

## Materiały informacyjne na strony internetowe CIOP-PIB

G. Bartkowiak, A. Dąbrowska, A. Marszałek

### Obciążenie termiczne pracowników w mikroklimacie gorącym i sposoby jego redukcji dzięki zastosowaniu układów chłodzących

#### 1. Wprowadzenie

W Polsce, około 20 tysięcy osób pracuje w warunkach mikroklimatu gorącego (temperatura powietrza od 25 °C do 60 °C, przy wilgotności względnej od 10 % do 80 %), m.in. w przemyśle metalurgicznym, szklarskim, w górnictwie oraz w okresie letnim podczas upałów w przestrzeni otwartej (rys. 1).



Rys. 1. Widok osób pracujących w odzieży ochronnej w warunkach środowiska gorącego

Długotrwała, intensywna praca w warunkach mikroklimatu gorącego powoduje nie tylko odczuwalny stres cieplny i zmęczenie, ale również zaburzenia w funkcjonowaniu układu krwionośnego [1]. Stwierdzono również, że wraz ze wzrostem temperatury powietrza środowiska pracy oraz intensywności pracy rośnie liczba wypadków na stanowiskach pracy [2]. Wielu pracowników w środowisku gorącym narażonych jest dodatkowo na kontakt z płomieniem, na promieniowanie podczerwone, rozpryski płynnego metalu i odpryski gorących metali oraz kontakt z gorącymi przedmiotami. Stosowana wtedy odzież ochronna, wykonana z wielowarstwowych układów materiałów, często nieprzepuszczających pary wodnej nie eliminuje i nie ogranicza w wystarczającym stopniu wpływu mikroklimatu gorącego na organizm pracownika, może nawet utrudniać usuwanie nadmiaru ciepła z organizmu i często stanowi dla niego dodatkowe obciążenie cieplne.

#### 2. Obciążenie termiczne pracowników w mikroklimacie gorącym

Człowiek może pracować w mikroklimacie gorącym dzięki mechanizmom termoregulacyjnym, które pozwalają na przystosowanie się do szerokiego zakresu temperatury zewnętrznej. Związane są one z usuwaniem nadmiaru ciepła z organizmu, które powstaje nie tylko w wyniku przemian metabolicznych, ale też jest pobierane z otoczenia, gdy temperatura otoczenia jest wyższa od średniej temperatury powierzchni skóry [3, 4]. Odpowiedzią termoregulacyjną ze strony ustroju człowieka na stres cieplny wynikający z gorąca jest rozszerzenie naczyń krwionośnych skóry i wzrost skórniego przepływu krwi. Gdy temperatura otoczenia przekracza (28 ÷ 32) °C uruchomiony zostaje drugi mechanizm termoregulacyjny – wydzielanie potu.

Negatywne oddziaływanie środowiska termicznego na organizm człowieka należy ściśle wiązać z czasem ekspozycji, a wzrost częstości skurczów serca, maksymalne tempo pocenia oraz wzrost temperatury wnętrza ciała są czułymi wskaźnikami obciążenia termicznego organizmu i wyznaczają granice tolerancji niekorzystnego wpływu środowiska i pracy na organizm człowieka. Zakres bezpiecznych zmian tych parametrów omawia norma PN-EN ISO 9886:2005 [5].

Biorąc pod uwagę intensywność pocenia przyjmuje się, że maksymalna ilość potu wydzielanego w ciągu 8 godzin pracy nie powinna przekroczyć 5 litrów. Zgodnie z normą PN-EN ISO 7933:2005 [6] dla osób, które mają swobodny dostęp do napojów ustala się maksymalne odwodnienie na poziomie 5 % masy ciała dla 95 % populacji pracującej oraz 3 % masy ciała dla osób, które nie mają możliwości uzupełniania płynów.

Reakcje fizjologiczne organizmu na pracę w środowisku gorącym zależą w dużym stopniu od wieku osoby ekspozowanej – na skutki stresu cieplnego w większym stopniu narażeni są pracownicy starsi [7]. Wraz z wiekiem następuje obniżenie zarówno tolerancji wysiłku fizycznego, jak i środowiska gorącego, co wynika z mniejszej sprawności mechanizmów regulacyjnych organizmu.

Niezwykle ważne jest, aby osoby pracujące w gorącym środowisku były zdrowe. Można to zapewnić poprzez:

- skontrolowanie stanu zdrowia kandydata do pracy,
- systematyczną kontrolę stanu zdrowia tych pracowników,
- nadzór medyczny podczas narażenia człowieka na skrajnie wysoką temperaturę.

Na możliwość odprowadzania ciepła z organizmu decydujący wpływ ma odzież [8]. Odzież stosowana w gorącym środowisku pracy, chroniąca przed zapaleniem, promieniowaniem cieplnym, rozpryskami stopionego metalu, wykonana z wielowarstwowych materiałów bądź ich układów, często nieprzepuszczających parę wodną, nie eliminuje ani nie ogranicza w wystarczającym stopniu wpływu mikroklimatu gorącego na organizm pracownika, a często stanowi dodatkowe obciążenie cieplne dla organizmu [9]. Stąd, niezbędne jest poszukiwanie rozwiązań, które pozwolą na zmniejszenie obciążenia cieplnego osób pracujących w odzieży ochronnej w warunkach środowiska gorącego.

### 3. Ocena obciążenia termicznego pracowników w mikroklimacie gorącym

Najbardziej powszechnym sposobem oceny obciążenia termicznego w mikroklimacie gorącym jest wyznaczenie wskaźnika WBGT[10].

Dla mikroklimatu gorącego ustalona została dopuszczalna wartość wskaźnika obciążenia termicznego WBGT dla pięciu poziomów metabolizmu organizmu, związanego z wielkością wysiłku fizycznego i wartości te zostały podane w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej (DU 105, poz. 873, 2009) [11]. Dopuszczalne wartości wskaźnika WBGT odpowiadają takim poziomom ekspozycji, na które narażone mogą być osoby bez szkodliwych skutków zdrowotnych, o ile są zdrowe i ubrane w odzież o izolacyjności cieplnej 0,6 clo. Wielkość wyznaczanego wskaźnika zależy także od stopnia aklimatyzacji pracownika i odczuwalnego ruchu powietrza. W celu dokonania oceny ryzyka w środowisku gorącym, należy skorzystać z tabeli 1. Przestrzeganie wymagań dotyczących wskaźnika WBGT chroni większość pracowników przed przekroczeniem maksymalnej dopuszczalnej temperatury wewnętrznej (38 °C).

Tabela 1. Dopuszczalne wartości wskaźnika WBGT

Poziom ciężkości pracy	Poziom metabolizmu w stosunku do powierzchni skóry $W/m^2$	Dopuszczalne wartości WBGT [°C]			
		Osoba zaaklimatyzowana w środowisku gorącym		Osoba niezaaklimatyzowana w środowisku gorącym	
Spoczynek	$M \leq 65$	33		32	
Praca lekka	$65 < M \leq 130$	30		29	
Praca umiarkowana	$130 < M \leq 200$	28		26	
Praca ciężka	$200 < M \leq 260$	nieodczuwalny ruch powietrza	odczuwalny ruch powietrza	nieodczuwalny ruch powietrza	odczuwalny ruch powietrza
		25	26	22	23
Praca bardzo ciężka	$M > 260$	23	25	18	20

#### 4. Sposoby zmniejszenia obciążenia termicznego pracowników

Obowiązkiem pracodawcy, wynikającym z Kodeksu Pracy jest podejmowanie działań, zwłaszcza technicznych i organizacyjnych, likwidujących lub co najmniej ograniczających zagrożenia zawodowe powodowane przez niebezpieczne i szkodliwe czynniki środowiska pracy. Pracownicy powinni być informowani o negatywnych skutkach długotrwałej pracy w gorącym środowisku, należy również pamiętać o udostępnieniu pracownikom odpowiedniej ilości napojów w celu uniknięcia odwodnienia [12, 13].

Na stanowiskach pracy w mikroklimacie gorącym, na których nie można wprowadzić takich rozwiązań skutecznym rozwiązaniem mogą być **indywidualne systemy chłodzenia organizmu**. Wyróżnia się cztery grupy układów chłodzących wbudowanych w odzież, w zależności od zastosowanego medium chłodzącego. Są to układy, w których wykorzystano: materiały przemiany fazowej (PCM), lód (jako szczególny przypadek materiału przemiany fazowej), powietrze lub ciecz.

Najpopularniejsze i znane od dawna są **systemy chłodzenia organizmu wykorzystujące lód**. Najczęściej są to kamizelki z pakunkami wypełnionymi lodem z wody lub dwutlenku węgla w stanie stałym (suchy lód). Ten sposób chłodzenia jest prosty, gdyż nie wymaga zewnętrznego źródła energii, może być przenośny i jest dobrym rozwiązaniem podczas krótkotrwałego narażenia organizmu na ciepło [14, 15]. Efektywność chłodzenia zależy głównie od masy zastosowanego lodu, sposobu jego rozmieszczenia, jak również jego odizolowania od środowiska zewnętrznego [14]. Stosowanie tej metody chłodzenia może być niewygodne ze względu na konieczność wymieniania bloków lodowych umieszczonych w odzieży, gdy ulegną one stopieniu [15] jak również ze względu na zmiany temperatury medium chłodzącego w czasie.

Materiały zdolne do zmiany stanu skupienia w określonym przedziale temperatur znane są jako **materiały przemiany fazowej (PCM)**. PCM jest materiałem, który absorbuje, magazynuje i uwalnia duże ilości energii w postaci ciepła utajonego, w ściśle określonym zakresie temperatury nazywanym temperaturą przemiany fazowej, zmieniając w tym czasie stan skupienia (ze stałego w ciekły i odwrotnie) [16]. Wprowadzenie w strukturę odzieży PCM, charakteryzujących się temperaturą przemiany fazowej na poziomie zbliżonym do temperatury skóry w stanie komfortu sprawia, że w wyniku akumulacji ciepła w organizmie i w konsekwencji - wzrostu temperatury skóry użytkownika odzieży, wzrasta temperatura PCM zawartych w wyrobie, co powoduje, iż zaczynają się one topić, odbierając przy tym ciepło wydzielane przez organizm.

Przykładowy układ chłodzący z wykorzystaniem PCM w postaci makrokapsuł przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Trójwarstwowa kamizelka o budowie kanałowej wypełniona makrokapsułkami PCM - zgłoszenie patentowe nr P-396551 (praca badawcza własna) [17]

Badania wpływu chłodzonych części ciała na efektywność odbierania ciepła z organizmu wykazały, że najbardziej efektywne jest chłodzenie głowy i szyi, rąk oraz stóp, jednak nie zawsze te

systemy są możliwe ze względu na konieczność wykonywania określonych czynności przez osobę użytkującą dany system, stąd najpopularniejsze są systemy chłodzenia całego ciała lub torsu [15].

Innym sposobem na indywidualne chłodzenie organizmu są **systemy chłodzenia powietrzem**. System chłodzenia za pomocą powietrza jest najlepszy, jeżeli chodzi o odprowadzanie ciepła drogą konwekcji i poprzez odparowanie potu [15], zależy jednak w dużym stopniu od parametrów fizycznych powietrza oraz od stosowanej odzieży ochronnej, która powinna umożliwić odprowadzenie wprowadzonego pod nią powietrza.

Kolejnym **medium chłodzącym może być ciecz**, najczęściej w postaci wody, z uwagi na jej wysokie przewodnictwo cieplne. Systemy te składają się z agregatu chłodzącego, pompy, źródła energii i systemu rozprowadzania cieczy. Na wielkość odbieranego ciepła z organizmu można wpływać poprzez regulację temperatury cieczy chłodzącej i zwiększenie powierzchni kontaktu układu rozprowadzającego ciecz z ciałem, a także poprzez regulację prędkości jej przepływu.

W CIOP-PIB przy współpracy z Katedrą Dziewiarstwa Politechniki Łódzkiej, Przedsiębiorstwem Sprzętu Ochronnego Maskpol S.A. oraz firmą TECHNOCHŁÓD Waldemar Andrzejewski opracowano model indywidualnego układu chłodzącego cieczą. Opracowany układ przeznaczony jest dla osób wykonujących pracę w odzieży ochronnej w gorącym środowisku pracy na stanowiskach, na których niewymagana jest duża mobilność. Idea działania opracowanego rozwiązania opiera się na przepływie cieczy schłodzonej w agregacie chłodzącym, przez układ rurek zintegrowany z wyrobem odzieżowym w formie bluzki, przeznaczonej do noszenia bezpośrednio na ciało. Specjalnie opracowana konstrukcja bluzki z pionowymi kanałami przeznaczonymi na rurki dzięki zapewnieniu dużej powierzchni kontaktowej ciała z rurkami wypełnionymi cieczą chłodzącą umożliwia zintensyfikowanie procesu odprowadzania ciepła z organizmu użytkownika. Widok bluzki z układem rurek rozprowadzających ciecz chłodzącą, której konstrukcja została zgłoszona do ochrony w Urzędzie Patentowym (zgłoszenie wzoru użytkowego nr W.122407), przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Widok bluzki z układem rurek rozprowadzających ciecz chłodzącą: a) przód, b) tył

Bluzka przeznaczona do chłodzenia organizmu za pomocą cieczy, zasilana jest schłodzonym medium dzięki mobilnemu agregatowi chłodzącemu o mocy chłodzącej 300 W, połączonemu z bluzką za pomocą szybkozłączek z obustronną blokadą. Istotnym elementem układu chłodzącego cieczą jest automatyczny system sterowania temperaturą cieczy chłodzącej. Układ chłodzący pozwala na samoistne dostosowywanie temperatury cieczy chłodzącej do zmian temperatury w mikroklimacie pododzieżowym tak, aby zapewnić jej stały poziom i komfortowy dla użytkownika.

Ocenę opracowanego indywidualnego układu chłodzącego cieczą przeprowadzono podczas badań na ochotnikach w komorze klimatycznej w warunkach środowiska gorącego (30 °C, 40 %) przy zmiennej aktywności fizycznej z chłodzeniem i bez chłodzenia. Zmiany temperatury skóry podczas badań wykazały, że kształtuje się ona na niższym poziomie podczas badań ochotników z opracowanym układem chłodzącym, wpływając na ograniczenie dyskomfortu cieplnego uczestników badań, co potwierdziły ich odczucia subiektywne.

## Podsumowanie

Pomimo postępującej automatyzacji procesów produkcyjnych i rosnącej świadomości dotyczącej bezpieczeństwa pracy wciąż wiele tysięcy osób w Polsce pracuje w warunkach zagrożenia mikroklimatem gorącym. Problem ten dotyczy różnorodnych stanowisk pracy, zarówno pod względem gałęzi gospodarki, wykonywanych prac, wydatku energetycznego, stosowanej odzieży, mobilności pracowników oraz ewentualnych dodatkowych czynników stanowiących zagrożenie jak np. rozpryski stopionego metalu. Stąd istotne jest, ograniczenie obciążenia cieplnego pracowników, a rozwiązaniem tego problemu mogą być indywidualne układy chłodzące, dostosowane do potrzeb pracowników i charakteru wykonywanej pracy.

### **Więcej informacji dotyczących obciążenia termicznego osób pracujących w mikroklimacie gorącym oraz sposobów jego ograniczenia można znaleźć w następujących publikacjach:**

1. Bartkowiak G., Dąbrowska A., *Indywidualne układy chłodzące organizm podczas pracy w gorącym środowisku, Bezpieczeństwo Pracy - Nauka i Praktyka, nr 3 (498) 2013*
2. Bartkowiak G., Marszałek A., Dąbrowska A., *Obciążenie cieplne pracowników w gorącym środowisku pracy i sposoby jego redukcji, Bezpieczeństwo Pracy - Nauka i Praktyka, nr 10 (493), 2012*
3. Bartkowiak G., Dąbrowska A., Czapska A., *Konstrukcje odzieżowe ograniczające dyskomfort cieplny podczas pracy w barierowej odzieży ochronnej, Przegląd Włókienniczy - Włókno, Odzież, Skóra, nr 8/2013*
4. Bartkowiak G., Marszałek A., Dąbrowska A., *Analysis of thermoregulation properties of PCM garments on the basis of ergonomic tests, Textile Research Journal, first published September 27, 2012, doi:10.1177/0040517512460299,*
5. Bartkowiak G., Dąbrowska A., *Assessment of the Thermoregulation Properties of Textiles with Fibres Containing Phase Change Materials on the Basis of Laboratory Experiments, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2012, 20, 1(90) 47-52,*
6. Bartkowiak G. (60 %), Pabich A. (40 %), *Modelowanie numeryczne wymiany ciepła między człowiekiem w barierowej odzieży ochronnej a otoczeniem. Cz. II, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra, nr 10/2010, 27-28*
7. Bartkowiak G. (60 %), Pabich A. (40 %), *Modelowanie numeryczne wymiany ciepła między człowiekiem w barierowej odzieży ochronnej a otoczeniem. Cz. I, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra, nr 9/2010, 30-33*

*Materiał opracowany na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/ Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.*

*Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

## Bibliografia

1. Sołtyński K., Marszałek A., 2007, Obciążenie termiczne. W: Ryzyko zawodowe - Metodyczne podstawy oceny, Red. Zawieska W.M. CIOP-PIB, Warszawa
2. GUS, 2011, Warunki Pracy w 2010 r., Warszawa
3. Kozłowski S., Nazar K., 1999, Wprowadzenie do fizjologii klinicznej, PZWL, Warszawa
4. Koradecka D., 2008, Bezpieczeństwo i higiena pracy, CIOP-PIB, Warszawa
5. PN-EN ISO 9886: 2005 Ergonomia – Ocena obciążenia termicznego na podstawie pomiarów fizjologicznych
6. PN-EN ISO 7933: 2005 Ergonomia środowiska termicznego -Analityczne wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego

7. Marszałek A., 2000, Fizjologiczne reakcje organizmu człowieka podczas pracy w odzieży ochronnej w gorącym środowisku, *Ergonomia*, 23, 1-2: 159-166
8. Pascode D.D., Shanley L.A., Smith E.W., 1994, Clothing and exercise; Biophysics of heat transfer between the individual, clothing and environment, *Sport Medicine*, 18: 38-54
9. Marszałek A., 2006, Fizjologiczne reakcje organizmu człowieka podczas pracy w odzieży ochronnej w gorącym środowisku, *Bezpieczeństwo Pracy*, 414, 3:11-15
10. PN-EN 27243: 2005 Środowiska gorące. Wyznaczenie obciążenia termicznego działającego na człowieka podczas pracy, oparte na wskaźniku WBGT
11. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 czerwca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 105, poz 873, 2009
12. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 28 maja 1996 r. w sprawie profilaktycznych posiłków i napojów. DzU nr 60, poz. 279
13. Marszałek A., Bartkowiak G., Kamińska W., Stefko A., 2007, Pracownicy starsi w warunkach gorącego środowiska, CIOP-PIB, Warszawa
14. Speckmen K.L., Allan A.E. Sawka M.N., Young A.L., Muza S.R., Pandolf K.L. (1998) *Perceptives in microclimate cooling involving protective clothing in hot environments*, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 3, s. 121-147
15. Caldwell Joanne Nellie, 2008, *The interaction of the thermal environment, clothing and auxiliary body cooling in the workplace*, Msc-Res thesis, School of Health Science, University of Wollongong, <http://ro.uow.edu.au/theses/765>
16. Shim H. and McCullough E.A., 2000, The effectiveness of phase change materials in outdoor clothing. Proceedings of NOKOBETEF 6 and 1st European Conference on Protective clothing, Stockholm.
17. Bartkowiak G., Dąbrowska A., Czapska A., 2013, Konstrukcje odzieżowe ograniczające dyskomfort cieplny podczas pracy w barierowej odzieży ochronnej, *Przegląd Włókienniczy - Włókno, Odzież, Skóra*, nr 8, str. 25 - 30