

Weryfikacja metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego przy użyciu obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego

NIKODEM SZŁAZAK

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

BARTŁOMIEJ GŁUCH

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono walidację metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ . Badania zrealizowano pod kątem prawidłowej oceny obciążenia cieplnego w środowisku pracy przy wykorzystaniu metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym opisanej w normie PN-EN ISO 7933:2005. Badania wykonano biorąc pod uwagę wydatek energetyczny oraz izolacyjność termiczną odzieży. W artykule opisano wyniki badań oraz wskazano niedoskonałości badanego wskaźnika mikroklimatu.

Słowa kluczowe: ocena warunków mikroklimatu, wskaźnik dyskomfortu cieplnego

1. Wprowadzenie

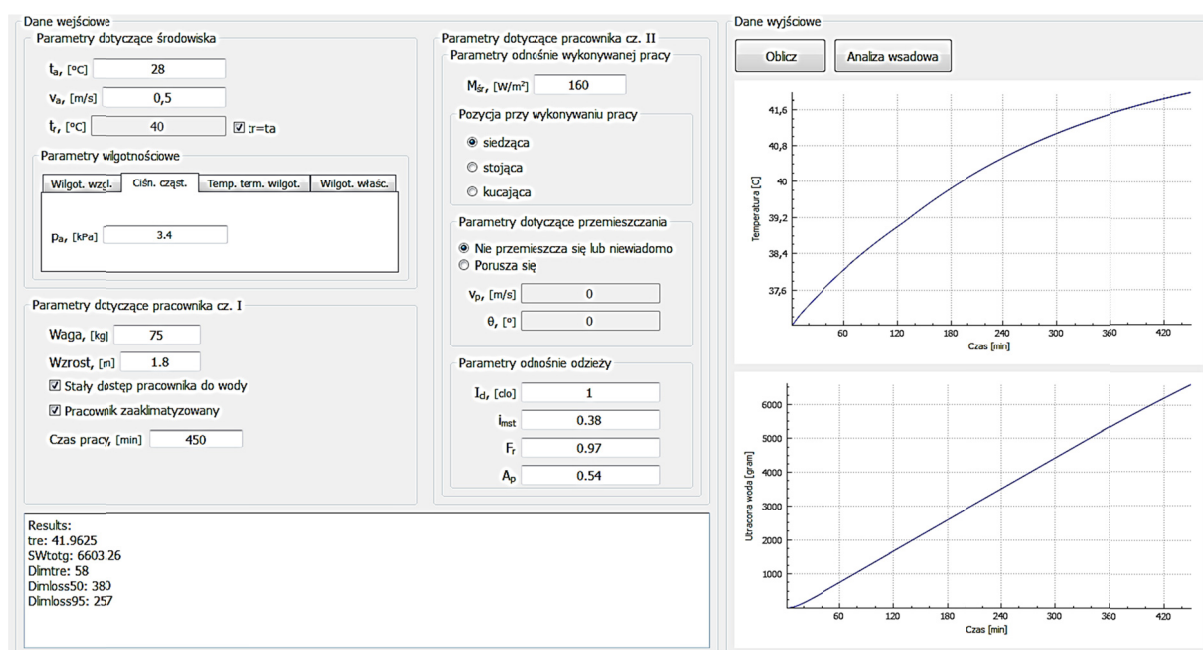
Pracownicy zatrudnieni w przemyśle mogą być narażeni na oddziaływanie środowiska gorącego. Aby zabezpieczyć ludzi przed przegrzaniem lub odwodnieniem wykonuje się ocenę warunków mikroklimatu. Ze względu na wymogi bezpieczeństwa oczekuje się, że ocena warunków mikroklimatu będzie wykonywana w łatwy i szybki sposób. Spełnienie takiego założenia wiąże się przede wszystkim z zastosowaniem prostych wskaźników mikroklimatu. Wskaźniki mikroklimatu w głównej mierze posiadają uproszczenia i są opracowane do konkretnego przeznaczenia. Niewłaściwa ocena warunków mikroklimatu może doprowadzić do utraty zdrowia i życia pracowników. Najlepszymi obecnie metodami oceny warunków mikroklimatu są metody oparte na teorii bilansu cieplnego człowieka, gdzie parametrami fizjologicznymi charakteryzującymi obciążenie cieplne jest ubytek wody z organizmu oraz temperatura rektalna (Wacławik i in., 2004). Metody opierające się na bilansie cieplnym człowieka nie są powszechnie stosowane do oceny warunków mikroklimatu w środowisku pracy, ponieważ często wymagają określenia dużej ilości parametrów wejściowych oraz obliczeń numerycznych. Jedną z tych metod jest metoda zamieszczona w normie PN-EN ISO 7933:2005. Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym jest popartym obszernymi badaniami sposobem oceny warunków mikroklimatu. W niniejszej pracy uznano omawianą metodę za wzorzec oceny warunków mikroklimatu. Metoda zawarta w normie PN-EN ISO 7933:2005 pozwoliła na wykonanie badań pod kątem prawidłowej oceny obciążenia termicznego, których przedmiotem była metoda oceny warunków mikroklimatu oparta na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ . Badania były wykonane biorąc pod uwagę różne wartości wydatku energetycznego oraz izolacyjności termicznej odzieży.

2. Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym według normy PN-EN ISO 7933:2005

Norma PN-EN ISO 7933:2005 zatytułowana „Analityczne wyznaczanie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego” zawiera model numeryczny wymiany ciepła między organizmem człowieka a otoczeniem określany jako model PHS (*predicted heat strain model*). Omawiana metoda została opracowana na podstawie teorii bilansu cieplnego organizmu ludzkiego oraz na podstawie bazy danych pochodzącej z 8 instytucji badawczych, składającej się z 747 laboratoryjnych eksperymentów oraz 336 eksperymentów polowych. Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym umożliwia przewidywanie odpowiedzi organizmu człowieka na warunki pracy pod postacią utraty wody z organizmu oraz wartości temperatury rektalnej. Za pomocą tej metody można określić, na który parametr lub grupę parametrów, dotyczących pracownika oraz środowiska pracy, należy zwracać uwagę w celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia przeżrzenia lub odwodnienia organizmu człowieka. Norma PN-EN ISO 7933:2005 zawiera algorytm modelu numerycznego przewidywanego obciążenia termicznego. W celu wykonania badań opracowano program komputerowy, który umożliwia zrealizowanie obliczeń numerycznych przy użyciu modelu PHS przy wykorzystaniu dużej ilości wariantów parametrów określających środowisko pracy.

3. Program komputerowy oparty na modelu PHS

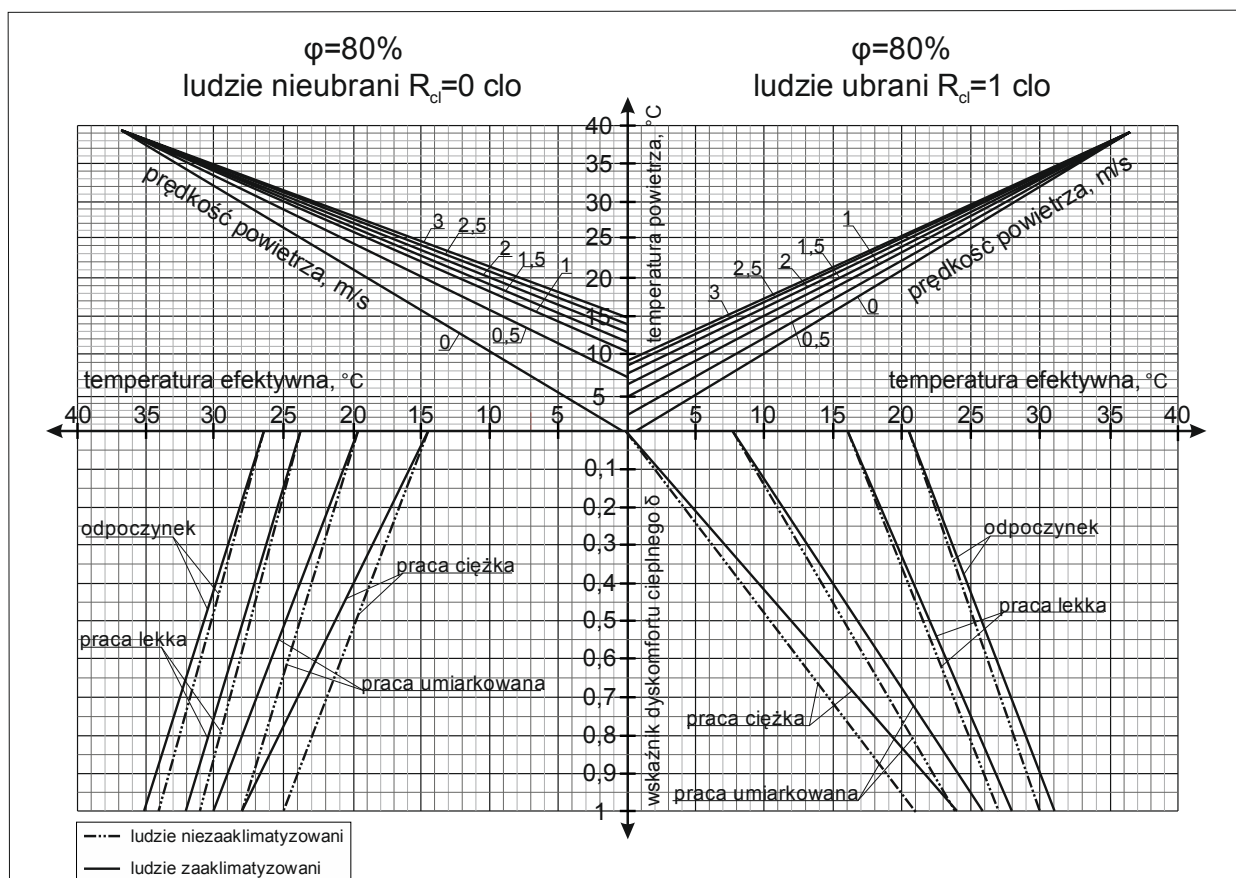
Program komputerowy został opracowany przez autora niniejszej pracy (Gluch, 2015) na podstawie metody analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego w środowisku gorącym, znajdującej się w normie PN-EN ISO 7933:2005. Program wykorzystuje model PHS umożliwiając ocenę obciążenia cieplnego panującego w danym środowisku pracy. Interfejs programu komputerowego pokazano na rysunku 1. Program pozwala na obliczenie temperatury rektalnej i ilości utraty wody z organizmu człowieka po zadanym czasie ekspozycji na dane warunki środowiska pracy. Umożliwia także określenie dopuszczalnego czasu ekspozycji na dane warunki środowiska pracy, ze względu na graniczne wartości parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne. Program komputerowy rysuje przebiegi temperatury rektalnej i ilości utraty wody z organizmu człowieka w funkcji czasu. Dzięki temu można prześledzić kształtowanie parametrów fizjologicznych w czasie zadanej ekspozycji na dane warunki środowiska pracy. Program komputerowy posiada funkcję tzw. analizy wsadowej, która umożliwia analizę większej ilości danych na podstawie wcześniej przygotowanego szablonu.



Rys. 1. Interfejs programu komputerowego – główny program (źródło: opracowanie własne)

4. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ (Drenda, 1993) został opracowany przez J. Drendę na podstawie równania komfortu Fangera (Fanger, 1974). Wskaźnik ten określa stan niezadowolenia człowieka z warunków cieplnych otoczenia. Wartość wskaźnika dyskomfortu cieplnego zależy od parametrów środowiska, wydatku energetycznego pracownika, stopnia aklimatyzacji oraz izolacyjności termicznej odzieży. Wskaźnik mikroklimatu powstał przy założeniu, że gdy parametry środowiska nie odpowiadają punktom leżącym na krzywych komfortu cieplnego Fangera, to w środowisku mogą panować warunki zaliczane do dyskomfortowych. Dyskomfort niebezpieczny dla zdrowia występuje, gdy zostaną przekroczone wartości graniczne wskaźnika *WBGT* i temperatury efektywnej *ET*. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego określa liczbowo, jak bardzo warunki klimatyczne panujące w danym środowisku pracy odbiegają od warunków uznawanych za komfortowe w stosunku do warunków uznawanych za niebezpieczne. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego można wyznaczyć za pomocą nomogramów, które zostały sporządzone dla różnych wilgotności względnych powietrza φ (20%, 40%, 60%, 80%, i 100%). Przykładowy nomogram znajduje się na rysunku 2. W zależności od wilgotności względnej powietrza należy dobrać odpowiedni nomogram w celu wyznaczenia wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego. Jeżeli wskaźnik dyskomfortu cieplnego będzie równy lub większy od 1, to praca w danym środowisku powinna być zabroniona ze względu na niebezpieczeństwo wystąpienia udaru cieplnego. Określanie czasu pracy według metody oceny warunków mikroklimatu przy użyciu wskaźnika dyskomfortu cieplnego realizuje się w następujący sposób: $\delta \geq 1$ – praca zabroniona, $\delta < 1$ – praca dopuszczalna, $0,8 \leq \delta < 1$ – skrócony czas pracy do 6 godzin, $\delta < 0,8$ – normalny czas pracy (Drenda, 1993).



Rys. 2. Nomogram do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ (opracowanie własne na podstawie (Drenda i in., 2005))

5. Weryfikacja metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ

Metodyka badawcza

Metoda analitycznego wyznaczania i interpretacji stresu cieplnego doznawanego przez człowieka w środowisku gorącym umożliwiła zweryfikowanie pod kątem prawidłowego opisu obciążenia cieplnego metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ . Obliczenia wykonane zostały za pomocą opracowanego programu komputerowego z uwzględnieniem standardowych parametrów dotyczących pracownika opisanych w normie PN-EN ISO 7933:2005. Parametry średniego wydatku energetycznego i izolacyjności termicznej odzieży dobrano z uwagi na ostatnie badania przeprowadzone w polskich kopalniach podziemnych w ramach projektu strategicznego „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”. W przodkach i ścianach eksploatacyjnych dominuje umiarkowany stopień ciężkości pracy ze sporadycznym zwiększaniem stopnia ciężkości pracy (Domagała i in., 2013). Przyjęto, że izolacyjność termiczna odzieży standardowego ubrania pracowników polskich kopalń podziemnych zatrudnianych w środowisku gorącym wynosi 1 clo (Bogdan i in., 2012). W badaniach dla porównania wzięto po uwagę mniejszą izolacyjność termiczną odzieży wynoszącą 0,5 clo.

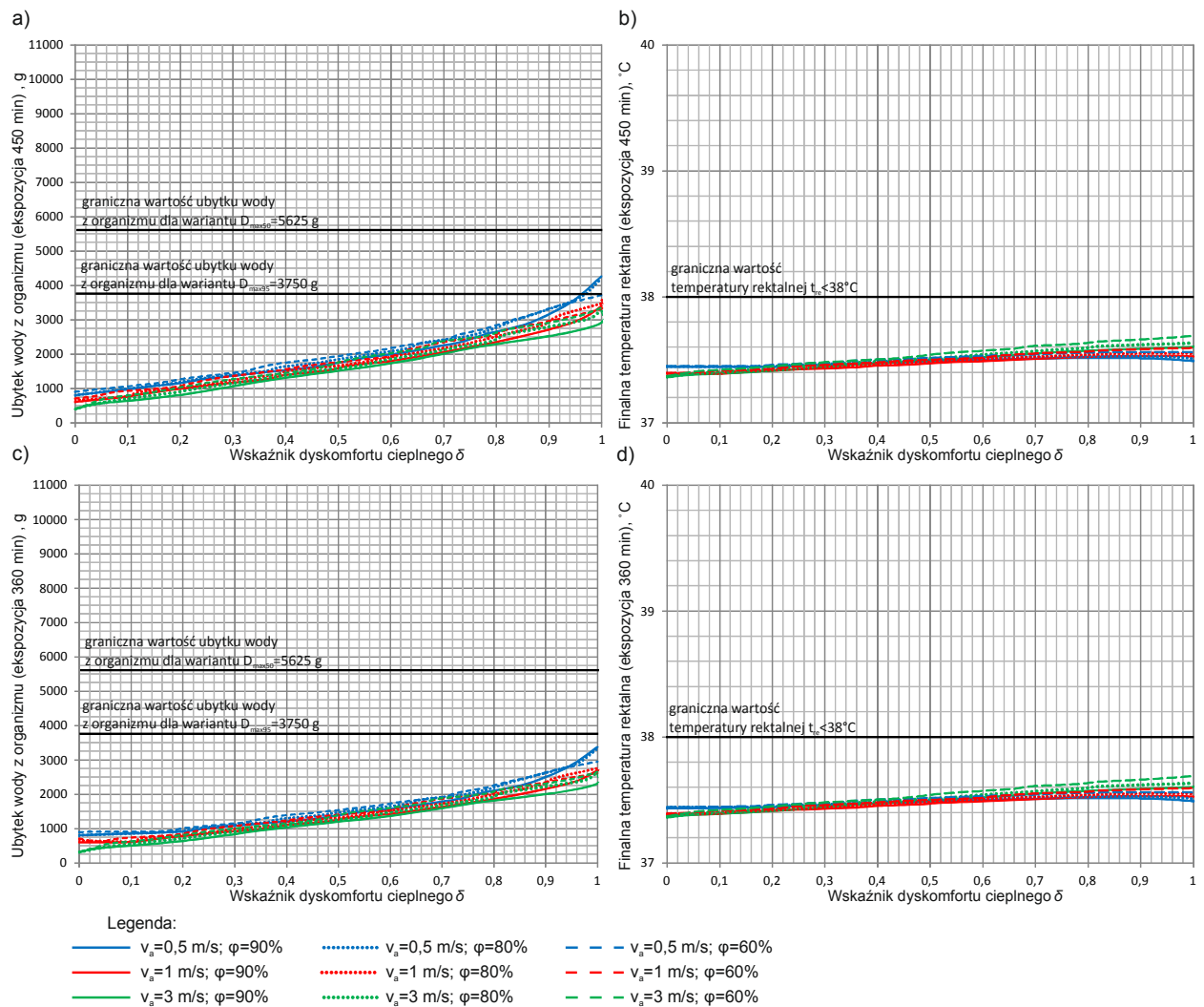
W celu wykonania walidacji omawianej metody oceny warunków mikroklimatu odczytano z nomogramów wartości badanego wskaźnika mikroklimatu dla założonych zestawów parametrów. Dla tych samych zestawów parametrów wykonano obliczenia z zastosowaniem modelu PHS. Obliczenia wykonano dla izolacyjności termicznej $I_{cl} = 1$ clo i $I_{cl} = 0,5$ clo oraz dla średniego wydatku energetycznego $M_{sr} = 165$ W/m² i $M_{sr} = 230$ W/m². Zestawy parametrów powietrza składają się z kombinacji trzech prędkości przepływu powietrza: $v_a = 0,5$ m/s lub $v_a = 1$ m/s lub $v_a = 3$ m/s, trzech wilgotności względnych powietrza: $\varphi = 90\%$ lub $\varphi = 80\%$ lub $\varphi = 60\%$.

Określając czas ekspozycji na dane warunki mikroklimatu wzięto pod uwagę, że w polskich przepisach dotyczących kopalń podziemnych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002) normalny czas pracy został określony na 450 minut łącznie ze zjazdem i wyjazdem na powierzchnię. W uzgodnionych przez przepisy warunkach może on zostać skrócony do 360 minut. Wyniki wykonanych badań są rzetelne tylko w przypadku, gdy pracownik przybywa całą lub skróconą dniówkę roboczą w środowisku pracy o określonych parametrach, wykonując pracę z uśrednionym wydatkiem energetycznym.

Analiza wyników badań

Rezultaty badań przedstawiono w postaci porównania wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ z wynikami obliczeń numerycznych parametrów fizjologicznych określających obciążenie termiczne w środowisku pracy. Porównanie przedstawiono w formie rysunków, na których znajdują się wykresy. Porównanie polega na odniesieniu wartości wskaźnika dyskomfortu (oś x) do wartości parametrów fizjologicznych obliczonych przy użyciu modelu PHS, takich jak ubytek wody lub temperatura rektalna (oś y). Ocena warunków cieplnych metodą wykorzystującą model PHS bierze pod uwagę niezależnie oba parametry fizjologiczne. Przekroczenie granicznej wartości, jednego z parametrów oznacza wystąpienie niebezpiecznych warunków. Każdy rysunek zawiera cztery wykresy, które przedstawiają wyniki obliczeń parametrów fizjologicznych dla normalnego czasu pracy oraz skróconego czasu pracy. Podział rysunków na podpunkty został zrealizowany w następujący sposób:

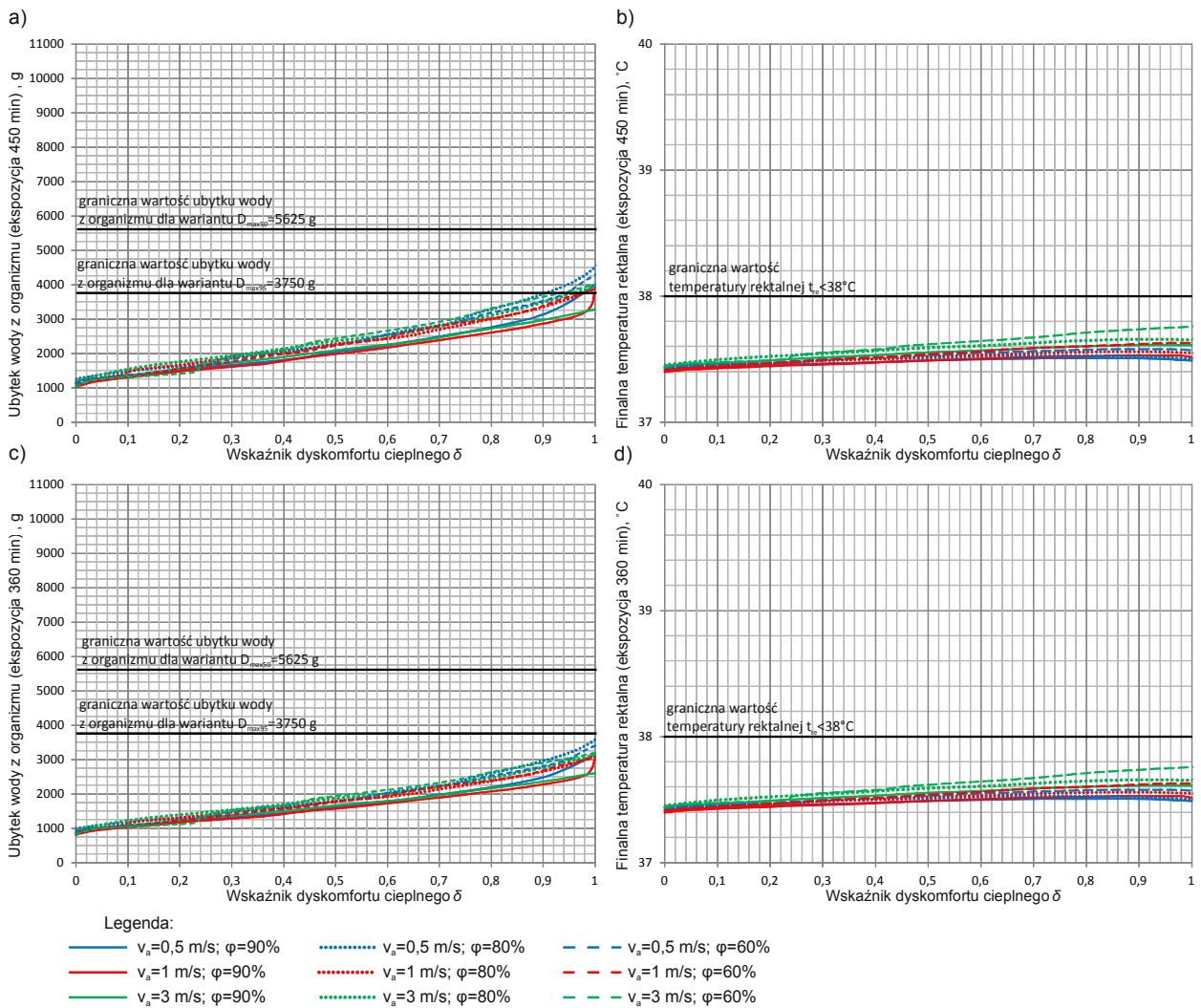
- a) ubytek wody z organizmu – wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min,
- b) temperatura rektalna – wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min,
- c) ubytek wody z organizmu – wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min,
- d) temperatura rektalna – wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min.



opis: $\delta < 0$ – środowisko chłodne, $\delta = 0$ – komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ – warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ – zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ – trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ – bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ – dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 3. Zmiana wartości parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne dla izolacyjności termicznej odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji wskaźnika dyskomfortu: a) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, b) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, c) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min, d) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min

Na poszczególnych wykresach znajdują się przebiegi wartości parametrów fizjologicznych w funkcji wskaźnika dyskomfortu cieplnego, które zostały wyznaczone dla określonych w założeniach wilgotności względnych oraz określonych prędkości przepływu powietrza. W zależności od wartości poszczególnych parametrów przebiegi na wykresach zaznaczone są w sposób opisany w legendzie zamieszczonej pod rysunkami. Na każdym rysunku zaznaczono czarnymi liniami równoległymi do osi x wartości graniczne parametrów fizjologicznych. Graniczny ubytek wody z organizmu, który jest brany pod uwagę wynosi 3750 g z uwagi na to, że pracownicy zatrudniani w podziemnych zakładach górniczych, w celu dopuszczenia do pracy, przechodzą standardowe badania lekarskie. Granicę ubytku wody z organizmu można rozszerzyć wprowadzając specjalistyczne badania lekarskie dopuszczające do pracy. Natomiast graniczna wartość temperatury rektalnej wynosi 38°C .



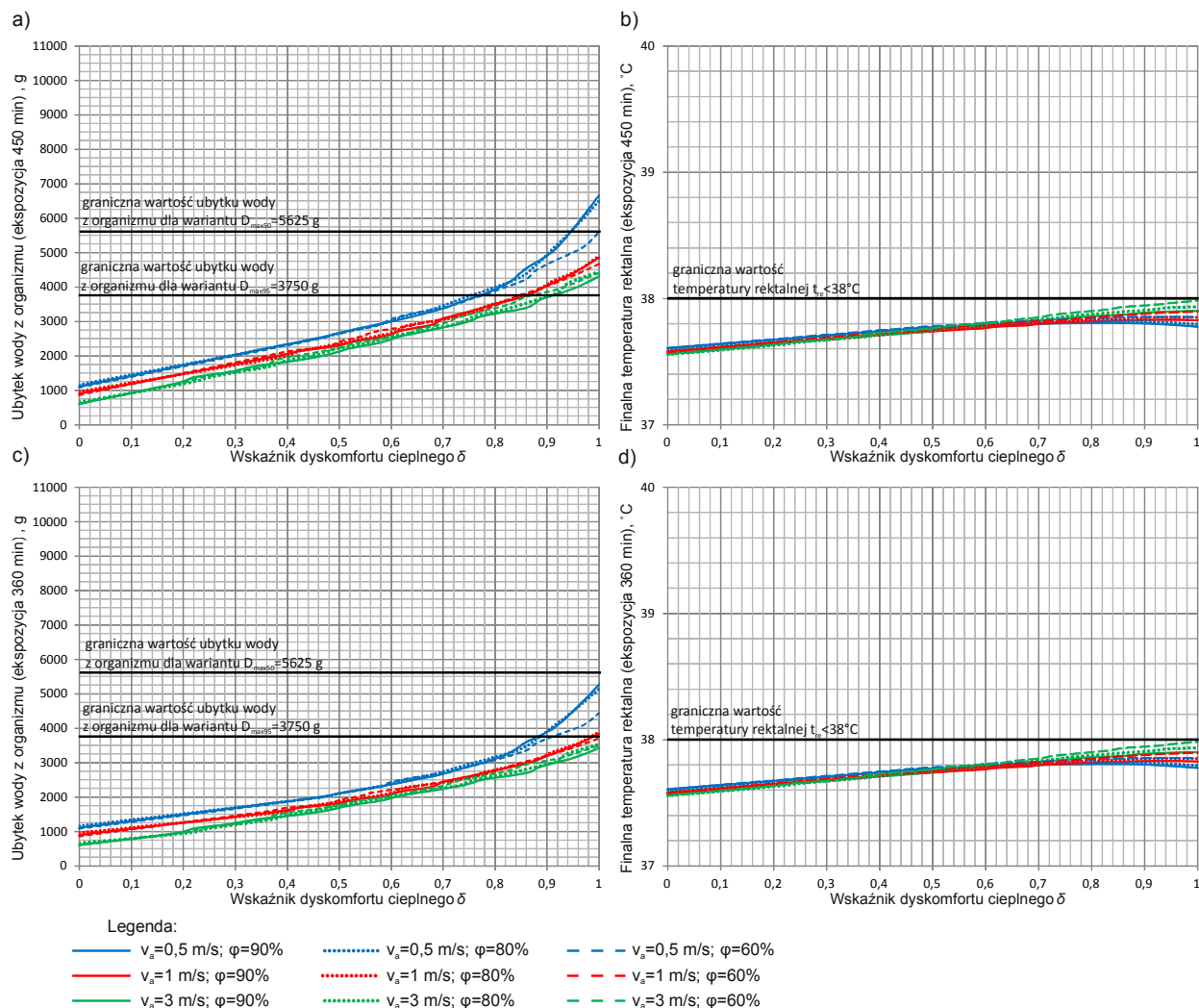
opis: $\delta < 0$ – środowisko chłodne, $\delta = 0$ – komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ – warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ – zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ – trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ – bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ – dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 4. Zmiana wartości parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne dla izolacyjności termicznej odzieży 0,5 clo oraz wydatku energetycznego 165 W/m^2 w funkcji wskaźnika dyskomfortu: a) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, b) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, c) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min, d) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min

Analiza wyników badań wykazała, że wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ zabezpiecza człowieka ubranego w odzież o izolacyjności termicznej odzieży 1 clo (rysunek 3) i 0,5 clo (rysunek 4), przebywającego w środowisku gorącym przed odwodnieniem i przegrzaniem organizmu na stanowiskach pracy, gdzie średni wydatek energetyczny wynosi 165 W/m^2 , w przedziale wartości wskaźnika odpowiadającego normalnemu czasowi pracy $\delta < 0,8$. Skrócenie czasu pracy w przedziale wartości wskaźnika $0,8 \leq \delta < 1$ powoduje obniżenie ubytku wody z organizmu człowieka i uzyskanie bezpiecznych warunków pracy dla analizowanych zestawów parametrów powietrza.

Wyniki obliczeń dla wariantu ze zwiększonym wydatkiem energetycznym do 230 W/m^2 dla izolacyjności termicznej odzieży 1 clo zostały zamieszczone na rysunku 5. Analiza tego przypadku wykazała, że wskaźnik dyskomfortu cieplnego chroni przed przekroczeniem granicznej temperatury rektalnej. Natomiast wskaźnik mikroklimatu nie chroni przed przekroczeniem granicznej wartości 3750 g utraty wody z organizmu przy wartościach dyskomfortu cieplnego $0,7 \leq \delta < 0,8$ dla prędkości przepływu powietrza wynoszącej 0,5 m/s. Skrócenie czasu pracy w przedziale wartości wskaźnika $0,8 \leq \delta < 1$ powoduje obniżenie ubytku wody, ale nadal jest przekroczona graniczna wartość 3750 g utraty wody z organizmu. Wprowadzenie specjalistycznych badań stwierdzających prawidłowe działanie układu termoregulacji człowieka umożliwi zwiększenie granicznej wartości ubytku wody do 5625 g. Taki zabieg pozwala na

uzyskanie bezpiecznych warunków pracy przy zastosowaniu metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego przy średnim wydatku energetycznym wynoszącym 230 W/m^2 dla analizowanych zestawów parametrów.



opis: $\delta < 0$ – środowisko chłodne, $\delta = 0$ – komfort cieplny; $0 < \delta < 0,2$ – warunki klimatyczne korzystne; $0,2 \leq \delta < 0,5$ – zadowalające warunki klimatyczne; $0,5 \leq \delta < 0,8$ – trudne warunki klimatyczne; $0,8 \leq \delta < 1$ – bardzo trudne warunki klimatyczne, $\delta \geq 1$ – dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia

Rys. 5. Zmiana wartości parametrów fizjologicznych określających obciążenie cieplne dla izolacyjności termicznej odzieży 1 clo oraz wydatku energetycznego 230 W/m^2 w funkcji temperatury zastępczej ślaską: a) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, b) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 450 min, c) ubytek wody z organizmu wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min, d) temperatura rektalna wyniki obliczeń dla ekspozycji 360 min

6. Podsumowanie

Prawidłowa ocena obciążenia cieplnego pozwala na opracowanie bezpiecznych zasad zatrudniania w środowisku gorącym. Często opisywanym sposobem oceny warunków mikroklimatu w polskiej literaturze dotyczącej oceny zagrożenia klimatycznego jest metoda oparta na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ . Weryfikacja pod kątem prawidłowego opisu obciążenia cieplnego doznawanego przez człowieka metody oceny warunków mikroklimatu opartej na wskaźniku dyskomfortu cieplnego wykazała, że wskaźnik zabezpiecza przed odwodnieniem i przegrzaniem organizmu, na stanowiskach pracy, gdzie średni wydatek energetyczny wynosi 165 W/m^2 , przy izolacyjności termicznej odzieży 1 clo i 0,5 clo, dla analizowanych zestawów parametrów powietrza. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego niewłaściwie opisuje obciążenie cieplne przy średnim wydatku energetycznym wynoszącym 230 W/m^2 . W środowisku gorącym charakteryzującym

się wysoką wilgotnością względną oraz niską prędkością przepływu powietrza może dojść do przekroczenia granicznej wartości 3750 g utraty wody z organizmu według proponowanych zasad określania czasu pracy przez metodę oceny warunków mikroklimatu opartą na wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ .

Literatura

- Głuch B., 2015: *Sposoby oceny warunków mikroklimatu w wyrobiskach podziemnych*. Biblioteka Główna AGH [praca doktorska], Kraków.
- Wacławik J., Branny M., Borodulin-Nadzieja L., 2004: *Modelowanie wymiany ciepła między górnikiem a otoczeniem w trudnych warunkach klimatycznych*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- PN-EN ISO 7933:2005, *Ergonomia środowiska termicznego, Analityczne wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego*.
- Drenda J., 1993: *Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy kopalń głębokich*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z. 213, Gliwice.
- Fanger P.O., 1974: *Komfort Ciepłny*, Arkady, Warszawa.
- Drenda J., Morcinek-Pokrywka A., 2005: *Wpływ warunków klimatycznych na bezpieczeństwo pracy górników*, Zeszyty naukowe politechniki śląskiej, Górnictwo, z. 270.
- Domagała L., Kułagowska E., Karolak I., 2013: *Określanie rodzajów i ciężkości pracy wykonywanej przez górników*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Opracowanie zasad zatrudnienia pracowników w warunkach zagrożenia klimatycznego w podziemnych zakładach górniczych” w ramach projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”, Gliwice – Rybnik 27.06.2013
- Bogdan A., Bugajska J., Marszałek A., Sobolewski A., Zwolińska M., Kozłowska M., 2012: *Badania dotyczące izolacyjności cieplnej odzieży górników pracujących w kopalniach węgla*, praca badawcza, praca niepublikowana
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz. U. Nr 139, poz. 1169 oraz z 2006 r. Nr 124, poz. 863)

Verification of method to evaluate microclimate conditions based on thermal discomfort coefficient using predicted heat strain model

Abstract

The article presents the validation of method to evaluate microclimate conditions based on Thermal Discomfort Coefficient δ . The study was carried out taking into consideration correct evaluation of thermal stress in the working environment using the method of analytical determination and interpretation of heat stress experienced by a man in a hot environment described in the PN-EN ISO 7933:2005. The study was performed considering severity of work, metabolic rate and clothing insulation. The article describes the results of research and identifies disadvantages of analyzed microclimate indicator.

Keywords: evaluate microclimate conditions, thermal discomfort coefficient