

dr inż. ANDRZEJ SOBOLEWSKI

dr inż. MAGDALENA MŁYNARCZYK (ORCID: 0000-0002-9218-9781)

prof. dr hab. n. med. MARIA KONARSKA (ORCID: 0000-0002-2902-575x)

dr hab. med. JOANNA BUGAJSKA prof. CIOP-PIB (ORCID: 0000-0003-3102-8869)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: szord@ciop.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0013.6275

# Porównanie wyników badań obciążenia cieplnego człowieka w środowisku gorącym z wynikami otrzymanymi z symulacji numerycznej

Fot. Aha-Softy/Bigstockphoto



Porównanie wyników badań wykonanych w komorze klimatycznej z udziałem ochotników w warunkach otoczenia:  $t_a = 42\text{ }^\circ\text{C}$ ; RH = 80%; prężność pary wodnej = 6,56 kPa,  $V = 0,5\text{ m/s}$ ; z prognozami z symulacji numerycznej wykonanej programem PHS wykazały ich zadowalającą zgodność.

Potwierdza to możliwość wykorzystania programu PHS do prognozowania obciążenia cieplnego człowieka w ekstremalnym środowisku gorącym, kiedy prężność pary wodnej w otaczającym środowisku przekracza wartość 4,5 kPa, przyjętą w normie PN-EN ISO 7933:2005 jako wartość maksymalną zakresu normy.

*Słowa kluczowe: ekstremalne obciążenia cieplne, środowisko gorące i wilgotne, przewidywane obciążenie cieplne (PHS)*

## Comparison the heat load as the results of tests on human subject in a hot environment with the results obtained from numerical simulation

Comparison of the results of tests carried out in a climatic chamber with volunteers at ambient conditions:  $t_a = 42\text{ }^\circ\text{C}$ ; RH = 80%; the vapor pressure = 6.56 kPa,  $V = 0.5\text{ m/s}$ ; with predictions from numerical simulation made by the PHS program, they showed their satisfactory compatibility. This confirms the possibility of using the PHS program to predict the heat load of a human being in an extreme hot environment, when the vapor pressure in the surrounding environment exceeds 4.5 kPa, indicated in PN-EN ISO 7933:2005 as a limit value.

*Keywords: extreme heat loads, hot and humid environment, predicted heat strain (PHS)*

## Wstęp

Działanie środowiska gorącego na organizm człowieka powoduje nadmierną akumulację ciepła w jego ciele. Obowiązującym obecnie kryterium fizjologicznym pracy bezpiecznej dla zdrowia w środowisku gorącym jest nieprzekroczenie poziomu  $38\text{ }^\circ\text{C}$  temperatury wnętrza ciała.

Do oceny warunków pracy w środowisku gorącym przewidziane są dwie normy:

1. PN-EN ISO 7243:2018-01 Ergonomia środowiska termicznego – Ocena obciążenia cieplnego za pomocą wskaźnika WBGT (temperatura wilgotnego termometru i poczerwionej kuli) [1, 2].

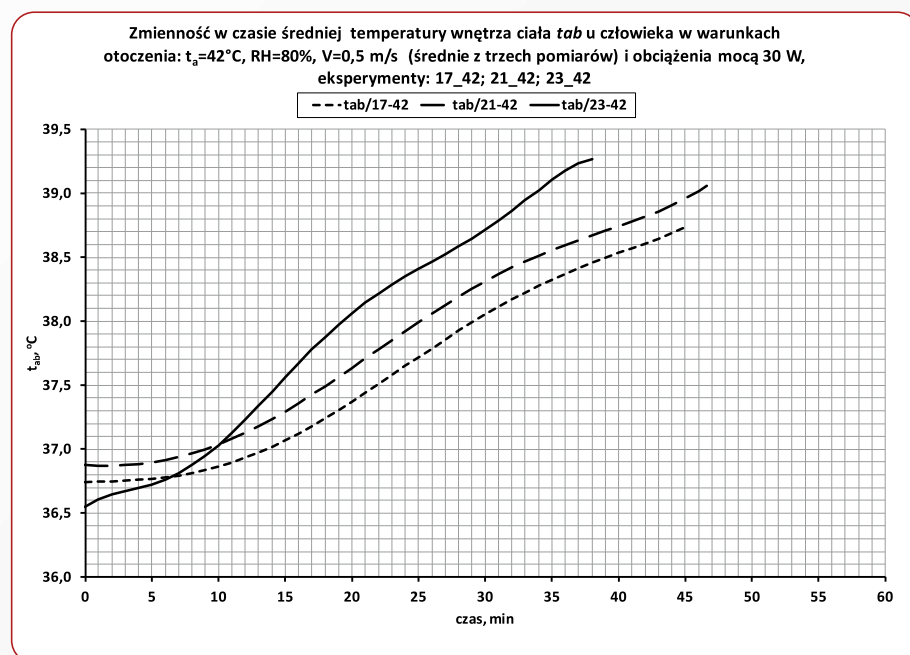
2. PN-EN ISO 7933:2005 Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego [3].

PN-EN 7243:2018-01 jest stosowana do oceny obciążenia cieplnego, działającego na człowieka w gorącym środowisku pracy, za pomocą wskaźnika WBGT (ang. *Wet Bulb Globe Temperature*). Jego normatywne wartości odniesienia służą do oszacowania przeciętnego wpływu środowiska gorącego na organizm człowieka w okresie reprezentatywnym dla jego pracy, najczęściej 8 godzin. Nie mają zatem zastosowania do oceny obciążeń cieplnych ekstremalnych i krótkotrwałych, które mogą również stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka. Z obciążeniami tego rodzaju można zetknąć się w naturalnym

Tabela. Zakres zmienności parametrów środowiskowych uwzględniony w ocenie analitycznej i interpretacji stresu cieplnego wg PN-EN ISO 7933:2005

Table. The range of variability of environmental parameters included in the analytical assessment and interpretation of heat stress according to PN-EN ISO 7933:2005

Nazwa parametru	Symbol	Minimum	Maksimum
Temperatura powietrza	$t_a$ , °C	15	50
Ciśnienie cząstkowe pary wodnej	$P_a$ , kPa	0	4,5
Różnica temperatury promieniowania i temperatury powietrza	$t_r - t_a$ , °C	0	60
Prędkość przepływu powietrza	$V$ , m/s	0	3
Tempo metabolizmu	$M$ , $W$	100	450
Izolacyjność cieplna odzieży ochronnej	$I_{cl}$ , clo	0,1	1,0



Rys. 1. Zmienność w czasie średniej temperatury wnętrza ciała  $t_{wb}$  u człowieka w warunkach otoczenia:  $t_a = 42^\circ\text{C}$ ,  $RH = 80\%$ ,  $V = 0,5$  m/s (średnia z trzech pomiarów), eksperymenty: 17\_42; 21\_42; 23\_42

Fig. 1. Variation in time of average internal body temperature  $t_{wb}$  inside human in ambient conditions:  $t_a = 42^\circ\text{C}$ ,  $RH = 80\%$ ,  $V = 0.5$  m/s (average of three measurements), experiments: 17\_42; 21\_42; 23\_42

środowisku kopalni głębokich, oraz podczas podziemnych akcji ratowniczych [4-6].

Do oceny wpływu obciążeń cieplnych ekstremalnych na organizm człowieka wykorzystywana jest PN-EN ISO 7933:2005. Oparto ją na podstawach naukowych z zakresu fizjologii człowieka i fizyki środowiska termicznego, które posłużyły autorom normy do opracowania metody analitycznej obliczania i interpretacji obciążenia cieplnego oraz programu komputerowego PHS (ang. *Predicted Heat Strain*) [7, 8].

Celem artykułu jest porównanie wyników badań wykonanych w warunkach wykraczających ponad zakres zmienności parametrów fizycznych, przyjętych w PN-EN ISO 7933:2005, z wynikami otrzymanymi z obliczeń za pomocą programu PHS, który pozwala określić zmiany parametrów fizjologicznych organizmu pracownika, zachodzące w wyniku wymiany ciepła między jego ciałem a otoczeniem w środowisku pracy.

## Materiały i metody

### Zakres zmienności parametrów środowiska gorącego w programie PHS

Zakres zmienności wiodących parametrów środowiska gorącego, uwzględniony w programie PHS, przedstawiono w tabeli.

Dane wejściowe do programu w jego wersji podstawowej obejmują informacje o 18 zmiennych. Niektóre są przyjęte domyślnie, a te, które trzeba wprowadzić obejmują m.in.: mikroklimat środowiska pracy, rozmiary ciała pracownika (masa i wysokość), jego tempo metabolizmu i obciążenie mocą, izolacyjność cieplną odzieży  $I_{cl}$  podstawowa, tj. zmierzona na manekinie nieruchomym. Wynikiem obliczeń obciążenia cieplnego pracownika są przewidywane wartości: końcowej temperatury wnętrza ciała, osiągniętej w planowanym momencie zakończenia pracy, często osiągającej wartość hipotetyczną, bo przewyższającą

$38^\circ\text{C}$ ; czasu ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia w rozpatrywanych warunkach, tj. czasu pracy do momentu osiągnięcia temperatury wnętrza ciała równej  $38^\circ\text{C}$ ; masy potu wytworzonego przez organizm podczas trwania pracy. Otrzymane z obliczeń, prognozowane wartości tych zmiennych odnoszą się do osób zdrowych i przystosowanych do pracy, którą wykonują.

Wykorzystanie PHS do prognozowania obciążenia cieplnego człowieka w ekstremalnym środowisku gorącym, wykraczającym poza zakres przyjęty w PN-EN ISO 7933:2005

Przykładem środowiska gorącego, ekstremalnie obciążającego organizm człowieka, są warunki naturalnego mikroklimatu kopalni głębokich [4-6]. Mogą one być źródłem obciążeń cieplnych, stanowiących zagrożenie dla jego zdrowia, a nawet życia. W przypadku awarii systemu klimatyzacji w kopalni, praca ciągła i długotrwała w tym środowisku jest niemożliwa. Jednoczesne oddziaływanie wysokiej temperatury otoczenia ( $t_a$ ) i wysokiej wilgotności powietrza ( $RH$ ), połączone często z dużym wysiłkiem fizycznym, powoduje w ciągu kilkunastu minut szkodliwą akumulację ciepła w organizmie. W jej rezultacie temperatura wnętrza ciała w *rectum* ( $t_{re}$ ) osiąga szybko graniczną wartość  $38^\circ\text{C}$ . Dalsza ekspozycja pracownika w tym środowisku jest niewskazana, a po przekroczeniu  $39^\circ\text{C}$  – zabroniona.

PN-EN ISO 7933:2005 dopuszcza górną granicę ciśnienia cząstkowego pary wodnej (prężność pary wodnej) w powietrzu równą 4,5 kPa, natomiast w warunkach naturalnych – na poziomie wydobywania w kopalniach głębokich, ciśnienie cząstkowe pary wodnej może osiągać 8 kPa (np.  $RH = 85\%$ ;  $t_a = 45^\circ\text{C}$ ).

Wykorzystanie zatem programu PHS do analizy i prognozy obciążeń cieplnych w naturalnie występujących i przewidywanych warunkach klimatycznych kopalni (uwzględniających coraz głębszy poziom wydobywania), wymaga uprzedniego porównania otrzymanych wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi z badań z udziałem ochotników w realnych lub sztucznie odtworzonych warunkach mikroklimatu kopalni.

### Badania reakcji fizjologicznych z udziałem ochotników

W Zakładzie Ergonomii w CIOP-PIB, w latach 2008-2017 prowadzone były badania odpowiedzi fizjologicznych ochotników, poddawanych działaniu środowiska gorącego, symulowanego w komorach klimatycznych [9-11]. Warunki mikroklimatu utrzymywane w przeprowadzanych badaniach w znacznym stopniu pokrywały przedział zmienności temperatury powietrza ( $t_a$ ) i wilgotności względnej ( $RH$ ) odnotowany w naturalnym środowisku kopalni głębokich.



Natomiast wyniki badań reakcji fizjologicznej organizmu człowieka na obciążenie ciepłe, zastosowane do porównań z wynikami otrzymanymi z symulacji numerycznej, zostały wykonane w latach 2014-2015 [9].

Prowadzono wówczas badania z udziałem 3 ochotników (wiek  $22 \pm 1$  lat,  $VO_{2max}$   $3,3 \pm 0,3$  l/min, BMI  $26 \pm 2$ ), w warunkach mikroklimatu:  $t_a = 42^\circ C$ ,  $RH = 80\%$  ( $P_a = 6,56$  kPa),  $V = 0,5$  m/s, przy obciążeniu organizmu ochotników mocą  $W = 30$  W.

Przedmiotem tych badań, poza innymi zmiennymi fizjologicznymi, była temperatura powierzchni skóry  $t_{sk}$  (mierzona w 8 punktach pomiarowych) i temperatura wnętrza ciała  $t_{ab}$  (mierzona w przewodzie pokarmowym) u osób poddawanych działaniu środowiska gorącego. Uczestnicy badań przed ich obciążeniem środowiskiem gorącym, przebywali przez 45 minut w warunkach mikroklimatu umiarkowanego w komorze klimatycznej nr 1, w celu ustabilizowania się ich parametrów fizjologicznych na poziomie odpowiadającym stanowi spoczynku. Do warunków stabilizacji przyjęto trzy wartości temperatury otoczenia:  $t_a = 17^\circ C$ ,  $21^\circ C$  i  $23^\circ C$ . Temperatura ta miała wpływ na wartości temperatury powierzchni skóry uczestników badań ustalającej się po 45 minutach ich pobytu w danych warunkach, i w dalszej konsekwencji, na czas ekspozycji w środowisku gorącym, do momentu przekroczenia temperatury wnętrza ciała  $38^\circ C$ . Temperatury powierzchni skóry ustalające się podczas stabilizacji, różne w zależności od temperatury otoczenia, przyjęto do obliczeń symulacyjnych jako wartości początkowe dla chwili  $\tau = 0$  ( $\tau = 0$ ), po zamianie środowiska na środowisko gorące utrzymywane w komorze klimatycznej nr 2.

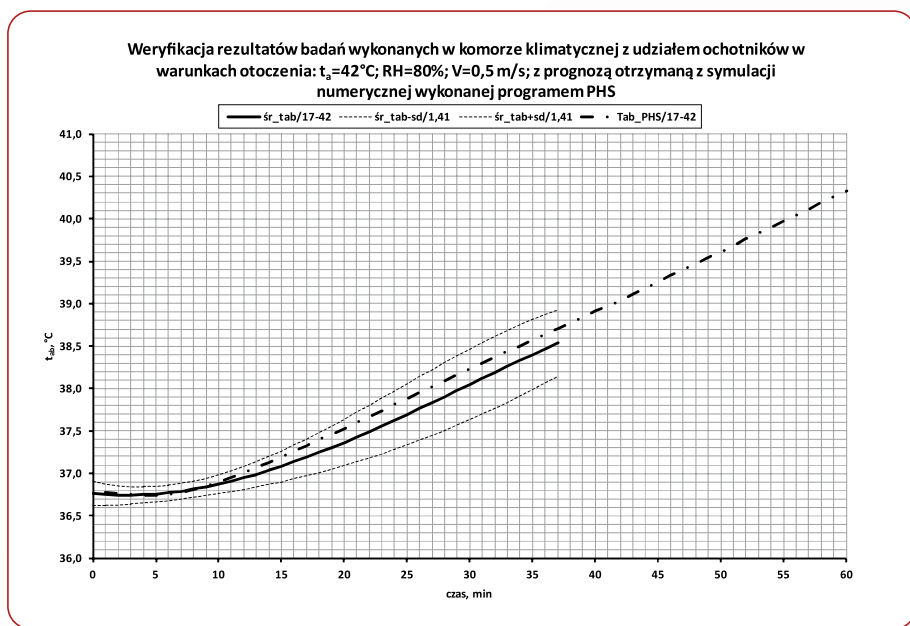
### Wyniki badań własnych

#### Porównanie wyników badań i symulacji numerycznej PHS

Na podstawie uśrednionych wyników pomiarów z wymienionych wyżej badań, określono przebieg w czasie  $\tau$  średniej ważonej temperatury powierzchni skóry i temperatury wnętrza ciała u ochotników, przebywających w środowisku gorącym.

Na rys. 1. przedstawiono empiryczne funkcje zmienności w czasie średniej temperatury wnętrza ciała  $t_{ab}$  u człowieka (średnia z trzech pomiarów), odnotowane w omawianych warunkach otoczenia. W zależności od temperatury, w której przebiegała stabilizacja początkowa, w celu rozróżnienia uzyskanych wyników badań, oznaczono je jako: 17\_42; 21\_42; 23\_42.

- Dane wejściowe przyjęte do symulacji:
- temperatura powietrza  $t_a = 42^\circ C$
  - temperatura radiacyjna  $t_r = 42^\circ C$



Rys. 2. Funkcja empiryczna  $\bar{t}_{ab}/17-42$  zmienności w czasie średniej temperatury wnętrza ciała u człowieka przebywającego w środowisku gorącym w temperaturze  $t_a = 42^\circ C$ ,  $RH = 80\%$ ,  $V = 0,5$  m/s, obciążanego mocą  $W = 30$  W – linia ciągła, badanie zakończone po upływie 37 minut. Funkcja prognozy zmienności w czasie temperatury wnętrza ciała  $T_{ab\_PHS}/17-42$  otrzymana dla tych samych warunków z obliczeń PHS – linia przerywana. Temperatura stabilizacji przed ekspozycją w środowisku gorącym wynosiła  $t_a = 17^\circ C$ . Dwie krzywe kropkowane otaczające obie funkcje:  $\bar{t}_{ab}/17-42$  oraz  $T_{ab\_PHS}/17-42$ , oznaczają pasmo ufności 68% wokół wartości średnich  $t_{ab}$  opisanych funkcją  $\bar{t}_{ab}/17-42$

Fig. 2. Empirical function  $\bar{t}_{ab}/17-42$  variability in time of the internal body temperature in a human being in a hot environment at  $t_a = 42^\circ C$ ,  $RH = 80\%$ ,  $V = 0.5$  m/s, loaded with power  $W = 30$  W – solid line, test ended after 45 minutes. The function of forecasting the variation in time of body temperature  $T_{ab\_PHS}/17-42$  obtained for the same conditions from simulation calculations with the PHS program – dashed line. The stabilization temperature before exposure in a hot environment was  $t_a = 17^\circ C$ . Two dotted curves surrounding both functions:  $\bar{t}_{ab}/17-42$  and  $T_{ab\_PHS}/17-42$ , denote the 68% confidence band around the mean values of  $t_{ab}$  described by the function  $\bar{t}_{ab}/17-42$

- wilgotność względna powietrza  $RH = 80\%$
- prędkość przepływu powietrza  $V = 0,5$  m/s
- obciążenie człowieka mocą  $W = 30$  W (marsz na bieżni)
- izolacyjność cieplna odzieży zastosowanej w badaniach  $I_a = 0,79$  clo (pomiar własny)
- średnia masa ciała człowieka (uczestnika badań)  $m = 87,1$  kg
- średnia wysokość ciała człowieka (uczestnika badań)  $h = 1,83$  m
- średnia powierzchnia ciała człowieka (uczestnika badań)  $A_{Du} = 2,09$  m<sup>2</sup>
- metabolizm przyjęty do obliczeń  $M = 150$  W/m<sup>2</sup>
- temperatura powierzchni skóry początkowa ustalona w  $t_a = 17^\circ C$ ,  $t_{sk}(0)/17 = 31,93^\circ C$  (wartość średnia, wynik z badań)
- temperatura powierzchni skóry początkowa ustalona w  $t_a = 21^\circ C$ ,  $t_{sk}(0)/21 = 32,9^\circ C$  (wartość średnia, wynik z badań)
- temperatura powierzchni skóry początkowa ustalona w  $t_a = 23^\circ C$ ,  $t_{sk}(0)/23 = 33,33^\circ C$  (wartość średnia, wynik z badań)
- temperatura początkowa wnętrza ciała  $t_{ab}(0)/17 = t_{ab}(0)/21 = t_{ab}(0)/23$  stała dla  $t_a = 17^\circ C, 21^\circ C, 23^\circ C$ ,  $t_{ab}(0) = 36,79^\circ C$  (wartość średnia, wynik z badań).

Przedział dopuszczalnej zmienności parametrów przyjętych do symulacji numerycznej w przypadku kombinacji temperatury powietrza  $t_a = 42^\circ C$  i wilgotności względnej

powietrza  $RH = 80\%$  jest przekroczony ze względu na wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej, wynoszącą  $P_a = 6,56$  kPa. Wartość graniczna ciśnienia pary wodnej przyjmowana w PHS, jak wspomniano, wynosi  $P_a = 4,5$  kPa (tabela). W wyniku wykonanych symulacji numerycznych określono przebiegi funkcji:  $T_{ab\_PHS}/17-42$ ,  $T_{ab\_PHS}/21-42$ ,  $T_{ab\_PHS}/23-42$  (oznaczone dużą literą  $T_{ab\_PHS}$ ), obliczone w odniesieniu do wymienionych wyżej kombinacji zmiennych wejściowych. Na rys. 2. przedstawiono funkcję  $T_{ab\_PHS}/17-42$  wraz z funkcją empiryczną  $\bar{t}_{ab}/17-42$ , określoną na podstawie wyników badań z udziałem ludzi.

Funkcja  $T_{ab\_PHS}/17-42$  (linia przerywana) opisująca zmienność w czasie wartości prognozowanych temperatury wnętrza ciała u człowieka, przebywającego w środowisku gorącym ( $t_a = 42^\circ C$ ), po aklimatyzacji w temperaturze otoczenia  $t_a = 17^\circ C$ , od 10. minuty czasu ekspozycji przebiega prawie równoległe do funkcji  $\bar{t}_{ab}/17-42$ , obrazującej rzeczywisty przebieg temperatury wnętrza ciała, określony na podstawie badań z udziałem ochotników (linia ciągła).

Wartość temperatury prognozowanej do 30. minuty badań, przewyższa zmierzoną w trakcie badań przeciętnie o około  $0,15^\circ C$ . Wraz z upływem czasu następuje rozejście się obu krzywych. W 45. minucie różnica między wartością średnią temperatury wnętrza ciała



otrzymaną z badań a temperaturą prognozowaną, zwiększa się do około  $+0,55^{\circ}\text{C}$ .

Biorąc pod uwagę odchylenie standardowe od średniej temperatury  $\bar{s}r_{t_{ab}}$  ( $\pm 0,23^{\circ}\text{C}$ ) od chwili początkowej  $\tau = 0$  do  $\tau = 30$ . minuty, jest to dobra zgodność wyników pomiarów z wynikami przewidywanymi z symulacji numerycznej. Z przebiegu funkcji  $\bar{s}r_{t_{ab}/17-42}$  wynika, że wartość graniczna temperatury wnętrza ciała  $38^{\circ}\text{C}$  była osiągnięta w 29. minucie i 30. sekundzie eksperymentu. Natomiast z funkcji prognozy  $T_{ab, PHS}/17-42$  wynika, że stan ten może być osiągnięty w 27. minucie pobytu człowieka w rozpatrywanym środowisku. W przypadku pozostałych przeprowadzonych eksperymentów zgodność wyników pomiarów z wynikami przewidywanymi z symulacji numerycznej okazała się podobna.

Identyczne zestawienia wykonano w odniesieniu do funkcji  $T_{ab, PHS}/21-42$ , opisującej zmienność w czasie wartości prognozowanych temperatury wnętrza ciała u człowieka przebywającego w środowisku gorącym ( $t_a = 42^{\circ}\text{C}$ ) po aklimatyzacji w temperaturze otoczenia  $t_a = 21^{\circ}\text{C}$ . Do 30. minuty prognoza pokrywała się niemal z funkcją  $\bar{s}r_{t_{ab}/21-42}$ , obrazującą rzeczywisty przebieg temperatury wnętrza ciała, określony na podstawie badań z udziałem ludzi. W 25. minucie ekspozycji człowieka w rozpatrywanym środowisku została osiągnięta temperatura wnętrza ciała  $\bar{s}r_{t_{ab}}(\tau = 25) = 38^{\circ}\text{C}$ . Począwszy od 30. minuty wartości prognozowane zaczynały przewyższać wartości zmierzone. W 45. minucie wartość prognozowana przewyższa zmierzoną podczas badań o  $0,43^{\circ}\text{C}$ .

Podobne zestawienie wykonano w odniesieniu do funkcji  $T_{ab, PHS}/23-42$ , opisującej zmienność w czasie wartości prognozowanych temperatury wnętrza ciała u człowieka przebywającego w środowisku gorącym ( $t_a = 42^{\circ}\text{C}$ ) po aklimatyzacji w temperaturze otoczenia  $t_a = 23^{\circ}\text{C}$ . Do 10. minuty prognoza

przebiegała powyżej funkcji  $\bar{s}r_{t_{ab}/23-42}$ , opisującej rzeczywisty przebieg temperatury wnętrza ciała, określony na podstawie badań z udziałem ludzi. Różnica obu wartości nie przekraczała  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Powyżej 10. minuty funkcja  $\bar{s}r_{t_{ab}/23-42}$  przebiegała powyżej linii funkcji  $T_{ab, PHS}/23-42$ , a od 20. minuty przebieg obu funkcji był równoległy. Różnica wartości, dzieląca obie linie równoległe, wynosiła około  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Temperaturę wnętrza ciała  $t_{ab} = 38^{\circ}\text{C}$  zanotowano w warunkach rzeczywistych w ok. 19. minucie przebywania człowieka w rozpatrywanym środowisku, natomiast z funkcji prognozy moment osiągnięcia temperatury wnętrza ciała  $T_{ab, PHS} = 38^{\circ}\text{C}$  przewidywany jest na 24. minutę. W tym czasie temperatura zmierzona podczas badań wynosiła  $t_{ab} = 38,35^{\circ}\text{C}$  i przewyższała temperaturę prognozowaną o  $0,35^{\circ}\text{C}$ .

#### Ocena zgodności wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznej

W omawianych przypadkach za zgodność wyników pomiarów z wynikami przewidywanymi z symulacji numerycznej (rys. 2.) przyjęto kryterium niepewności standardowej, a więc zawierania się wartości prognozowanej  $T_{ab, PHS}$  w 68% przedziale ufności  $[t_{ab} - sd/(N-1)^{1/2}] \leq t_{ab} \leq [t_{ab} + sd/(N-1)^{1/2}]$  otaczającym wartość średnią  $t_{ab}$  (gdzie  $N$  oznacza liczbę pomiarów).

#### Podsumowanie

Wyniki porównania rezultatów badań, wykonanych w komorze klimatycznej z udziałem ochotników, w warunkach otoczenia:  $t_a = 42^{\circ}\text{C}$ ,  $RH = 80\%$  ( $P_a = 6,56\text{ kPa}$ ),  $V = 0,5\text{ m/s}$ , z prognozami otrzymanymi z symulacji numerycznej, wykonane przy wykorzystaniu programu PHS, wykazały zgodność w zakresie niepewności standardowej. Potwierdzają zatem, w rozpatrywanym przypadku, gdy wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej (prężność pary wodnej) w otaczającym środowisku wy-

kracza poza zakres wartości przyjętych w PN-EN ISO 7933:2005, możliwości wykorzystania programu PHS do prognozowania obciążenia cieplnego człowieka w ekstremalnym środowisku gorącym.

Podsumowując wyniki porównań, przeprowadzonych w odniesieniu do rozpatrywanych warunków, wykraczających poza zakres PN-EN ISO 7933:2005, można stwierdzić, że w zakresie niepewności standardowej uzyskano zbieżność wyników otrzymanych z symulacji z wynikami otrzymanymi z pomiarów.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 7243:2018-01 Ergonomia środowiska termicznego – Ocena obciążenia cieplnego za pomocą wskaźnika WBGT (temperatura wilgotnego termometru i poczerzonej kuli).
- [2] MARSZAŁEK, A. Nowelizacja normy do oceny obciążenia cieplnego w gorącym środowisku na podstawie wskaźnika WBGT [Revision of the standard for the assessment of heat load in a hot environment based on the WBGT index]. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka* 2019, 573, 6:27-28.
- [3] PN-EN ISO 7933:2005 Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego.
- [4] WACŁAWIK, J., BRANNY, M., BORODULIN-NADZIEJA, L. Modelowanie wymiany ciepła między górnikiem a otoczeniem w trudnych warunkach klimatycznych [Modeling of heat exchange between miner and surroundings in difficult climatic conditions]. *Wydawnictwa AGH, Kraków* 2004.
- [5] DRENDA, J. Ocena klimatycznych warunków pracy górników w polskich kopalniach węgla i rudy miedzi [Assessment of climatic working conditions of miners in Polish coal and copper ore mines]. *Górnictwo i Geologia*, tom 7, zeszyt 3, 2012.
- [6] SZLĄZAK, N., OBRACA, D., GŁUCH, B. Analiza warunków mikroklimatu w rejonie ścian eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego [Analysis of microclimate conditions in the vicinity of the mining walls of hard coal mines]. *Górnictwo i Geologia*. 2013, tom 8, zeszyt 2.
- [7] MALCHAIRE, J., PIETTE, A., KAMPMANN, B., MEHNERT, P., GEBHARDT, H., HAVENITH, G., DEN HARTOG, E., HOLMER, I., PARSONS, K., ALFANO, G., GRIEFAHN, B. Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann. Occup. Hyg.* 2001, 45:123-135.
- [8] PARSONS, K. C. Human thermal environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold of Human Health, Comfort, and Performance. Third Edition Taylor & Francis London, 2014.
- [9] SOBOLEWSKI, A. Opracowanie metody oceny obciążenia cieplnego organizmu w warunkach niejednorodnego środowiska gorącego Sprawozdanie z zadania 2.Z.22. z zakresu służb państwowych 1.01.2014-31.12.2015.
- [10] SOBOLEWSKI, A., MŁYNARCZYK, M., KONARSKA, M., BUGAJSKA, J. The influence of air humidity on the heat stress in a hot environment. JOSE, w druku.
- [11] SOBOLEWSKI, A., MŁYNARCZYK, M., KONARSKA, M., BUGAJSKA, J. Effect of previous lowering the skin temperature on time of a safe exposure to hot environment. JOSE, w druku.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*