wyrobiska, J/kg,

R_g - stała gazowa, J/kg K,

g - przyspieszenie grawitacyjne, m/s²,

Δz - różnica wysokości, m.

Mając temperaturę i ciśnienie powietrza można przystąpić do obliczenia depresji cieplnej. Oczywiście depresja cieplna spowoduje zmiany w rozplywie powietrza. W jednych wyrobiskach poplynie wiecej powietrza, w innych zaś mniej. Zmiana strumieni powietrza wplynie z kolei na zmianę jego temperatury.

Stosując metodę iteracyjną można obliczyć wielkość depresji cieplnej, oczywiście przy założeniu odpowiedniej dokładności obliczeń. W sieciach wentylacyjnych złożonych z setek bocznic wymaga to odpowiednio dużego nakładu pracy, a uzyskane wyniki niejednokrotnie wykazują duże odchyłki od wartości rzeczywistych (pomierzonych).

3. Zakończenie

Podany sposób obliczania temperatury i wilgotności powietrza w projektowanych sieciach wentylacyjnych pozwoli użytkownikom obliczyć depresję cieplną w kopalni projektowanej. Należy jednak mieć na uwadze, że same metody obliczenia depresji cieplnej wymagają dalszych studiów, gdyż - jak wykazuje praktyka - istnieją niejednokrotnie poważne rozbieżności między teorią a rzeczywistością. Zagadnienie to powinno być rozwiązywane nie tylko przez górników, ale także przez pracowników naukowych zajmujących się przeplwami oraz wymianę ciepła i masy.

LITERATURA

- [1] Budryk W.: Wentylacja kopalń. Wyd. Górniczo-Hutnicze, Katowice 1961.
- [2] Budryk W.: Wybór pism. PWN, Warszawa-Kraków 1976.
- [3] Budryk W.: Depresja cieplna. Przegląd Górniczo-Hutniczy 1979, nr 11-12.
- [4] Bystron H.: Podstawy schematu potencjalnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace GIG Kom, nr 471, 1969.
- [5] Bystron H.: Metody modelowe wyznaczania rozplywu powietrza w aktywnych sieciach wentylacyjnych. Przegląd Górniczy 1970, nr 10.
- [6] Frączek R.: Proces nawilżania powietrza w wyrobiskach górniczych w świetle rozważań teoretycznych i obserwacji w kopalniach. ZN Pol.Śl. Górnictwo z. 98, Gliwice 1979.
- [7] Frycz A., Frączek R.: Propozycja sposobu obliczania temperatury powietrza na projektowanych poziomach kopalń czynnych. Projekty-Problemy nr 10, 1976.
- [8] Miedwiediew B.J.: Tieplovyje osnovy wientilacji szacht pri normalnych i awaryjnych rieziwach prowietriwanija. "Wyszszaja szkoła", Kijew-Donieck 1978.
- [9] Ochęduszek St.: Termodynamiczny sens tak zwanej depresji cieplnej w aerologii górniczej. Archiwum Budowy Maszyn T, II, z. 1, 1959.
- [10] Roszczynialski W., Waclawik J.: Podstawy aerologii górniczej. AGH Kraków. Skrypt uczelniany nr 626, 1978.
- [11] Woropajew A.F.: Teorija tieploobmiena rudnoznogo wozducha i gornych porod w glubokich szachtach. Izd. "Niedra", Moskwa 1966.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЕПРЕССИИ В ПРОЕКТИРОВАННОЙ ШАХТЕ

Р е з ю м е

В статье обсуждены методы Будрыка и Быстрона; касающиеся вычисления тепловой депрессии шахты, а затем представлены достижения Ст. Охендужко в области интерпретации депрессии в методе Будрыка.

DATA PREPARATION WHEN COMPUTING HEAT DEPRESSION IN MINES DESIGN

S u m m a r y

Methodes developed by Budryk and Bystron used to calculations of mine heat depression are presented. St. Ochęduszek's contribution in interpretation of depression in Budryk's method is discussed.