

Uniwersalne cechy temperatury śląskiej „TŚ” w normowaniu czasu pracy i bezpieczeństwa cieplnego górników w środowiskach pracy kopalń głębokich

W artykule przeprowadzono analizę czterech wskaźników klimatu, efektywnej temperatury amerykańskiej, temperatury zastępczej klimatu, „cooling power” i temperatury śląskiej, pod kątem ich przydatności do wykorzystania w normowaniu czasu i bezpieczeństwa pracy w kopalniach. W układzie współrzędnych (ts; tw) temperatura termometru suchego i temperatura termometru wilgotnego wyznaczono izolinie wymienionych wskaźników. Podano propozycję normy klimatycznej dla górnictwa opartej na wartościach temperatury śląskiej „TŚ”, określającej bezpieczne dla zdrowia parametry klimatu i czas pracy górnika. $TŚ < 26\text{ °C}$ – nieograniczony czas pracy (8 godzin), $26\text{ °C} \leq TŚ < 30\text{ °C}$ – 6-ciogodzinny czas pracy, $TŚ \geq 30\text{ °C}$ – praca zabroniona z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczych. Udowodniono, że propozycja powyższej górniczej normy klimatycznej opartej na temperaturze śląskiej „TŚ” posiada znaczenie uniwersalne, ponieważ może być stosowana w kopalniach węgla, rud i soli.

1. WPROWADZENIE

W górnictwie polskim i światowym w normowaniu czasu pracy w kopalniach węgla i soli stosuje się wskaźniki klimatu. Wskaźnikami tymi są między innymi: kata-stopnie, temperatura efektywna amerykańska, temperatura zastępcza klimatu, „cooling power”. W niniejszym artykule proponuje się wprowadzić do górniczych norm i przepisów klimatycznych wskaźnik zwany „temperaturą śląską”, który mógłby zastąpić wyżej wymienione wskaźniki klimatu i obowiązywać we wszystkich podziemnych zakładach górniczych, czyli w kopalniach węgla, rud i soli. Wskaźniki klimatu łączą w sobie podstawowe parametry powietrza i otoczenia, czyli temperaturę, wilgotność i prędkość przepływu.

2. WYBRANE WSKAŹNIKI KLIMATU STOSOWANE W GÓRNICZYCH NORMACH KLIMATYCZNYCH

2.1. Temperatura efektywna – amerykańska

Temperatura efektywna amerykańska ATE [1, 2, 3, 5, 6] jest temperaturą nasyconego i nieruchomego powietrza, które posiada takie same właściwości chłodzące człowieka, jak rzeczywiste powietrze występujące w danym środowisku. Wskaźnik ten, porównujący klimat w środowisku, w którym przebywa człowiek, do temperatury powietrza nieruchomego i nasyconego, jest ważnym i wygodnym narzędziem oceny warunków klimatycznych panujących w danym miejscu pracy. Amerykańską temperaturę efektywną wy-

znacza się z nomogramów sporządzonych dla ludzi rozebranych (do połowy) i ubranych w normalną odzież roboczą w zależności od temperatur psychrometrycznych termometru suchego i wilgotnego oraz prędkości przepływu powietrza. Temperatura efektywna obowiązuje w niemieckich przepisach klimatycznych dla kopalń węgla. Graniczną dopuszczalną wartością temperatury efektywnej w górnictwie niemieckim w kopalniach węgla jest 30°C. W wyjątkowych przypadkach dopuszczalna jest praca w temperaturach efektywnych 30-32°C. Powyżej temperatury 32°C praca jest zabroniona z wyjątkiem akcji ratowniczej. Temperatura efektywna amerykańska określana jest w przedziale prędkości powietrza 0-3,5 m/s.

2.2. Temperatura zastępcza klimatu

Temperaturę zastępczą klimatu t_{zk} wyznacza się ze wzoru [1, 2, 3, 10]:

$$t_{zk} = 0,4t_s + 0,6t_w - w \quad (1)$$

gdzie:

t_s – temperatura termometru suchego, °C
 t_w – temperatura termometru wilgotnego, °C
 w – prędkość przepływu powietrza w m/s, pomnożona przez współczynnik przeliczeniowy wynoszący $1 \frac{s \cdot ^\circ C}{m}$.

Wskaźnik ten w Polsce stosowany jest w kopalniach, w których pracują maszyny samojezdne, czyli w kopalniach miedzi.

2.3. Cooling power

Cooling power [6], czyli siła chłodząca powietrza oddziaływująca na człowieka znajdującego się w środowisku o danym klimacie, zależy od trzech podstawowych sposobów wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, czyli od konwekcji, promieniowania cieplnego i parowania potu. Oblicza się ją ze wzoru:

$$CP = C + R + E \quad (2)$$

gdzie:

C – gęstość strumienia ciepła wymienianego przez ciało ludzkie z powietrzem przez konwekcję,
 R – gęstość strumienia ciepła wymienianego przez ciało ludzkie z otoczeniem przez promieniowanie,
 E – gęstość strumienia ciepła odbieranego przez powietrze z powierzchni skóry przez parowanie potu.

W obliczeniach „cooling power” przyjmuje się stałą bezpieczną temperaturę powierzchni ciała człowieka równą 35°C.

Szczegółowy wzór dla obliczania siły chłodzącej powietrza „cooling power” jest następujący [6, 9]:

$$CP = 17 \left(\frac{t_R}{2} + 290,7 \right)^3 10^{-8} (t_{SK} - t_R) + h_C (t_{SK} - t_S) + 0,0167 h_C (e_{SK} - e_S) \quad (3)$$

gdzie:

t_R – średnia temperatura promieniowania cieplnego otoczenia (przyjmuje się, że jest równa temperaturze powietrza), °C,
 t_S – temperatura powietrza, °C,
 t_{SK} – średnia temperatura skóry człowieka (przyjmuje się $t_{SK} = 35^\circ C$),
 h_C – współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję

$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, który oblicza się:

– dla konwekcji swobodnej:

$$h_C = 2,38 |t_{SK} - t_S|^{0,25},$$

– dla konwekcji wymuszonej:

$$h_C = 3,5 + 5,2w \quad \text{gd } w \leq 1 \text{ m/s,}$$

$$h_C = 8,7w^{0,6} \quad \text{gd } w > 1 \text{ m/s,}$$

e_{SK} – ciśnienie cząstkowe pary wodnej dla temperatury skóry, Pa,

e_S – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, Pa.

Wskaźnik klimatu „cooling power”, określający siłę chłodzącą powietrza i otoczenia w jednostkach gęstości wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a powietrzem i otoczeniem [W/m^2], wskazuje na rodzaj pracy i wysiłku fizycznego człowieka przebywającego w danym środowisku, czyli na jego wydatek energetyczny. Przyjmując więc według normy PN-EN 27243/2005 następujące średnie wartości wydatków energetycznych dla:

– odpoczynku $65 W/m^2$,
 – pracy lekkiej $100 W/m^2$,
 – pracy umiarkowanej $165 W/m^2$,
 – pracy ciężkiej $230 W/m^2$,

wskaźnik CP określa, jaką pracę można bezpiecznie wykonywać w danym klimacie.

2.4. Temperatura zastępcza śląska „TŚ” (temperatura śląska)

Temperaturę śląską [1, 2, 3, 4, 5] wyznacza się ze wzoru:

$$TŚ = 0,7 t_w + 0,3 t_s - (1,7 - \phi)\phi w \quad (4)$$

gdzie:

t_s – temperatura termometru suchego, °C
 t_w – temperatura termometru wilgotnego, °C
 ϕ – wilgotność względna powietrza, %

w – prędkość przepływu powietrza w m/s, pomnożona przez współczynnik przeliczeniowy wynoszący $1 \frac{s^{\circ}C}{m}$.

Wskaźnik klimatu, zwany temperaturą śląską, został wprowadzony ze względu na ograniczenie wpływu dużych prędkości przepływu powietrza na jego wartość. Zgodnie z ostatnim składnikiem wzoru (4) wpływ prędkości przepływu powietrza na wartość temperatury śląskiej jest zależny od wilgotności powietrza. Przykładowo dla powietrza nasyconego wspomniany wpływ prędkości powietrza na temperaturę śląską jest zmniejszony o 30%, zaś dla powietrza suchego ostatni składnik wzoru (4) jest równy zeru. Jeżeli do równania na temperaturę śląską wstawimy dopuszczalną prędkość powietrza w ścianie, czyli 5 m/s, to dla powietrza nasyconego ($\phi = 1$) wartość ostatniego składnika równania wyniesie $(1,7 - \phi)pw = 3,5^{\circ}C$. Dla wskaźnika t_{zk} niezależnie od wilgotności powietrza ostatni składnik w równaniu (1) wyniesie $w = 5^{\circ}C$. Te przykłady świadczą o tym, że w powietrzu nasyconym, dla występującej dużej prędkości powietrza „5 m/s”, temperaturę śląską równą $30^{\circ}C$ uzyskamy wtedy, gdy temperatura powietrza mierzona termometrem suchym i wilgotnym wyniesie $33,5^{\circ}C$, natomiast temperaturę zastępczą klimatu równą $30^{\circ}C$ uzyskamy wtedy, gdy tempera-

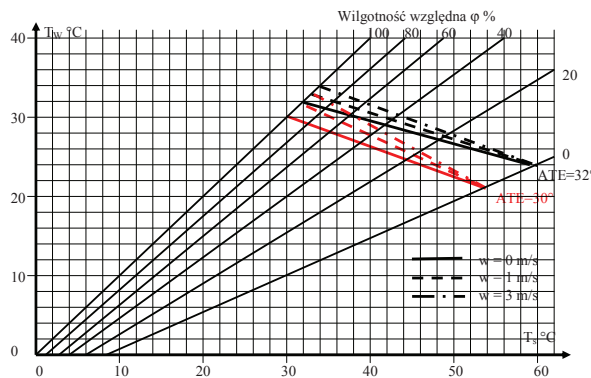
tura powietrza mierzona termometrem suchym i wilgotnym wyniesie $35^{\circ}C$. W przypadku prędkości powietrza 4 m/s temperatury powietrza nasyconego wyniosą odpowiednio $32,8^{\circ}C$ według temperatury śląskiej i $34^{\circ}C$ według temperatury zastępczej klimatu.

3. IZOLINIE WSKAŹNIKÓW KLIMATU

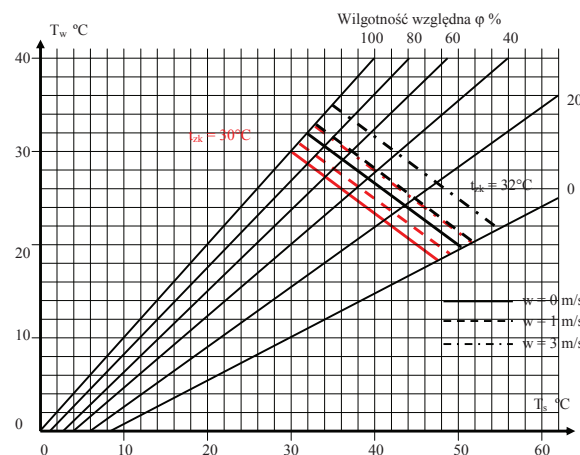
Wymienione wskaźniki klimatu, czyli efektywną temperaturę amerykańską, temperaturę zastępczą klimatu, cooling power i temperaturę śląską, można przedstawić na wykresach w postaci izolinii dla wybranych wartości [1, 2, 3, 4, 5]. Na rysunkach 1-4 przedstawiono izolinie wskaźników klimatu dla wartości:

- ATE = $30^{\circ}C$ i ATE = $32^{\circ}C$ (rys. 1),
- $t_{zk} = 30^{\circ}C$ i $t_{zk} = 32^{\circ}C$ (rys. 2),
- CP = $100 W/m^2$ i CP = $165 W/m^2$ (rys. 3),
- TŚ = $30^{\circ}C$ i TŚ = $32^{\circ}C$ (rys. 4).

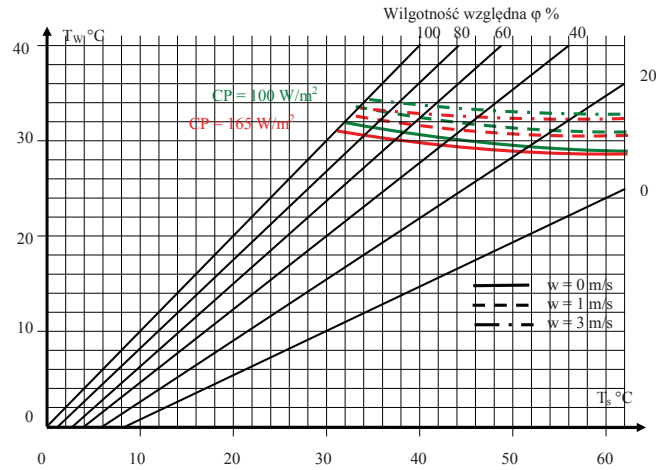
Z przebiegów izolinii pokazanych na rysunkach od 1 do 4 można odczytać temperatury powietrza odpowiadające przyjętym wartościom wskaźników klimatu w zależności od wilgotności względnej powietrza i prędkości przepływu.



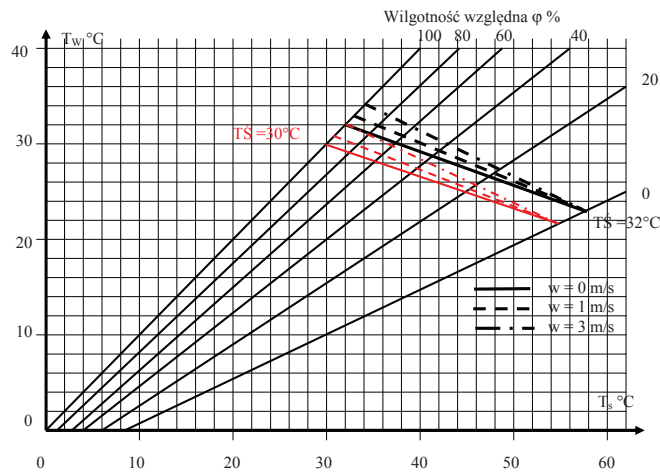
Rys. 1. Wykresy wskaźników klimatu ATE o wartościach $30^{\circ}C$ i $32^{\circ}C$ dla różnych prędkości powietrza: 0, 1, 3 m/s



Rys. 2. Wykresy wskaźników klimatu $t_{zk}=30^{\circ}C$ i $t_{zk}=32^{\circ}C$ dla różnych prędkości powietrza: 0, 1, 3 m/s



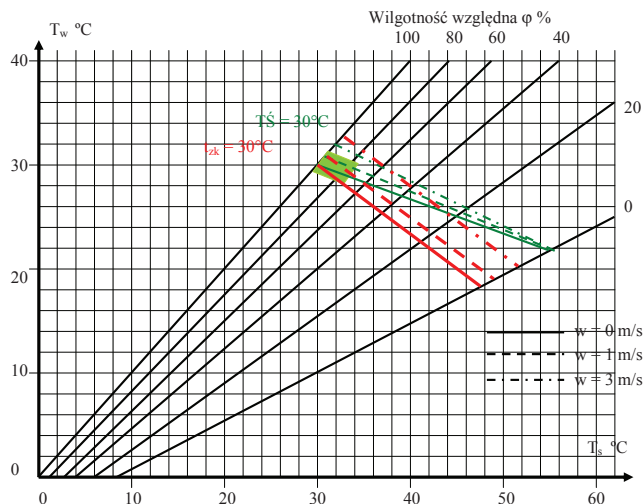
Rys. 3. Wykresy wskaźników klimatu $CP=165 \text{ W/m}^2$ dla różnych prędkości powietrza: 0, 1, 3 m/s



Rys. 4. Wykresy wskaźników klimatu $T_s=30^\circ\text{C}$ i $T_s=32^\circ\text{C}$ dla różnych prędkości powietrza: 0, 1, 3 m/s

Rysunek 5 przedstawia izolinie temperatury zastępczej klimatu i temperatury ślaskiej dla ich wartości 30°C i prędkości powietrza 0 m/s, 1 m/s i 3 m/s. Z tego wykresu można odczytać, jak różnią się tem-

peratury powietrza dla tych samych wartości obydwu wskaźników w zależności od wilgotności względnej i prędkości przepływu powietrza.



Rys. 5. Wykresy wskaźników klimatu $t_{zk}=30^\circ\text{C}$ i $T_s=30^\circ\text{C}$, dla różnych prędkości powietrza 0, 1, 3 m/s

W tabeli 1. pokazano przykładowo temperatury powietrza, jakie odpowiadają wskaźnikom klimatu (ATE = 30°C, $t_{zk} = 30^\circ\text{C}$, CP = 100 W/m², CP = 165

W/m², TŚ = 30°C) w zależności od wilgotności względnej i prędkości powietrza.

Tabela 1.

Temperatury powietrza odpowiadające wskaźnikom klimatu w zależności od wilgotności względnej powietrza „ φ ” i prędkości przepływu powietrza „ w ”

Wskaźniki klimatu	Prędkość powietrza m/s	Wilgotność względna powietrza φ				
		0%	20%	40%	80%	100%
ATE = 30°C	0	53,6	44,2	38,8	32,4	30
	1	53,6	45,2	40	34	32
	3	53,6	46	40,8	35,4	33
$t_{zk} = 30^\circ\text{C}$	0	47,6	41	37	32	30
	1	49	42,2	38	33	31
	3	51,8	44,6	40,2	34,8	33
CP = 100 W/m ²	0	72	51,6	43	34,8	32
	1	87	54	46	36,4	33,6
	3	100	57	47,6	37,4	34,2
CP = 165 W/m ²	0	70	51	42	33,8	31
	1	85	53,6	45,4	36,4	32,4
	3	98,2	56	47	36,8	33,6
TŚ = 30°C	0	54,6	44,6	39	32,4	30
	1	54,6	45,2	39,8	33,4	30,7
	3	54,6	46	40,6	34,4	32

4. PODSUMOWANIE

Jak wynika z rysunków 1. i 4., izolacje efektywnej temperatury amerykańskiej i temperatury śląskiej dla wartości 30°C i 32°C mają zbliżony przebieg.

Siła chłodząca powietrza, czyli „cooling power”, posiada wartość CP = 165 W/m² dla powietrza nieruchomego i nasyconego w temperaturze $t_s = 31^\circ\text{C}$. Oznacza to, że do temperatury powietrza $t_s = 31^\circ\text{C}$ otoczenie odbierze ciepło pochodzące z metabolizmu człowieka wykonującego pracę umiarkowaną (165 W/m²). Dla wyższych temperatur powietrza praca umiarkowana w środowisku, w którym występuje nieruchome i nasycone powietrze, będzie już niebezpieczna.

Izolacje temperatury zastępczej klimatu według „Cuprum” nie mają przebiegów zbliżonych do efektywnej temperatury amerykańskiej i temperatury śląskiej. Izolacje tej temperatury w zależności od prędkości przepływu powietrza są prostymi równoległymi (rys. 2).

Porównując przebieg izolacji temperatury zastępczej klimatu i temperatury śląskiej dla tych samych wartości (30°C) pokazanych na rysunku 5., można wyciągnąć wniosek, że dla wysokich wilgotności

powietrza (powyżej 70%) oraz prędkości powietrza niższych od 2 m/s wartości tych dwóch wskaźników niewiele różnią się od siebie (rys. 5, obszar zaznaczony kolorem zielonym). Dla mniejszych wilgotności powietrza ($\varphi < 70\%$) i małych prędkości powietrza ($w < 2$ m/s) różnica temperatur powietrza odpowiadająca stałym wartościom tych wskaźników jest istotna. Przykładowo w kopalniach soli przy wilgotności względnej powietrza $\varphi = 20\%$ i prędkości powietrza $w = 0,1$ m/s i $w = 1$ m/s temperaturze śląskiej TŚ = 30°C odpowiadać będą temperatury powietrza odpowiednio 44°C i 45,2°C, podczas gdy dla tej samej wartości temperatury zastępczej klimatu $t_{zk} = 30^\circ\text{C}$, przyjmując tę samą wilgotność względną powietrza $\varphi = 20\%$ i te same prędkości przepływu $w = 0,1$ m/s i $w = 1$ m/s, temperatury powietrza wyniosą odpowiednio 41°C i 42,2°C, czyli będą o 3°C niższe (rys. 5 i tab. 1). Dla mniejszych wilgotności powietrza różnica ta będzie większa.

W powietrzu o wilgotności powyżej 80% i prędkości powietrza większej od 3 m/s, stosując wskaźnik $t_{zk} = 30^\circ\text{C}$ (temperaturę zastępczą klimatu), otrzymujemy stosunkowo wysokie temperatury powietrza, stąd konieczność ograniczenia w obliczeniach wartości prędkości powietrza do 4 m/s, która to wielkość dla wskaźnika t_{zk} jest i tak zbyt wysoką. Przykładowo

wo, według wzoru na temperaturę zastępczą klimatu (1), w powietrzu o wilgotności względnej $\phi = 100\%$ i prędkości przepływu $w = 5 \text{ m/s}$ dopuszczalna temperatura powietrza wyniesie 35°C . Dla tej temperatury w powietrzu nasyconym, według wskaźnika CP („cooling power”), który zakłada stałą bezpieczną temperaturę powierzchni ciała ludzkiego $t_{sk} = 35^\circ\text{C}$, nie wystąpi żadna wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, prowadząc do wzrostu temperatury wewnętrznej organizmu. Dla temperatury śląskiej przy tych samych parametrach powietrza (wilgotność względna $\phi = 100\%$ i prędkość powietrza $w = 5 \text{ m/s}$) dopuszczalna temperatura powietrza wyniesie $33,5^\circ\text{C}$ (4) i nie przekroczy temperatury wyznaczonej dla wskaźnika $CP = 165 \text{ W/m}^2$, nawet dla mniejszej ($w = 3 \text{ m/s}$) prędkości powietrza (tab. 1). Z tego przykładu wynika, że dla ścianowych przodków górniczych, w których dopuszczalna prędkość powietrza wynosi 5 m/s , temperatura śląska jest bezpieczniejsza.

Temperatura śląska może być parametrem normy klimatycznej dla środowisk pracy w kopalniach. Analizując przebieg izolinii temperatury śląskiej i wskaźnika „cooling power” CP oraz wartości odniesienia wskaźnika WBGT [PN-EN 27243/2005], należy stwierdzić, że wartość temperatury śląskiej dla pracy umiarkowanej wynosząca 30°C nie powinna być przekroczona. Praca w środowisku, w którym temperatura śląska jest większa od 30°C , powinna być zabroniona z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczej. Biorąc pod uwagę wskaźnik dyskomfortu ciepłego „ δ ” [2] dla ludzi zaaklimatyzowanych, nieubranych i pracy umiarkowanej, można wyznaczyć temperaturę śląską, powyżej której wystąpią trudne i bardzo trudne warunki klimatyczne, czyli $\delta > 0,5$. Tą temperaturą jest temperatura 26°C .

W związku z powyższym propozycja normy klimatycznej dla górnictwa ze wskaźnikiem, jakim jest temperatura śląska, przedstawia się następująco:

- 1) jeżeli w środowisku pracy w kopalni temperatura śląska jest mniejsza od 26°C , to dopuszczalna jest praca w pełnym wymiarze (7,5 godzin), czyli $T\acute{S} < 26^\circ\text{C}$ – nieograniczony czas pracy (7,5 godzin),
- 2) jeżeli temperatura śląska jest większa od 26°C i mniejsza od 30°C , dopuszczalny jest 6-cio godzinny czas pracy, czyli $26^\circ\text{C} \leq T\acute{S} < 30^\circ\text{C}$ – 6-ciogodzinny czas pracy,
- 3) jeżeli temperatura śląska jest większa od 30°C , praca powinna być zabroniona z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczych, czyli $T\acute{S} \geq 30^\circ\text{C}$ – praca zabroniona z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczych.

W przypadku prędkości powietrza w wyrobisku większej od 5 m/s we wzorze na temperaturę śląską należy przyjmować wielkość prędkości powietrza równą 5 m/s .

Temperatura śląska „T \acute{S} ”, posiada uniwersalne zastosowanie. Jej uniwersalność polega na tym, że może być w niezmiennych zakresach wartości stosowana w kopalniach, w których w środowiskach pracy występuje zarówno duża, jak i mała wilgotność względna powietrza. Może być więc stosowana w kopalniach węgla, rud i soli, gwarantując pracę w bezpiecznych warunkach. Uwzględniając w swoim wzorze wilgotność powietrza „ ϕ ”, pozwala przyjmować dopuszczalną prędkość powietrza równą 5 m/s , która to prędkość jest prędkością maksymalną w przodkach ścianowych.

Literatura

1. Drenda J.: *Ocena klimatycznych warunków pracy górników w polskich kopalniach węgla kamiennego i rudy miedzi*. „Górnictwo i Geologia”, t. 7, z. 3. Wyd. Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
2. Drenda J.: *Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy kopalń głębokich*. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, S. Górnictwo*, z. 213, Gliwice 1993 r.
3. Drenda J.: *Ocena bezpieczeństwa klimatycznego górników w gorących środowiskach kopalń głębokich*. *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”*, nr 2, 2007, wydanie specjalne, Katowice 2007, s. 101-109.
4. Drenda J.: *Temperatura zastępcza śląska „T \acute{S} ” jako wskaźnik mikroklimatu w środowiskach*, Wyd. WUG, 2007.
5. Drenda J.: *Wyznaczenie stopni i stref zagrożenia klimatycznego pracowników w przodkach kopalń głębinowych*. *Przegląd Górniczy*, nr 12, 2010.
6. Waclawik J., Branny M., Borodulin-Nadzieja L.: *Modelowanie wymiany ciepła między górnikiem a otoczeniem w trudnych warunkach klimatycznych*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
7. PN-85/N-08011 (tłum. z ISO 7243-1982). *Środowiska gorące. Wyznaczenie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT*.
8. PN-EN 27243: 2005. *Środowiska gorące. Wyznaczenie obciążenia termicznego działającego na człowieka podczas pracy, oparte na wskaźniku WBGT*.
9. PN-EN 12515: 2002. *Środowiska gorące. Analityczne określanie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczania wymaganej ilości potu*.
10. PN-G-03100. *Warunki klimatyczne kopalń podziemnych. Wyznaczenie temperatury zastępczej klimatu*.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.