

dr hab. med. IWONA SUDOŁ-SZOPIŃSKA
dr ANNA ŁUCZAK

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Stres termiczny, będący integralnym elementem pracy w wielu sytuacjach życia zawodowego i pozazawodowego, ma istotny wpływ na sprawność i bezpieczeństwo działania człowieka. W artykule przedstawiono procesy fizjologiczne oraz sprawności i funkcje poznawcze, których poziom ulega istotnemu obniżeniu w warunkach stresu termicznego, jak również czynniki indywidualne i środowiskowe mające znaczenie w relacji stres termiczny – sprawność człowieka. Szczególną sytuacją, zwłaszcza w sezonie letnim, narażenia na mikroklimat gorący jest stosowanie kasku ochronnego, np. motocyklowego, który mimo niepodważalnej roli w zakresie ochrony głowy przed urazami mechanicznymi, może mieć niekorzystny wpływ na szereg procesów poznawczych motocyklisty, z uwagi na tworzące się w przestrzeni pod kaskiem gorące środowisko. W artykule omówiono więc także szczególną rolę głowy w procesie wymiany ciepła między człowiekiem i otoczeniem, podkreślając przy tym znaczenie badań nad wpływem różnych elementów odzieży ochronnej, w tym kasków, m.in. systemów ich chłodzenia, na komfort i bezpieczeństwo człowieka w warunkach stresu termicznego.

The influence of thermal stress on man's physical performance

Thermal stress, an integral element of work in both professional and non-professional life, has a vital influence on man's physical performance and safety. This article presents physiological as well as cognitive functions and capacities, which decrease considerably under thermal stress, as well as individual and physiological factors, which play a significant role in the relationship between thermal stress and human performance.

The use of a protective helmet (for instance, a motorcycle helmet) brings about exposure to a hot microclimate, especially in summer. Admittedly, its role in protecting the head against mechanical trauma is unquestionable; nonetheless due to the hot microclimate generated in the space under the motorcyclist's helmet, it can have a negative influence on a number of cognitive processes.

The article also discusses the special role the head plays in the process of heat exchange between man and the environment. It emphasizes the significance of research on the impact of various elements of protective clothing (including helmets) and, e.g., their cooling systems on comfort and safety of man under thermal stress.

Wpływ temperatury środowiska zewnątrznego na sprawność działania człowieka



Wstęp

Temperatura środowiska zewnętrznego, zarówno zimno jak i gorąco, ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa pracy ze względu na wpływ, jaki wywiera na procesy fizjologiczne, sprawności psychomotoryczne oraz przebieg procesów poznawczych człowieka. Wpływ temperatury środowiska zewnętrznego na sprawność człowieka podczas wykonywania pracy przedstawiono na rysunku.

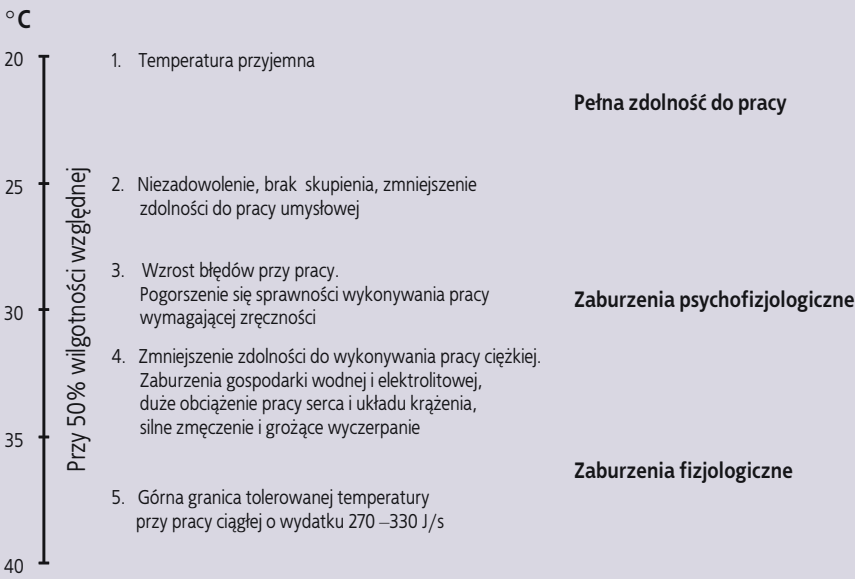
Istnieje wiele zawodów, których wykonywanie wiąże się z funkcjonowaniem człowieka w warunkach stresu termicznego. Jako przykład można podać górników, hutników, pracowników budowlanych, strażaków, pilotów, żołnierzy. Także wiele sytuacji poza pracą niesie ryzyko narażenia na niekorzystne oddziaływanie środowiska termicznego. Przykładem może być jazda na motocyklu. Motocykliści, ze względu na konieczność ochrony głowy przed urazami mechanicznymi, mają obowiązek stosowania kasków ochronnych, co – głównie ze względu na wzrost temperatury pod kaskiem – w sposób paradoksalny może mieć negatywny wpływ na wiele ich sprawności, w tym motorycznych, poznawczych oraz fizjologicznych. W sezonie letnim oraz w okresie wakacyjnym problem oddziaływania środowiska gorącego na procesy poznawcze i reakcje fizjologiczne człowieka nabiera szczególnego znaczenia, między innymi także dlatego, że liczba użytkowników motocykli w tym okresie zdecydowanie wzrasta.

Celem tego artykułu jest zwrócenie uwagi na czynniki środowiska termicznego, które istotnie pogarszają sprawność działania człowieka jak również podkreślenie znaczenia badań prowadzonych w zakresie poprawy komfortu użytkowania elementów odzieży ochronnej w warunkach stresu termicznego. Komfort użytkowania odzieży przekłada się bowiem w spo-

sób bezpośredni na jakość wykonywanych zadań, w tym na efektywność pracy. Badania analizujące związki między jakością pracy a różnymi zmiennymi potwierdzają, że koreluje ona w lepszym stopniu z komfortem, niż z jakąkolwiek inną pojedynczą zmienną [1].

W literaturze dotyczącej wpływu temperatury otoczenia na sprawność człowieka poruszane są trzy główne problemy, a mianowicie: **poziom stresu termicznego** (temperatury) powodującego istotne zmiany sprawności działania człowieka,

Zależność między temperaturą otoczenia i sprawnością opisuje wykres w kształcie odwróconej litery U [3]. Oznacza to, że najniższy poziom sprawności obserwuje się w środowisku zimnym, tj. w temperaturze 10 °C, oraz w gorącu, w temperaturze 32,2 °C. Natomiast w zakresie temperatur 21,11-26,61 °C zmiany w poziomie sprawności wykonania zadań są nieznaczne i wynoszą ok. 0,8% w stosunku do poziomu sprawności notowanego w temperaturze neutralnej, tj. 16-21 °C. Zależność tę potwierdzają wyniki



Rys. Wpływ temperatury środowiska zewnętrznego na sprawności człowieka [2]
Fig. Influence of the environmental temperature on human psychophysiological capabilities [2]

kategorie sprawności i procesów poznawczych, których poziom ulega zmianie pod wpływem działania stresu termicznego oraz tzw. **moderatory relacji stres termiczny – sprawność człowieka**, tzn. czynniki mające istotne znaczenie dla charakteru i przebiegu tej relacji.

Temperatura otoczenia

Wydaje się, że **temperatura otoczenia** jest podstawowym czynnikiem wpływającym na rodzaj i zakres zmian sprawności człowieka w warunkach stresu termicznego.

badan wskazujące, że najmniej zachowań niebezpiecznych obserwuje się w temperaturze otoczenia wynoszącej 17-23 °C, zaś ich liczba zaczyna istotnie rosnąć w temperaturze 35 °C. W zakresie temperatur 33-35 °C obserwuje się także największe obniżenie jakości wykonywanych zadań motorycznych. Z kolei optymalną temperaturą do wykonywania zadań wymagających czujności i uwagi jest 26,7 °C, zaś dla zadań polegających na ocenie czasu oraz wymagających refleksu i obserwacji tą wielkością jest 29,4 °C [4].

Sprawności i procesy poznawcze podatne na działanie stresu termicznego

Wyniki badań nad wpływem stresu termicznego na sprawność człowieka wykazały, że pod wpływem gorąca w największym stopniu pogorszeniu ulega **pamięć, zdolność uczenia się i logiczne rozumowanie**, tj. o 18,05%. Inne skutki wywołuje zimno, a inne gorąco. W środowisku zimnym ($\leq 18,33^{\circ}\text{C}$) dochodzi głównie do upośledzenia sprawności **uczenia się, pamięci i rozumowania logicznego**, podczas gdy w środowisku gorącym ($\geq 26,67^{\circ}\text{C}$) obniżeniu ulega **poziom uwagi, spostrzegawczość, sprawność w rozwiązywaniu zadań matematycznych oraz czujność**.

Negatywny wpływ gorąca na procesy poznawcze w zakresie **czujności** potwierdził m.in. eksperyment przeprowadzony wśród kierowców, w naturalnych warunkach ruchu ulicznego, w umiarkowanym gorącu. Badane sprawności były na znacznie niższym poziomie, gdy temperatura otoczenia wynosiła 27°C , w porównaniu z temperaturą 21°C : liczba niezauważonych sygnałów (błędów) była o 50% większa, zaś czas reakcji o 22% dłuższy. Objawy te były najwyraźniej zaznaczone u osób w wieku poniżej 40. roku życia, jadących z małą prędkością, tj. $<60\text{ km/godz.}$, oraz w drugiej połowie godziny kierowania pojazdem.

Badania nad wpływem stosowanej odzieży ochronnej (kombinezon i kask) na procesy fizjologiczne i poznawcze pilotów wykazały cechy silnego stresu termicznego w temperaturze 40°C , zarówno w ocenie subiektywnej, jak i w odniesieniu do **reakcji fizjologicznych** (wzrost temperatury skóry, temperatury wewnętrznej i częstości skurczów serca) oraz obniżenia **czujności** (wzrosła liczba błędów) [5].

Pogorszenie czujności stwierdzono także w badaniach przeprowadzonych wśród członków cywilnych służb ratowniczych używających odzieży ochronnej przed zagrożeniami biologiczno-chemicznymi: pod wpływem gorąca, po 1,5 godz. ćwiczeń w warunkach symulacyjnych, **czujność** w zakresie wykrywania sygnału spadła o około 55%, a po dwóch godzinach ekspozycji na gorąco (35°C , 60% wilgotność względna) **wartość spadku sprawności** w zakresie strzelania z broni wyniosła od 19 do 22%.

Czynniki sytuacyjne

Poziom sprawności w warunkach stresu termicznego zależy w sposób istotny zarówno od **czasu przebywania** w określonych warunkach termicznych środowiska, jak i **wcześniejszej ekspozycji na zimno lub gorąco**. Krótka, tj. nie przekraczająca 2 godzin ekspozycja, ma silniejszy negatywny wpływ na sprawność, w porównaniu z ekspozycją dłuższą: w pierwszym przypadku obniżenie sprawności wynosi 15,91%, podczas gdy w efekcie długiej ekspozycji 5,84%. Z drugiej strony, przebywanie w warunkach stresu termicznego przed przystąpieniem do właściwej pracy przez czas dłuższy niż 60 minut ma gorszy wpływ na sprawność (spadek o 18,15%) w porównaniu do braku wcześniejszej ekspozycji [3]. Na poziom sprawności w warunkach stresu termicznego ma także wpływ **złożoność zadań**. Zadania proste, wymagające np. szybkości refleksu są mniej podatne na wpływ gorąca niż zadania bardziej złożone, związane z zachowaniem czujności.

Czynniki o charakterze indywidualnym

Do najistotniejszych indywidualnych moderatorów relacji stres termiczny – poziom sprawności zalicza się **temperaturę ciała**. Nie ulega ona zmianie w sytuacji, gdy obciążenie termiczne nie jest znaczne, tj. w temperaturze otoczenia $29,4^{\circ}\text{C}$ uznawanej za optymalną dla zachowania stałego poziomu czuwania. Wysoka temperatura otoczenia powoduje zazwyczaj stopniowy wzrost temperatury wewnętrznej, co do pewnego momentu wpływa na poprawę sprawności w zakresie utrzymywania uwagi i czuwania. Dalszy wzrost temperatury wewnętrznej z prędkością $0,055^{\circ}\text{C}$, $0,22^{\circ}\text{C}$, $0,88^{\circ}\text{C}$ i $1,33^{\circ}\text{C}$ na godzinę powoduje obniżenie sprawności odpowiednio w zakresie czujności, wykonywania zadań podwójnych, śledzenia i prostych zadań umysłowych [6]. Sprawność funkcji poznawczych ulega pogorszeniu wraz ze wzrostem temperatury wewnętrznej, co zazwyczaj ma miejsce w temperaturze otoczenia równej 40°C .

Autorzy badań poświęconych problematyce wpływu stresu termicznego na sprawności człowieka zwracają również uwagę na inne czynniki modulujące skutek

jaki zimno lub gorąco wywołuje w zakresie sprawności psychofizycznej. Jednym z nich jest **trening** w zakresie analizowanych sprawności. Na przykład piloci, którzy w rzeczywistych warunkach lotu muszą wykazywać się zdolnością koncentracji i podzielnością uwagi, dobrym refleksem i czujnością, lepiej poradzą sobie z wykonaniem zadań wymagających wymienionych sprawności w warunkach laboratoryjnych niż osoby, których codzienna aktywność nie wymaga szczególnie wysokiego poziomu w tym zakresie. Innym moderatorem jest dodatkowy **wysiłek i motywacja**, które zazwyczaj pojawiają się w sytuacji konieczności radzenia sobie z zadaniem w trudnych warunkach, m.in. środowiska termicznego.

Mechanizm ograniczania negatywnego wpływu stresu termicznego na poziom sprawności człowieka przez zaangażowanie się w wykonanie zadania i silną motywację wyjaśnia Model Maksymalnej Adaptacji. Przedstawia on strategię adaptacyjną, polegającą na stopniowym wykorzystywaniu zasobów uwagi w sytuacji przedłużającej się ekspozycji na stres lub wzrostu intensywności stresu. Dzięki tej strategii nie obserwuje się obniżenia poziomu sprawności, a wręcz jej wzrost w niektórych przypadkach. Korzystanie z zasobów odbywa się jednak do momentu naruszenia obszaru równowagi, czyli tzw. fizjologicznej strefy maksymalnej adaptacji, poza którą następuje spadek sprawności wykonywania zadań.

Moderatorem relacji stres termiczny – poziom sprawności jest również **pleć**. W warunkach stresu związanego z gorącem kobiety lepiej niż mężczyźni radzą sobie z wykonaniem zadań wymagających zaangażowania pamięci krótkotrwałej.

Temperatura głowy a komfort termiczny

Mimo że głowa stanowi zaledwie 10% powierzchni ciała, jej temperatura ma ogromne znaczenie dla odczuwanego komfortu termicznego. Z tych względów od wielu lat trwają prace nad poszukiwaniem systemów chłodzenia głowy, które jednocześnie poprawią komfort całego ciała człowieka.

Potencjał głowy w zakresie wymiany ciepła z otoczeniem wynika z bogatego unaczynienia jej części mózgowej (skalpu), której naczynia

nie ulegają zwężeniu pod wpływem niskiej temperatury, a także obecności przeciwnieprądowego chłodzenia, dzięki któremu dochodzi do obniżenia temperatury krwi w tętnicy szyjnej pod wpływem ochłodzenia głowy.

W badaniach analizujących wpływ temperatury głowy na parametry fizjologiczne organizmu, uczucie komfortu oraz jakość wykonywanych zadań w warunkach hipertermii, wykorzystano podgrzewaną czapkę. Okazało się, że czapka, pokrywająca zaledwie 3-4% powierzchni ciała, wywoływała efekt systemowy w odniesieniu do temperatury wewnętrznej, a więc wpływała na bilans ciepły, co potwierdzało doskonałe możliwości głowy jako wymiennika ciepła [7]. Z kolei podczas chłodzenia głowy, które osiągało za pomocą czapki z systemem naczyń wypełnianych zimną wodą, obserwowano odwrócenie niekorzystnych reakcji związanych ze wzrostem temperatury wewnętrznej, tj. poprawę jakości wykonywanych zadań, szybkie obniżenie częstości skurczów serca i poprawę komfortu cieplnego. Reakcje te pojawiły się natychmiast po włączeniu systemu chłodzenia głowy o wiele wcześniej niż doszło do obniżenia wartości temperatury wewnętrznej.

Efekt termoregulacyjny chłodzenia głowy badano także porównując inne metody jej chłodzenia, m.in. części twarzowej chłodnym powietrzem oraz oddychania chłodnym powietrzem. Nie potwierdzono jednak ich korzystnego wpływu na obniżenie temperatury w przełyku, natomiast obniżeniu uległa – pod wpływem chłodzenia twarzy – temperatura błony bębenkowej [8]. Nie obserwowano pozytywnych reakcji w czasie oddychania chłodnym powietrzem.

Uzyskane rezultaty potwierdzają, iż częstą przyczyną odczuwanego dyskomfortu termicznego może być m.in. stosowanie różnego typu kasków w warunkach środowiska ciepłego i gorącego. Wykazały to m.in. badania kasków stosowanych w przemyśle [9] i kasków rowerowych [10]. Dyskomfort spowodowany stresem termicznym odczuwało ponad 70% ich użytkowników. Należy jednak przypuszczać, iż przyczyną dyskomfortu była nie tylko temperatura powietrza,

ale i wilgotność w przestrzeni pod kaskiem. Czasza tworząca kask jest bowiem wykonana z tworzywa sztucznego, stanowiącego nieprzepuszczającą barierę i stawiającego praktycznie nieskończony opór przenikaniu wilgotności, której źródłem jest człowiek (oddychanie i wydzielanie potu).

Spostrzeżenia te zainicjowały podjęcie badań nad wpływem prędkości powietrza na komfort termiczny użytkowników kasków rowerowych oraz nad właściwościami wentylacyjnymi kasków motocyklowych, w ramach międzynarodowego projektu COST – Akcja 357 o akronimie Prohelm [9, 11].

Podsumowanie

Temperatura otoczenia jest podstawowym czynnikiem wpływającym na rodzaj i zakres zmian sprawności człowieka w warunkach stresu termicznego. Nie należy jej jednak traktować jako głównego wyznacznika zmian sprawności występujących pod wpływem stresu termicznego. Badacze tego zagadnienia podkreślają konieczność łącznej analizy wpływu temperatury otoczenia, czasu ekspozycji, typu zadania i temperatury ciała na sprawność człowieka. Obok wymienionych czynników, stres termiczny zależy również od właściwości odzieży ochronnej, w tym m.in. kasków, stosowanych w celach rekreacyjnych oraz przeznaczonych do stosowania w niektórych zawodach. Fakt ten potwierdza znaczenie badań nad wpływem określonych elementów tego typu odzieży na sprawność działania i bezpieczeństwo pracy człowieka w warunkach stresu termicznego oraz nad właściwościami materiałów stosowanych do produkcji kasków w celu poprawy komfortu ich użytkowania. Przeprowadzenie takich badań jest planowane w Zakładzie Ergonomii CIOP-PIB, w ramach międzynarodowego projektu COST – Akcja 357 o akronimie Prohelm, którego celem będzie określenie wpływu mikroklimatu tworzącego się w przestrzeni pod kaskiem, w tym temperatury, wilgotności i stężenia dwutlenku węgla, na zdolności poznawcze, reakcje fizjologiczne i psychomotoryczne kierowców motocykli. Zakłada się, że pozwolą one określić parametry komfortu użytkowania kasków motocyklowych, co może być wykorzystane przez ich producentów w celu poprawy bezpieczeństwa użytkowania tych ochron.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Allan J. R., Belyavin C. A., Flik C. A., Higenbottam C. *Detection of Visual signals during induced cycles of core temperature*. RAF Institute of Aviation Medicine, Farnborough, England, Report No 592, 1979
- [2] Gwóźdź B. *Człowiek w środowisku wielokopremysłowym i elementy ergonomii*. W: *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej*. Traczyk Wł., Trzebisk A. PZWL Warszawa 2004
- [3] Pilcher J. J., Nadler E., Busch C. *Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review*. "Ergonomics", Vol. 45, No 10, 2002, 682-698
- [4] Grether W. F. *Human performance at elevated environmental temperatures*. "Aerospace Medicine", 44, 1973, 747-755
- [5] Faervik H., Reinersten R. E. *Effect of wearing aircrew protective clothing on physiological and cognitive responses under various ambient conditions*. "Ergonomics", Vol. 46, No 8, 2003, 780-799
- [6] Hancock P. A., Vasmatazidis I. *Human occupational and performance limits under stress: the thermal environment as a prototypical example*. "Ergonomics", 4, 1998, 1169-91
- [7] Nunneley S. A., Leader D. C., Maldonado R. J. *Head-temperature effects on physiology, comfort, and performance during hyperthermia*. "Aviation Space and Environmental Medicine", 53, 1982, 623-628
- [8] Desruelle A. V., Candas V. *Termoregulatory effects of three different types of head cooling in humans during a mild hyperthermia*. "European Journal of Applied Physiology", 81, 2000, 33-39
- [9] Liu X. *Evaluation of thermal comfort of head gear*. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden 1997
- [10] Ellis A. J., Bertolini A. F., Thompson L. A. *A review of research on bicycle helmet ventilation*. "Sports Engineering", 3, 2000, 185-194
- [11] Bruhwiler P. A., Ducas C., Huber R., Bishop P. A. *Bicycle helmet ventilation and comfort angle dependence*. "European Journal of Applied Physiology" 92, 2004, 698-701



Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach zadania badawczego, realizowanego w zakresie działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego w latach 2006-2007