

**Teoretyczne ujęcie problemu
obciążenia organizmu człowieka
w gorącym środowisku pracy
dla służb monitorujących warunki pracy
i zarządzających bezpieczeństwem pracy w kopalniach**

Materiały informacyjne CIOP-PIB

Teoretyczne ujęcie problemu obciążenia organizmu człowieka w gorącym środowisku pracy dla służb monitorujących warunki pracy i zarządzających bezpieczeństwem pracy w kopalniach

Opracowano na podstawie wyników IV etapu program 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.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt I.N.05: Opracowanie modelu obciążenia cieplnego organizmu człowieka przebywającego w warunkach środowiskowych odpowiadających głęboko położonym oddziałom kopalni węgla i miedzi

Autor:

dr inż. Andrzej Sobolewski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Ergonomii

© Copyright by

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2018

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Wstęp

Naturalne warunki mikroklimatu kopalni głębokich są dla ludzi źródłem obciążeń cieplnych, zagrożających ich zdrowiu, a nawet życiu. W przypadku awarii systemu klimatyzacji w kopalni, bez którego ciągła praca człowieka w tym środowisku jest niemożliwa, jednoczesne oddziaływanie wysokiej temperatury otoczenia i wilgotności powietrza powoduje – w ciągu kilkunastu minut – szkodliwą akumulację ciepła w ludzkim organizmie. Do oceny obciążenia cieplnego człowieka przebywającego i pracującego w gorącym środowisku stosuje się normę: PN-EN ISO 7933:2005 *Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego*. Przyjęty w niej model wymiany ciepła między organizmem a otoczeniem jest oparty na równaniu bilansu cieplnego. Na jego podstawie powstał program obliczeniowy PHS (*Predicted Heat Strain*), służący do oceny obciążeń cieplnych oddziałujących na człowieka pracującego w gorącym środowisku.

Norma PN-EN ISO 7933:2005 dopuszcza górną granicę ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu równą 4,5 kPa. Tymczasem na poziomie wydobywania w kopalniach głębokich w warunkach naturalnych ciśnienie pary wodnej może osiągać nawet 8 kPa.

Aby sprawdzić poprawność oceny obciążeń w naturalnych warunkach klimatycznych (stwierdzonych i przewidywanych) kopalni głębokich za pomocą programu PHS, trzeba wcześniej zweryfikować wyniki obliczeń, biorąc pod uwagę wyniki badań z udziałem ochotników, przeprowadzonych w realnych lub sztucznie odtworzonych warunkach mikroklimatu kopalni. W CIOP-PIB w latach 2008-2016 wykonano badania na ochotnikach, których poddawano działaniu środowiska gorącego, symulowanego w komorach klimatycznych. Zakres zmienności mikroklimatu uwzględniony w przeprowadzonych doświadczeniach w dużym stopniu pokrywał przedział zmienności temperatury powietrza (t_a) i wilgotności względnej (RH) w kopalniach głębokich. Wyniki tych badań, stanowiące unikatową bazę danych, wykorzystano do weryfikacji prognoz uzyskanych z obliczeń wykonanych za pomocą programu komputerowego PHS. Ta weryfikacja, odnosząca się do zmiennej diagnostycznej, za jaką uważa się temperaturę (t_{re}) wnętrza ciała człowieka i czas (τ), w którym dochodzi do przekroczenia przez nią poziomu 38 °C (38,5 °C), wykazała przydatność programu PHS do oceny obciążeń cieplnych człowieka przebywającego w środowisku gorącym w warunkach ciśnienia cząstkowego pary wodnej do 6,6 kPa ($t_a = 42$ °C, $RH = 80\%$). Rozszerzenie zakresu do wartości 8 kPa wymagałoby podjęcia

nowych badań z udziałem ochotników i ponownego porównania wyników empirycznych z wynikami symulacji numerycznej.

Wpływ wybranych parametrów wejściowych na czas bezpiecznej ekspozycji w środowisku gorącym

Z uwagi na to, że wielkości prognozowane za pomocą programu PHS zależą od wielu parametrów wejściowych, dalej omówiono wpływ niektórych z nich na uzyskiwane wyniki.

Rozmiary ciała człowieka

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że rozmiary ciała pracownika przebywającego w środowisku gorącym – przede wszystkim powierzchnia ciała – mają wpływ na długość czasu ekspozycji bezpiecznego dla zdrowia. Jeśli za wartość odniesienia przyjmie się czas dopuszczalnej ekspozycji osoby reprezentującej 50. centyl (czyli osoby o przeciętnych rozmiarach ciała), dla której opracowano model (tab. 1), to osoba reprezentująca 5. centyl osiągnie ten sam poziom dopuszczalnej akumulacji ciepła w organizmie wcześniej, tj. po upływie 0,91 prognozowanego czasu ekspozycji osoby reprezentującej 50. centyl. Osoba o rozmiarach ciała reprezentujących 95. centyl może bez szkody dla zdrowia przebywać w środowisku gorącym dłużej, tj. przez 1,1 czasu ekspozycji osoby reprezentującej 50. centyl. Określając czas ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka (na podstawie map izochron załączonych do opracowanego modelu obciążenia cieplnego), należy wziąć pod uwagę rozmiary człowieka.

Tabela 1. Masy i rozmiary ciał mężczyzn odpowiadające 5., 50. i 95. centylowi populacji polskiej (na podstawie: A. Gedliczka i in., „Atlas miar człowieka – dane do projektowania i oceny ergonomicznej”, Wyd. CIOP, Warszawa 2001)

Centyl	5c	50c	95c
Masa ciała [kg]	60	78	99
Wysokość ciała [cm]	164,3	174,8	185,4

Wysiłek fizyczny

Wartość metabolizmu M przyjmowana do obliczeń w programie PHS determinuje poprawność i wiarygodność uzyskiwanych wyników. Metabolizm człowieka jest ściśle związany z ciężkością wykonywanej pracy. Bez zaangażowania w wysiłek fizyczny, czyli bez *obciążenia człowieka mocą*, organizm nie osiąga wysokiego metabolizmu. Przyjmuje się, że podczas działalności niewymagającej wysiłku fizycznego cała energia wytwarzana w organizmie zamienia się w ciepło, które następnie jest rozpraszane do otoczenia. Do zajęć niewymagających wysiłku fizycznego można zaliczyć pracę siedzącą, np. przy komputerze ($M \approx 70 \text{ W/m}^2$), lub prowadzenie samochodu osobowego ($M \approx 95 \text{ W/m}^2$). Jakikolwiek wysiłek fizyczny natychmiast powoduje wzrost metabolizmu. Bieganie w tempie umiarkowanym podnosi wartość metabolizmu do ok. 350 W/m^2 , a wejście z prędkością 4 km/h na pochyłość 25° z obciążeniem 20 kg – do ok. 410 W/m^2 .

W obliczeniach wykonywanych za pomocą programu PHS uwzględnia się wartości mocy W przewidzianej na wykonanie pracy fizycznej. Przy małych wartościach metabolizmu M zaleca się przyjęcie $W = 0$. W praktyce ten postulat stosuje się także przy dużych wartościach metabolizmu, co jest błędem, który prowadzi do znacznego zafałszowania obliczonych czasów bezpiecznej dla zdrowia ekspozycji w środowisku gorącym. W takim przypadku zakłada się bowiem, że energia wytworzona w organizmie w całości zostaje przetworzona w ciepło, które akumuluje się w ciele i podnosi jego temperaturę. W związku z tym dopuszczalny dla zdrowia poziom temperatury wnętrza ciała, wynoszący 38°C (lub $38,5^\circ\text{C}$), jest osiąganym wcześniej, a prognozowany czas dopuszczalnej ekspozycji – krótszy od potencjalnego czasu, który mógłby zostać wykorzystany na pracę w danych warunkach środowiska gorącego.

Można przyjąć, że od wartości $M > 130 \text{ W/m}^2$ ok. 20% wartości metabolizmu człowieka jest wykorzystywane na wykonywaną pracę. Różnica ($M - W$) jest wartością mocy cieplnej uczestniczącej w akumulacji ciepła w organizmie.

Temperatura otoczenia i wilgotność względna powietrza

Z symulacji numerycznych dotyczących środowiska gorącego wynika, że jeśli temperatura otoczenia jest stała, to począwszy od pewnej wartości wilgotności względnej RH , obliczony czas bezpiecznej dla zdrowia człowieka ekspozycji nie skraca się mimo wzrostu RH (wydaje się, że tego należałoby oczekiwać). Przyczyny tego zjawiska należy upatrywać w zmniejszaniu się (wraz ze wzrostem wilgotności względnej) różnicy między ciśnieniem cząstkowym pary wodnej zawartej w otaczającym powietrzu Pa_{sr} a ciśnieniem pary wodnej występującej nad powierzchnią skóry pokrytej potem Pa_{sk}

(para wodna nasycona). W przypadku gdy ciśnienie pary wodnej nad powierzchnią skóry przewyższa wartość ciśnienia pary wodnej w otoczeniu, zachodzi proces parowania potu, czemu towarzyszy rozpraszanie ciepła z organizmu człowieka. Tak powstałe straty ciepła ograniczają akumulację ciepła w organizmie i w konsekwencji wydłuża się czas ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia pracownika w środowisku gorącym. W odwrotnym przypadku parowanie potu jest zablokowane i nie ma strat ciepła z organizmu. Od momentu ustania parowania potu wzrost wilgotności względnej powietrza w otaczającym środowisku przestaje odgrywać rolę w wymianie ciepła między organizmem człowieka a otoczeniem, chyba że na powierzchni ciała człowieka następuje kondensacja pary wodnej i ciepło kondensacji jest przekazywane do organizmu. Ten proces musi być jednak na tyle wydajny, aby jego wpływ na akumulację w krótkim czasie ekspozycji dało się zmierzyć. Źródłem ciepła, które na skutek niedostatecznego rozpraszania do otoczenia gromadzi się w organizmie, są przede wszystkim procesy endogenne (metabolizm) i wysoka temperatura środowiska (ciepło egzogenne). Jeżeli w tych warunkach temperatura otoczenia i metabolizm człowieka są stałe, to przyrost w czasie akumulacji ciepła w organizmie również jest quasi-stały. Właśnie dlatego czasy ekspozycji, obliczone dla rosnących wartości RH , przy których nie zachodzi parowanie potu, są sobie równe (tab. 2).

Model obciążenia cieplnego organizmu człowieka przebywającego w warunkach odpowiadających głęboko położonym oddziałom kopalni węgla i miedzi

Do opracowania modelu obciążenia cieplnego wykorzystano rozszerzony program komputerowy PHS, oparty na postanowieniach normy PN-EN ISO 7933:2005. W stosunku do programu, którego kod źródłowy jest załączany do tekstu normy ISO 7933, rozszerzenia obejmują m.in. możliwość wprowadzania do obliczeń wartości początkowych temperatury powierzchni skóry człowieka t_{sk} i temperatury wnętrza ciała t_{re} . W niniejszym opracowaniu do obliczeń przyjęto wartości: $t_{sk} = 34,1^{\circ}\text{C}$, $t_{re} = 36,8^{\circ}\text{C}$.

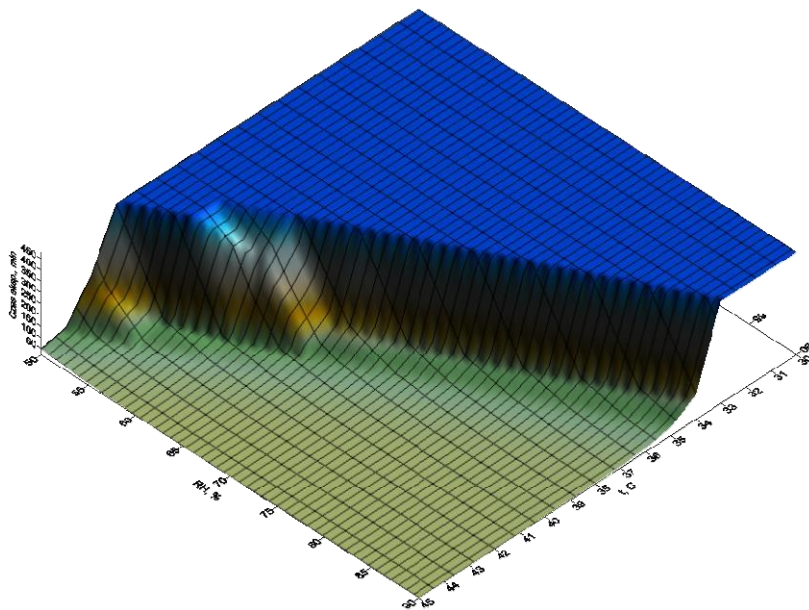
Na podstawie symulacji numerycznych opracowano model obciążenia cieplnego organizmu mężczyzny o wzroście 1,75 m i masie ciała 78 kg, reprezentującego 50. centyl polskiej populacji. Wyniki obliczeń, służące do określania czasu ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w naturalnym środowisku gorącym kopalni głębokich przedstawiono w postaci modeli 3D oraz map

izochron, obrazujących zależności czasu ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) od temperatury otoczenia (zmieniającej się w zakresie $30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) i wilgotności względnej powietrza (zmieniającej się w zakresie $50\% \leq RH \leq 90\%$).

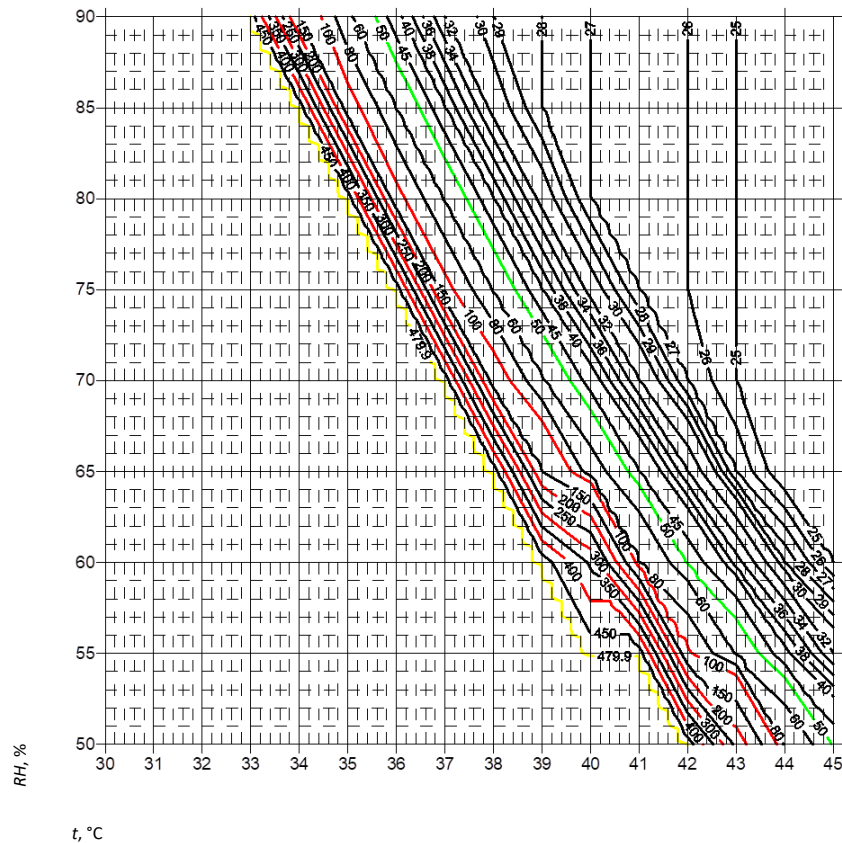
Zarówno modele 3D, jak i mapy izochron opracowano dla:

- kryterium nieprzekraczania temperatury wnętrza ciała wartości $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- metabolizmu człowieka M równego: 120, 140, 160, 180 i 200 W/m^2
- obciążenia człowieka mocą W wynoszącą: 0; 13,5; 17,6; 25,9 i $46,6\text{ W/m}^2$ (wartości W wynikają z empirycznej zależności $W = f(M)$, opracowanej na podstawie badań własnych CIOP-PIB)
- prędkości przepływu powietrza V równej: 0,2; 0,5; 1 i 2 m/s
- izolacyjności cieplnej odzieży ochronnej $I_{cl} = 1\text{ clo}$.

Przykładowy model 3D przedstawiający zależność czasu bezpiecznej ekspozycji od temperatury otoczenia i wilgotności względnej powietrza przedstawiono na rys. 1, a przykładową mapę izochron, sporządzoną dla tych samych warunków mikroklimatu i kryteriów fizjologicznych – na rys. 2.



Rys. 1. Model 3D zależności czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowany dla: $t_{re} = 38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M = 200\text{ W/m}^2$, $W = 46,6\text{ W/m}^2$, $V = 2\text{ m/s}$, $I_{cl} = 1\text{ clo}$



Rys. 2. Izochrony czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowane dla: $t_{re} = 38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M = 200\text{ W/m}^2$, $W = 46,6\text{ W/m}^2$, $V = 2\text{ m/s}$, $I_{cl} = 1\text{ clo}$

Wyniki symulacji numerycznej, zaprezentowane w formie modeli 3D i map izochron, opracowanych dla tych samych warunków mikroklimatu i kryteriów fizjologicznych, zawarto w załączniku do „Modelu obciążenia cieplnego organizmu człowieka przebywającego w warunkach środowiskowych odpowiadających głęboko położonym oddziałom kopalni węgla i miedzi”. Zamieszczono w nim również tablicę czasów bezpiecznej dla zdrowia człowieka ekspozycji w środowisku gorącym w temperaturze $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ w zależności od wartości metabolizmu, obciążenia mocą i wilgotności względnej powietrza (tab. 2).

Tabela 2. Czasy (podane w minutach) bezpiecznej dla zdrowia człowieka ekspozycji (kryterium osiągnięcia: $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$ – kolor czarny, $t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$ – kolor czerwony) w środowisku gorącym, w temperaturze $t_a = 50^{\circ}\text{C}$, w zależności od wartości metabolizmu M , obciążenia mocą W i wilgotności względnej RH

RH, %	$M = 120 \text{ W/m}^2$ $W = 0 \text{ W/m}^2$		$M = 140 \text{ W/m}^2$ $W = 13,5 \text{ W/m}^2$		$M = 160 \text{ W/m}^2$ $W = 17,6 \text{ W/m}^2$		$M = 180 \text{ W/m}^2$ $W = 25,9 \text{ W/m}^2$		$M = 200 \text{ W/m}^2$ $W = 46,6 \text{ W/m}^2$	
	$t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$	$t_{re} = 38,5^{\circ}\text{C}$
$V = 0,2 \text{ m/s}$										
50	20	27	20	26	19	25	18	24	19	24
55	21	27	20	26	19	25	18	24	19	24
60	21	27	20	26	19	25	18	24	19	24
65	21	27	20	26	19	25	18	24	19	24
70	21	27	20	26	19	25	19	24	19	24
75	21	27	20	26	19	25	19	24	19	24
80	21	27	21	26	19	25	19	24	19	24
85	21	27	21	26	19	25	19	24	19	24
90	21	27	21	26	19	25	19	24	19	24
$V = 0,5 \text{ m/s}$										
50	20	26	20	26	19	24	18	24	18	24
55	20	26	20	26	19	24	18	23	18	24
60	20	27	20	26	19	24	18	23	18	24
65	21	27	20	26	19	24	18	23	19	24
70	21	27	20	26	19	24	18	24	19	24
75	21	27	20	26	19	25	18	24	19	24
80	21	27	20	26	19	25	19	24	19	24
85	21	27	20	26	19	25	19	24	19	24
90	21	27	21	26	19	25	19	24	19	24
$V = 1 \text{ m/s}$										
50	20	26	19	24	18	23	17	22	17	22
55	19	25	19	24	18	23	17	22	18	22
60	19	25	19	25	18	23	17	22	18	23

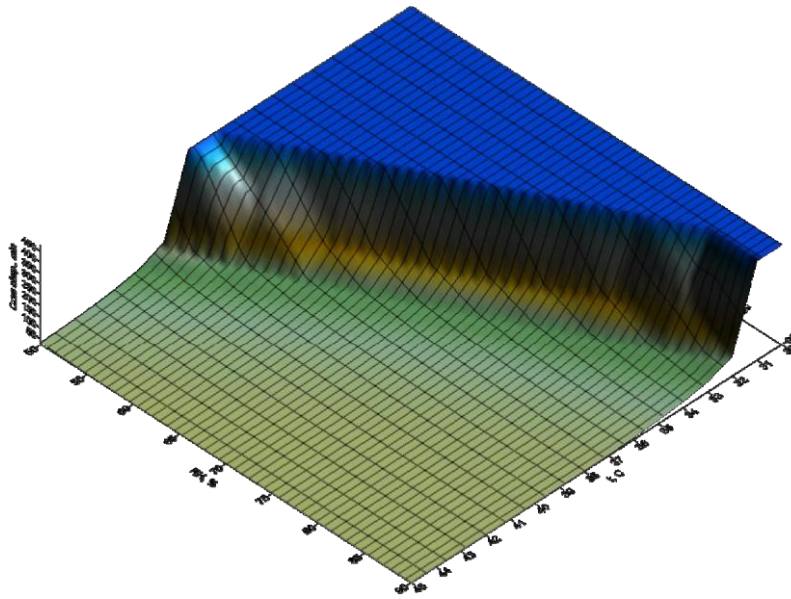
65	19	25	19	25	18	23	17	22	18	23
70	19	25	19	25	18	23	18	22	18	23
75	20	25	19	25	18	23	18	22	18	23
80	20	25	19	25	18	23	18	22	18	23
85	20	25	19	25	18	23	18	22	18	23
90	20	25	19	25	18	23	18	22	18	23
V = 2 m/s										
50	17	23	17	22	16	21	16	21	16	21
55	18	23	17	23	17	21	16	21	16	21
60	18	23	17	23	17	21	16	21	16	21
65	18	23	17	23	17	22	16	21	16	21
70	18	23	18	23	17	22	16	21	16	21
75	18	23	18	23	17	22	16	21	16	21
80	18	23	18	23	17	22	16	21	16	21
85	18	23	18	23	17	22	16	21	17	21
90	18	23	18	23	17	22	16	21	17	21

Dalej zaprezentowano modele 3D i mapy izochron, ilustrujące zależności między czasem ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym a temperaturą otoczenia, zmieniającą się w zakresie $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$, oraz wilgotnością względną powietrza, zmieniającą się w zakresie $50\% \leq RH \leq 90\%$.

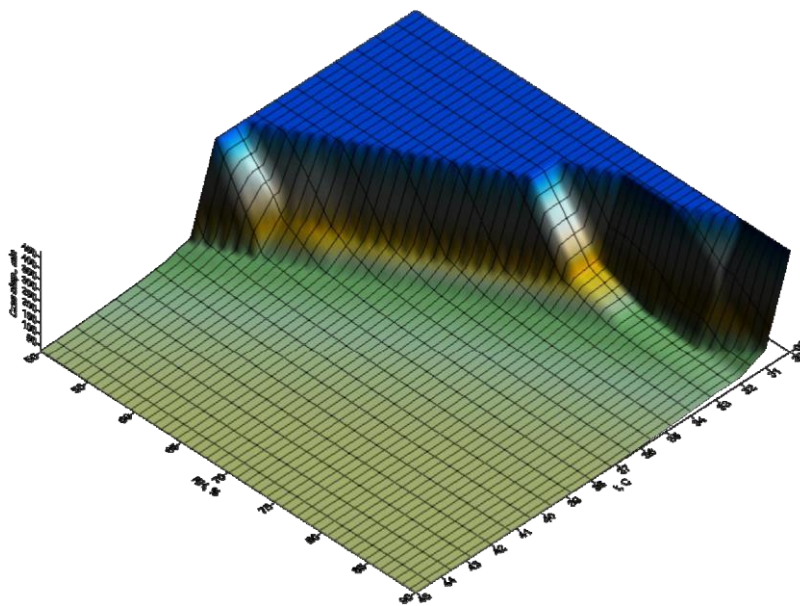
Wyniki symulacji przedstawione w formie modeli 3D

Ta forma prezentacji związków zachodzących między czasem ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym a temperaturą otoczenia t_a i wilgotnością względną powietrza RH ($\tau = f(t_a, RH)$) pozwala ocenić wpływ zmienności metabolizmu M i prędkości przepływu powietrza V na kształt funkcji τ .

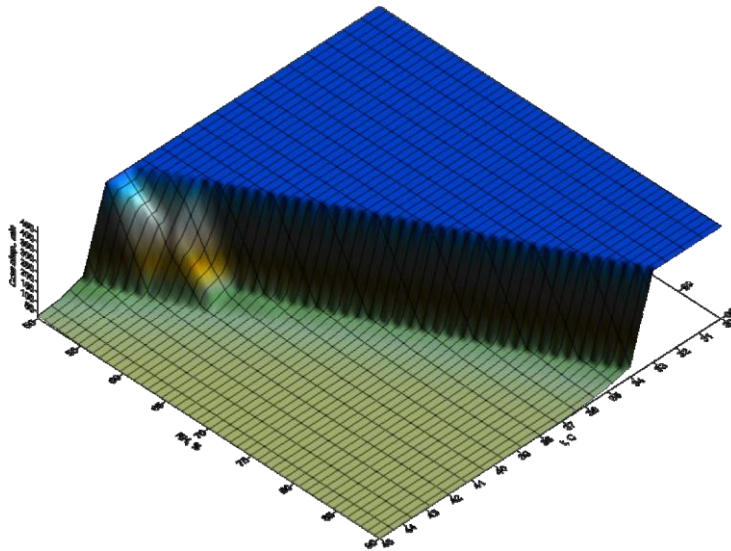
Na kolejnych rysunkach (rys. 3-5) przedstawiono wyniki otrzymane dla różnych wartości obciążenia mocą (i metabolizmu) oraz prędkości przepływu powietrza.



Rys. 3. Model 3D zależności czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowany dla: $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$, $M = 140 \text{ W/m}^2$, $W = 13,5 \text{ W/m}^2$, $V = 0,2 \text{ m/s}$, $I_{cl} = 1 \text{ clo}$



Rys. 4. Model 3D zależności czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowany dla: $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$, $M = 200 \text{ W/m}^2$, $W = 46,6 \text{ W/m}^2$, $V = 0,2 \text{ m/s}$, $I_{cl} = 1 \text{ clo}$



Rys. 5. Model 3D zależności czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowany dla: $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$, $M = 200 \text{ W/m}^2$, $W = 46,6 \text{ W/m}^2$, $V = 2 \text{ m/s}$, $I_{cl} = 1 \text{ clo}$

Pokazana na rys. 3 niebieska powierzchnia, zbliżona kształtem do trójkąta, reprezentuje obszar, który odpowiada 480 minutom ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym. Ten obszar jest ograniczony zakresem zmienności temperatury $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 39^{\circ}\text{C}$ dla wilgotności $RH = 50\%$ oraz $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 31^{\circ}\text{C}$ dla $RH = 90\%$. Poza płaszczyznę wyznaczoną powierzchnią niebieskiego trójkąta czas bezpiecznej ekspozycji gwałtownie się skraca – przy temperaturze otoczenia $t_a = 44^{\circ}\text{C}$ i wilgotności zmieniającej się w przedziale $65\% \leq RH \leq 90\%$ wynosi $\tau = 23 \text{ min}$.

Zwiększenie obciążenia wysiłkiem fizycznym do wartości $W = 46,6 \text{ W/m}^2$ powoduje wzrost metabolizmu do wartości $M = 200 \text{ W/m}^2$ i zmienia kształt funkcji τ (rys. 4). Niebieski obszar, wyznaczający czas bezpiecznej ekspozycji, skurczył się w porównaniu z poprzednim przypadkiem. Zwiększone obciążenie pracownika mocą wywołało w jego organizmie podwyższoną akumulację ciepła i szybszy wzrost temperatury wnętrza ciała. Obszar ograniczonego czasu pracy, tj. poniżej 480 minut, rozszerzył się w porównaniu z analogicznym obszarem na rys. 3. W tej sytuacji poprawa warunków pracy teoretycznie jest możliwa do osiągnięcia dzięki zintensyfikowaniu strat ciepła z organizmu człowieka na skutek zwiększenia prędkości przepływu powietrza wokół jego ciała. Jak widać na rys. 5, dla tych samych co poprzednio warunków temperatury otoczenia, wilgotności względnej powietrza i obciążenia człowieka mocą ($M = 200 \text{ W/m}^2$, $W = 46,6 \text{ W/m}^2$), ale przy prędkości przepływu powietrza zwiększonej do $V = 2 \text{ m/s}$, obszar zaznaczony kolorem niebieskim, odpowiadający bezpiecznej dla

zdrowia człowieka ekspozycji (trwającej 480 minut), rozszerzył się w porównaniu z analogiczną powierzchnią na rys. 4. Ten obszar jest ograniczony zakresem zmienności temperatury otoczenia $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 41^{\circ}\text{C}$ dla $RH = 50\%$ oraz $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 33^{\circ}\text{C}$ dla $RH = 90\%$. Poza tym obszarem czas bezpiecznej dla zdrowia ekspozycji gwałtownie się skraca – w temperaturze otoczenia $t_a = 41^{\circ}\text{C}$ i przy wilgotności $75\% \leq RH \leq 90\%$ wynosi $\tau = 20$ min.

Wyniki symulacji przedstawione w formie map izochron

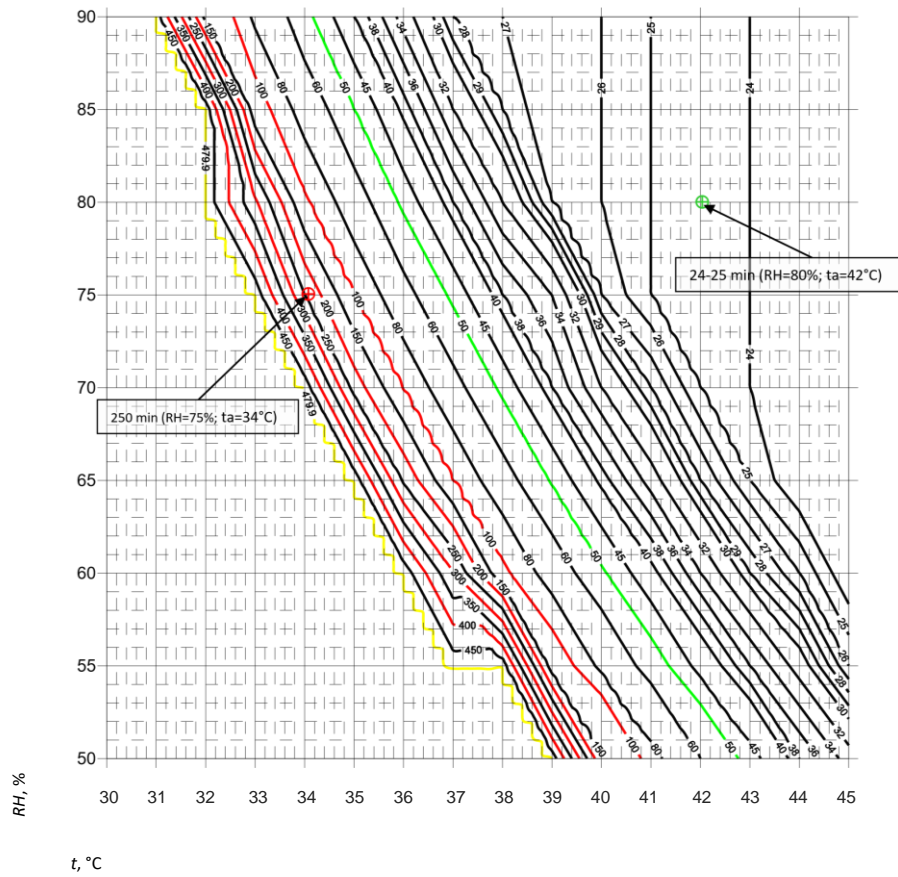
Ta forma prezentacji związków między czasem τ ekspozycji bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym a temperaturą otoczenia t_a i wilgotnością względną powietrza RH pozwala oszacować – na podstawie wykresu – prognozowaną wartość τ zależną od: metabolizmu M , obciążenia mocą W , temperatury otoczenia (zmieniającej się w zakresie $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$), wilgotności względnej powietrza (zmieniającej się w zakresie $50\% \leq RH \leq 90\%$) i prędkości przepływu powietrza $V = 0,2; 0,5; 1$ i 2 m/s.

Dalej przedstawiono przykładowe mapy izochron, sporządzone dla $V = 0,2$ m/s (rys. 6) oraz $V = 1$ m/s (rys. 7) i następujących parametrów: $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$, $50\% \leq RH \leq 90\%$, $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$, $M = 120$ W/m², $W = 0$ W/m², $I_{cl} = 1$ clo.

Punkt oznaczony na rys. 6 symbolem \oplus jest punktem przecięcia się odciętej $RH = 75\%$ z rzędną $t_a = 34^{\circ}\text{C}$ – wartość czasu bezpiecznej ekspozycji dla tej kombinacji wartości temperatury i wilgotności wynosi $\tau = 250$ min. Z kolei dla kombinacji $RH = 80\%$ oraz $t_a = 42^{\circ}\text{C}$ (symbol \oplus na wykresie) czas bezpiecznej dla zdrowia ekspozycji wynosi $\tau = 24$ - 25 min.

Zwiększenie prędkości przepływu powietrza z $V = 0,2$ m/s do $V = 1$ m/s powoduje zmiany wartości prognozy czasu bezpiecznej dla zdrowia ekspozycji (rys. 7).

Położenie punktu \oplus na rys. 7 wskazuje, że w zadanych warunkach czas bezpiecznej dla zdrowia człowieka ekspozycji wydłużył się wskutek zwiększenia prędkości przepływu powietrza do 1 m/s i wynosi $\tau = 480$ min. Dla kombinacji $RH = 80\%$ oraz $t_a = 42^{\circ}\text{C}$ (punkt \oplus) czas bezpiecznej dla zdrowia ekspozycji wynosi zaś $\tau = 23$ min.



Rys. 6. Izochrony czasów ekspozycji (bezpiecznej dla zdrowia człowieka przebywającego w środowisku gorącym) w warunkach temperatury otoczenia $30^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 45^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50\% \leq RH \leq 90\%$, opracowane dla: $t_{re} = 38^{\circ}\text{C}$, $M = 120 \text{ W/m}^2$, $W = 0 \text{ W/m}^2$, $V = 0,2 \text{ m/s}$, $I_{cl} = 1 \text{ clo}$

