

dr inż. GRAŻYNA BARTKOWIAK
 mgr inż. ANNA DĄBROWSKA
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy

Indywidualne układy chłodzące organizm podczas pracy w gorącym środowisku



Fot. www.coroflot.com

Zagrożenie wynikające z obciążenia cieplnego podczas pracy w gorącym środowisku sprawia, iż niezbędne jest eliminowanie lub ograniczanie akumulacji ciepła w organizmie tak, aby mikroklimat gorący nie stanowił zagrożenia dla zdrowia osób pracujących na stanowiskach pracy w warunkach zagrożenia tym czynnikiem. W związku z tym podejmowanych jest wiele prac, których celem jest zaprojektowanie skutecznego układu chłodzącego, z wykorzystaniem różnych czynników chłodzących, pozwalającego na odebranie nadmiaru ciepła generowanego przez organizm. Przedmiotem publikacji jest analiza znanych rozwiązań indywidualnego chłodzenia organizmu pod kątem opracowania układu ergonomicznego, zapewniającego komfort cieplny pracownika w gorącym środowisku na stanowisku charakteryzującym się ograniczoną mobilnością.

Individual cooling systems reducing body heat during work in a hot environment

Hazards posed by thermal load while working in a hot environment make it necessary to eliminate or reduce the accumulation of heat in the body. Hot microclimate should not put workers at risk. Therefore, numerous studies have been undertaken to design an efficient cooling system, based on different cooling factors. That system would absorb excessive heat generated by the body at work. This article analyses existing solutions of individual cooling body systems in the context of developing an ergonomic personal cooling system that provides thermal comfort in a hot environment at a workstation with limited mobility.

Wstęp

Człowiek jest w stanie pracować w gorącym środowisku pracy dzięki mechanizmom termoregulacyjnym organizmu, które pozwalają mu na przystosowanie się do wysokich wartości temperatury zewnętrznej. Mechanizmy te polegają na usuwaniu nadmiaru ciepła z organizmu, które jest pobierane z otoczenia

gdy jego temperatura jest wyższa od średniej temperatury powierzchni skóry [1], lub powstaje w wyniku przemian metabolicznych. Możliwość odprowadzania ciepła z organizmu pracownika jest zależna od warunków temperatury i wilgotności względnej środowiska pracy, jak również od stosowanej odzieży [2]. Odzież ochronna stosowana w gorącym

środowisku, chroniąca przed zapaleniem, promieniowaniem cieplnym, rozpryskami roztopionych metali, wykonana z wielowarstwowych układów materiałów, często nieprzepuszczających pary wodnej, nie eliminuje ani nie ogranicza w wystarczającym stopniu wpływu mikroklimatu gorącego na organizm pracownika, utrudnia usuwanie nadmiaru ciepła z organizmu i stanowi dla niego dodatkowe obciążenie cieplne [3].

Podczas wykonywania intensywnego i długotrwałego wysiłku w środowisku gorącym organizm nie zawsze jest w stanie podjąć odprowadzanie nadmiaru ciepła, a długotrwała praca w tym środowisku powoduje nie tylko odczuwalny stres cieplny i zmęczenie, ale również zaburzenia w funkcjonowaniu układu krwionośnego [3]. Stwierdzono również, że liczba niebezpiecznych zachowań oraz wypadków na stanowiskach pracy rośnie wraz ze wzrostem temperatury środowiska pracy oraz intensywności pracy [4].

W celu uniknięcia zagrożeń spowodowanych narażeniem pracowników na długotrwałe działanie środowiska gorącego, niezbędne jest eliminowanie lub ograniczanie akumulacji ciepła w organizmie. Niestety, na większości gorących stanowisk pracy nie można wprowadzić systemów klimatyzacyjnych ze względu na prowadzone procesy technologiczne bądź duże przestrzenie. Wobec braku innych możliwości chłodzenia organizmu pracownika podczas pracy, rozwiązaniem tego problemu mogą być indywidualne systemy chłodzenia organizmu. W związku z tym podejmowane są prace, których celem jest zaprojektowanie skutecznych indywidualnych układów chłodzących, pozwalających na odbiór nadmiaru ciepła generowanego przez organizm podczas pracy.

Rodzaje układów chłodzących

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 szczegól-

ny przypadek materiału przemiany fazowej), powietrze lub ciecz.

W literaturze naukowej dotyczącej tego zagadnienia przedstawione są wyniki badań, prowadzonych w wielu ośrodkach światowych, dotyczące indywidualnych układów chłodzących, ich skuteczności oraz wpływu chłodzenia na fizjologię organizmu, wydajność i bezpieczeństwo pracy. Oceniano je, modelując zjawisko wymiany ciepła pomiędzy osobami wykonującymi pracę w odzieży a środowiskiem zewnętrznym [5] oraz na podstawie badań na manekinie termicznej i na ochotnikach, analizując ich zdolność do wymiany ciepła drogą konwekcji, przewodzenia, promieniowania i parowania [6]. Stwierdzono, że wszystkie badane układy umożliwiają odebranie nadmiaru ciepła z organizmu osoby znajdującej się w stanie stresu cieplnego [5, 6, 7, 8].

Układy chłodzące z lodem

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). Badania potwierdziły, że systemy te są efektywne w odprowadzaniu nadmiaru ciepła z organizmu [7], a ich efektywność zależy głównie od masy zastosowanego lodu, sposobu jego rozmieszczenia, jak również jego odizolowania od środowiska zewnętrznego [9]. Ten sposób chłodzenia jest bardzo prosty w zaprojektowaniu, gdyż nie wymaga zewnętrznego źródła energii, może być przenośny i jest dobrym rozwiązaniem chłodzącym podczas krótkotrwałego narażenia organizmu na ciepło [9, 10]. System chłodzenia za pomocą lodu dominuje nad innymi w zakresie efektywności odprowadzania ciepła drogą przewodzenia i promieniowania. Aby zwiększyć ilość odprowadzanego ciepła z organizmu, modyfikuje się fizyczne właściwości lodu dodając do niego substancje, które zmieniają przewodnictwo cieplne, ciepło właściwe lub punkt topnienia lodu. Dobrym przykładem jest glikol etylenu, którego temperatura topnienia wynosi $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura wrzenia $196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Chłodzenie organizmu człowieka za pomocą lodu uważane jest za skuteczne rozwiązanie, pozwalające na redukcję obciążenia cieplnego i wydłużenie dopuszczalnego czasu pracy, w którym nie zostanie przekroczona bezpieczna dla organizmu wartość temperatury wewnętrznej: $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jednakże rozwiązanie to ma jedną zasadniczą wadę – charakteryzuje się ograniczonym czasem chłodzenia, ściśle związanym z czasem trwania przemiany fazowej lodu w wodę. Stosowanie tej metody chłodzenia jest szczególnie niewygodne ze względu na konieczność wymieniać bloków lodowych umieszczonych w odzieży, gdy ulegną one stopieniu [10]. W związku

z tą niedogodnością rozważano zastosowanie w układzie chłodzącym lodem półprzewodnikowych elementów termoelektrycznych wykorzystujących efekt Peltiera¹, które odprowadzałyby ciepło z układu chłodzącego, zapobiegając topnieniu lodu. Jednakże takie rozwiązanie powoduje generowanie znacznej ilości ciepła, które wymaga odprowadzenia na zewnątrz. Potrzebna jest również duża ilość energii niezbędnej do zasilania ogniwa, co sprawi, że kamizelka z tym systemem będzie ciężka i będzie ograniczać ruchy pracownika [11].

Chłodzenie lodem ma również inną wadę, wynikającą ze znacznej zmiany temperatury medium chłodzącego w czasie i wpływu tej zmiany na bezpieczeństwo i komfort osoby chłodzonej. Temperatura medium chłodzącego, początkowo bardzo niska, podwyższa się w trakcie topnienia lodu, co wpływa negatywnie na organizm osoby stosującej ten system chłodzenia.

Układy chłodzące wykorzystujące materiały przemiany fazowej (PCM) wprowadzone w strukturę odzieży

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) [13]. Do najbardziej znanych materiałów zdolnych do przemiany fazowej należy lód, który podczas przejścia do ciekłego stanu skupienia (wody) wydziela $333,7\text{ kJ/kg}$.

Indywidualne układy chłodzące człowieka, opierające się na zdolności do odbierania ciepła przez materiały przemiany fazowej wprowadzone w strukturę odzieży, należą do najnowszych rozwiązań na świecie. Wybór i zastosowanie PCM w tekstyliach determinują takie cechy, jak: temperatura topnienia pomiędzy: $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, wysoka pojemność cieplna, niewielka różnica pomiędzy temperaturą topnienia i krystalizacji, stabilność termiczna, brak toksyczności, niska higroskopijność², wysoka przewodność cieplna, niepalność. Większość z tych kryteriów spełniają liniowe węglowodory nasycone (alkany), zwane woskami parafinowymi.

¹ Zjawisko termoelektryczne, które może być zaobserwowane w ciałach stałych. Polega na generowaniu lub absorbowaniu energii cieplnej na skutek przepływu prądu elektrycznego przez złącze. W wyniku absorbowania energii na jednym złączu i generowaniu energii na drugim, pomiędzy złączami powstaje różnica temperatur. Dzięki temu ogniwa Peltiera (półprzewodnikowe elementy termoelektryczne wykorzystujące efekt Peltiera) znalazły zastosowanie w chłodnictwie np. w lodówkach samochodowych.

² Higroskopijność – zdolność wyrobu do sorpcji pary wodnej z powietrza o wilgotności względnej przyjętej za 100%, wyrażona ilorazem różnicy masy próbki przetrzymywanej w powietrzu o wilgotności względnej 100% i suchej masy do suchej masy tej próbki, wyrażona w procentach.

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 ograniczonym i wzroście temperatury skóry użytkownika odzieży, wzrasta temperatura PCM zawartych w wyrobie, co powoduje, iż zaczynają się one topić, odbierając przy tym ciepło wydzielane przez organizm.

Układy chłodzące oparte na PCM określane są mianem pasywnych układów chłodzących (nie posiadają źródeł zasilania). Stąd, z jednej strony układy te są elastyczne, nie powodują ograniczenia ruchów czy mobilności, więc są wygodne w pracy, jednakże z drugiej strony – charakteryzują się ograniczonym czasem chłodzenia. W pracach prowadzonych z układami chłodzącymi opartymi na PCM, jako czynnik chłodzący stosowano najczęściej żele w zestalonej postaci, sole oraz woski w postaci mikro- i makrokapsułek wprowadzonych w odzież.

Badania przeprowadzone w Lund University wykazały, że PCM stosowane w wyrobach odzieżowych w postaci mikrokapsułek, umieszczanych najczęściej we włóknach, charakteryzują się bardzo małą zdolnością do odbierania nadmiaru ciepła i są niewystarczające do zapewnienia komfortu cieplnego w gorącym środowisku pracy [14].

Układy chłodzące z wykorzystaniem materiałów przemiany fazowej powinny być odpowiednio dobrane do warunków panujących na stanowiskach pracy, na których mają być stosowane. Prace, w których analizowano skuteczność zaprojektowanych wyrobów z PCM w redukcji obciążenia cieplnego w warunkach mikroklimatu gorącego, a nawet ekstremalnie gorącego (odpowiadających pożarowi) wykazały, że bardzo duże znaczenie ma dobór właściwej entalpii oraz temperatury przemiany fazowej [14, 15]. Błędna analiza gradientu temperatury pomiędzy skórą i temperaturą przemiany fazowej PCM może doprowadzić do zaniżenia efektu chłodzenia zaprojektowanego wyrobu i niewystarczającej skuteczności w odbieraniu ciepła w warunkach mikroklimatu gorącego.

Gao, Kuklane i Holmer [14] przeprowadzili eksperyment, w którym wykorzystano dwa rodzaje kamizelek z PCM różniącymi się temperaturą topnienia soli zawartych w wyrobach ($24\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $28\text{ }^{\circ}\text{C}$) i entalpią (108 J/g i 126 J/g). Udo- wodniono, że większy gradient temperatury pomiędzy temperaturą skóry a temperaturą topnienia PCM pozwala na skuteczniejsze chłodzenie, gdyż kamizelka z PCM o temperaturze topnienia $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, pomimo niższej entalpii, pozwoliła na bardziej efektywne i szybsze chłodzenie torsu, niż kamizelka z PCM o wyższej temperaturze topnienia. Dzięki zastosowaniu tej kamizelki w ekstremalnie gorących warunkach (temperatura powietrza $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,

wilgotność względna 30%) podczas marszu z prędkością 5 km/h (metabolizm 200 W/m²) przez 30 min ograniczono wzrost temperatury na klatce piersiowej aż o 3 °C na zakończenie eksperymentu.

Przykładowy układ chłodzący z wykorzystaniem PCM przedstawiono na rys. 1. Kamizelka z trójwarstwowej dzianiny wypełniona makrokapsułkami PCM przeznaczona do stosowania pod odzieżą ochronną jest przedmiotem zgłoszenia patentowego nr P-396551 [16].

Układy chłodzące wykorzystujące powietrze

Innym sposobem na indywidualne chłodzenie organizmu są systemy chłodzenia powietrzem. Chociaż pojemność cieplna powietrza jest znacząco niższa od pojemności cieplnej lodu, tego typu układy uważane są za skuteczne w ograniczaniu dyskomfortu cieplnego podczas pracy o wysokiej intensywności w umiarkowanie gorącym środowisku. System chłodzenia za pomocą powietrza jest najlepszy, jeżeli chodzi o odprowadzanie ciepła drogą konwekcji i poprzez odparowanie potu [10], zależy jednak w dużym stopniu od parametrów fizycznych powietrza oraz od stosowanej odzieży ochronnej, która powinna umożliwić odprowadzenie wprowadzonego pod nią powietrza.

Zaletą metody chłodzenia powietrzem wynika z faktu, że powietrze o mniejszej wilgotności względnej niż powietrze w mikroklimacie pod odzieżą przechodzi nad powierzchnią skóry, zwiększając chłodzenie skóry przez parowanie. Taki sposób chłodzenia może być bardziej komfortowy niż chłodzenie lodem czy cieczą, gdyż układ ten potencjalnie może zapewnić utrzymanie większego stopnia suchości powierzchni skóry. Jednakże, dla procesu wymiany ciepła przez parowanie istotny jest gradient ciśnienia pary wodnej pomiędzy skórą i nadmuchiwanym powietrzem, stąd

ważne są parametry powietrza: ciśnienie, temperatura i prędkość przepływu [17]. Przeprowadzone przez Caldwell badania wykazały, że, aby układ chłodzący powietrzem był skuteczny, wymagany jest przepływ na poziomie wyższym niż 300 l/min [10].

Najlepszą metodą zapewnienia zarówno suchości, jak i jakości medium chłodzącego, jest używanie skompresowanego i przefiltrowanego powietrza. Możliwa jest również wentylacja innym gazem niż powietrze. Bardzo wysoką przewodnością cieplną, wyższym ciepłem właściwym i bardzo niską gęstością charakteryzuje się hel, który jest idealnym gazem do wentylacji. Jest to jednak dosyć droga opcja chłodzenia.

Badania przeprowadzone przez Vallerand i innych wykazały, że dzięki zastosowaniu systemów chłodzenia powietrzem w środowisku gorącym uzyskano obniżenie temperatury wewnętrznej i zmniejszenie częstości skurczów serca organizmu użytkownika systemu do poziomu bezpiecznego, głównie dzięki zwiększeniu wykorzystania ciepła parowania potu, który bez stosowania systemu chłodzenia nie mógł spełniać swej fizjologicznej funkcji [6]. Przykład układu chłodzącego powietrzem dostępnego na rynku przedstawiono na rys. 2.

Układy chłodzące z cieczą

Kolejnym medium chłodzącym może być ciecz, najczęściej w postaci wody, z uwagi na jej wysokie przewodnictwo cieplne [8]. Prowadzone przez Shim i McCullough badania wykazały, że stosowanie układu chłodzenia cieczą przez osoby wykonujące prace w mikroklimacie gorącym w przestrzeni otwartej (około 32 °C) obniża poziom temperatury wewnętrznej i wskaźnika zużycia tlenu, w porównaniu do badań przeprowadzonych bez systemu chłodzącego [18]. Zmniejszona zostaje również liczba pomyłek i błędów towarzysząca wykonywaniu pracy w mikroklimacie gorącym.

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. Zmiana temperatury cieczy o 5 °C wpływa na zmianę w ilości odbieranego ciepła o 130 W. W przypadku cieczy o temperaturze 15 °C, zmiana powierzchni kontaktu nośnika medium chłodzącego o 0,05 m² powoduje zmianę w ilości odbieranego ciepła o 220 W (według danych literaturowych wielkość powierzchni chłodzącej mieści się w zakresie 0,13 – 0,18 m²). Zdecydowanie mniejszy wpływ na ilość odbieranego ciepła ma zmiana prędkości przepływu cieczy V_c , którą zmieniając o 2 l/min zwiększa się odbiór ciepła o 10 W. Ważną rolę w chłodzeniu odgrywa architektura układu chłodzącego – sposób rozłożenia rurek rozprowadzających ciecz, ich średnica, umiejscowienie [8].

Duże znaczenie przy projektowaniu odzieży z układami chłodzenia cieczą ma prawidłowy dobór materiałów na tę odzież [19]. Odzież od strony ciała człowieka powinna charakteryzować się wysoką przewodnością cieplną, aby nie blokować odbierania ciepła z organizmu przez rurki z cieczą oraz od strony otoczenia – niską przewodnością cieplną, aby zminimalizować straty mocy chłodzącej wynikającej z odbierania ciepła z gorącego środowiska zewnętrznego. Ponadto, w celu ograniczenia dyskomfortu fizjologicznego pracownika wynikającego z wysokiej wilgotności względnej mikroklimatu pod bielizną, niezwykle istotny jest wybór materiału o niskim oporze przenikania pary wodnej. Taki materiał sprawi, że pot, który zostanie wydzielony przez człowieka podczas wysiłku, jak również skropliny, które



Rys. 1. Trójwarstwowa kamizelka o budowie kanałowej, wypełniona makrokapsułkami PCM (praca badawcza własna)

Fig. 1. Three-layered vest of canal structure filled with PCM macrocapsules (author's research)



Rys. 2. Układ chłodzący powietrzem z wentylatorami umieszczonymi na plecach (zdjęcie opublikowane za zgodą www.mawashi.net)

Fig. 2. Air cooling system with fans placed on the back (photo published with permission from www.mawashi.net)



Rys. 3. Przykłady układów chłodzących cieczą dostępnych na rynku: a) bluzka z rozprowadzonymi rurkami podłączenia do układu chłodzącego cieczą (zdjęcie opublikowane za zgodą www.CoolShirtSystems.com); b) kamizelka z układem chłodzącym cieczą w formie plecaka (zdjęcie opublikowane za zgodą www.veskimo.com)

Fig. 3. Examples of liquid cooling systems available on the market: a) blouse with tubes spread and connected to the system (photo published with permission from www.CoolShirtSystems.com); b) a vest equipped with the system in the shape of a backpack (photo published with permission from www.veskimo.com)

powstaną w wyniku kondensacji pary wodnej na rurkach z cieczą chłodzącą będą mogły być łatwo odprowadzone do otoczenia poprzez odparowanie.

Materiał na odzież powinien charakteryzować się również wysoką elastycznością, dzięki której będzie zapewnione przyleganie odzieży z układem rurek rozprowadzających ciecz do ciała i tym samym – zwiększona będzie powierzchnia kontaktu układu chłodzącego z ciałem. W literaturze naukowej mało jest prac dotyczących wpływu tworzywa rurek chłodzących na efektywność procesu chłodzenia. Powszechnie stosowany polichlorek winylu charakteryzuje się niską przewodnością cieplną, stąd nie jest najlepszym tworzywem do przekazywania ciepła. W przypadku stosowania systemu chłodzenia pod odzież ochronną (w tym ciężką i barierową) przy projektowaniu należy zwrócić uwagę na jej nacisk na rurki z medium chłodzącym. Podkreśla się, że istotne dla efektywności odzieży z systemem chłodzenia cieczą jest właściwe jej dopasowanie do użytkownika i zaleca się w tym celu projektowanie tych układów z wykorzystaniem danych uzyskanych z trójwymiarowego skanowania ciała użytkownika [20].

Przykłady rozwiązań układów chłodzących cieczą dostępnych na rynku przedstawiono na rys. 3.

W licznych badaniach analizowano wpływ chłodzonych części ciała na efektywność odbierania ciepła z organizmu. Wynika z nich, 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 [10]. Ciekawym pomysłem jest rozwiązanie firmy Black Ice, która zaproponowała indywidualne chłodzenie za pomocą kołnierza (rys. 4.). Takie rozwiązanie zapewnia łatwą i szybką wymianę czynnika chłodzącego, a ponadto neoprenowa izolacja przyczynia się do wydłużenia skutecznego chłodzenia, które według danych producenta wynosi do 1,5 h.

Inne badania dotyczyły wpływu chłodzenia ciągłego i przerywanego na zmniejszenie obciążenia cieplnego organizmu człowieka. Stwierdzono, że chłodzenie przerywane w cyklach np. 2-4 min jest efektywniejsze z punktu

widzenia fizjologicznego i pragmatycznego oraz bezpieczniejsze dla użytkownika od chłodzenia ciągłego [21].

Publikacje dotyczące odzieży z systemem chłodzenia cieczą wskazują na jej wady, do których należą: duża masa, sztywny i ciężki układ rurek chłodzących, brak pełnej mobilności osoby podłączonej do systemu chłodzącego, kondensacja pary wodnej z powodu niskiej temperatury medium chłodzącego [10]. Wadą tego rodzaju układów chłodzenia jest również brak całkowitej mobilności z uwagi na potrzebę zasilania układu energią elektryczną oraz konieczność zastosowania agregatu chłodzącego. Jednakże w przypadku pracy niewymagającej znacznego przemieszczania się, możliwość szybkiego podłączania się i odpinania od agregatu chłodzącego nie jest kłopotliwa, a chłodzenie organizmu może odbywać się w sposób ciągły [11].

Podsumowanie

Przegląd literatury z zakresu indywidualnych układów chłodzących organizm pracownika wskazuje, że wiele problemów związanych z ich stosowaniem, takich jak praca ciągła, zasilanie energią, ergonomia, nie zostało jeszcze do końca rozwiązanych. Podkreślana jest konieczność podjęcia prac kontynuujących problematykę chłodzenia organizmu dzięki indywidualnym układom chłodzącym oraz konieczność ich modelowania metodą eksperymentalną, przy uwzględnieniu istotnych czynników związanych z ich zastosowaniem. Prace te powinny uwzględniać wyniki dotychczasowych badań i zmierzać do skonstruowania układów funkcjonalnych, ergonomicznych, mobilnych, komfortowych i efektywnych, przy wykorzystaniu najnowszej wiedzy technicznej i nowoczesnych rozwiązań materiałowych. Jest to niezmiernie istotne dla osób wykonujących pracę w niebezpiecznych dla zdrowia i życia warunkach, używających systemy chłodzenia przeznaczonych do stosowania pod odzież ochronną.

W związku z tym, w CIOP-PIB w ramach II etapu programu wieloletniego został podjęty projekt badawczy dotyczący opracowania układu chłodzenia z cieczą do zastosowania pod odzież ochronną na stanowiskach w gorącym środowisku pracy, na których praca nie wymaga dużej mobilności. Charakterystyka nowego indywidualnego układu chłodzącego, który zostanie opracowany w CIOP-PIB, będzie przedmiotem oddzielnej publikacji.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Koradecka D. (red.), *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, CIOP-PIB, Warszawa 2008
- [2] Pascode D.D., Shanley L.A. and Smith E.W. *Clothing and exercise; Biophysics of heat transfer between the individual, clothing and environment*. "Sports Medicine" 1994, 18, 38-54
- [3] Marszałek A. *Fizjologiczne reakcje organizmu człowieka podczas pracy w odzieży ochronnej w gorącym środowisku*. „Bezpieczeństwo Pracy” 2006, 414, 3: 11-15

[4] O' Neal E. K., Bishop P. *Effects of work in hot environment on repeat performance of multiply of simple mental tasks* "International Journal of Industrial Ergonomics" 2010, 40: 77-81

[5] Kaufman J.W. *Estimated ventilation requirements for personal air cooling systems, Aviation, Space and Environmental Medicine*. 2001, 72: 842-847

[6] Vallerand A.L., Michas R.D., Firm J., Ackles K.N. *Heat balance of subjects wearing protective clothing with liquid or air cooled vest, Aviation "Space and Environmental Medicine"* 1991, 63, 5: 383-391

[7] Hamada S., Torii M., Szygula Z., Adachi K. *Effect of partial body cooling on thermophysiological responses during cycling work in hot environment*, "Journal of Thermal Biology" 2006, 31: 194-207

[8] Nyberg K.L., Diller K.R., Wissler E.H. *Model of human liquid cooling garment interaction for space suit automatic thermal control* "Journal of Biomechanical Engineering" 2001, 123, 1: 114-120

[9] Speckmen K.L., Allan A.E., Sawka M.N., Young A.L., Muza S.R., Pandolf K.L. *Perceptions in microclimate cooling involving protective clothing in hot environments* "International Journal of Industrial Ergonomics" 1998, 3: 121-147

[10] Caldwell Joanne Nellie *The interaction of the thermal environment, clothing and auxiliary body cooling in the workplace*, Msc-Res thesis, School of Health Science, University of Wollongong, 2008 <http://ro.uow.edu.au/theses/765>

[11] Chi Y.-C., Chin Y.C., Dimoski D., Kroll R., Low A. C. H., ME 450 Fall 2008 Water Cooling

[12] PN-EN ISO 9886:2005. Ergonomia. Ocena obciążenia termicznego na podstawie pomiarów fizjologicznych

[13] Shim H. and McCullough E.A. *The effectiveness of phase change materials in outdoor clothing*, Proceedings of NOKOBETEF 6 and 1st European Conference on Protective clothing, 2000 Stockholm

[14] Gao C., Kuklane K., Holmer I. (2009) *Effects of temperature gradient on cooling effectiveness of PCM vests in an extremely hot climate*, The 13th International Conference on Environmental Ergonomics

[15] 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

[16] Zgłoszenie patentowe nr P-396551 z dn. 5.10.2011. Tytuł zgłoszenia: *Dwuwarstwowa dzianina rzadkowa wypełniona makrokapsułkami o właściwościach termoregulujących oraz wyrób odzieżowy zawierający makrokapsułki o właściwościach termoregulujących*

[17] Smith D.L., Petruzello S.J. *Selected Physiological and Physiological responses to live-fire drills in different configuration of firefighting gear* "Ergonomics", 1998, 41: 1141-1154

[18] Alwyn L. Furtado, Brian N. Craig, Joshua T. Chard, Victor A. Zaloom & Hsing-Wei Chu *Cooling Suits, Physiological Response, and Task Performance in Hot Environments for the Power Industry*, JOSE, 2007, Vol. 13, No. 3: 227-239

[19] Cao H., Branson D. H., Peksoz S., Nam J., Farr Ch. A. *Fabric Selection for a Liquid Cooling Garment* "Textile Research Journal" 2006, Vol. 76 No. 7: 587-595

[20] Flouris A.D., Cheung S.S. *Design and control optimization of microclimate liquid cooling system underneath protective clothing* "Annals of Biomedical Engineering" 2006, Vol. 34, No. 3: 359-372

[21] Xu X., Berglund L. G., Chevront S. N., Endrusick T. L., Kolka M. A. *Model of human thermoregulation for intermittent regional cooling*. Aviat. Space Environ. Med. 2004, 75: 1065-1069

Publikacja opracowana 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.



Rys. 4. Kołnierz chłodzący firmy Black Ice (zdjęcie opublikowane za zgodą www.blackicecooling.com)

Fig. 4. A cooling collar designed by Black Ice (photo published with permission from www.blackicecooling.com)