

Funkcje badawczo-interpretacyjne bilansu cieplnego organizmu pracownika w ocenie obciążenia termicznego

Research and interpretation functions of the heat balance of the worker in the assessment of thermal load



Prof. dr hab. inż. Józef Waclawik*)



Dr inż. Józef Knechtel***)



Mgr inż. Lucjan Świerczek***)

Treść: W pracy omówiono sposób postępowania w celu ograniczenia negatywnych dla organizmu ludzkiego skutków pracy w gorącym mikroklimacie. Korzysta się z racjonalnych metod oceny zagrożenia stresem cieplnym, opartych na reakcjach fizjologicznych organizmu. W metodach tych opracowuje się bilans cieplny, w którym uwzględnia się wymianę ciepła i wilgoci między organizmem pracownika a otoczeniem. Na tej podstawie określa się granice stresu cieplnego dla górników na podstawie fizjologicznej tolerancji, wyrażonej przez temperaturę wewnętrzną ciała oraz odwodnienie organizmu. W razie potrzeby dokonuje się selekcji pracowników i opracowuje procedury ochrony. Przy ocenie cieplnych warunków pracy korzysta się z pojedynczych pomiarów określonych parametrów powietrza, pomiarów otoczenia, a także racjonalnych indeksów, wynikających z bilansu cieplnego pracownika. W artykule przytoczono niektóre z nich: temperatura powietrza na termometrze wilgotnym, wskaźnik WBGT, wskaźnik dyskomfortu, zdolność chłodnicza otoczenia, australijska cieplna granica pracy.

Abstract: This paper presents a way of conduction in the reduction of adverse effects of work in hot microclimate. The rational methods of assessment of heat stress hazard, which are based on physiological reactions of human body are used. These methods allow to develop the heat balance which includes the exchange of heat and moisture between the body of the worker and the surroundings. Thus, it is possible to determine the limits of heat stress for the miner on the basis of physiological tolerance, expressed in body temperature and dehydration. If needed, the selection of workers and development of protection procedures are performed. By assessing the thermal conditions of work, separate measurements of air parameters, surrounding measurements as well as rational indexes, resulting from the heat balance of the worker are used. This paper presents some of them: the air temperature on the wet-bulb thermometer, WBGT index, discomfort index, cooling power of the surroundings, Australian thermal work limit (TWL).

Słowa kluczowe:

praca w gorącym mikroklimacie, stres cieplny, wskaźniki oceny obciążenia cieplnego

Key words:

work in hot microclimate, thermal stress, index of thermal load indexes

1. Wprowadzenie

Wśród wielu ważnych wyników badań uzyskanych w przemyśle górnym po raz pierwszy zidentyfikowano stres cieplny jako problem (górnictwo rud złota w Republice Południowej Afryki).

Związane z tym problemem zagadnienia to:

- racjonalne metody oceny zagrożenia stresem cieplnym, oparte na reakcjach fizjologicznych,
- opracowanie bilansu cieplnego organizmu uwzględniającego wymianę ciepła między organizmem pracownika a otoczeniem,

- granice stresu cieplnego dla górników na podstawie fizjologicznej tolerancji, wyrażonej przez temperaturę wewnętrzną ciała oraz odwodnienie organizmu – selekcja pracowników i procedury ochrony.

2. Strategia kontroli, analizy i zapobiegania zagrożeniom cieplnym w pracy

W badaniach prowadzonych w górnictwie wykazano, że stres cieplny i jego ograniczenia można określić ilościowo, w odniesieniu do odbioru ciepła przez środowisko z organizmu pracownika. W środowisku gorącym lub w miejscu, gdzie praca wykonywana jest w anormalnych warunkach i charakteryzuje się dużym wydatkiem energetycznym, konieczna

*) AGH w Krakowie, **) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

jest racjonalna obserwacja i analiza panujących ciepłych warunków pracy, w celu zapobiegania zagrożeniom ciepłym. Obecny stan w tej dziedzinie w większości kopalń podziemnych w naszym państwie wskazuje na niezbędność dyskusji na temat strategii jaka powinna być zastosowana, by skutecznie rozpoznawać i zwalczać obciążenie termiczne. Metody kontroli, analizy i zapobiegania stanom stresu cieplnego i innym zagrożeniom ciepłym na stanowiskach pracy były przedmiotem publikacji Malchaire, Gebhardta i Piette [14] oraz normy ISO 15265:2004, (czyli PN-EN ISO15265:2005) Ergonomics of the thermal environment – Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions („Ergonomia środowiska termicznego – strategia oceny ryzyka i zapobieganie stresowi cieplnemu podczas wykonywania pracy w warunkach termicznych”). Zarówno publikacja [14], jak też dokument ISO [33] stanowią podsumowanie dość ogólnych badań i doświadczeń związanych z podejmowanymi w zakładach pracy (firmach) działaniami skierowanymi na poprawę ciepłych warunków pracy, prowadzonych przez jednostki badawcze zajmujące się medycyną, ergonomią oraz bezpieczeństwem i higieną pracy w ośmiu państwach starej Unii, w ramach programu BIOMED. Niemal wszystkie stwierdzenia i wnioski zawarte w obu wymienionych dokumentach można zastosować w większości zakładów przemysłowych z problemami termicznymi. Celem ogólnym tych działań jest poprawa bezpieczeństwa, stworzenie warunków sprzyjających utrzymaniu zdrowia, poprawie samopoczucia i komfortu w miejscu pracy, co powinno sprzyjać wysokim wynikom produkcyjnym. Celem bezpośrednim jest zapobieganie stanom stresu cieplnego i innym zagrożeniom ciepłym, oparte na wiedzy dostępnej w środowisku pracowników i na zewnątrz firmy, o dowolnej wielkości i profilu produkcyjnym. Wersja strategii przyjęta w normie przewiduje pewną metodykę postępowania, realizowaną w trzech etapach, które zostały nazwane „Obserwacja”, „Analiza” i „Ekspertyza”. Metodyka opiera się na dwóch podstawowych zasadach:

1. Zasadzie partycypacji (uczestnictwa): pracownicy odgrywają istotną rolę w działaniach nad poprawą warunków pracy. Specjaliści w zakresie higieny i ergonomii oraz eksperci stanowią pomoc dla pracowników w znalezieniu rozwiązania.
2. Zasadzie poszukiwania rozwiązania i jego wdrożenia w etapach, wymagających odpowiedniej wiedzy i kompetencji:
 - w pierwszym etapie o nazwie „Obserwacja” konieczna jest znajomość firmy oraz procedur pracy w „normalnych” i „nienormalnych” warunkach;
 - na drugim etapie „Analiza”: przewidziana jest pomoc specjalistów w kształceniu i szkoleniu na temat ogólnych aspektów metodologicznych, w tym zarówno pomiarów, jak i ocen technicznych, a także możliwości rozwiązań praktycznych;
 - ostatni trzeci etap „Ekspertyza” podejmuje się wtedy, gdy jest to absolutnie konieczne.

Metodyka przewiduje pomoc wysoko wykwalifikowanych ekspertów, którzy dzięki konkretnej wiedzy są w stanie identyfikować problemy termiczne oraz określić specjalne rozwiązania konkretnych problemów. Należy podkreślić, że nie wszystkie trzy etapy są systematycznie wykonywane, gdyż procedura zatrzymuje się, gdy odpowiednie rozwiązanie zostanie pomyślnie wdrożone w ramach pierwszego lub drugiego etapu.

Wczesna wersja powyższej metodyki została poddana sprawdzeniu w grupie potencjalnych użytkowników, z różnych gałęzi przemysłu i z różnych krajów. Z czterech krajów 42 osoby zgodziły się i przeprowadziły próby w swoich firmach, a następnie przekazały opinie i uwagi do krajowego

partnera BIOMED. Były to osoby głównie z małych i średnich przedsiębiorstw z problemami termicznymi, przeszkolone w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. Zapytano je o opinie w kwestii użyteczności, czasu realizacji, zrozumienia i trafności propozycji przedstawionych w projekcie. Konsultacje pokazały oczekiwania, z których wynika, że metoda powinna być zrozumiana w czasie dość krótkim przez przeszkolone osoby, w szczególności, przez pracowników firmy, którzy będą ją wdrażali. Mają rozstrzygać w jednej konkretnej sytuacji, a w razie potrzeby, postępowanie powinno być powtarzane w różnych okolicznościach, na tym samym miejscu pracy. Propozycje muszą być związane ze środkami profilaktyki. W ramach „Obserwacji” powinny zostać wykryte wszystkie (lub większość) czynniki ryzyka oraz problemy ciepłe występujące na stanowiskach pracy. W związku z tym działania obejmują ewidencję czynników związanych z bezpieczeństwem, zdrowiem i dobrym samopoczuciem pracowników. Czynności „Obserwacji” muszą być zaprojektowane w taki sposób, by można było określić gdzie „problem cieplny” istnieje i ustalić, co należy zrobić, aby go zmniejszyć lub wyeliminować. Na ogół „Obserwacja” może być zrealizowana bezpośrednio przez samych pracowników, jeśli mają dostateczną wiedzę na temat warunków pracy. Użyteczne są kompetencje w zakresie fizjologii i pomiarów ciepłych. Jednak do przeprowadzenia pierwszego etapu „Obserwacji” powinny wystarczyć ogólne umiejętności wynikające z wykształcenia i doświadczenia, zdolności do obserwacji i kojarzenia. Po przeprowadzeniu podstawowych czynności tego etapu, użytkownik powinien być w stanie określić, czy „problem cieplny” jest kontrolowany w sposób zadowalający czy nie. Jeśli tak nie jest lub w przypadku dalszych wątpliwości, potrzebna jest pomoc wykwalifikowanych specjalistów. Również „Analiza” powinna być oparta na prostych obserwacjach. Ma być ukierunkowana na zapobieganie oraz na przyczyny, które powodują że stan warunków termicznych nie jest korzystny, a także na sposoby ich korygowania. Należy wykorzystać wiedzę użytkowników o ich warunkach pracy, technikach procesowych, charakterystyce źródeł ciepła lub zimna, możliwościach zmian i poprawy. Metoda zatem uznaje kompetencje i umiejętności pracowników oraz ich chęć do poprawy warunków pracy (a nie na przykład skrócenie czasu pracy). Takie podejście pomaga uporządkowaniu i usystematyzowaniu działań tak, by nie były podejmowane wyłącznie na podstawie (na przykład lokalnych) spostrzeżeń i opinii.

Etap „Analiza” powinien być dostosowany do wykorzystania służb zajmujących się bezpieczeństwem pracy, higieną i ergonomią lub odpowiednio przeszkolonych osób. Należy wykorzystać ogólne wykształcenie w zakresie problemów obciążenia termicznego oraz koncepcje, techniki i rozwiązania powszechnie stosowane w ruchu. W razie potrzeby, w celu zapobiegania, mogą być wymagane pomiary za pomocą łatwo dostępnych przyrządów taniach i prostych w użyciu. Należy unikać specjalnych technik pomiarowych. Szczegółowe badanie warunków wymaga także określenia rozwiązań organizacyjnych obejmujących środki ochrony (np. dostęp do napojów). Opiniujący projekt metodyki sugerowali, by było możliwe, aby zrealizować etap i opracować rekomendacje w ciągu jednego dnia. Nie zawsze jest to realne, w szczególności wtedy, gdy istnieje skomplikowany problem. Pod koniec „Analizy”, w większości przypadków warunki powinny być pod kontrolą. Jedynie w wyjątkowych przypadkach, jeśli pozostaje niedopuszczalne ryzyko dyskomfortu i stresu cieplnego, należy realizować następny etap.

Wtedy podejmuje się etap „Ekspertyza”, w którym przewidziana jest pomoc eksperta, który według swojej wiedzy i uznania określa stan warunków pracy przy użyciu bardzo wyszukanych technik badawczych, takich jak (na przykład)

miar temperatury promieniowania, izolacyjności i przepuszczalności odzieży lub bardziej precyzyjnie określa wydatek energetyczny, na przykład przez pomiar konsumpcji tlenu. Tego rodzaju badania są drogie, wymagają więcej czasu oraz wyrafinowanego oprzyrządowania i kompetencji. Należy posługiwać się określoną metodologią wybraną stosownie do panujących warunków, wykonać pomiary w zakresie odpowiednim do podejmowanego problemu. Ekspertiści powinni wybrać najlepszą procedurę zbierania informacji niezbędnych do rozwiązania problemu. Ponieważ nie istnieje jedna unikatowa metoda fachowej ekspertyzy czy fachowa wiedza nie można zaproponować tutaj bardziej szczegółowej sugestii. W „Ekspertyzie” powinny znaleźć zastosowanie metody uważane za naukowe.

Prace pozostają ukierunkowane na zapobieganie, a zatem należy wykorzystać pomiary i zastosować wskaźniki, dzięki którym można najlepiej określić przyczyny istnienia problemu termicznego i środki do jego rozwiązania. Istnieje wiele różnych metod zaproponowanych w przeszłości do pierwszego etapu „Obserwacja”. Przykłady można znaleźć w podręcznikach (np. z bezpieczeństwa i higieny pracy, a także wentylacji i klimatyzacji), w normach i instrukcjach. Istnieją także starsze i nowsze ciekawe źródła bibliograficzne, zasługujące jednak na oddzielne omówienie, głównie z uwagi na to, że większość dotyczy dziedzin niegórnictw. Wśród licznych dokumentów Komisji Europejskiej znalazł się także „Samo audyt, podręcznik dla małych i średnich przedsiębiorstw”, który w rozdziale szóstym omawia zagrożenia temperaturowe i wentylacyjne [3].

3. Procedury badania zagrożenia stresem cieplnym

Reakcja organizmu człowieka na ciepłe warunki pracy wyraża się przez zmiany parametrów fizjologicznych [8, 9, 10, 17, 19, 24]. Niektóre z nich są mierzone w celu oceny stanu obciążenia termicznego, jakiemu poddany jest organizm człowieka [6, 15, 21, 27]. Ciepłe warunki panujące w miejscu pracy kształtowane są przez parametry charakteryzujące środowisko i pracownika oraz wielkości fizjologiczne. Środowisko oddziałuje na warunki przez temperaturę na termometrze wilgotnym t_m i suchym t_a , prędkość przepływu powietrza v_a , temperaturę promieniowania t_r oraz ciśnienie barometryczne p . Wymienione wielkości mają wpływ głównie na ilość ciepła wymienianego między organizmem człowieka a otoczeniem oraz na sposób oddychania człowieka i noszą nazwę mikroklimatu pomieszczenia (wzrostu). W miejscach otwartych na powierzchni ziemi mikroklimat zależy także od stopnia nasłonecznienia. Obciążenie cieplne pracownika tworzą: wydatek energetyczny (ciepło przemian metabolicznych) M , ruch ciała v_w , pole powierzchni jego ciała A_{Du} , rodzaj ubioru i jego opór cieplny I_{cl} oraz przepuszczalność wilgoci i_m [26]. Obciążenie cieplne powoduje zmiany następujących parametrów fizjologicznych temperatury wewnętrznej ciała t_{cr} (w rectum t_{re}), konsumpcji tlenu $\dot{V}_{O_2}^k$, liczby skurczów serca HR , średniej temperatury skóry t_{sk} , stopnia zwilżenia skóry ciała w , a także odwodnienia organizmu S_w [2]. Osoby pracujące w środowisku gorącym powinny być zaaklimatyzowane, cieszyć się dobrym zdrowiem, co uzależnione jest od higienicznego trybu życia, sprawności ruchowej i kondycji fizycznej. Konieczna jest sprawność parametrów termoregulacyjnych ustroju, a także młody wiek (od 21 do 40 lat).

Człowiek może przebywać i pracować w rozmaitych warunkach charakteryzujących się różnymi wartościami podanych wyżej wielkości fizycznych. Najkorzystniejszy mikroklimat tworzą takie stany parametrów powietrza w pomieszczeniu, w których samopoczucie człowieka jest dobre,

a gospodarka cieplna jego organizmu przebiega ekonomicznie. Stany takie osiąga się w różnych kombinacjach wzajemnych temperatury, wilgotności oraz prędkości przepływu powietrza i określa jako komfort cieplny. Z uwagi na różnice biologiczne nie ma możliwości uzyskania dobrego samopoczucia czy zadowolenia z warunków cieplnych otoczenia przez wszystkich ludzi przebywających w miejscu o danym mikroklimacie. Z tego powodu niekiedy za optymalny mikroklimat uważa się stan, w którym możliwe duży odsetek pracujących (na przykład 80 lub 90 %) akceptuje panujące warunki cieplne.

Jednak w wyrobiskach kopalnianych z wysokim obciążeniem cieplnym należy się liczyć z występowaniem pewnego dyskomfortu i formalną akceptacją warunków klimatycznych, w których temperatura wewnętrzna ciała nie przekracza $t_{cr} = 38^\circ\text{C}$, a w zależności od sytuacji masa potu wynosi nie więcej niż 5 czy 7,5 % masy ciała [24, 25]. Akceptacja warunków wiąże się głównie z utrzymaniem parametrów fizjologicznych w bezpiecznych granicach. Stanowi to różnicę w stosunku do tradycyjnego celu zainteresowania stresem cieplnym w zakładach pracy. Główną motywacją do wysiłków podejmowanych w firmach w zakresie oceny i kontroli obciążenia cieplnego w miejscu pracy jest zminimalizowanie szkodliwości ich wpływu na zdrowie pracowników. Doprowadziło to do rozwoju standardów wskaźników stresu i ograniczeń czasu ekspozycji, opartych przede wszystkim na fizjologicznej tolerancji i zdrowiu, a w mniejszym stopniu na kryteriach wydajności pracy i na subiektywnych odczuciach zatrudnionych. Ponadto autorzy z krajów o liberalnej gospodarce (np. [27]) podkreślają, że należy brać pod uwagę kluczową równowagę między kosztami i potencjalnymi zwrotami z kopalń oraz kwestię zapewnienia rentowności, która stawia wymagania uwzględniania kryteriów oceny wydajności pracowników gorących miejsc pracy, nie opierając się wyłącznie na ocenie tolerancji fizjologicznej. Ważne jest zaufanie inwestorów do projektów górniczych głębokich kopalń, nie tylko pod względem rentowności, ale również w zakresie minimalizacji przyszłych roszczeń odszkodowawczych i sporów. Na tej podstawie autorzy wysunuli wniosek, że niezmiernie ważną sprawą jest zapewnienie, na ile jest to możliwe i korzystne, by środowiskowe normy dla górnictwa były zgodne z międzynarodowymi normami i praktykami.

Wspólnym celem wszystkich wskaźników stresu cieplnego jest zatem określenie reakcji fizjologicznych pracownika i innych reakcji na stres termiczny, na przykład takich, jak obciążenie psychiczne, w celu umożliwienia oceny, przewidywania oraz kontroli warunków pracy. Na skutek różnic w ocenie poszczególnych parametrów termicznych warunków pracy, powszechnie stosowane wskaźniki zwykle różnią się nieco w ocenie danego środowiska. Ocenę bezpieczeństwa pracowników w gorącym otoczeniu w wyrobiskach kopalnianych prowadzi się na podstawie:

- pojedynczych pomiarów określonych parametrów powietrza,
- pomiarów parametrów otoczenia, przede wszystkim temperatury i prędkości, a następnie wyznaczenia wartości wskaźnika uznanego za miarę obciążenia cieplnego,
- racjonalnych indeksów, wynikających z bilansu cieplnego pracownika.

Pomiary sprawdzające są konieczne, gdyż liczba sytuacji z termicznymi problemami na stanowisku pracy pozostaje wysoka. Szczegółowe i systematyczne studiowanie każdego przypadku byłoby niepraktyczne i bezużyteczne, a środki zapobiegawcze dla większości przypadków można łatwo znaleźć na podstawie prostych i jednoznacznych obserwacji. W związku z tym na stanowiskach pracy prowadzi się pomiary rutynowe (pomiary ruchowe), których zadaniem jest przybliżone oszacowanie zdolności otoczenia do odbioru ciepła

z ciała pracownika. W tym celu wykonuje się pomiar wielkości, które pozwalają wyznaczyć wartość parametru lub określonego wskaźnika, charakteryzującego obciążenie cieplne. Wskaźnik taki powinien być określony na podstawie jednego lub paru prostych pomiarów i nieskomplikowanych obliczeń, względnie wykorzystania tablicy lub rysunku. Pojedyncze pomiary wielkości środowiskowej mogą być traktowane jako względny wskaźnik charakteryzujący warunki pracy.

Przy ocenie przydatności wskaźników należy zauważyć, że żaden psychrometryczny parametr nie może sam zapewnić oszacowania reakcji fizjologicznych pracownika. Wielkością, która służy do względnej oceny jest temperatura powietrza na termometrze wilgotnym. Inną wielkością, która ma istotny wpływ na intensywność wymiany ciepła między ciałem pracownika a otoczeniem, jest prędkość przepływu powietrza v_a . Jednak wielkość ta nie może być traktowana jako parametr samodzielny i do oceny mikroklimatu wykorzystywana jest łącznie z temperaturą na termometrze wilgotnym. Temperatura powietrza na termometrze suchym t_a ma ograniczoną rolę przy charakteryzowaniu cieplnych warunków pracy, a jej górna wartość jest przyjmowana na różnej wysokości. Po przekroczeniu przez $t_a = 34\div 35^\circ\text{C}$ zachodzi konwekcyjne i na ogół radiacyjne nagrzewanie ciała przez otoczenie, a także ma miejsce pewien dyskomfort przy oddychaniu, a powyżej $t_a = 45^\circ\text{C}$ odsłonięta część skóry człowieka narażona jest na działanie gorącego powietrza. Najwyższe wartości ograniczające wartość t_a przyjęto w górnictwie Australii ($t_a = 44^\circ\text{C}$) oraz w górnictwie solnym Niemiec ($t_a = 52^\circ\text{C}$), gdzie wielkość tę łączy się z nie wyższą od $t_m = 27^\circ\text{C}$ temperaturą na termometrze wilgotnym.

Nawet w podobnych parametrach środowiskowych, wydatkach energetycznych i zestawach odzieży roboczej, poszczególne wskaźniki obciążenia cieplnego mogą wykazywać znaczne różnice w akceptacji środowiska (Brake, Bates [1]). Przyczynami takiego stanu są różnice w zakresie założeń i wartości liczbowych stosowanych w odniesieniu do odzieży i reakcji fizjologicznych. Należy również pamiętać, że większość badań nad stresem cieplnym była prowadzona w środowisku pracowników młodych, zdrowych i zaaklimatyzowanych. W praktyce istnieją znaczne różnice w zakresie wieku, zdrowia i innych cech osób zatrudnionych w danym miejscu pracy. Z tej przyczyny uznano, że wstępne badania przesiewowe i testy tolerancji ciepła są wskazane dla tych nowo przyjętych i powracających do pracy, którzy będą pracować w wysokiej temperaturze.

Sformułowanie „trudne warunki klimatyczne” lub „problemy cieplne” na stanowiskach pracy wymaga, choćby ogólnikowego, objaśnienia. Wstępnie można przyjąć, że przekroczenie temperatury na termometrze suchym $t_a = 32^\circ\text{C}$ lub na termometrze wilgotnym $t_m = 28^\circ\text{C}$ w miejscu, gdzie przebywają pracownicy przez dużą część dniówki, wystarcza do podjęcia działań w celu poprawy warunków klimatycznych.

W związku z coraz trudniejszymi warunkami pracy w polskich kopalniach węgla i rud miedzi konieczna jest dyskusja nad podejściem do oceny stanu zagrożenia obciążenia termicznego górników. Z jednej strony chodzi o efektywne pomiary kontrolne w wyrobiskach kopalnianych, z drugiej o podejmowanie działań, które likwidują lub ograniczają problemy termiczne w rejonie miejsc pracy. Tak postawionemu zagadnieniu poświęcona jest omówiona wyżej norma PN-EN ISO 15 265 (2005) [33] oraz prace zespołu działającego pod hasłem BIOMED. Wymienione dokumenty są ogólne i odnoszą się w podobnym stopniu do wyrobisk kopalń podziemnych, jak do innych gorących miejsc pracy, w których pracownicy podejmują swój trud. Autorzy publikacji, o której mowa, należą do głównych twórców dokumentu ISO 7933 (2004) [30] Hot environments – analytical determination and

interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rates (Środowisko gorące – analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczenia wymaganego strumienia potu) i uznają tę normę za narzędzie badawczo-interpretacyjne służb zajmujących się wentylacją i klimatyzacją oraz bezpieczeństwem i higieną pracy. Biorąc pod uwagę, że dokument ten stanowi najbardziej wszechstronne i pogłębione ujęcie zagadnień reakcji osoby (pracownika) w otoczeniu gorącym, zespół Głównego Instytutu Górnictwa przedstawia propozycje uwzględnienia w działaniu służb wentylacyjnych kopalń metodyki badania i interpretacji warunków klimatycznych, opartej na modelu fizjologicznym, opracowanej na podstawie PN-EN ISO 7933 (2005) [30].

Na ogół rozwiązania organizacyjne przyjęte w kopalniach, w których istnieje zagrożenie cieplne, stanowią swoisty przykład realizacji takiej metodyki, jaką zaproponowali realizatorzy programu BIOMED i jaką sugeruje dokument PN-EN ISO 16 265. Z lektury publikacji i normy wynika, że działanie na rzecz poprawy warunków pracy ma charakter akcyjny. Stanowi to zasadniczą różnicę, która wynika z natury i charakteru działalności górniczej. Ciągłe zmieniają się warunki pracy i analiza zagrożenia cieplnego należy do systematycznych działań kopalnianych. W kopalniach z problemami cieplnymi i z dużymi układami klimatyzacji nie udaje się podejmować racjonalnych bieżących decyzji w kwestiach wentylacyjnych i cieplnych warunków pracy bez jednoczesnych pomiarów kontrolnych sprawdzających bieżący stan oraz ciągłych analiz stanu zagrożenia i poszukiwania rozwiązań.

3.1. Pomiary kontrolne

Powstaje pytanie, jakie metody mogą być wykorzystane do pomiaru kontrolnego. Głównym celem higieny pracy nie jest analiza i interpretacja ryzyka dla własnego dobra, lecz zapobieganie. Dlatego też metody pomiarowe muszą być wykorzystywane przede wszystkim w celu wybrania informacji niezbędnych do identyfikacji zagrożenia i znalezienia rozwiązania. Zatem należy poszukiwać takich wskaźników, które oprócz względnej kontroli obciążenia termicznego dostarczają informacje rzeczywiście potrzebne do identyfikacji stanu zagrożenia termicznego. Jeśli informacje zebrane w pomiarach kontrolnych nie uzupełniają wiedzy o termicznych warunkach pracy, należy z nich rezygnować i szukać lepszego rozwiązania.

3.1.1. Temperatura powietrza na termometrze wilgotnym

Jak wspomniano pojedynczy parametr psychrometryczny nie jest sam w sobie wiarygodnym wskaźnikiem reakcji fizjologicznej. Jednak w gorących i wilgotnych środowiskach, w których dominującym sposobem odprowadzenia ciepła z organizmu pracownika jest parowanie potu, temperatura powietrza na termometrze mokrym stanowi najsilniejszy czynnik wpływający na chłodzenie ciała przez otoczenie. Na tej podstawie niektóre kopalnie zachowały temperaturę termometru mokrego jako jedyny wskaźnik akceptacji warunków termicznych w wyrobisku. Pomierzona psychrometrem temperatura termometru wilgotnego od 27 do 28°C może być stosowana jako kryterium, powyżej którego czas pracy lub godziny przesunięcia (do pracy w lepszych warunkach) powinny być obniżone. Jednocześnie temperatura powietrza na termometrze wilgotnym 32°C została uznana jako górna granica akceptowalności w bardzo gorących kopalniach, gdyż wtedy różnica prężności pary wodnej przy zwilżonej potem skórze ciała i w strumieniu przepływającego powietrza jest już niewielka i zbyt mała do odprowadzenia ciepła nawet przy umiarkowanym wydatku energetycznym.

3.1.2. Wskaźnik *WBGT*

Początkowo w Stanach Zjednoczonych, a następnie w wielu krajach szerokie zastosowanie znalazł wskaźnik *WBGT* (*Wet Bulb Globe Temperature*), wprowadzony przez Yaglou i Minarda w 1957 r. [29], opisany w normie ISO 7243 i jej polskim odpowiedniku PN-EN ISO 27 243 [32]. Wskaźnik ten oparty jest na pomiarze temperatury poczerzonego termometru kulistego t_g oraz temperatury wilgotnej t_{mn} określonej za pomocą termometru wilgotnego bez podmuchu (psychrometru Augusta). Dla pomieszczeń zamkniętych wskaźnik *WBGT* oblicza się ze wzoru

$$WBGT = 0,7t_{mn} + 0,3t_g, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

gdzie:

- t_{mn} – temperatura wilgotna naturalna, czyli temperatura na termometrze wilgotnym bez wymuszonego przepływu powietrza, $^\circ\text{C}$;
- t_g – temperatura poczerzonej kuli, $^\circ\text{C}$.

Tablica 1. Wartości odniesienia wskaźnika obciążenia termicznego *WBGT*

Table 1. Basic sizes of *WBGT* thermal index

Poziom wysiłku	Tempo metabolizmu	Osoba zaklimatyzowana	Osoba niezaklimatyzowana
Odpozynek	$M < 65$	33	32
Lekki	$65 < M < 130$	30	29
Umiarkowany	$130 < M < 200$	28	26
Ciężki	$200 < M < 260$	25 (26)*	22 (23)*
Bardzo ciężki	$M > 260$	23 (25)*	18 (20)*

Wartości oznaczone gwiazdką odpowiadają warunkom z odczuwalnym przepływem powietrza.

Od 1972 r. na podstawie sugestii amerykańskiego Narodowego Instytutu Bezpieczeństwa Pracy i Zdrowia (National Institute of Occupational Safety and Health) stosowano *WBGT* jako wskaźnik charakteryzujący obciążenie cieplne środowiska. Fizjolodzy uważają, że zachowanie wymagań podanych w tej normie zabezpiecza przed osiągnięciem przez wnętrze ciała temperatury $38\text{ }^\circ\text{C}$. Jednak nie chroni przed naruszeniem innych fizjologicznych kryteriów, takich jak ilość wydzielonego potu czy liczba skurczów serca. Niekiedy zwraca się także uwagę, że wskaźnik *WBGT* jest kompromisem między dążeniem do stosowania dość dokładnego wskaźnika a prostotą pomiaru potrzebnych do jego określenia parametrów w środowisku przemysłowym (tabl. 1).

3.1.3. Wskaźnik dyskomfortu Jana Drendy

Fanger [5] opracował równanie komfortu cieplnego, którego spełnienie jest warunkiem zadowalającego komfortu w miejscu pracy. Równanie to opiera się na bilansie cieplnym ciała człowieka. Parametrami zmiennymi są wartości argumentów mikroklimatu powietrza, wydatek energetyczny oraz opór cieplny odzieży. Wyniki tych badań posłużyły do opracowania nomogramów dla wydatków energetycznych odpowiadających pracy lekkiej, o wysiłku umiarkowanym oraz pracy ciężkiej, przedstawionych w podręczniku Fangera [5]. Obszar pomiędzy linią komfortu Fangera i linią amerykańskiej temperatury efektywnej $ATE = 28\text{ }^\circ\text{C}$ został nazwany przez Drendę [4] obszarem bezpiecznego dyskomfortu cieplnego. Na linii komfortu Fangera wskaźnik dyskomfortu jest równy $\delta = 0$, a na linii $ATE = 28\text{ }^\circ\text{C}$ wskaźnik ten $\delta = 1$. Powierzchnia obejmująca dyskomfort bezpieczny została podzielona w sposób liniowo proporcjonalny na 4 podobzary odpowiadające

korzystnym ($\delta \in (0-0.2)$), zadowalającym ($\delta \in (0.2-0.5)$), trudnym ($\delta \in (0.5-0.8)$) i bardzo trudnym $\delta \in (0.8-1.0)$ warunkom klimatycznym. W stanach mikroklimatu, gdy $\delta \geq 1$ praca powinna być zabroniona. Wydaje się, że pomiar kontrolny może opierać się na jednej z podanych wielkości. Pomiar temperatury powietrza na termometrze wilgotnym trwa najkrócej, pomiary *WBGT* i wskaźnika dyskomfortu znacznie dłużej.

2.2. Wskaźniki racjonalne

Wskaźnikami racjonalnymi nazywał McPherson [17] miary parametrów fizjologicznych, których wartości ustalają się jako reakcja na obciążenie cieplne pracownika w danych warunkach termicznych. Metodyka wyznaczenia wielkości fizjologicznych w tym przypadku opiera się na bilansie cieplnym organizmu. W pierwszych pracach bilansujących składniki energii wymieniane między organizmem pracownika a otoczeniem przyjmowano, że w krótkim czasie po podjęciu wysiłku ustala się stan stacjonarny tej wymiany. Należy tu wymienić metody opracowane w górnictwie rud złota Południowej Afryki, dotyczące zdolności otoczenia do odbioru ciepła z ciała człowieka, a także pierwszą wersję normy ISO 7933 [30]. W pracach początkowych w bilansie ciepła organizmu pracownika przyjmowano, że średnia temperatura powierzchni jego skóry ciała jest znana i wynosi $\bar{t}_{sk} = 35$ lub $36\text{ }^\circ\text{C}$. Przy takim założeniu wyznaczano straty ciepła organizmu przy określonych parametrach otoczenia. Przyjmowano, że przy umiarkowanych wartościach parametrów fizjologicznych, warunki klimatyczne są zadowalające, jeśli spełniona jest podana niżej nierówność, w której pomijano, jako małe, składniki związane z oddychaniem

$$M \geq E + C + R \quad (2)$$

Modele numeryczne wymiany ciepła i termoregulacji, wielokrotnie i dość szczegółowo przedstawiane w środowisku górniczym mogą być stosowane do studiów szczegółowych w charakterze badawczo-interpretacyjnym, w odniesieniu do pracowników na istniejących lub wirtualnych stanowiskach pracy [7, 11, 12, 13, 22, 23]. Ustanowienie takiego modelu w biurze głównego inżyniera wentylacji pozwala na częste analizy i umożliwi wykonywanie rutynowych badań z dnia na dzień. W celu wykonania szybkiej oceny lub prognozy zdolności chłodniczej otoczenia dla danego miejsca pracy mogą znaleźć zastosowanie obliczone na podstawie modelu wykresy lub tabele.

3.2.1. Dokument PN-EN ISO 7933 [30]

Badania dotyczące cieplnych warunków pracy przy wysokiej temperaturze i wilgotności powietrza prowadzone w międzynarodowych i europejskich komitetach standaryzacji oparte są na wynikach dużej liczby doświadczeń fizjologicznych prowadzonych w różnych środowiskach. Uwzględniają one doświadczenia specjalistów w zakresie fizjologii, ergonomii, higieny oraz bezpieczeństwa pracy. Znajduje w nich zastosowanie teoria wymiany ciepła między ustrojem człowieka a otoczeniem. Modelowanie numeryczne wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem, prowadzone metodami opracowanymi przez fizjologów, w szczególności podanymi w kolejnych wersjach normy ISO 7933, stwarza obecnie możliwość najbardziej wszechstronnej oceny stanu obciążenia termicznego pracownika w danych warunkach.

Bilans cieplny sporządzony dla sytuacji panującej na stanowisku pracy, według metody podanej w dokumencie PN-EN ISO 7933 [31] „Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczenia obciążenia ter-

micznego” uwzględnia parametry mikroklimatu środowiska, wydatek energetyczny, ubiór pracownika oraz wielkości fizjologiczne. W górnictwie opracowano i stosowano od dawna podobne metody bilansu cieplnego pracownika (Malchaire [16], Parsons [19], Wyndham [28], Stewart, Whillier [21], McPherson [17], Brake [1], Smolander [20]). Bilans cieplny organizmu pozwala wyznaczyć obciążenie cieplne osoby przebywającej i pracującej w środowisku gorącym. Metodyka pozwala wyznaczyć ciepło odprowadzane od ciała pracownika do otoczenia drogą odparowania potu E , konwekcji C , promieniowania R oraz podczas oddychania mechanizmami konwekcji i parowania $C_{res} + E_{res}$.

Wcześniej metody bilansu cieplnego organizmu pracownika opracowano przy założeniu zrównania strat i zysków ciepła, gdy proces wymiany ciepła jest stacjonarny. Jednak na skutek zmian parametrów otoczenia i obciążenia cieplnego w czasie proces wymiany ciepła między organizmem pracownika a otoczeniem jest niestacjonarny. Do zmiennych w czasie parametrów fizjologicznych należą temperatura wewnętrzna ciała (oraz w rectum), strumień wydzielanego potu, temperatura skóry ciała oraz wielkości pochodne. W szczególności proces niestabilnej wymiany ciepła następuje po rozpoczęciu pracy o określonym wydatku energetycznym w miejscu, do którego pracownik przybywa. Gdy parametry otoczenia oraz wydatek energetyczny są w czasie stałe, to niestabilny proces po podjęciu pracy ma charakter procesu przejściowego, czyli w miarę regularne przejścia od jednego stanu równowagi do drugiego. W modelu przyjętym w dokumencie PN-EN ISO 7933 [31], w zasadzie opisującym proces przejściowy po podjęciu pracy, trzy parametry fizjologiczne: temperaturę wewnętrzną ciała t_{cr} , średnią temperaturę powierzchni skóry t_{sk} oraz gęstość strumienia wydzielanego potu S_w aproksymuje się za pomocą funkcji wykładniczych, opisujących zachowanie liniowych układów dynamicznych pierwszego rodzaju. Empirycznie ustalone stałe czasowe procesów przejściowych dla temperatury wewnętrznej t_{cr} i gęstości strumienia potu S_w wynoszą 10 minut, a dla temperatury skóry ciała t_{sk} 3 min.

Do oceny obciążenia termicznego w charakterze syntetycznych wskaźników wykorzystuje się przede wszystkim temperaturę wewnętrzną ciała (w rectum) oraz odwodnienie organizmu. Zgodnie z dokumentem PN-EN ISO 7933 [31] temperatura w rectum nie powinna być wyższa od 38°C. Jednak przekroczenia tej wartości można pogrupować na spełniające nierówność $38 < t_{re} < 39$ oraz na te, które przekraczają $t_{re} \geq 39$ °C. Bezpieczna utrata wody organizmu spowodowana wydzielaniem i parowaniem potu pracowników zaaklimatyzowanych o dobrym zdrowiu i sprawnym układzie termoregulacji wynosi 7,5 % masy ciała w przypadku stałego dostępu do wody. Gdy pracownik jest dopuszczony do pracy, lecz jego reakcja na intensywne wydzielanie i parowanie potu nie jest znana, bezpieczne odwodnienie wynosi 5 % masy ciała, pod warunkiem dostępu do wody. Ocenę obciążenia termicznego na stanowisku pracy przedstawiają cztery wielkości: (1) temperatura wewnętrzna ciała, jaka ustaliłaby się po 480 minucie pracy, (2) czas pracy, po którym temperatura w rectum przyjmie $t_{re} = 38$ °C, (3) czas pracy, po którym ubytki wody wyniosą 7,5 % masy ciała oraz (4) czas pracy, po którym strata wody wyniesie 5 % masy ciała. Pomocniczą rolę interpretacyjną może spełnić analiza parametrów fizycznych i fizjologicznych związanych z odparowaniem potu.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że nie można przebywać w mikroklimacie z temperaturą na termometrze wilgotnym wyższą od 32 °C. Czas pracy powinien być skrócony po przekroczeniu na termometrze wilgotnym 28, 29 °C, w przypadku pracy lekkiej lub umiarkowanej, oraz 27, 28 °C przy pracy ciężkiej. Pozostaje do ustalenia, rodzaj i opór cieplny ubrania pracownika. Równowaga cieplna organizmu

w ubraniu o mniejszej oporności cieplnej i wyższej przepuszczalności zestawu ubraniowego pracownika ustala się przy niższej temperaturze wewnętrznej jego ciała.

Przyjęta metoda modelowania numerycznego parametrów fizycznych i fizjologicznych okazała się dogodnym narzędziem oceny mechanizmów wymiany ciepła między pracownikiem a jego otoczeniem. Wprowadzane dane na ogół mieściły się w zalecanym w dokumencie PN-EN ISO 7933 [31] zakresie zmian parametrów. Przekroczenia podanego zakresu mogą dotyczyć prędkości przepływu powietrza $v_a > 3$ m/s lub skrajnie wysokiej prężności pary wodnej.

Podany wyżej program oceny warunków pracy w otoczeniu gorącym powinien być poddany analizie pod kątem poprawy procesu numerycznego, w celu ograniczenia występujących w obliczeniach nieregularności.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy uznać, że interpretacyjne analizy warunków klimatycznych w wyrobiskach kopalnianych powinny być prowadzone metodyką opartą na bilansie cieplnym organizmu pracownika, podaną w PN-EN ISO 7933 [31]. Autorzy opracowania Głównego Instytutu Górnictwa [34] dostosowali tę metodykę do badania procesów ustalonych wymiany ciepła między organizmem pracownika a otoczeniem, wprowadzili ostatnie wyniki badań oporności cieplnej i innych właściwości zestawów odzieżowych, a także podjęli obliczenia bilansu cieplnego przy zmieniających się skokowo warunkach środowiska i wydatkach, co symuluje przejście z jednego otoczenia do drugiego lub nagłą zmianę warunków na stanowisku pracy.

3.2.2. Zdolność chłodnicza otoczenia (ACPA – Specific Cooling Power, A scale)

Wskaźnik zwany zdolnością chłodniczą otoczenia został opracowany w górnictwie ośrodku badawczym Republiki Południowej Afryki (Chamber of Mines Research Organization of South Africa). Powstawanie koncepcji wskaźnika można prześledzić w publikacjach Mitchella i Whilliera [18], Wyndhama [28], Stewarta i Whilliera [21], Stewarta [22, 23]. Niezależnie od teoretycznej koncepcji w wymienionym ośrodku prowadzono dużą liczbę badań empirycznych, a współczynniki wymiany ciepła między ciałem górnika i otoczeniem wyznaczano na przepływowym stanowisku laboratoryjnym. Obliczenia prowadzono dla ciśnienia barometrycznego $p = 100$ kPa i dla temperatur na termometrze wilgotnym t_m od 25 do 35 °C. Rozpatrywano szczególne warunki, odpowiadające stanowi w RPA: pracownicy bez ubrania, o całej powierzchni skóry ciała pokrytej potem.

W górnictwie złota Republiki Południowej Afryki uznano, że przebywanie i praca w skrajnie niekorzystnych warunkach klimatycznych nie powinny stwarzać zagrożenia udarem cieplnym. W obliczeniach przyjęto, że temperatura promieniowania t_r jest równa temperaturze powietrza na termometrze suchym t_a , zaś temperatura powietrza na termometrze wilgotnym t_m o dwa stopnie niższa

$$t_r = t_a = t_m + 2, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

a ciśnienie powietrza wynosi $p = 10^5$ Pa. Zdolność chłodnicza CP (Cooling Power) środowiska, rozumiana jest jako strumień cieplny odprowadzony z organizmu człowieka do otoczenia drogą konwekcji, promieniowania i parowania potu [26]

$$CP = h_c(t_{sk} - t_a) + f_r h_r(t_{sk} - t_r) + \frac{c_1 h_c}{p_a} (e_{sk} - e), \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

gdzie:

- h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, W/(m²·K);
- h_r – współczynnik wymiany ciepła drogą promieniowania, W/(m²·K);

- t_r – temperatura promieniowania, °C;
 f_r – współczynnik uwzględniający posturę pracownika względem źródła promieniowania, bez wym.,
 c_1 – współczynnik wymiany ciepła drogą odparowania potu, °C,
 p_a – ciśnienie barometryczne, kPa;
 e_{sk} – prężność pary wodnej w powietrzu, w temperaturze powierzchni zwilżonej skóry, kPa;
 e – prężność pary wodnej w głównym strumieniu powietrza, kPa.

Pierwszy składnik prawej strony (4) podaje gęstość strumienia ciepła wymienionego drogą konwekcji, drugi poprzez promieniowanie, a trzeci w wyniku parowania potu. Stałe występujące we wzorze (4) różnią się nieco od podanych w pracach McPhersona [17] czy dokumentu PN-EN ISO 7933 [31]. Obliczenia były prowadzone dla następujących wartości średniej temperatury skóry ciała: 35, 36 °C.

Przy korzystaniu z pojęcia zdolności chłodniczej środowiska CP w kopalniach rud złota w RPA przyjęto następującą interpretację:

- niebezpieczeństwo wynikające z przegrzania organizmu istnieje wtedy, gdy wydatek energetyczny zaaklimatyzowanego górnika M przewyższa zdolność chłodniczą otoczenia CP ,
- gdy wydatek energetyczny M zrównuje się ze zdolnością chłodniczą otoczenia CP , istnieje pewna, chociaż bardzo mała, szansa przekroczenia bezpiecznych parametrów fizjologicznych ciała,
- jeśli zdolność chłodnicza środowiska CP przekracza ciepło przemian metabolicznych M , to istnieje możliwość osiągnięcia ustalenia równowagi cieplnej organizmu na poziomie niestwarzającym stanu niebezpiecznego.

Wybór wartości zdolności chłodniczej środowiska podaje tablica 2. Przy obowiązującej w górnictwie rud złota RPA tabeli zdolności chłodniczej środowiska wypisane jest stwierdzenie: jeśli zdolność chłodnicza otoczenia CP jest równa wydatkowi energetycznemu, to prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury rektalnej $t_{re} = 40^\circ\text{C}$ wynosi jedną milionową.

Ocena obciążenia cieplnego polega na wyliczeniu gęstości strumienia ciepła, które może być odebrane od organizmu pracownika przez otoczenie o zadanych parametrach.

Tablica 2. Wybór wartości zdolności chłodniczej otoczenia CP opracowanej w górnictwie rud złota RPA, W/m²

Table 2. Selection of values of cooling power of surroundings CP developed in mining of gold ore in RPA, W/m²

tm/v	0,2 m/s	0,3	0,5	1,0	1,5	2	3	5
27 oC	351	378	424	510	572	621	696	752
26	325	348	390	473	531	577	647	699
27	299	322	361	435	489	531	596	643
28	271	293	329	396	445	484	542	586
29	243	262	295	355	399	434	487	526
30	214	231	259	313	352	383	430	464
31	183	198	223	269	303	329	370	400
32	151	164	184	223	252	282	308	333

3.2.3. Zdolność chłodnicza otoczenia (ACPM – Air Cooling Power, M scale)

Autorem wskaźnika ACPM jest McPherson [17]. Obliczenia zdolności chłodniczej otoczenia oparte są na fizjologicznym bilansie ciepła sporządzonym dla organizmu osoby, gdy przepływ ciepła jest ustalony. Wtedy zyski i straty ciepła równoważą się i akumulacja ciepła w organizmie nie występuje. Przyjęto ciśnienie barometryczne powietrza $p = 100$ kPa, temperaturę promieniowania równą temperaturze na termometrze suchym $t_r = t_a$ i niższą o 5 °C temperaturę na termometrze wilgotnym

$$t_a = t_r = t_m + 5, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Jako kryterium akceptowalnych medycznie parametrów fizjologicznych organizmu przyjęto pomijalnie małe zagrożenie wyższą od 40 °C temperaturą wewnętrzną ciała. Warunek ten został wyrażony poprzez średnią równowagową temperaturę skóry ciała \hat{t}_{sk} , przypisaną stanowi zrównania strat z zyskami ciepła. Ustalono, że wielkość graniczna \hat{t}_{sk} zależy od wydatku energetycznego M i zależność tę podano w sposób wykresowy: $\hat{t}_{sk} = \hat{t}_{sk}(M)$. Na przykład w przypadku przemiany metabolicznej $\dot{M} = 100$ W/m² graniczna wartość średniej temperatury skóry człowieka wynosi $\hat{t}_{sk} = 35,8$ °C, dla $M = 150$ W/m², wartość $\hat{t}_{sk} = 35,4$ °C, dla $M = 200$ W/m² $\hat{t}_{sk} = 34,85$ °C, a dla $M = 300$

Tablica 3. Zasady ochrony górników w gorącym otoczeniu w Australii

Table 3. Principles of protection of miners in the hot surroundings in Austria

Warunki klimatyczne	Określenie charakteru działań w miejscu pracy	Zasady interwencji
$TWL < 115$ $t_a > 44$ $t_m > 32$	Opuścić miejsce pracy, wycofać załogę z miejsc pracy	<ul style="list-style-type: none"> – normalna praca jest zabroniona, – dozwolona praca prowadzona w celu poprawy bezpieczeństwa i warunków klimatycznych, – zgody na pracę udziela kierownik ruchu zakładu przed jej podjęciem, – test dehydratacji na końcu zmiany, – każdy pracownik obowiązany jest posiadać osobisty 4-litrowy pojemnik, wypełniony wodą pitną
$115 < TWL < 140$	Szczególna ostrożność	<ul style="list-style-type: none"> – poprawa przewietrzania, – nie można organizować pojedynczych stanowisk pracy, – osoby niezaaklimatyzowane nie powinny być zatrudnione, – jeśli praca ma być kontynuowana, plan niezbędnych korekt w celu poprawy warunków powinien być przyjęty przez kierownika ruchu zakładu w okresie 48 godzin, – należy zapewnić prędkość przepływu powietrza co najmniej 0,5 m/s, – test dehydratacji na końcu zmiany, – każdy pracownik obowiązany jest posiadać osobisty 4-litrowy pojemnik, wypełniony wodą pitną
$140 < TWL < 220$	Aklimatyzacja	<ul style="list-style-type: none"> – osoby aklimatyzowane mogą pracować, lecz nie na pojedynczych (izolowanych) stanowiskach pracy, – każdy pracownik obowiązany jest posiadać osobisty 4-litrowy pojemnik, wypełniony wodą pitną
$TWL > 220$	Bez ograniczeń	<ul style="list-style-type: none"> – stres cieplny nie ogranicza warunków pracy

$W/m^2 \hat{t}_{sk} = 33,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. W programie numerycznym służącym modelowaniu wymiany ciepła między ciałem pracownika a otoczeniem korzysta się z równania linii poprowadzonej przez podane cztery punkty $\hat{t}_{sk} = \hat{t}_{sk}(M)$

$$t_{sk} = 35,85 + 0,006M - 7,5 \times 10^{-5}M^2 + 10^{-7}M^3 \quad (6)$$

W metodzie ACPM średnia równowagowa temperatura skóry ciała spełnia jednocześnie rolę wielkości obliczeniowej oraz kryterium zagrożenia. Związek między wydzielanym w organizmie ciepłem M , parametrami otoczenia, a fizjologiczną odpowiedzią organizmu w postaci wartości średniej równowagowej temperatury skóry ciała t_{sk} przedstawiono graficznie, w celu wykorzystania do analizy wyników przy pomiarach rutynowych.

3.2.4. Australijska ciepła granica pracy (TWL)

Zdolność chłodnicza przyjęta w Australii nosi nazwę ciepłej granicy pracy (Thermal work limit – TWL), określonej jako maksymalny wydatek energetyczny M , który w danym otoczeniu może być w sposób ciągły odbierany od aklimatyzowanej osoby, a nie zostanie przekroczona temperatura wewnętrzna $t_{cr} = 38,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ani strumień potu $1,2 \text{ kg/h}$.

Opracowany przez Brake'a [1] sposób obliczania wartości TWL oparty jest na bilansie cieplnym ustroju pracownika, sporządzonym dla ustalonego stanu wymiany ciepła z otoczeniem. Podstawę stanowią wyniki badań Wyndhama [29] oraz Stewarta [23]. Wyrażenia opisujące konwekcję, promieniowanie cieplne i odparowanie potu zostały przyjęte na podstawie badań Stewarta [22], Mitchella i Whilliera [18]. Zasadnicze znaczenie ma zależność fizjologicznego przewodnictwa i strumienia potu od bodźca (sygnału) termoregulacyjnego oraz porównanie przewidywanego i obserwowanego odbioru ciepła drogą parowania potu z ciała nieokrytego ubraniem. Przy obliczaniu temperatury wewnętrznej ciała t_{cr} Brake [1] korzysta ze związku podanego przez Stewarta [22], wyrażającego równość strat ciepła z powierzchni skóry ze stratami ciepła z wnętrza organizmu, proporcjonalnych do różnicy temperatur $(t_{cr} - t_{sk})$. Współczynnikiem proporcjonalności jest fizjologiczne przewodnictwo ciepła. Wpływ oporu cieplnego i przepuszczalności wilgoci materiału ubrania roboczego na wymianę ciepła drogą konwekcji, promieniowania i parowania potu uwzględniono, wzorując się na opracowaniach ASHRAE. W tabelicy 3 przedstawiono zasady postępowania związane z zapewnieniem bezpieczeństwa cieplnego górników w australijskich kopalniach rud miedzi.

Australijskie graniczne wartości temperatury wewnętrznej ciała $t_{cr} = 38,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ i strumienia wydzielanego potu $S_w = 1,2 \text{ l/h}$ są wyższe od przyjętych w normach ISO i zalecanych przez WHO.

4. Uwagi różne

Szeroko stosowany wskaźnik WBGT w wielu opracowaniach traktowany jest jako użyteczny do umiarkowanej szybkiej kontroli. W charakterze metody analitycznej należy korzystać z dokumentu ISO 7933, który spełnia warunki oczekiwane od metody analitycznej i może służyć do interpretacji, warunków pracy z problemami termicznymi. W obecnym stanie poznania mechanizmów wymiany ciepła między organizmem pracownika a otoczeniem, prowadzenie analiz interpretacyjnych ze zwiększoną precyzją rzadko wymaga udziału osób o wysokich kompetencjach, aby doprowadzić do zadowalających wyników analiz. Wyrafinowane wskaźniki i techniki należy stosować wtedy, gdy są potrzebne. Obecnie istnieje w naszym państwie grono specjalistów w zakresie

wentylacji i klimatyzacji kopalń, które nie zna metody oceny cieplnych warunków pracy oparte na wskaźnikach fizjologicznych. Niektóre z tych osób mają nawet pewien wkład w badania i w rozwój metod numerycznych.

Oczekuje się, że w dużym przedsiębiorstwie, jaką jest kopalnia, wśród pracowników odpowiednich specjalistycznych służb dostępny będzie specjalista, który zainicjuje monitorowanie, badanie i interpretację każdego stanu świadczącego o istnieniu problemu termicznego, stwierdzonego w pomiarach kontrolnych lub oddolnie zgłoszonego. Przedstawiona w dokumencie ISO 15 265 strategia nie wyklucza tego, jednakże nie opiera się na takim założeniu. Uznaje za utopijną dostępność wykwalifikowanego specjalisty.

Metodyka numeryczna oparta na bilansie cieplnym organizmu może pełnić funkcje badawczo-interpretacyjne. Przy prowadzeniu analiz w odniesieniu do wyrobisk eksploatacyjnych o dużych gabarytach, takich jak ściany w kopalniach węgla czy pola eksploatacyjne w kopalniach rud konieczna jest „mapa warunków klimatycznych” w obrębie badanego wyrobiska. Mapa ta powinna odwzorowywać temperaturę na termometrze suchym, wilgotnym i prędkość przepływu powietrza. Na etapie projektowania wyrobiska mapę taką można stworzyć opracowując prognozę warunków klimatycznych. Obecnie stosowane metody prognoz na ogół nie wyznaczają temperatury powietrza na termometrze wilgotnym i wymagają odpowiedniego uzupełnienia. W przypadku wyrobiska istniejącego należy korzystać z wyników pomiarów.

Wskaźnik WBGT nie jest powszechnie uważany za właściwą miarę obciążenia cieplnego. W publikacji Malchaire, Gebhardta i Piette [14], z których pierwszy jest opiekunem naukowym zespołu BIOMED, można znaleźć stwierdzenie, że porównanie ISO 7933 ze wskaźnikiem WBGT, który jest używany lub nadużywany – w wielu sytuacjach pracy na całym świecie, jest uderzające. Jest mało prawdopodobne, żeby ten wskaźnik (to znaczy WBGT), trywialnie prosty, mógł być ważnym modelem zachowania fizjologicznego w gorącym klimacie, a powodem jego „sukcesu” jest ta prostota. Porównanie między WBGT (ISO 7243, 1989) i ISO 7933 jest często wykonywane w praktyce; jednak wskaźnik WBGT może być metodą badania sprawdzającego, a więc kontrolnego czy stan spełnia określone warunki, na przykład podane w przepisach. Natomiast metody numeryczne ISO 7933 są metodą analizy i interpretacji, gdy warunki pracy wnoszą termiczne problemy. Jako przykład uznają wymienieni autorzy „naturalną temperaturę mokrego termometru”, który mierzy hybrydę, będącą pod wpływem wszystkich parametrów klimatycznych (temperatury, wilgotności i prędkości powietrza oraz promieniowania), a zatem nie podaje wskazówki co zrobić, aby najefektywniej zmniejszyć zagrożenie stresem cieplnym. Wyciągają wniosek, że wskaźnik WBGT nie jest idealną metodą sprawdzającą. Wymaga bowiem zastosowania specyficznych przyrządów, jeden pomiar trwa co najmniej 30 min. Zaletą wskaźnika WBGT wydaje się być to, że nie wymaga on żadnych obliczeń, co stanowiło określony walor w czasach, gdy komputery były trudno dostępne.

Pracę niniejszą wykonano ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach tematu: „Modelowanie wymiany ciepła między organizmem górnika a otoczeniem jako podstawa oceny mikroklimatu w gorących wyrobiskach kopalń głębokich” (3396/B/T02/2011/40).

Literatura

1. A. Brake D.J., Bates G.P.: Deep Body Core Temperatures in Industrial Workers under Heat Thermal Stress, Journal of Occupational and Environmental Medicine, Vol. 44, No. 2, 2002 pp. 125÷135.

2. *Bresser G., Kampmann B.*: Fitneß und Wärmeverträglichkeit der Grubenwehrmitglieder, Glückauf 135, Nr 9, 1999 s. 604÷608.
3. Commission Self audit handbook for SME. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1995.
4. *Drenda J.*: Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy głębokich kopalń, ZN Pol. Śl., Górnictwo z. 213, Gliwice 1993.
5. *Fanger P.O.*: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974.
6. *Haslam, R.A. and Parsons, K.C.*: A comparison of models for predicting human response to hot and cold environments. Ergonomics 30, 1599÷1614 1987.
7. *Hoffmann B., Butz M., Coenen W., Waldeck D.*: Health and Safety at Work: System and Statistics, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften. Public Relations Department, Sankt Augustin, Germany 1996.
8. *Kampmann B., Kalkowsky B., Piekarski C.*: Untersuchung zur Beanspruchung von Bergleuten an heißen Betriebspunkten, Glückauf 137, Nr 5, 2001 s. 263÷268.
9. *Kampmann B., Kalkowsky B., Piekarski C.*: Zur Selbsteinteilung der Arbeitsschwere bei Bergleuten, insbesondere an Hitze Arbeitsplätzen, Glückauf-Forschungshefte 64, Nr 2, 2003 s. 40÷47.
10. *Kampmann B., Kalkowsky B.*: Untersuchung und Bewertung von Hitzewirkungen auf Bergleute im Steinkohlenbergbau. Final Report 1999.
11. *Kampmann B.*: Working paper GT2/13 of BIOMED project BMH4-CT96-0648 "Heat". Risk analyses for one colliery of Ruhrkohle AG in 1995.
12. *Malchaire J., Kampmann B., Gebhardt H., Mehnert P., Alfano G.*: The Predicted Heat Strain Index: Modifications brought to the required Sweat Rate index, Heat stress, Barcelona, 1999 pp. 45-50.
13. *Malchaire J.*: Evaluation and control of warm working conditions, Proceedings of the BIOMED "Heat Stress" Conference, Barcelona 1999, June 14÷15.
14. *Malchaire J., Gebhardt H.J., Piette A.*: Strategy for evaluation and prevention of risk due to work in thermal environment, The Annals of Occupational Hygiene, 43(5), 1999 pp. 367÷376.
15. *Malchaire J., Kampmann B., Havenith G., Mehnert P., Gebhardt H.J.*: Criteria for estimating acceptable exposure times in hot work environment, a review, International Archives of Occupational and Environmental Health, 73(4), 2000 pp. 215÷220.
16. *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. Vol. 45, No 2, 2001 pp. 123÷135.
17. *McPherson M.J.*: Physiological reaction to climatic conditions, Chapter in: Subsurface ventilation and environmental engineering, Chapman & Hall, London 1992.
18. *Mitchell D., Whillier A.*: Cooling power of underground environments, J.S.Afr.IMM, vol 72, October, 1971 pp. 93÷99.
19. *Parsons K.C.*: Human Thermal Environments, Taylor&Francis, London and New York 2003
20. *Smolander J., Ilmarinen R. and Korhonen O.*: An evaluation of heat stress indices (ISO 7243, ISO/DIS 7933) in the prediction of heat strain in unacclimated men. Int. Arch. Occup. Environ. Health 63, 1990 39÷41.
21. *Stewart J.M., Whillier A.*: A guide to the measurement and assessment of heat stress in gold mines, JMVentSocSA, 32, nr 9, 1979 s.169÷178.
22. *Stewart J.M.*: Fundamentals of human heat stress, Environment Engineering in S.A. Mines, The Mine Ventilation Society of South Africa 1982.
23. *Stewart J.M.*: Practical aspects of human heat stress, Environment Engineering in S.A. Mines, The Mine Ventilation Society of South Africa 1982.
24. *Waclawik J.*: Rola doświadczeń kopalnianych w poznawaniu reakcji fizjologicznych osób pracujących w gorącym otoczeniu, Problemy współczesnego górnictwa, GIG, Katowice, 2010 s. 413÷431.
25. *Waclawik J.*: Numerical Model of Heat Exchange between a Worker Body and Environment, Archives of Mining Sciences, vol. 55, issue 3, 2010 s. 573÷588.
26. *Waclawik J.*: Wentylacja kopalń, Wydaw. AGH, Kraków 2010.
27. *Webber R.C.W., Franz R.M., Marx W.M., Schutte P.C.*: A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining, The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, June, 2002 pp. 313÷322.
28. *Wyndham C.H.*: The Physiological and Psychological Effects of Heat, "The Ventilation of South Africa Gold Mines", The Mine Ventilation Society of South Africa, 1974 pp. 93÷137.
29. *Yaglou C.P., Minard C.D.*: Control of heat casualties at military training centres. A.M.A. Arch. Industr. Health, 16: 302–316, 1957.
30. ISO 7933 Ergonomics of the thermal environment – "Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain", 2004.
31. PN-EN ISO 7933 (2005): Hot environments—analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rates.
32. PN-EN ISO 27243 1989 Hot environments—estimation of the heat stress on working man based on the WBGT-index.
33. PN-EN ISO 16265 (2005): Ergonomics of the thermal environment – Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions.
34. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego nr 3396/B/T02/2011/40 pt.: „Modelowanie wymiany ciepła między organizmem górnika a otoczeniem jako podstawa oceny mikroklimatu w gorących wyrobiskach kopalń głębokich” GIG, Katowice 2013.