



Zastosowanie techniki komputerowej w modelowaniu wymiany ciepła między organizmem górnika a gorącym otoczeniem

Application of calculation technique in modeling the exchange of heat between the body of a miner and the hot surroundings

Mgr inż. Lucjan Świerczek*)

Treść: W artykule przedstawiono opis działania programu komputerowego MWC, który pozwala wyznaczyć wielkości charakteryzujące obciążenie termiczne organizmu górnika oraz maksymalny dopuszczalny czas jego pracy na podstawie parametrów środowiska i wydatku energetycznego. Aplikacja umożliwia tworzenie nomogramów, za pomocą których określa się dopuszczalne przedziały pracy dla pełnej dniówki roboczej, w danych warunkach mikroklimatu. Nomogramy te można generować dla wielu zestawów parametrów wejściowych, co pozwala przeanalizować różne scenariusze związane z narażeniem człowieka na trudne warunki mikroklimatu. W związku z powyższym program MWC może być bardzo pomocny dla pracowników dozoru górniczego zajmujących się problematyką klimatyzacji kopalń.

Abstract: This paper presents a description of MWC computer program which allows to indicate values for thermal load of a miner's body and maximum acceptable working time, on the basis of parameters of the environment and expenditure of energy. This software allows to create nomograms which determine the acceptable work intervals for a complete work day in particular microclimate conditions. These nomograms can be created for many sets of input parameters allowing to analyze different scenarios of exposing a worker to difficult conditions of the microclimate. Thus, the MWC program may be very helpful for mining supervision workers who deal with the problem of mine ventilation.

Słowa kluczowe:

górnictwo, wentylacja, zagrożenie klimatyczne, komputerowe wspomaganie obliczeń

Key words:

mining, ventilation, climate hazard, computer-aided calculations

1. Wprowadzenie

Eksperycki program komputerowy „Modelowanie Wymiany Ciepła” (w skrócie MWC) powstał na potrzeby projektu badawczego pt. „Modelowanie wymiany ciepła między organizmem górnika a otoczeniem jako podstawa oceny mikroklimatu w gorących wyrobiskach kopalń głębokich” (3396/B/T02/2011/40).

Służy on do obliczania maksymalnego dopuszczalnego czasu przebywania pracownika w środowisku charakteryzującym się podwyższoną temperaturą. Obliczenia można przeprowadzać dla warunków stanu ustalonego i nieustalonego.

Zastosowany w programie algorytm obliczeniowy bazuje na bilansie termicznym organizmu człowieka i jest oparty na modelu PHS (*Predicted Heat Strain*) opisanym w normie PN-EN ISO 7933 (2005) oraz w opracowaniach Waclawika i innych (2010, 2012 i 2013).

Program MWC można uruchomić na każdym systemie operacyjnym Windows, a do jego poprawnej pracy konieczne jest posiadanie na komputerze zainstalowanych bibliotek Microsoft .NET Framework w wersji przynajmniej 4.0.

2. Model obliczeniowy zastosowany w programie MWC

Algorytm obliczeniowy programu MWC bazuje na modelu PHS (*Predicted Heat Strain*), który opisuje bilans termiczny organizmu człowieka, czyli porównuje jego zyski i straty ciepłne. Bilans ten można przedstawić za pomocą następującego równania

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad (1)$$

gdzie:

- M – wydatek energetyczny organizm pracownika (metaboliczna produkcja ciepła), W/m^2 ;
- W – efektywna praca mechaniczna podczas aktywności pracownika, W/m^2 ;
- C_{res} – przepływ ciepła w wyniku konwekcji (podczas oddychania), W/m^2 ;
- E_{res} – przepływ ciepła w wyniku parowania (podczas oddychania), W/m^2 ;
- K – przepływ ciepła w wyniku przewodnictwa, W/m^2 ;
- C – przepływ ciepła w wyniku konwekcji na powierzchni skóry, W/m^2 ;
- R – przepływ ciepła w wyniku promieniowania na powierzchni skóry, W/m^2 ;
- E – przepływ ciepła w wyniku parowania na powierzchni skóry, W/m^2 ;

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

S – akumulacja ciepła w organizmie człowieka, W/m^2 .

Zastosowany algorytm wyznacza parametry dotyczące obciążenia cieplnego osób pracujących w trudnych warunkach mikroklimatu, a następnie porównuje je z wartościami następujących wielkości granicznych:

- maksymalny stopień zwilżenia skóry, w_{max} ;
- maksymalny strumień wydzielanego potu, Sw_{max} ;
- maksymalna ilość wody utraconej w wyniku pocenia, D_{max} ;
- maksymalna temperatura wewnętrzna organizmu, t_{cr} (temperatura w rectum, t_{re}).

Wartości parametrów granicznych uzyskano w wyniku badań fizjologicznych. Badania te pozwoliły ustalić, że pracownicy zaaklimatyzowani zaczynają się pocić wcześniej niż osoby niezaaklimatyzowane (w tych samych warunkach). Dodatkowo ci pierwsi pocą się równomierniej i bardziej obficie. Dlatego w modelu obliczeniowym zróżnicowano wartości wielkości granicznych w zależności od stopnia zaaklimatyzowania pracownika.

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono co następuje:

Maksymalny stopień zwilżenia skóry (w_{max}) dla osób niezaaklimatyzowanych nie powinien przekraczać wartości 0,85, podczas gdy dla pracowników zaaklimatyzowanych może osiągać 1.

Maksymalny strumień wydzielanego potu (Sw_{max}) w przypadku pracownika zaaklimatyzowanego jest większy o 25 % niż dla osoby niezaaklimatyzowanej.

Warunek maksymalnej ilości wody utraconej w wyniku pocenia (D_{max}) zabezpiecza pracownika przed nadmiernym odwodnieniem, aby nie doszło do zaburzenia równowagi wodno-elektrolitycznej w jego organizmie. Pracownicy ze znaną reakcją na nadmierne wydzielanie potu mogą utracić maksymalnie 7,5 % masy ciała w wyniku pocenia. Natomiast dla pracowników o niesprawdzonych predyspozycjach do pracy w trudnych warunkach mikroklimatu granicą jest 5% masy ich ciała. Obydwie wartości graniczne są prawidłowe tylko w przypadku, gdy dana osoba ma możliwość uzupełniania płynów. Jeżeli pracownik nie ma takiej możliwości, wtedy maksymalny ubytek wody z jego organizmu może wynosić 3 % masy ciała.

Jeśli chodzi o warunek związany z przekroczeniem temperatury wewnętrznej t_{re} , to przyjęto, że maksymalna dopuszczalna temperatura wewnętrzna może wynosić 38 °C. Przeprowadzone badania wykazały, że przekroczenie tej temperatury znacznie zwiększa ryzyko wystąpienia udaru cieplnego.

W omawianej aplikacji za maksymalny czas dniówki roboczej przyjęto 8 godzin – zgodnie z obowiązującymi regulacjami w zakresie stosunku pracy. Jeżeli obciążenie cieplne pracownika oraz jego wydatek energetyczny powodują, że podane wyżej warunki nie są spełnione, może wtedy dojść do nadmiernego odwodnienia jego organizmu i/lub wzrostu temperatury wewnętrznej powyżej dopuszczalną wartość. Aby zabezpieczyć pracownika przed taką sytuacją program MWC skraca czas ekspozycji do wartości, która powinna mu zapewnić bezpieczną pracę.

3. Omówienie programu MWC

3.1. Moduły obliczeniowe

Użytkownik programu MWC ma do wyboru dwa następujące moduły obliczeniowe:

- moduł I – stan ustalony,
- moduł II – stan nieustalony.

3.1.1. MODUŁ I – STAN USTALONY

Stan ustalony odpowiada sytuacji, w której człowiek wykonuje lekką pracę, a temperatura, wilgotność i prędkość przepływającego powietrza są umiarkowane. W takim przypadku temperatura jego skóry i oddawanie ciepła do otoczenia przez odparowanie potu ustalają się na pewnym poziomie, przy stałej wartości temperatury wewnętrznej.

Moduł „stan ustalony” wyznacza dwa dopuszczalne czasy przebywania pracownika w danych warunkach mikroklimatu, które zabezpieczają go przed nadmiernym odwodnieniem organizmu:

Czas pierwszy dotyczy grupy pracowników cechujących się odpowiednim zdrowiem i predyspozycjami do pracy w trudnych warunkach mikroklimatu. Predyspozycje te powinny być potwierdzone odpowiednimi badaniami. Jeżeli ci pracownicy mają możliwość uzupełniania płynów, to dopuszcza się, aby maksymalna ilość wody, która odparowała z ich organizmu wynosiła 7,5 % masy ich ciała.

Drugi czas dotyczy grupy pracowników, którzy nie zostali przebadani na ewentualność pracy w trudnych warunkach mikroklimatu (ich reakcja na intensywne wydzielanie potu nie jest znana). W przypadku tych pracowników – jeżeli mają oni możliwość uzupełniania płynów – dopuszcza się, aby ilość wody utraconej przez ich organizm w wyniku pocenia wynosiła maksymalnie 5 % masy ciała.

3.1.2. MODUŁ II – STAN NIEUSTALONY

Jeżeli człowiek wykonuje pracę ciężką i/lub warunki mikroklimatu są trudne, wtedy istnieje możliwość akumulacji ciepła w jego organizmie. Jest to tak zwany stan nieustalony. Aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnej temperatury wewnętrznej ciała konieczne jest w takich warunkach skrócenie jego czasu pracy.

Moduł „stan nieustalony”, oprócz występujących w module I dopuszczalnych czasów ekspozycji, związanych z wydzielaniem potu, wyznacza dodatkowo trzeci czas wynikający z akumulacji ciepła w organizmie człowieka.

3.2. Opis działania programu MWC

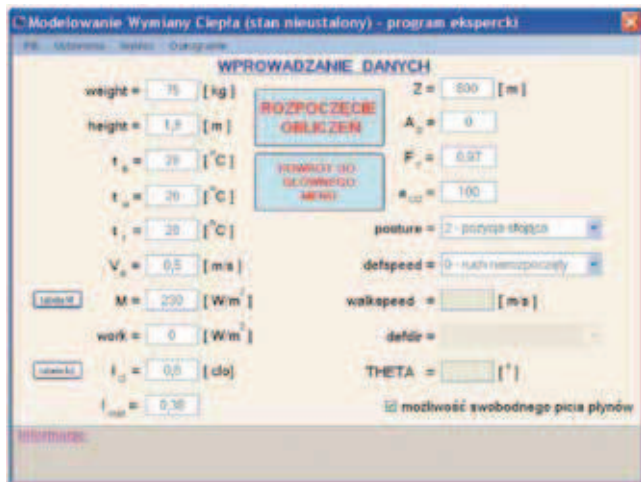
Po uruchomieniu programu na ekranie monitora pojawia się menu główne przedstawione na rysunku 1.

W menu głównym użytkownik ma możliwość wyboru czy chce wykonywać obliczenia w stanie ustalonym czy nieustalonym. Wybierając pożądaną opcję przechodzi się do okna,



Rys. 1. Menu główne programu eksperckiego MWC
Fig. 1. Main menu of MWC program

w którym wprowadza się dane potrzebne do przeprowadzenia obliczeń (rys. 2).



Rys. 2. Okno wprowadzania danych do programu eksperckiego MWC – stan nieustalony

Fig. 2. Window for data input to the MWC software – non-stationary state

Dla obydwu modułów obliczeniowych (stan ustalony i nieustalony) okna wprowadzania danych wejściowych są prawie identyczne, dlatego w dalszej części artykułu zostanie omówiony tylko moduł „stan nieustalony”.

Parametry wejściowe do obliczeń można wprowadzić ręcznie, albo wczytać z pliku tekstowego z rozszerzeniem „.txt”. Należy podać wartości następujących wielkości:

- masa pracownika, $weight$, kg;
- wzrost pracownika, $height$, m;
- temperatura powietrza zmierzona na termometrze suchym, t_a , °C;
- temperatura powietrza zmierzona na termometrze wilgotnym, t_w , °C;
- średnia temperatura promieniowania, t_r , °C;
- średnia prędkość powietrza, V_a , m/s;
- metabolizm pracownika, M , W/m²;
- efektywna praca mechaniczna, $work$, W/m²;
- statyczna izolacja cieplna ubioru pracownika, I_{cl} , clo;
- statyczna przepuszczalność wilgoci przez ubiór pracownika, I_{mst} ;
- głębokość wyrobiska względem poziomu morza, Z , m;
- udział części powierzchni ciała pracownika pokrytej ubiorem odbijającym promieniowanie, A_p ;
- współczynnik emisyjności ubioru pracownika odbijającego promieniowanie, F_r ;
- aklimatyzacja pracownika, a_{cl} ;
- pozycja pracownika podczas wykonywania pracy, $posture$;
- prędkość poruszania się pracownika, $walkspeed$, m/s;
- kąt poruszania się pracownika względem kierunku przepływu powietrza, $THETA$, stopień;
- czy istnieje możliwość swobodnego uzupełniania płynów przez pracownika.

Algorytm obliczeniowy programu został opracowany dla zakresów parametrów wejściowych podanych w tabelicy 1.

Wartości niektórych parametrów można zmierzyć bezpośrednio w miejscu pracy (np. t_a , t_w , t_r), inne są związane z fizjologią pracownika (np.: $weight$ i $height$), pozostałe (np. M , I_{cl}) należy odczytać z tablic lub norm – np. PN-EN ISO 7933 (2005).

Tablica 1. Zakresy parametrów wejściowych algorytmu obliczeniowego programu MWC

Table 1. Ranges of input parameters of the calculation algorithm in MWC program

Parametr, jednostka	Minimum	Maksimum
Temperatura powietrza na termometrze suchym, t_a , °C	15	50
Cząstkowe ciśnienie pary wodnej, Pa, kPa	0	4,5
Różnica między temperaturą promieniowania a temperaturą suchą: $t_r - t_a$, °C	0	60
Prędkość przepływającego powietrza, v_a , m/s	0	3
Metabolizm pracownika, M , W/m ²	100	450
Współczynnik izolacyjności odzieży, I_{cl} , clo	0,1	1,0

Aby usprawnić pracę z programem umieszczono w nim tablice z normowymi wartościami następujących wielkości:

- metabolizm pracownika, M , W/m²;
- statyczna izolacja cieplna ubioru pracownika, I_{cl} , clo.

Dodatkowym udogodnieniem dla obsługującego program jest opcja „Objaśnienia symboli”, w zakładce „Ustawienia”. Po jej włączeniu i naprowadzeniu wskaźnika myszy na symbol dowolnej wielkości program wyświetla krótki jej opis w dolnym obszarze okna dialogowego, opisanym jako „Informacje”

Po wprowadzeniu wszystkich danych wejściowych można przystąpić do obliczeń. Ponieważ omawiany program posiada rozbudowaną obsługę błędów, dlatego po naciśnięciu przycisku „Rozpoczęcie obliczeń” w pierwszym kroku zostają sprawdzone wszystkie pola z danymi wejściowymi pod kątem prawidłowości ich wypełnienia. Algorytm sprawdza czy:

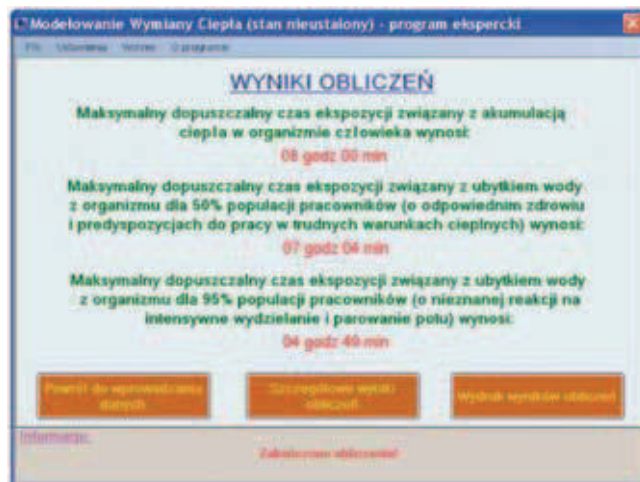
- pola z danymi są pełne,
- w pola zostały wpisane tylko liczby,
- wartości wpisanych danych znajdują się w przedziałach zamieszczonych w tabelicy 1.

W przypadku, gdy któryś warunek nie jest spełniony, wtedy program ostrzega o tym przez wyświetlenie odpowiedniego komunikatu w obszarze „Informacje”.

Natomiast, gdy wszystkie powyższe warunki są spełnione, program przechodzi do następnego kroku, w którym przeprowadza obliczenia.

Po zakończeniu obliczeń w oknie aplikacji zostają wyświetlone wyniki z maksymalnymi dopuszczalnymi czasami ekspozycji (rys. 3) związane z:

- akumulacją ciepła w organizmie pracownika,
- ubytkiem wody z jego organizmu.



Rys. 3. Przykładowe wyniki obliczeń przeprowadzonych w programie eksperckim MWC

Fig. 3. Examples of results of calculations performed in MWC program

W tym momencie użytkownik ma możliwość zapoznania się z tabelą zawierającą wartości parametrów pośrednich, które wyznacza program podczas wykonywania obliczeń (rys. 4). Opcja ta jest bardzo przydatna, gdy istnieje potrzeba przeanalizowania wpływu zmian wartości poszczególnych danych wejściowych na obliczany czas ekspozycji (np. z wykorzystaniem programu MWC do obliczeń wariantowych).

Lp.	Wielkość	Wartość
1	ta	30
2	ta	30
3	ta	32,145
4	ta	33
5	ta	33
6	ta	37,152
7	ta	38,954
8	ta	39,820
9	ta	40,677
10	ta	41,533
11	ta	42,389
12	ta	43,245
13	ta	44,101
14	ta	44,957
15	ta	45,813
16	ta	46,669
17	ta	47,525
18	ta	48,381
19	ta	49,237
20	ta	50,093
21	ta	50,949
22	ta	51,805
23	ta	52,661
24	ta	53,517
25	ta	54,373
26	ta	55,229
27	ta	56,085
28	ta	56,941
29	ta	57,797
30	ta	58,653

Rys. 4. Tabela z wartościami parametrów pośrednich wyznaczanych przez program MWC
 Fig. 4. Table with values of indirect parameters indicated by MWC program

4. Nomogramy dopuszczalnych obszarów bezpiecznej pracy

Program ekspercki MWC umożliwia użytkownikowi tworzenie nomogramów dopuszczalnych obszarów pracy dla pełnej dniówki roboczej na podstawie podanych przez niego wartości parametrów wejściowych.

Utworzone krzywe odpowiadają różnym prędkościom powietrza na stanowisku pracy. Standardowo nomogramy tworzone są dla prędkości powietrza zmieniających się co 0,5 m/s. Użytkownik może również utworzyć nomogram dla dowolnej prędkości powietrza.

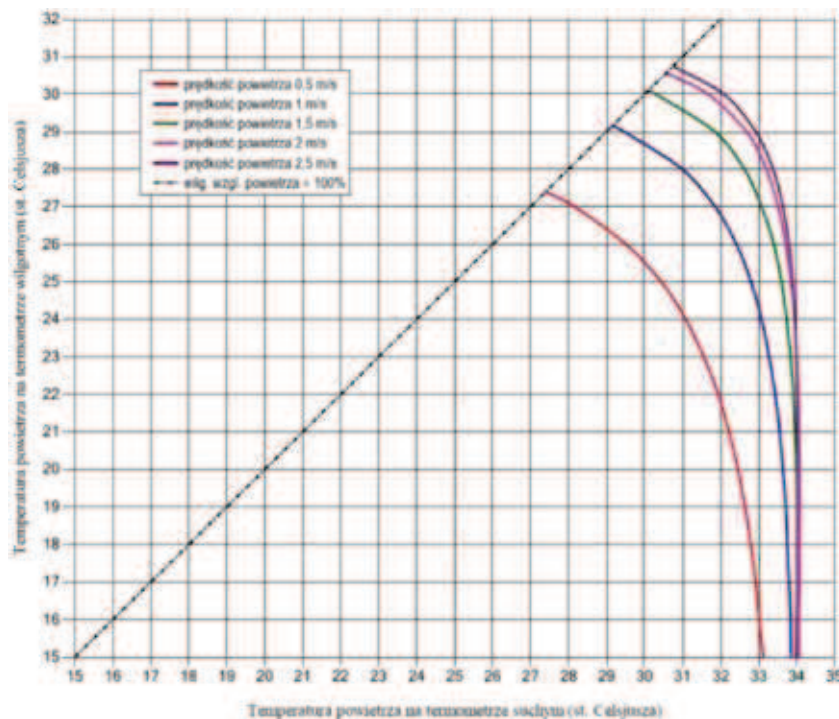
Przykładowy nomogram został przedstawiony na rysunku 5.

Dzięki utworzonym nomogramom można w łatwy sposób sprawdzić, czy człowiek w danych warunkach mikroklimatu i przy danym wydatku energetycznym może wykonywać swoją pracę przez pełną dniówkę roboczą, czy też należy skrócić jego czas pracy. W tym celu wystarczy zmierzyć w miejscu pracy temperaturę na termometrze suchym (t_a) i wilgotnym (t_w) oraz prędkość przepływu powietrza (V_a). Następnie sprawdza się, w którym miejscu na wykresie znajduje się punkt otrzymany z przecięcia linii reprezentujących zmierzoną temperaturę powietrza. Jeżeli otrzymany punkt znajduje się powyżej krzywej odpowiadającej prędkości powietrza, jaka występuje na stanowisku pracy, wtedy dniówka robocza powinna zostać skrócona. Ponieważ, według przeprowadzonych badań, praca w pełnym wymiarze godzin, w takich warunkach mikroklimatu i przy podanym wydatku energetycznym pracownika może skutkować zbyt dużym odwodnieniem jego organizmu i/lub wzrostem temperatury wewnętrznej powyżej bezpiecznej wartości.

5. Wykorzystanie nomogramów generowanych przez program MWC do analizy wpływu wybranych wartości metabolizmu pracownika na jego czas pracy

Nomogram przedstawiony na rysunku 5 został utworzony dla pracownika o wzroście 1,8 m i wadze 75 kg. Statyczna izolacyjność jego ubrania wynosiła 0,60 clo. Pracownik był zaaklimatyzowany i wykonywał pracę umiarkowaną, dla której średnia wartość metabolizmu według PN-85/N-08011 (1985) wynosi 165 W/m².

Jeżeli ten sam pracownik zwiększy swój wydatek energetyczny (np. jego metabolizm osiągnie wartość 200 W/m²),



Rys. 5. Nomogram dopuszczalnych obszarów pracy w pełnym wymiarze godzin, wyznaczony dla osób nieprzebadanych pod kątem trudnych warunków mikroklimatu – metabolizm pracownika wynosi 165 W/m²

Fig. 5. Nomogram of acceptable areas of full-time work determined for workers who weren't examined with review for the difficult microclimate conditions – metabolism of a worker comes up to 165 W/m²

wtedy krzywe wyznaczające obszary pełnej dniówki roboczej przesuwają się w kierunku początku układu współrzędnych. Sytuację taką przedstawia rysunek 6.

Gdyby natomiast przyjąć, że pracownik wykonuje ciężką pracę, dla której średnia wartość metabolizmu według PN-85/N-08011 (1985) wynosi 230 W/m^2 , wtedy obszary pełnej dniówki roboczej zawężają się jeszcze bardziej (rys. 7).

Zwiększenie wydatku energetycznego przez pracownika skutkuje zawężeniem obszarów, w których może on wykonywać pracę w pełnym wymiarze czasu. Nomogramy w sposób wygodny i przejrzysty pozwalają przeanalizować te zmiany.

Z analizy przedstawionych przykładów (rys. 5, 6 i 7) wynika, że zwiększenie wydatku energetycznego przez pracownika może narazić go na odwodnienie i/lub przekroczenie dopuszczalnej temperatury wewnętrznej już w warunkach, które uznaje się za klimatycznie dobre. Oprócz analizowanego w przykładach metabolizmu, decydujący wpływ na to ma także oporność odzieży, w którą ubrany jest pracownik.

Omówione trzy przypadki obrazują, w jaki sposób można szybko określać wpływ zmian metabolizmu człowieka na dopuszczalny czas jego pracy w danym środowisku, przez analizę nomogramów generowanych przez program MWC. Takie nomogramy można tworzyć również dla innych zmiennych. Pozwala to na przeprowadzenie różnego typu analiz związanych z narażeniem człowieka na trudne warunki mikroklimatu.

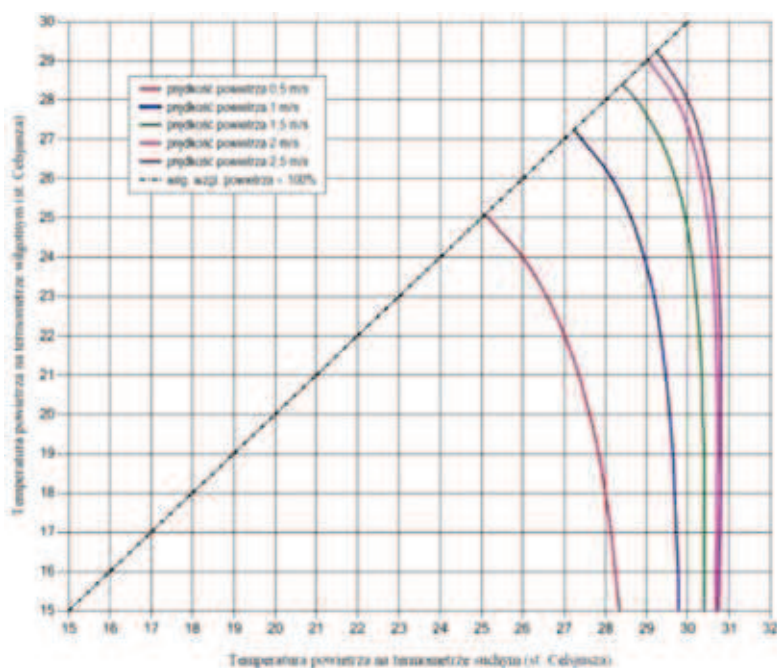
6. Podsumowanie

Program ekspercki MWC służy do obliczania maksymalnego dopuszczalnego czasu przebywania ludzi w trudnych warunkach mikroklimatu. Opiera się na modelu PHS (*Predicted Heat Strain*) opisanym w normie PN-EN ISO 7933 (2005) oraz innych publikacjach.

Obliczenia można wykonywać dla stanu ustalonego i niestalonego. W artykule skupiono się na opisie modułu

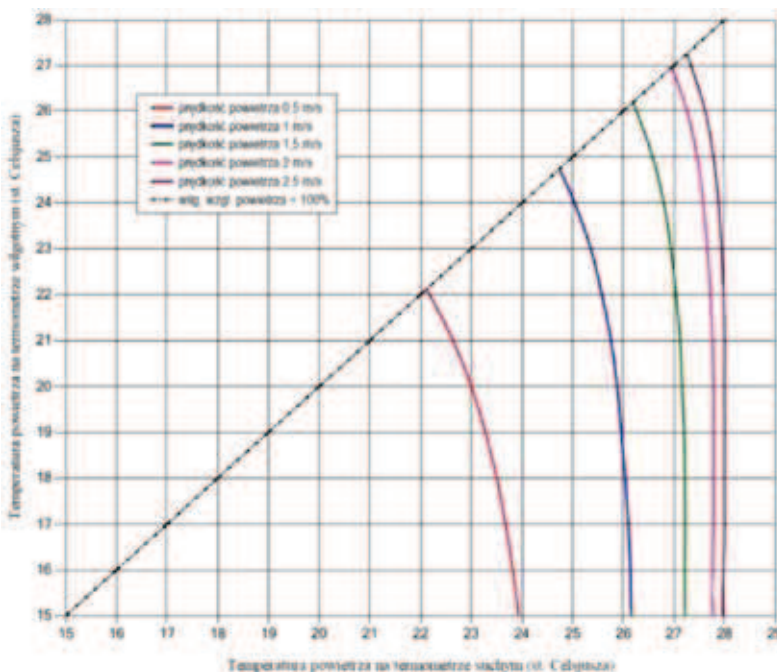
Rys. 6. Nomogram dopuszczalnych obszarów pracy w pełnym wymiarze godzin, wyznaczony dla osób nieprzebadanych pod kątem trudnych warunków mikroklimatu – metabolizm pracownika wynosi 200 W/m^2

Fig. 6. Nomogram of acceptable areas of full-time work determined for workers who weren't examined with review for the difficult microclimate conditions – metabolism of a worker comes up to 200 W/m^2



Rys. 7. Nomogram dopuszczalnych obszarów pracy w pełnym wymiarze godzin, wyznaczony dla osób nieprzebadanych pod kątem trudnych warunków mikroklimatu – metabolizm pracownika wynosi 230 W/m^2

Fig. 7. Nomogram of acceptable areas of full-time work determined for workers who weren't examined with review for the difficult microclimate conditions – metabolism of a worker comes up to 230 W/m^2



„stan nieustalony”. W wyniku obliczeń przeprowadzonych w stanie nieustalonym uzyskuje się trzy dopuszczalne czasy ekspozycji związane z:

- akumulacją ciepła w organizmie,
- ubytkiem wody z organizmu dla pracowników przebadanych na ewentualność pracy w trudnych warunkach mikroklimatu,
- ubytkiem wody z organizmu dla pracowników nieprzebadanych na ewentualność pracy w trudnych warunkach mikroklimatu.

Za pomocą omawianej aplikacji można tworzyć nomogramy służące do określania dopuszczalnych obszarów pracy w pełnym wymiarze godzin, dla różnych prędkości powietrza. Nomogramy można generować dla wielu zestawów parametrów wejściowych, co pozwala na analizę różnych scenariuszy związanych z narażeniem człowieka na trudne warunki mikroklimatu.

MWC może być wykorzystywany do przeprowadzania obliczeń wariantowych, gdy istnieje konieczność szybkiego zbadania, w jaki sposób zmiany wartości parametrów wejściowych wpływają na dopuszczalny czas pracy górnika. Dla lepszego zobrazowania tego wpływu użytkownik ma możliwość zapoznania się ze szczegółowymi wartościami parametrów pośrednich zamieszczonych w odpowiedniej tabeli.

Wyniki obliczeń, tabele wartości wielkości pośrednich oraz utworzone nomogramy można wydrukować w celu ich dokumentacji lub zarchiwizowania.

MWC posiada rozbudowaną obsługę błędów, dzięki czemu użytkownik jest na bieżąco informowany o pojawiających się problemach związanych z pracą programu.

Przedstawiona aplikacja może być bardzo pomocna dla pracowników dozoru górniczego zajmujących się problematyką klimatyzacji kopalń, gdyż pozwala w szybki sposób określić, jak zmiana warunków mikroklimatu (np. przez wprowadzenie urządzeń schładzających powietrze), wpłynie na czas pracy ludzi w nowych (prognozowanych) warunkach otoczenia.

Niniejszą pracę wykonano ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach tematu: „Modelowanie wymiany ciepła między organizmem górnika a otoczeniem jako podstawa oceny mikroklimatu w gorących wyrobiskach kopalń głębokich” (3396/B/T02/2011/40).

Literatura

1. *Mcpherson M.J.*: Physiological reaction to climatic conditions. [w]: Subsurface ventilation and environmental engineering, Chapman & Hall, London 1992.
2. PN-85/N-08011:1985 Ergonomia. Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT.
3. PN-EN 12515:2002 Środowiska gorące. Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczenia wymaganej ilości potu, oparta na ISO 7933 z 1988 r.
4. PN-EN ISO 7933:2005 Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywalnego obciążenia termicznego.
5. PN-EN ISO 9920:2008 Ergonomia środowiska termicznego. Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży.
6. *Wacławik J., Branny M., Borodulin-Nadzieja L.*: Modelowanie wymiany ciepła między górnikiem a otoczeniem w trudnych warunkach klimatycznych 2004.
7. *Wacławik J.*: Numeryczne modelowanie wymiany ciepła między ciałem pracownika i otoczeniem gorącym, Archives of Mining Sciences, vol. 55, issue 3, 2010 s. 573÷588.
8. *Wacławik J., Knechtel J., Świerczek L.*: O mechanizmach wymiany ciepła między organizmem pracownika a otoczeniem w wyrobiskach kopalnianych. Górnicze Zagrozenia Naturalne 2012 (praca zbiorowa), 2012 s. 371÷385.
9. *Wacławik J., Knechtel J.*: Nieustalona wymiana ciepła między organizmem górnika a otoczeniem, Zagrozenia aerologiczne w kopalniach węgla kamiennego – profilaktyka, zwalczanie, modelowanie, monitoring (praca zbiorowa), 2013 s. 155÷172.