

prof. dr hab. inż. Piotr Furmański

dr inż. Piotr Łapka

Politechnika Warszawska

Badanie wpływu rodzaju ubioru na jego właściwości ochronne

Streszczenie

W artykule omówiono kryteria oceny właściwości ochronnych ubiorów strażackich oparte o przewidywany stopień oparzenia i wykorzystanie temperatury powierzchniowych warstw skóry. Przedstawiono metody oceny tych właściwości bazujące na pomiarach temperatury przeprowadzanych na manekinach i specjalnie zaprojektowanych stanowiskach pomiarowych wykorzystujących próbki ubiorów ochronnych. Szczególną uwagę zwrócono na metodę opartą o symulację numeryczną procesów wymiany ciepła i wilgoci w ubiorach ochronnych warstwach powietrznych oddzielających jego poszczególne warstwy oraz w skórze. Omówiono zalety i wady zarówno metod eksperymentalnych, jak i teoretycznej oceny właściwości ochronnych ubioru. Krótko streszczono rodzaje materiałów stosowanych na warstwy ubioru ochronnego i ich właściwości cieplne, radiacyjne i dyfuzyjne. Na podstawie symulacji numerycznej różnych sposobów wymiany ciepła w ubiorze ochronnym wykazano, że największą rolę odgrywa w niej przewodzenie ciepła i promieniowanie cieplne. Przeprowadzono symulacje numeryczne przepływu ciepła przez trzy ubiory ochronne wykonane z warstw różnych materiałów. Wykazano, że ubiory te różnią się, przy zadanym obciążeniu cieplnym, zarówno przewidywanym wzrostem temperatury przypowierzchniowych warstw skóry jak stopniem oparzenia. Zbadano również wpływ grubości szczelin powietrznych między warstwami ubioru oraz między wewnętrzną powierzchnią ubioru i skórą wykazując istotny wpływ tej ostatniej szczeliny na przewidywany stopień oparzenia.

Słowa kluczowe: ubranie ochronne, właściwości warstw, symulacja numeryczna, ocena cech ochronnych

Study on Influence of the Firefighter Clothing Structure on its Protective Performance

Abstract

Criteria for evaluation of protective properties of firefighters clothing were presented in the paper. They were based on a degree of predicted skin burns and determination of temperature of the skin surface layers. Methods of the skin temperature measurements using mannequins and specially designed experimental stands containing samples of the protective clothing were described. Special attention was directed toward numerical simulation of heat and moisture transfer across layers of the protective clothing as well as via the air spaces separating them and the human skin. Advantages and disadvantages of the experimental and theoretical methods were briefly discussed. Types of textiles used for the separate layers of the protective clothing together with their thermal radiative and diffusive properties were presented. Numerical simulations indicate that heat conduction and thermal radiation play the most important role in heat transfer across the protective clothing. The numerical simulations were also carried out for three kinds of the protective clothing made from layers of different textiles. It was shown that these clothing differ in the predicted skin temperature values and burn degree for the same thermal load applied. Effect of changing thickness of the air spaces between textile layers and the skin on the burn degree was also studied. It was proved that the latter air space exerts significant influence on the predicted burn degree.

Keywords: firefighters clothing, layers properties, numerical simulation, protective performance

1. WSTĘP

W wielu grupach zawodowych (np. strażaków, żołnierzy, pracowników przemysłu petrochemicznego) występują zagrożenia od zapłonu gazów, wybuchów, parowych eksplozji cieplnych, łuku elektrycznego itp. Zagrożenia termiczne związane z tymi zjawiskami mogą mieć duże natężenie przewyższające 100 kW/m^2 przy temperaturach sięgających 1000°C i charakteryzują się krótkim (rzędu sekund) czasem trwania. Podczas pracy przy gaszeniu

pożarów (w tym pożarów lasów) strażacy narażeni są na dłuższe oddziaływanie termiczne o niższym natężeniu ze względu na pracę w większej odległości od źródła zagrożenia. Zagrożenia termiczne mogą przyjmować zarówno charakter radiacyjny (promieniowania pochodzącego od płomienia) jak i konwekcyjny (oddziaływanie gorących gazów). Najczęściej występuje narażenie na długotrwałe oddziaływanie promieniowania o niskim poziomie natężenia. Strażacy pracujący w tych warunkach intensywnie się pocą, co prowadzi do gromadzenia się wilgoci w warstwach ubioru ochronnego. Ich ubiory mogą również ulegać zawilgoceniu od wody pochodzącej z węży strażackich. Obecność wilgoci w sposób istotny zmienia właściwości ubiorów ochronnych. Wilgotny ubiór przenosi większe strumienie ciepła niż suchy przyczyniając się do występowania oparzeń skóry. Również gorąca para powstała z odparowania wilgoci zawartej w porach ubioru strażackiego może przyczyniać się do tych oparzeń. Badania doświadczalne wykazały, że przy wysokich obciążeniach od promieniowania ciepłego tkaniny ubioru pozostające w kontakcie ze skórą mogą wytrzymać nie więcej niż kilka sekund obciążenia ciepłego, zanim ulegną zniszczeniu poprzez procesy rozkładu termicznego lub reakcji chemicznych. Większość oparzeń strażaków powstaje jednak przy niskich lub średnich radiacyjnych obciążeniach ciepłych zanim ubiór ochronny ulegnie termicznej degradacji.

Ubiory ochronne są wielowarstwowe, a na warstwy stosowane są materiały spełniające określone funkcje, np. izolacji termicznej czy bariery przeciw wilgotnościowej. Na warstwy ubioru ochronnego proponowane są przez producentów różne materiały spełniające wspomniane funkcje. Materiały te różnią się jednak innymi właściwościami stąd potrzeba sprawdzenia jak dobór warstw różnych tkanin może wpływać na ich cechy ochronne. W pracy do oceny cech ochronnych ubioru strażackiego zastosowano symulacje numeryczne oparte o modele matematyczne opisujące zjawiska towarzyszące przepływowi ciepła i wilgoci w ubiorze oraz opisujące zjawiska termiczne w przypowierzchniowych warstwach skóry.

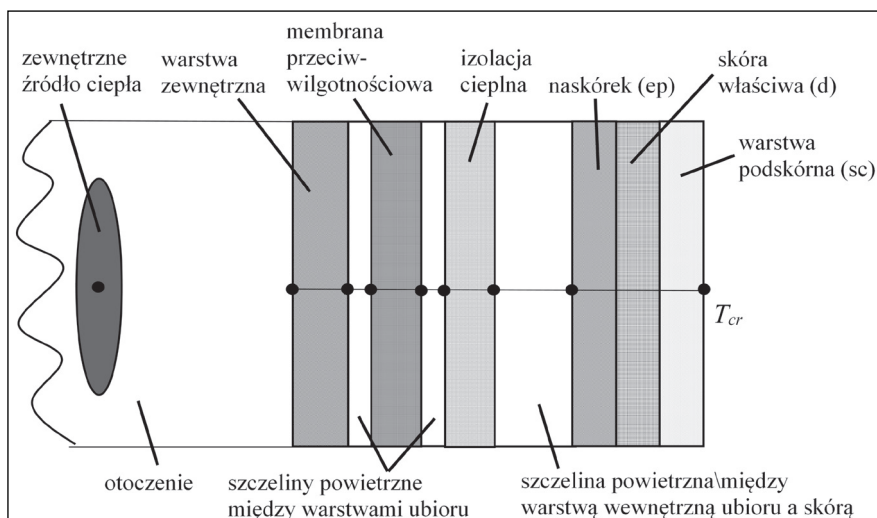
2. KRYTERIA OCENY WŁAŚCIWOŚCI OCHRONNYCH UBIORU

Do oceny jakości ubioru strażackiego stosowane są różne kryteria. Najczęściej proponowane przez odpowiednie normy [12-15]. Do kryteriów tych należą

np.: wskaźnik przenikania ciepła (HTI), współczynnik przenoszenia promieniowania cieplnego ($RHTI$) czy **gęstość strumienia ciepła** dopływającego do powierzchni ubioru wyrażona w kW/m^2 . Stosowane są również inne kryteria oceny takie jak czas progowy, temperatura, czas ekspozycji, wykurczenie, itp. W związku z rozwojem badań strażackich ubiorów ochronnych proponowane są w literaturze światowej kryteria oceny oparte o czas osiągnięcia przewidywanego stopnia oparzenia dla podanych warunków obciążenia cieplnego.

Stopnie oparzenia definiowane są w następujący sposób [1]:

- *I stopnia*, dla którego główną reakcją tkanki jest wazodilatacja naczyń subpapilarnych (zaczerwienienie oparzonego fragment skóry i ból).
- *II stopnia* związane są z uszkodzeniami naskórka i skóry właściwej scharakteryzowanymi uszkodzeniami naczyń kapilarnych, które powodują obrzęk tkanki i pęcherze.
- *III stopnia* związane są ze zniszczeniem całego naskórka i skóry właściwej z uwzględnieniem naczyń krwionośnych w obszarze oparzenia (martwica).
- *IV stopnia* związane są ze spaleniem tkanki skóry. Mogą również ulec uszkodzeniu mięśnie, ścięgna, kości i inne podskórne struktury ciała ludzkiego. W najcięższych przypadkach występuje zwęglenie oparzonej części ciała.



Rys. 1. Schemat przypowierzchniowych warstw skóry

Stopień oparzenia określany jest z zależności i wzorów przybliżonych związanych z reakcjami fizjologicznymi przypowierzchniowych warstw skóry poddanych obciążeniu cieplnemu. Do zależności tych należą np.: krzywa Stoli [21], całka Henriquesa-Moritza [4] czy wzór Xu i Qian'a [27] oparty o analizę stabilności cieplnej kompleksu substrat-enzym w skórze. W artykule do oceny stopnia oparzenia zastosowano całkę Henriquesa-Moritza opisaną wzorem:

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left[-\frac{\Delta E}{RT_b(t)}\right] dt \quad (1)$$

W wzorze (1) T_b jest temperaturą w określonych miejscach przypowierzchniowych warstw skóry, czynnik częstotliwościowy przyjmowany jest zwykle jako $P = 1.43 \cdot 10^{72}$ Hz, energia aktywacji $\Delta E = 4.61 \cdot 10^5$ J/mol, a $R = 8.314$ J/mol/K jest uniwersalną stałą gazową. Całkowanie we wzorze (1) jest przeprowadzane po czasie t dla którego temperatura $T_b > 44^\circ\text{C}$ (317.15 K). Oparzenie I stopnia występuje gdy wartość całki przekracza $\Omega = 0.53$, a temperatura T_b przyjmowana jest na granicy naskórek/skóra właściwa – rys.1. Oparzenie II stopnia ma miejsce gdy wartość całki przekracza $\Omega = 1.0$ przy tym samym miejscu wyznaczania temperatury T_b tzn. na granicy naskórek/skóra właściwa. Oparzenie III stopnia występuje gdy wartość całki przekracza $\Omega > 1.0$, a temperatura T_b przyjmowana jest na granicy skóra właściwa/tkanka podskórna. Najbardziej istotny jest czas osiągnięcia warunków odpowiadających oparzeniu I stopnia, który powinien być dla danej struktury ubioru strażackiego jak najdłuższy.

W celu wyznaczenia wspomnianego czasu ze wzoru (1) konieczna jest znajomość zmian temperatury $T_b(t)$ w czasie dla zadanych warunkach zewnętrzznego obciążenia cieplnego ubioru.

3. METODY OCENY WŁAŚCIWOŚCI OCHRONNYCH UBIORU

W celu oceny jakości ubioru przy stosowaniu jako kryterium czasu oparzenia I stopnia są dwie grupy metod: doświadczalne i oparte o symulację numeryczną.

3.1. Metody doświadczalne

Metody doświadczalne wykorzystują specjalnie skonstruowane manekiny imitujące sylwetkę człowieka i umieszczane w komorze, w której generowany

jest pożar lub wykorzystują odpowiednio zbudowane stanowiska pomiarowe, na których badane są próbki ubioru ochronnego. W pierwszym przypadku manekiny o wielkości człowieka wykonywane są z odpornej na płomień żywicy poliestrowej wzmocnionej włóknami szklanymi. Manekin wyposażony jest dużą liczbę czujników temperatury lub strumienia ciepła rozmieszczonych w różnych miejscach na powierzchni manekinu. Pomiaru przeprowadzane są na manekinach ubranych w różnego rodzaju ubiory ochronne [5, 25]. Ciepło pochodzące od płomienia i gorących gazów obecnych w komorze badawczej przepływa poprzez ubiór, szczelinę powietrzną oddzielającą ubiór od powierzchni manekinu i następnie do czujników rozmieszczonych na jego powierzchni. Dane z czujników są zbierane przez komputer, przetwarzane na historię zmian gęstości strumienia ciepła potem na temperaturę skóry, która z kolei służy do oceny czasu osiągnięcia określonego stopnia oparzenia.

W przypadku gdy wykorzystywane są do oceny jakości ubioru ochronnego specjalne stanowiska pomiarowe, w których używane są próbki ubioru jedna strona próbki jest nagrzewana impulsem cieplnym o określonym czasie trwania. Przeciwna strona próbki ubioru pozostaje w kontakcie z izolatorem cieplnym [6], chłodzoną płytą miedzianą (kalorymetrem) [22] lub materiałem imitującym ludzką skórę [26]. Między próbka a imitacją skóry pozostawiana jest niewielka szczelina powietrzna. Temperatury obu stron powierzchni próbki są mierzone termoparami.

Zaletą metod doświadczalnych jest bezpośredni pomiar temperatury lub strumienia ciepła na rzeczywistych próbkach ubioru lub samych ubiorach. Do wad należy stosowanie materiałów imitujących skórę, ale o odmiennych od niej właściwościach. Ponadto w materiałach imitujących skórę nie ma możliwości uwzględnienia szeregu procesów występujących w warstwach podskórnych skóry ludzkiej takich jak zjawisko generacji ciepła metabolicznego, perfuzji krwi itp.

3.2. Metody oparte o symulację numeryczną

Przewidywanie tej temperatury skóry, która służy do oceny stopnia oparzenia w sposób teoretyczny nie jest proste i wymaga rozwiązania skomplikowanych równań opisujących przepływ ciepła i wilgoci w powierzchniowych warstwach skóry i warstwach ubioru strażackiego z uwzględnieniem obecności noszonej przez niego bielizny i szczelin powietrznych występujących między

skórą a bielizna oraz między bielizną a ubiorem ochronnym. Przewidywanie temperatury skóry w oparciu o symulację numeryczną wymaga przyjęcia szeregu modeli fizycznych i matematycznych a w szczególności [3, 5, 7-9, 19, 20]:

- Modelu przepływu ciepła w przypowierzchniowych warstwach skóry.
- Modelu przepływu ciepła w warstwach ubioru i szczelinach powietrznych oddzielających poszczególne warstwy ubioru ochronnego oraz ubiór od skóry.
- Modelu przepływu wilgoci w warstwach ubioru i szczelinach powietrznych uwzględniającego przemiany fazowe wilgoci.
- Modelu przepływu energii na drodze promieniowania cieplnego w warstwach ubioru, szczelinach powietrznych i skórze.
- Modelu przepływu gazów: powietrza i pary wodnej w warstwach ubioru i szczelinach powietrznych.
- Modelu oddziaływań zewnętrznych opisujących oddziaływanie otoczenia: gorące gazy, płomień, kontakt z gorącymi powierzchniami ciał stałych, obecność wilgoci w otoczeniu i jej formy fazowej.

Ze względu na niewielką grubość ubioru ochronnego oraz przypowierzchniowych warstw skóry w porównaniu z wymiarami poprzecznymi na ogół do przeprowadzenia symulacji numerycznej, stosowane są modele jednowymiarowe, w których założony jest przepływ ciepła i wilgoci w kierunku zgodnym z grubością warstw. Znacznie rzadziej wykorzystywane są modele wielowymiarowe umożliwiające uwzględnienie rozkładu przestrzennego oddziaływań cieplnych otoczenia na ubiór strażacki.

Do zalet metod oceny jakości ubioru opartej o symulacje numeryczną procesów przepływu ciepła należy możliwość zbadania roli poszczególnych sposobów wymiany ciepła, wpływu zestawów materiałów na właściwości ochronne ubioru przy różnych obciążeniach cieplnych oraz szybkość i niewielki (poza wkładem czasu w opracowanie modelu i jego implementacji numerycznej) koszt przeprowadzenia oceny jakości ubioru w porównaniu z badaniami doświadczalnymi.

Wadami metody symulacji numerycznej jest konieczność wyboru dominujących sposobów przepływu ciepła i wilgoci, wyboru odpowiednich modeli przemian fazowych, a przede wszystkim konieczna znajomość wielu właściwości materiałów (w tym ich zależność od temperatury, a w przypadku właściwości radiacyjnych zależność od długości fali promieniowania cieplnego). Przy tym im bardziej skomplikowany model teoretyczny tym potrzebna jest większa liczba parametrów i właściwości opisujących stosowane materiały.

Wyznaczenie wspomnianych właściwości wymaga przeprowadzenia odpowiednich pomiarów dla warstw ubioru ochronnego wykonanych z różnych materiałów. Ponadto metoda teoretyczna wymaga oceny wiarygodności wyników przeprowadzanych symulacji poprzez ich weryfikację i walidację.

3.2.1. Modelowanie przepływu ciepła przez przypowierzchniowe warstwy skóry

Do opisu przepływu ciepła przez przypowierzchniowe warstwy skóry (naskórek, skórę właściwą i warstwę podskórną – patrz rys.1) wykorzystywany jest model Pennesa [11]. Zakłada on przewodzenie ciepła w naskórku oraz występowanie perfuzji krwi i ciepła metabolicznego w skórze właściwej (d) i warstwie podskórnej (sc) i jest opisany równaniem:

$$(\rho c)_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (\rho c)_b \omega_b (T_{cr} - T) + q_m - \frac{\partial q_{rx}}{\partial x} \quad (2)$$

gdzie: $(\rho c)_i$ jest objętościowym ciepłem właściwym odpowiedniej warstwy skóry, $(\rho c)_b$ – objętościowym ciepłem właściwym krwi, k_i – przewodnością cieplną odpowiedniej warstwy skóry, ω_b – współczynnik perfuzji krwi, q_m – intensywnością generacji ciepła metabolizmu a q_{rx} – składową radiacyjnego strumienia ciepła w kierunku x prostopadłym do warstw skóry, T_{cr} – temperaturą krwi tętniczej. Między kolejnymi warstwami skóry zakładana jest ciągłość temperatury i strumienia ciepła.

Model ten został później zmodyfikowany poprzez uwzględnienie zmian prędkości perfuzji krwi z temperaturą, zależności generacji ciepła metabolicznego od temperatury i rodzaju wykonywanej pracy oraz wprowadzenie dodatkowego sposobu przepływu ciepła przez półprzezroczyste warstwy skóry jakim jest promieniowanie ciepłe.

W innym modelu wymiany ciepła w skórze Chen and Holmes [2] podzielili naczynia krwionośne na dwie grupy: duże naczynia, z których każde jest traktowane oddzielne i małe naczynia, które traktowane są jako część ośrodka ciągłego tkanki skóry. W ich modelu wymiana ciepła między małymi naczyniami i tkanką występuje na trzy sposoby. Pierwszym jest mechanizm perfuzji zakładający wymianę ciepła między krwią a tkanką podczas ich dążenia do równowagi termicznej. Drugi konwekcyjny mechanizm związany jest z transportem ciepła poprzez naczynia krwionośne pozostające w stanie równowagi

termicznej z tkanką w kierunku przeciwnym do gradientu temperatury. Trzeci mechanizm dotyczy wymiany ciepła na drodze dyfuzji (przewodzenia) ciepła i jest związany członem dyspersyjnym opisującym krętą drogę krwi i transportu energii przez tkankę. Ogólnie w modelu tym zastąpiono drugi człon po prawej stronie równania (2) przez trzy wyrażenia opisujące wspomniane mechanizmy wymiany ciepła. Stąd też równanie przepływu ciepła w modelu Chena i Holmesa przyjmuje formę:

$$(\rho c)_{sc} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{sc} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (\rho c)_b \omega_b (T_{cr} - T) - (\rho c)_b w_b \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_m - \frac{\partial q_{rx}}{\partial x} \quad (3)$$

gdzie: w_b jest wydatkiem objętościowym krwi przenikającym przez jednostkową powierzchnię a k_p jest współczynnikiem dyspersji (tensorem przewodności perfuzyjnej), który zależy od lokalnej prędkości krwi, kąta między kierunkiem przepływu krwi a kierunkiem lokalnego gradientu. Proponowane były również inne modele przepływu ciepła przez warstwy skóry takie jak model Weinbauma i Jiji – trój-równaniowy model opisujących transport energii w krwi tętniczej, żylniej i tkance podskórnej czy modele uwzględniające zjawiska relaksacyjne i falowe [17, 23]. Do wyznaczenia rozkładu temperatury w warstwach skóry potrzebna jest, poza ich grubością i ciepłem metabolicznym wydzielanym w nich oraz prędkością perfuzji krwi, znajomość następujących ich właściwości: gęstość, współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i w przypadku bardziej złożonych modelach liniowe współczynniki pochłaniania i rozpraszania czy stałe relaksacji strumienia ciepła i gradientu temperatury.

3.2.2. Modelowanie przepływu ciepła przez ubiór specjalny

Model przepływu ciepła przez warstwy ubioru jest złożony i ujmuje szereg zjawisk opisanych modelami wymienionymi na początku paragrafu 3.2. Poniżej bliżej omówiono tylko wybrane z wymienionych modeli.

Poszczególne warstwy ubioru ochronnego traktowane są jako ciała porowate a ich właściwości jako efektywne. W porach występuje wilgoć w postaci ciekłej i gazowej. Woda występuje również w postaci związanej z włóknami tkaniny. Ciepło przepływa przez poszczególne warstwy ubioru na drodze przewodzenia ciepła, unoszenia ciepła wraz z ruchem wody w postaci ciekłej i pary wodnej oraz na drodze promieniowania cieplnego, które jest pochłaniane i emitowane przez składniki stałe warstw tkaniny. Przepływowi ciepła

towarzyszy jego akumulacja oraz przemiany fazowe. Przepływ ciepła przez warstwę ubrania ochronnego jest zatem opisany równaniem [3, 7-9, 20]:

$$(\rho c)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + [(\rho c)_l w_l + (\rho c)_g w_g] \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\partial q}{\partial x} + \dot{m}_{gs} (\Delta h_{par} + \Delta h_{adsorp}) + \dot{m}_{gl} \Delta h_{par} + \dot{m}_{ls} \Delta h_{adsorp} \quad (4)$$

gdzie kolejne wyrażenia po lewej stronie powyższego równania odpowiedzialne są za akumulację i unoszenie ciepła. Przepływ ciepła na drodze przewodzenia ciepła, promieniowania cieplnego i związany z dyfuzją wilgoci oraz powietrza ujęty jest w pierwszym wyrażeniu po prawej stronie gdzie gęstość strumienia ciepła q opisana jest wzorem:

$$q = -k_{ef} \frac{\partial T}{\partial x} + q_r + j_v h_v + j_l h_l + j_{pow} h_{pow} \quad (5)$$

Kolejne, poza pierwszym, wyrażenia po prawej stronie równania (4) odpowiadają za ciepło pochłaniane lub uwalniane podczas przemian fazowych para wodna/wilgość związana, para wodna/wilgość w postaci ciekłej, wilgość w postaci ciekłej/wilgość związana. Wyznaczanie powyższych członów opisano w [3, 7-9, 20]. Wielkości, które występują w równaniach (4) i (5) oznaczają kolejno: h_p , h_{pow} i h_v – entalpie właściwe cieczy, powietrza suchego i pary wodnej, j_p , j_{pow} i j_v – gęstości strumienia cieczy, powietrza suchego i pary wodnej, k_{eff} – efektywny współczynnik przewodzenia ciepła tkaniny, \dot{m}_{gs} , \dot{m}_{gl} i \dot{m}_{ls} – intensywności wymiany masy między fazą gazową a stałą (wilgość związana przez włókna tkaniny), fazą gazową a ciekłą i fazą ciekłą a stałą, q_r – radiacyjny strumień ciepła, w_g i w_l – prędkości przepływu gazu wilgotnego i cieczy, Δh_{adsor} i Δh_{par} – ciepła sorpcji i parowania, $(\rho c)_{eff}$ – efektywną pojemność cieplną, $(\rho c)_g$ i $(\rho c)_l$ – pojemności cieplne gazu wilgotnego i cieczy.

3.2.3. Modelowanie przepływu wilgoci i promieniowania przez ubiór specjalny

Istotną rolę w transporcie ciepła odgrywa przepływ pary wodnej. Zmiany ilości pary wodnej w warstwach ubioru opisane są równaniem [3, 7-9, 20]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_v w_g) = -\frac{\partial}{\partial x} j_v - \dot{m}_{gs} - \dot{m}_{gl} \quad (6)$$

w którym człony po lewej stronie odpowiadają za proces akumulacji pary wodnej w porach tkaniny i jej unoszenie wraz z ruchem mieszaniny powietrze – para wodna. Pierwszy człon po prawej stronie powyższego równania związany jest z dyfuzją wilgoci opisaną prawem Ficka:

$$j_v = -D_{v-pow,ef} \frac{\partial}{\partial x} \rho_v \quad (7)$$

Pozostałe człony w równaniu (6) opisują zmiany ilości pary wodnej w jednostce objętości tkaniny związane z przemianami fazowymi para wodna/wilgość związana oraz para wodna/wilgość w postaci ciekłej [3, 7-9, 20]. W powyższych równaniach symbole oznaczają kolejno: D_{v-pow} – efektywną dyfuzyjność pary wodnej, ε_g – udział objętościowy gazu wilgotnego, ρ_v – gęstość pary wodnej. Pozostałe wielkości opisano wcześniej.

Energia promieniowania cieplnego przepływającego przez poszczególne warstwy tkaniny jest w nich pochłaniana i rozpraszana jak również emitowana przez włókna [7-9]. Strumień ciepła przenoszony na drodze promieniowania opisuje związek:

$$\mathbf{q}_r = \int_0^{\infty} \int_{4\pi} i_{\lambda}(x, \omega) \mathbf{e}_{\omega} d\Omega d\lambda = \int_0^{\infty} \mathbf{q}_{r,\lambda} d\lambda \quad (8)$$

gdzie: całkowanie tzw. intensywności promieniowania cieplnego i_{λ} odbywa się po całym kącie bryłowym Ω i długości fali promieniowania λ . Zmiana intensywności promieniowania cieplnego wzdłuż określonego kierunku ω podczas przepływu promieniowania przez warstwę tkaniny wyrażona jest tzw. Równaniem Transportu Promieniowania:

$$\frac{d}{ds} i_{\lambda}(x, \omega) = -K_{e\lambda} i_{\lambda}(x, \omega) + K_{a\lambda} i_{b\lambda}(x, T) + K_{s\lambda} \int_{4\pi} p_{\lambda}(\omega' \rightarrow \omega) i_{\lambda}(x, \omega') d\Omega' \quad (9)$$

gdzie: człony po prawej stronie związane są ze zmianą intensywności kolejno na skutek pochłaniania i rozpraszania promieniowania na inne kierunki jego rozchodzenia się, emisji promieniowania przez tkaninę, rozpraszania promieniowania z innych kierunków na rozpatrywany kierunek. Wielkości, które występujące w równaniu (9) kolejno oznaczają: $i_{b\lambda}$ – spektralną intensywność promieniowania cieplnego emitowaną przez ciało doskonale czarne, $K_{a\lambda}$, $K_{e\lambda}$ i $K_{s\lambda}$ – spektralne współczynniki absorpcji, ekstynkcji i rozpraszania,

p_λ – spektralną funkcję fazową rozpraszania, ω i ω' – kierunki rozchodzenia się promieniowania cieplnego odpowiednio przed i po rozproszeniu.

4. BUDOWA UBIORU SPECJALNEGO, STOSOWANE MATERIAŁY I ICH WŁAŚCIWOŚCI WYMAGANE DO PRZEPROWADZENIA SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Ubiór ochronny złożony jest zwykle z trzech warstw. Warstwy zewnętrznej chroniącej przed zewnętrznymi oddziaływaniami mechanicznymi, warstwy wodoszczelnej (membrany, bariery przeciw-wilgotnościowej) oraz warstwy izolacyjnej (bariery cieplnej) – patrz rys. 1. Warstwy tkaniny mają określone grubości. Przykładowe wartości grubości warstw dla różnych tkanin i przyjęte wartości grubości szczelin między warstwami ubrania oraz między wewnętrzną warstwa ubrania a skórą podano w tabeli 1.

Tabela 1. Grubości warstw i szczelin powietrznych dla różnych rodzajów ubioru ochronnego

Grubość warstwy [mm]/ Rodzaj ubioru ochronnego	Warstwa I	Szczelina I	Warstwa II	Szczelina II	Warstwa III	Szczelina III
I	0,56	0,1	0,73	0,1	1,66	6,35
II	0,7	0,1	0,85	0,1	0,95	6,35
III	0,82	0,1	0,55	0,1	3,59	6,35

Materiały stosowane na ubiory ochronne produkowane są przez wyspecjalizowane firmy takie jak DuPont. Do materiałów stosowanych na zewnętrzne warstwy ochronne używane są: Kombat, Kevlar®/PBI, 60/40 KEVLAR/NOMEX blend, Nomex@ IIIA, Nomex® III-Defender™, PBI™Kevlar®Kombat™, Black Basofil® Kevlar®. Na bariery wilgoci proponowane są ComfortZone™, Breathable PTFE film on NOMEX E89™, PTFE non woven Nomex®, neoprene, Crosstech® on Nomex®, Breathe-Tex®, Nomex® E-89 Crosstech®, Nomex® IIIA Pajama Check-Crosstech®, Neo-Guard®. Natomiast na bariery termiczne używane są: Aralite®, Aramid batt quilted to 3.2 oz/yd² NOMEX.

Tabela 2. Właściwości termofizyczne warstw tkanin dla I rodzaju ubioru ochronnego

Warstwa tkaniny/ właściwości	Warstwa I: zewnętrzna (Kombat 7.5 oz/yd ²)	Warstwa II: bariera wilgoci (ComfortZone™)	Warstwa III: bariera termiczna (Aralite™)
ρ_f [kg/m ³]	1384	1295	1380
c_f [J/(kgK)]	1420	1325	1200
k_f [W/(mK)]	0,179	0,144	0,130
ε_f	0,334	0,186	0,115
$R_{f,\varphi=0.65}$	0,084	0,038	0,045
τ	1,50	1,25	1,00
D_f [m ² /s]	6,0·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻¹⁴
d_f [m]	1,6·10 ⁻⁵	1,6·10 ⁻⁵	1,6·10 ⁻⁵
$K_{a,f,i}$ [1/m]	4111,76	3154,23	1387,1
$K_{s,f,i}$ [1/m]	4111,76	3154,23	1387,1
$n_{f,i}$	1,1937	1,1079	1,0667

W przypadku tkanin do przeprowadzenia symulacji numerycznej wymagane są poza grubością warstw ubioru ochronnego również takie informacje jak rodzaj tkaniny, splot i średnica włókien d_f oraz następujące właściwości: gęstość włókien ρ_f , udział objętościowy włókien ε_f , współczynnik przewodzenia ciepła włókien k_f , ciepło właściwe włókien c_f , przepuszczalność cieczy i pary wodnej tkaniny, współczynnik krętności (turtuosity) dla tkaniny τ , współczynniki dyfuzji cieczy, pary wodnej D_f i powietrza, stałe równowagi para wodna – wilgoć związana we włóknach $R_{f,\varphi=0.65}$, współczynnik załamania n_f , liniowe współczynniki pochłaniania $K_{a,f}$, rozpraszania $K_{s,f}$ oraz funkcja rozpraszania p_f . Właściwości radiacyjne zależne są od długości fali promieniowania i zwykle wyznaczone z pomiaru współczynników przepuszczalności, odbicia i emisyjności warstwy tkaniny. Ze względu na znaczne zmiany temperatury na przekroju ubioru ochronnego potrzebna jest również zależność szeregu właściwości od temperatury. Ze względu na dużą liczbę właściwości tkanin potrzebnych do przeprowadzenia symulacji numerycznej konieczne jest zaplanowanie odpowiedniego programu systematycznych badań wspomnianych właściwości dla różnych typów tkanin używanych na ubiory ochronne. Przykładowe wartości właściwości cieplnych i radiacyjnych podane są w załączonych tabelach 2-4 [10, 16, 18, 24].

Tabela 3. Właściwości termofizyczne warstw tkaniny dla II rodzaju ubioru ochronnego

Warstwa tkaniny/ właściwości	Warstwa I: zewnętrzna (60/40KEVLAR/NOMEX blend at 7.0 oz/yd ²)	Warstwa II: bariera wilgoci (Breathable PTFE film on NOMEX E89™)	Warstwa III: bariera termiczna (Aramid batt quilted to 3.2 oz/yd ² NOMEX)
ρ_f [kg/m ³]	848,85	609,5	609,0
c_f [J/(kgK)]	1005	1150	1300
k_f [W/(mK)]	0,080	0,050	0,052
ε_f	0,336	0,409	0,360
$R_{f\varphi=0.65}$	0,055	0,056	0,041
τ	2,12	2,49	1,82
D_f [m ² /s]	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$
d_f [m]	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
$K_{a,fi}$ [1/m]	1820,435	1387,1	1164,95
$K_{s,fi}$ [1/m]	1820,435	1387,1	1164,95
n_{fi}	1,2000	1,1000	1,0667

Tabela 4. Właściwości termofizyczne warstw tkaniny dla III rodzaju ubioru ochronnego

Warstwa tkaniny\ właściwości	Warstwa I: zewnętrzna (Nomex® III-Defender™)	Warstwa II: bariera wilgoci (Neo-Guard®)	Warstwa III: bariera termiczna (Aralite®)
ρ_f [kg/m ³]	946,44	5185,66	636,1
c_f [J/(kgK)]	1510	1480	1620
k_f [W/(mK)]	0,044	0,071	0,036
ε_f	0,334	0,115	0,115
$R_{f\varphi=0.65}$	0,084	0,045	0,045
τ	1,50	1,00	1,00
D_f [m ² /s]	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$
d_f [m]	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
$K_{a,fi}$ [1/m]	1164,95	1820,435	1387,1
$K_{s,fi}$ [1/m]	1164,95	1820,435	1387,1
n_{fi}	1,100	1,100	1,0667

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ PRZEPEŁYWU CIEPŁA I OCENY JAKOŚCI UBRAŃ OCHRONNYCH

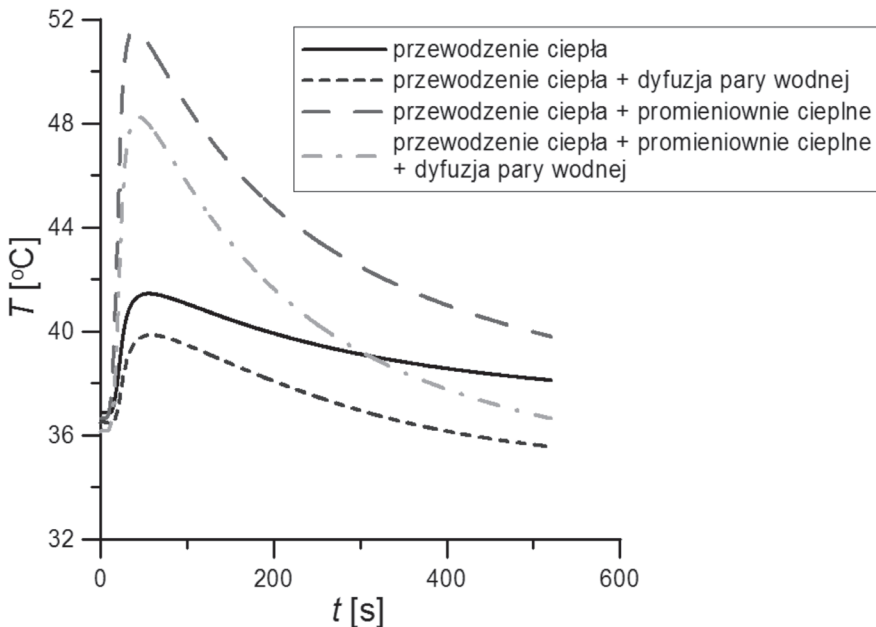
Opracowano odpowiedni kod symulacji numerycznej procesu przepływu ciepła i wilgoci przez warstwy skóry i ubioru ochronnego strażaka oraz oceny jego jakości przy wykorzystaniu całki Henriquesa-Moritza. Kod ten oparty był na dyskretyzacji Metodą Objętości Kontrolnych (Finite Volume Method) silnie nieliniowych równań różniczkowych (procesy przepływu ciepła i wilgoci) i różniczkowo-całkowych (promieniowanie cieplne) opisujących wspomniane procesy. Do uzyskania rozwiązania zaproponowano specjalnie opracowany algorytm iteracyjny. Szczegóły wykorzystywanego kodu opisano w publikacjach [7, 8]. W celu przedstawienia wpływu różnych sposobów przepływu ciepła oraz struktury i rodzaju tkanin wykorzystywanych w ubiorze ochronnym strażaka rozpatrywano ubiór trójwarstwowy złożony z warstwy zewnętrznej (ochronnej) bariery (membrany przeciwwilgociowej) i bariery termicznej (izolacji cieplnej). Jako materiały warstw wybrano trzy zestawy spośród warstw wymienionych na początku powyższego rozdziału:

- **I rodzaj ubioru ochronnego:** Kombat 7,5 oz/yd², Comfort Zone™, Aralite™,
- **II rodzaj ubioru ochronnego:** 60/40 KEVLAR/NOMEX blend at 7,0 oz/yd², Breathable PTFE film on NOMEX E89™, Aramid batt quilted to 3,2 oz/yd² NOMEX,
- **III rodzaj ubioru ochronnego:** Nomex® III-Defender™, Neo-Guard®, Aralite®.

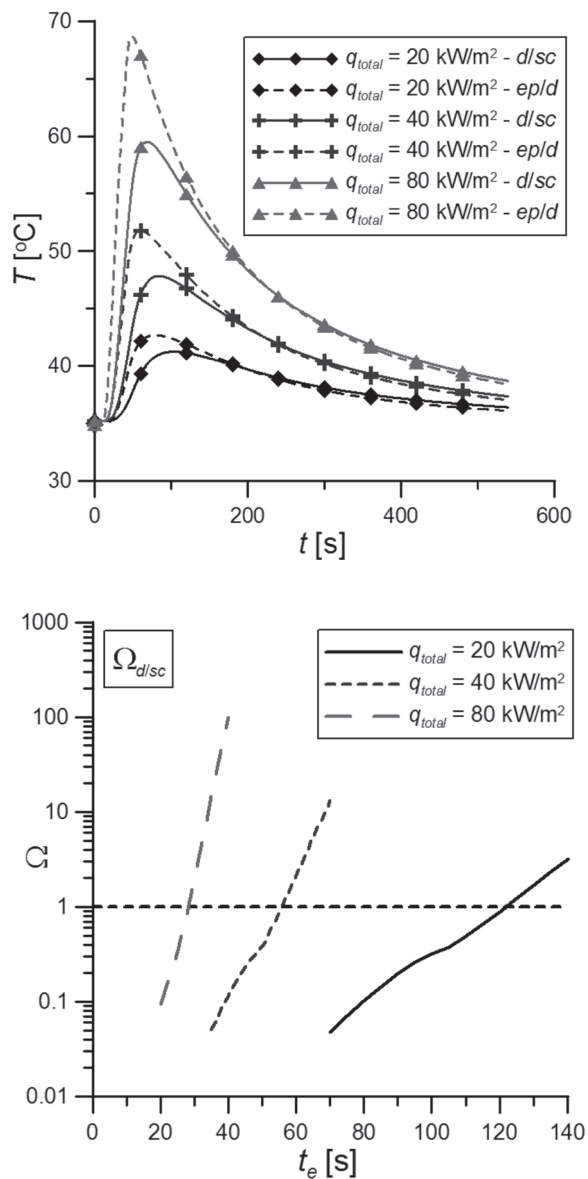
Założono niezależność właściwości cieplnych od temperatury a radiacyjnych również od długości fali promieniowania cieplnego. Przyjęto, że rozpraszanie w warstwach tkaniny jest izotropowe oraz model Pennesa przepływu ciepła w warstwach skóry. Badano wpływ różnych sposobów wymiany ciepła wewnątrz ubioru ochronnego i szczelinach powietrznych rozpatrując przewodzenie ciepła, promieniowanie cieplne, dyfuzję pary wodnej i zjawiska związane z odparowaniem wilgoci z włókien tkaniny i kondensacją pary wodnej. Sprawdzano jak przyjęty zestaw materiałów warstw ubioru wpływa na jego cechy ochronne oraz jaka jest rola grubości szczeliny między warstwą wewnętrzną ubioru a skórą w ocenie jakości ubioru.

W obliczeniach przyjmowano, że ubiór ochronny jest poddany działaniu zewnętrznego impulsu cieplnego o gęstości (gęstości strumienia ciepła) q_{total} o długości trwania (czasie ekspozycji) t_e . Na rys. 2 przedstawiono wpływ różnych sposobów przepływu ciepła oraz obecności wilgoci na temperaturę

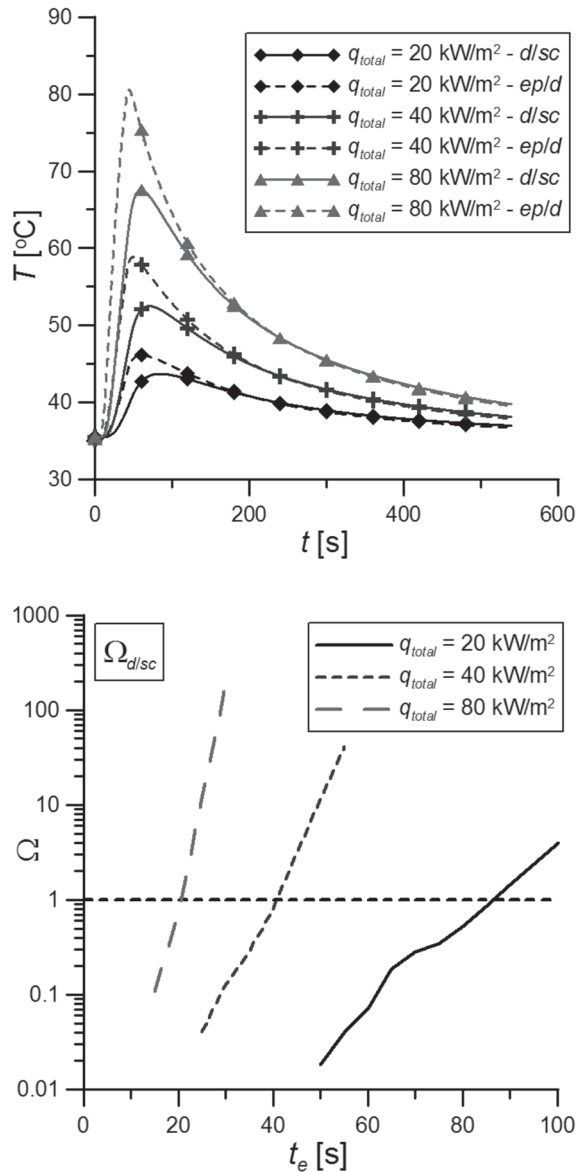
powierzchni skóry dla ubioru złożonego materiałów: Kombat 7,5 (oz/yd²) – warstwa zewnętrzna, ComfortZone™ – membrana przeciwwilgociowa, Aralite™ – izolacja cieplna. Maksymalna temperatura skóry przy impulsie o gęstości $q_{total} = 80 \text{ kW/m}^2$ i czasie ekspozycji $t_e = 20 \text{ s}$ osiąga ponad pięćdziesiąt stopni Celsjusza i występuje po czasie około 50 s po rozpoczęciu nagrzewania, następnie obniża się do wartości poniżej 44°C (temperatury uwzględnianej w całce Henriquesa-Moritzza) po czasie około 300 s. Te maksymalne wartości występują, gdy uwzględniane jest zarówno przewodzenie ciepła jak i przepływ ciepła na drodze promieniowania cieplnego wewnątrz warstw ubioru ochronnego. Obecność wilgoci, jej dyfuzja i przemiany fazowe obniżają wartość maksymalnej temperatury powierzchni skóry. Podobna zależność występuje, gdy przepływ ciepła wewnątrz ubioru występuje jedynie na drodze przewodzenia ciepła ale otrzymane wartości temperatury są niższe.



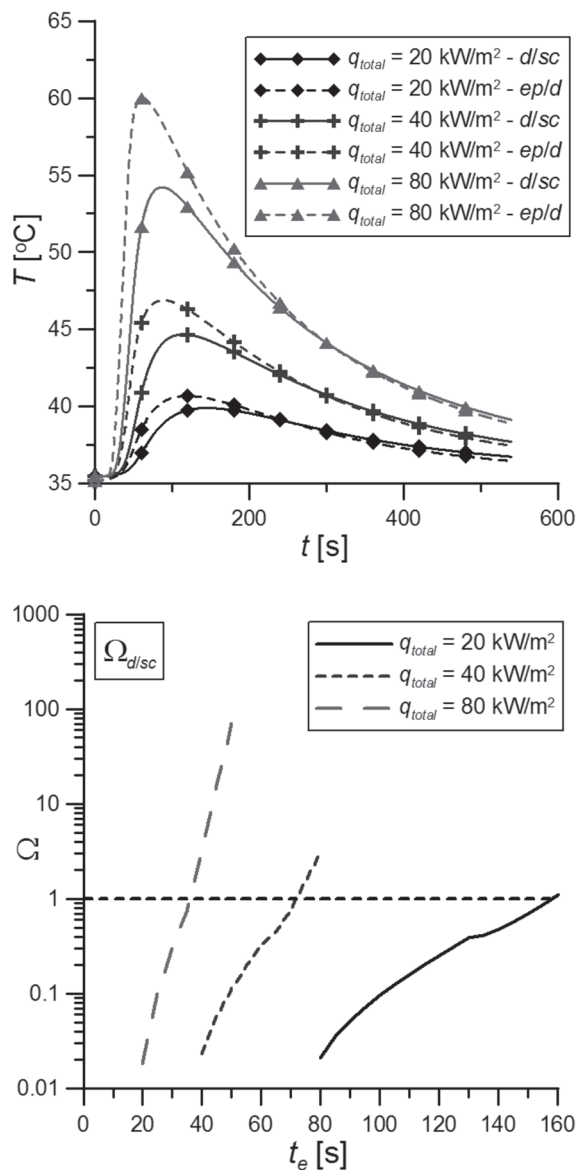
Rys. 2. Wpływ różnych sposobów wymiany ciepła i wilgoci na zmiany temperatury powierzchni skóry w czasie. Zewnętrzny impuls cieplny o kształcie prostokątnym i długości trwania $t_e = 20 \text{ s}$ i mocy $q_{total} = 80 \text{ kW/m}^2$



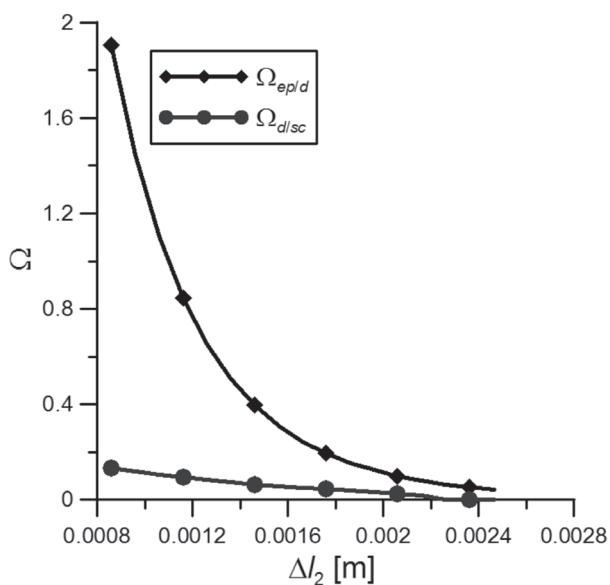
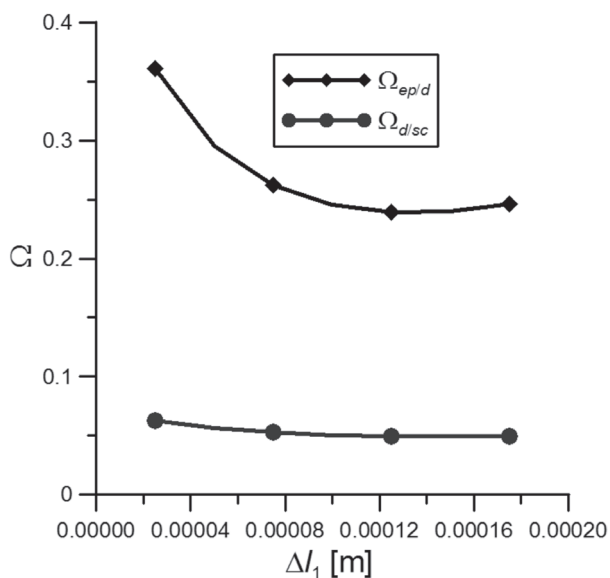
Rys. 3. Zmiana temperatury granicy naskórka (ep) i skóry właściwej (d) oraz na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) dla czasu ekspozycji $t_e = 40 \text{ s}$ (lewy wykres) oraz wartość całki Henriquesa-Moritzza dla temperatury na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) w funkcji czasu ekspozycji (prawy wykres) dla różnych wartości strumienia ciepła padającego na powierzchnię ubioru ochronnego I rodzaju



Rys. 4. Zmiana temperatury granicy naskórka (ep) i skóry właściwej (d) oraz na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) dla czasu ekspozycji $t_e = 40 \text{ s}$ (lewy wykres) oraz wartość całki Henriquesa-Moritza dla temperatury na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) w funkcji czasu ekspozycji (prawy wykres) dla różnych wartości strumienia ciepła padającego na powierzchnię ubioru ochronnego II rodzaju



Rys. 5. Zmiana temperatury granicy naskórka (ep) i skóry właściwej (d) oraz na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) dla czasu ekspozycji $t_e = 40$ s (lewy wykres) oraz wartość całki Henriquesa-Moritzza dla temperatury na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) w funkcji czasu ekspozycji (prawy wykres) dla różnych wartości strumienia ciepła padającego na powierzchnię ubioru ochronnego III rodzaju



Rys. 6. Wartości całki Henrique'a dla czasu ekspozycji $t_e = 5$ s i $q_{total} = 20$ kW/m² dla I rodzaju ubioru ochronnego i różnych: szerokości szczelin powietrznych pomiędzy warstwami tkaniny (górny wykres), grubości szczeliny powietrznej między warstwą wewnętrzną a skórą (dolny wykres).

Na rys. 3-5 przedstawiono wpływ zewnętrznego obciążenia cieplnego na temperaturę między poszczególnymi warstwami skóry (lewy wykres) oraz odpowiadającą im wartość całki Henriquesa-Moritza w zależności od czasu trwania impulsu cieplnego (prawy wykres) dla przyjętych trzech rodzajów ubioru ochronnego.

Maksymalne temperatury skóry osiągają, w zależności od rodzaju ubioru wartości rzędu 60-80°C. Przy tym dla większych obciążeń cieplnych występują dla krótszych czasów od momentu początku ogrzewania. Najniższe maksymalne wartości temperatury skóry osiągnęły dla ubioru III rodzaju, a największe dla ubioru ochronnego II rodzaju. Wartość oparzenia III stopnia (całka Henriquesa-Moritza przekraczająca wartość $\Omega = 1$ dla temperatury na granicy skóra właściwa/tkanka podskórna) występuje dla czasów ekspozycji $t_e = 90-160$ s przy najmniejszym z rozpatrywanych obciążeń cieplnych i maleje przy wzroście obciążenia cieplnego. Najdłuższe czasy ekspozycji występują dla III rodzaju ubioru ochronnego.

Wpływ grubości szczelin powietrznych między warstwami ubioru ochronnego oraz szczeliny między wewnętrzną warstwą ubioru a skórą na jakość i rodzaju ubioru ochronnego przy obciążeniu cieplnym $q_{total} = 20$ kW/m² i czasie ekspozycji $t_e = 5$ s przedstawiono na rys. 6. Wartość całki Henriquesa-Moritza wyznaczana dla temperatury granicy naskórka (ep) i skóry właściwej (d) oraz na granicy skóry właściwej (d) i tkanki podskórnej (sc) nie przekraczała w tym przypadku granicy I stopnia oparzenia przy grubości szczeliny między wewnętrzną warstwą ubioru a skórą odpowiadającą wartości podanej w tabeli 1. Obliczenia wskazują, że przy pewnej grubości szczelin powietrznych między warstwami ubioru ochronnego wartość całki Henriquesa-Moritza może przyjmować najmniejsze wartości – lewy wykres na rys. 6. Największy wpływ na wartość całki Henriquesa-Moritza wywiera grubość szczeliny między wewnętrzną warstwą ubioru a skórą. Jej wzrost przyczynia się znacznie do uniknięcia oparzenia zarówno II jak I rodzaju.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W oparciu o opracowany model złożonych procesów wymiany ciepła i przepływu wilgoci w ubiorze ochronnym uwzględniający zarówno przemiany fazowe wilgoci, jak przepływ ciepła na drodze promieniowania cieplnego związany z jego pochłanianiem, emisją i rozpraszaniem. W oparciu o wspomniany

model przygotowano własny kod obliczeniowy zakładający jednowymiarowy przepływ ciepła i wilgoci w warstwach ubioru ochronnego i skóry oraz przeznaczony do symulacji numerycznej tych procesów i oceny jakości ubioru ochronnego wykorzystującego model oparzeń. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że metoda symulacji numerycznej wymaga:

- Znajomości szeregu właściwości materiałów (warstw ubioru specjalnego) oraz ich zależności od temperatury czy długości fali promieniowania (w przypadku właściwości radiacyjnych).
- Określenia modelu wymiany ciepła przez przypowierzchniowe warstwy skóry.
- Określenia dominujących sposobów wymiany ciepła i przepływu wilgoci w warstwach ubioru specjalnego.

Ponadto na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych dla trzech rodzajów ubioru ochronnego (złożonego z warstw różnych materiałów) wywnioskowano, że

- Właściwości poszczególnych warstw ubioru w sposób istotny wpływają na właściwości ochronne. Należy dążyć do poznania przyczyn tego wpływu i optymalizacji struktury ubioru.
- Grubości szczelin powietrznych między warstwami ubioru oraz między wewnętrzną powierzchnią ubioru i skórą oraz grubości warstwy izolacji termicznej (bariery termicznej) w sposób istotny wpływają na właściwości ochronne.

LITERATURA

- [1] Anthony C. P., Thibodeau G. A.: *Textbook of Anatomy and Physiology*, cv Mosby, St. Louis 1979.
- [2] Chen M. M., Holmes K. R.: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1980, nr 335, s. 137–150.
- [3] Chitrphiromsri P., Kuznetsov A. V.: *Heat and Mass Transfer* 2005, nr 41, s. 206–215.
- [4] Henriques F. C., Moritz A. R.: *Archives of Pathology* 1947, nr 43, s. 489–502.
- [5] Jiang Y. Y., Yanai E., Nishimura K., Zhang H., Abe N., Shinohara M., Wakatsuki K.: *Fire Safety Journal* 2010, nr 45, s. 314–326.
- [6] Keltner N.: *Journal of ASTM International* 2005, nr 2, s. 1–14.

- [7] Łapka P., Furmański P., Wiśniewski T. S.: *Journal of Physics: Conference Series* 2016, nr 676, s. 012014.
- [8] Łapka P., Furmański P., Wiśniewski T. S.: Numerical assessment of thermal performance of protective garments, *Conference Proceedings of the Numerical Heat Transfer 2015 – Eurotherm Seminar No. 109*, 2015, s. 69-80.
- [9] Łapka P., Furmański P., Wiśniewski T. S.: Numerical assessment of influence of different heat transfer modes on temperature distribution in the protective clothing and the skin, *Conference Proceedings of the 1X International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*, 2016, s. 1-11.
- [10] Mell W. E., Lawson J. R.: *A Heat Transfer Model for Fire Fighter's Protective Clothing*, NISTIR 6299, 1999.
- [11] Pennes H. H.: *Journal of Applied Physiology* 1948, nr 2, s. 93-122.
- [12] PN-EN 1486: 2009.
- [13] PN-EN 15614: 2009.
- [14] PN-EN ISO 367: 1996.
- [15] PN-EN 1486: 2009.
- [16] Lawson J. R., Walton W. D., Bryner N. P., Amon F. K.: *Estimates of Thermal Properties for Fire Fighters' Protective Clothing Materials*, NISTIR 7282, 2005.
- [17] Roetzel W., Putra N., Das S. K.: *International Journal of Thermal Sciences* 2003, nr 42, s. 541-552.
- [18] Lee, S., Park, C.: *International Journal of Thermal Sciences* 2012, nr 51, s. 102-111.
- [19] Song G., Barker R. L., Hamouda H., Kuznetsov A. V., Chitrphiomsri P., Grimes R. V.: *Textile Research Journal* 2004, nr 74, s. 1033-1040.
- [20] Song G., Chitrphiomsri P., Ding D.: *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 2008, nr 14, s. 89-106.
- [21] Stoll A. M., Greene L. C.: *Journal of Applied Physiology* 1959, nr 14, s. 373-382.
- [22] Torvi D. A., Threlfall T. G.: *Fire Technology* 2006, nr 42, s. 27-48.
- [23] Weinbaum S., Jiji L.M., Lemos D.E.: *ASME Journal of Biomedical Engineering* 1984, nr 106, s. 321-330.
- [24] Udayraj, Talukdar P., Das A., Alagirusamy R.: *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, nr 106, s. 32-56.
- [25] Zhai L.-N., Li J.: *Burns* 2015, nr 41, s. 1385-1396.

- [26] Zhu F., Li K.: Measurement Science and Technology 2008, nr 19, s. 105704.
- [27] Xu F., Lu T.: Introduction to Skin Biothermomechanics and Thermal Pain, Springer Verlag 2011.

Praca została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych” nr O ROB 0011/03/001, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.