

dr inż. Piotr Łapka

prof. dr hab. inż. Piotr Furmański

mgr inż. Marcin A. Bugaj

mgr inż. Łukasz Cieślakiewicz

dr inż. Karol Pietrak

mgr inż. Michał Kubiś

dr hab. inż. Tomasz S. Wiśniewski

Politechnika Warszawska

Walidacja modelu przepływu ciepła i wilgoci przez ubiór ochronny

Streszczenie

W artykule przedstawiono zaawansowany model matematyczny i numeryczny transportu ciepła i masy w wielowarstwowych ubraniach ochronnych, które były poddane działaniu wysokiej temperatury otoczenia lub dużych radiacyjnych strumieni ciepła emitowanych przez gorące ciała. Zaproponowany model uwzględniał przewodzenie ciepła i promieniowanie cieplne w warstwach tkaniny o spektralnych właściwościach optycznych i w szczelinach powietrznych oraz transport energii związany z dyfuzją wilgoci przez ubranie ochronne oraz z procesami sorpcji i desorpcji wody w włóknach tkaniny. Dodatkowo do modelu włączono złożone warunki bilansu energii i masy oraz warunki optyczne na granicach warstw tkaniny. Do rozwiązania równań modelowych opracowano autorski iteracyjny algorytm numeryczny, który bazował na metodzie objętości kontrolnych. Następnie przeprowadzono analizę walidacyjną zaproponowanego modelu obliczeniowego poprzez porównanie otrzymanych wyników z wynikami pomiarów eksperymentalnych dla wybranego pakietu ubrania ochronnego ogrzewanego przez krótki czas radiacyjnym strumieniem ciepła emitowanym przez promiennik podczerwieni, a następnie chłodzonego w otoczeniu. Otrzymano dobrą zgodność czasowych przebiegów temperatury, co potwierdziło wiarygodność zaproponowanego modelu.

Słowa kluczowe: model numeryczny, promieniowanie cieplne, wymiana ciepła i masy, ubranie ochronne

Validation of Heat and Mass Transfer Model in the Protective Clothing

Abstract

An advanced mathematical and numerical model of heat and mass transfer in the multi-layer protective clothing, which was exposed to either high temperature environment or to high incident radiative heat flux emitted by hot objects was presented in this paper. The developed model accounted for heat conduction and thermal radiation in a non-grey layers of the protective garment. Additionally, heat transport associated with water vapour diffusion through the protective clothing and with sorption and desorption of liquid water in the fabric fibres were included. Complex energy and mass balances as well as optical conditions at the external and internal interfaces between clothing layers were formulated and incorporated into the model. A novel iterative numerical algorithm which was based on the Finite Volume Method was developed to solve the system of governing equations. Finally, the validation analysis of the model was carried out for selected multi-layer clothing which was exposed for a short time to radiative heat flux emitted by an infrared emitter and then cooled down in the surroundings. The simulated and experimentally measured time variations of temperatures were in good agreement, therefore the accuracy of the proposed model was validated.

Keywords: numerical model, thermal radiation, heat and mass transfer, protective clothing

1. WSTĘP

Ochrony osobiste chronią przed ryzykiem obrażeń cieplnych związanych z ekspozycją na wysoką temperaturę gazu zewnętrznego lub na duży promieniowy strumień ciepła emitowany przez gorące obiekty. Bezpośredni kontakt z gorącymi ciałami może być również źródłem oparzeń. Powyższe zagrożenia mogą być spotykane w wieku gałęziach przemysłu, sportach motorowych, na polu walki czy w gaszeniu pożarów. Ubrania ochronne powinny spełniać podwójną funkcję: utrzymywać komfortowe warunki podczas normalnych (regularnych) aktywności oraz chronić przed powstaniem poważnych obrażeń cieplnych w sytuacjach zagrożenia, takich jak nagły pożar czy wybuch.

Ubrania ochronne są z reguły wykonane z kilku warstw tkanin, które mogą być odseparowane wąskimi szczelinami powietrznymi lub zintegrowa-

ne ze sobą. Zwykle wykorzystywane są trzy lub cztery warstwy na przykład: tkanina zewnętrzna, membrana (paro- i wodo-izolacja), izolacja termiczna oraz podszewka. Bardzo często niektóre warstwy są ze sobą połączone np.: warstwa izolacji i podszewka. Najbardziej zewnętrzna warstwa – tkanina zewnętrzna – ma za zadanie ochronę przed zagrożeniami mechanicznymi oraz przed krótkotrwałymi i bardzo intensywnymi zagrożeniami termicznymi. Z kolei membrana chroni przed penetracją do wnętrza ubrania pary wodnej i ciepłej wody oraz innych płynów. Izolacja termiczna zabezpiecza przed długotrwałymi ekspozycjami na działanie środowiska o wysokiej temperaturze lub na działanie radiacyjnych strumieni ciepła emitowanych przez gorące obiekty. Z kolei podszewka zapewnia komfort użytkowania ubioru ochronnego. Każda z warstw tkaniny ma inną strukturę oraz odmienne właściwości termofizyczne i optyczne.

Procesy transportu ciepła i masy w ubraniach ochronnych, na które oddziałuje środowisko zewnętrzne o podwyższonej temperaturze lub radiacyjne strumienie ciepła emitowane przez gorące obiekty są bardzo złożone. Warstwy tkaniny są ośrodkami porowatymi wykonanymi z hydroskopowych włókien. Z tego powodu sprzężone procesy transportu energii w tkaninach (przewodzenie ciepła przez włókna tkaniny i przez powietrze wypełniające pory, konwekcja wymuszona ruchem ciała lub podmuchem powietrza zewnętrznego oraz promieniowanie cieplne, które pochodzi z zewnętrznego źródła ciepła i penetruje przez półprzezroczyste ubranie o spektralnych właściwościach optycznych) bardzo silnie zależą od struktury tkanin. Dodatkowo, procesom wymiany ciepła towarzyszy transport masy związany z dyfuzją i konwekcją pary wodnej w ubraniu ochronnym oraz z procesami sorpcji i desorpcji wody w włóknach tkanin. Para wodna wpływa na procesy transportu energii, jak również na właściwości termofizyczne i optyczne ochron osobistych. Źródłami wilgoci w ubraniach ochronnych jest otoczenie oraz ciało człowieka. Ponadto, wysokie temperatury, które mogą występować w ochronach osobistych na skutek ekspozycji na działanie gorących gazów lub dużych radiacyjnych strumieni ciepła mogą prowadzić do reakcji termochemicznych i w konsekwencji zmian w strukturze ubrań ochronnych oraz zmian właściwości termofizycznych i optycznych. Jednoczesne i sprzężone występowanie powyższych nieliniowych procesów transportu ciepła i masy powoduje, że modelowanie cieplno-przepływowe ochron osobistych jest bardzo trudne i czasochłonne.

W literaturze można znaleźć kilkanaście modeli matematycznych i numerycznych transportu ciepła i masy w ubraniach ochronnych, ale ze względu na bardzo złożony charakter modelowanych zjawisk, wprowadzono szereg założeń upraszczających. Z tego powodu rola analizy wiarygodności zaproponowanych modeli na podstawie ich weryfikacji i walidacji jest bardzo ważna. Jedne z pierwszych istotnych modeli dla ubrań ochronnych złożonych z pojedynczych oraz z kilku warstw tkaniny opracowali i zwalidowali Torvi i Dale [1] oraz Torvi i Threlfall [2]. Zaproponowane modele uwzględniały przewodzenie ciepła oraz absorpcję promieniowania cieplnego (model bazujący na prawie Beera) w warstwach tekstylnych, zmienne właściwości termofizyczne (zależność od temperatury), termochemiczne reakcje zachodzące w tkaninach rozgrzanych do wysokich temperatur oraz wymianę ciepła w szczelinie powietrznej pomiędzy powierzchnią wewnętrzną ubrania a powierzchnią układu pomiarowego oraz przepływ ciepła w sensorze. Otrzymane wyniki symulacji numerycznych zostały porównane z wynikami uzyskanymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych dla dwóch pojedynczych tkanin. Przewidziane oraz zmierzone rozkłady temperatury w tkaninie oraz wartości kryterium Strolla (oceny występowania oparzeń drugiego stopnia) były zgodne. Podobny kondukcyjno-radiacyjny model wymiany ciepła w ubraniach ochronnych złożonych z kilku warstw tkaniny odseparowanych wąskimi szczelinami powietrznymi zaprezentowali Mell i Lawson [3]. W powyższej pracy promieniowanie cieplne było symulowane w uproszczony sposób z zastosowaniem dwustopniowego algorytmu. W warstwach tkaniny założono tylko absorpcję promieniowania cieplnego – model bazujący na prawie Beera oraz na uśrednionych właściwościach optycznych, które otrzymano w wyniku scałkowania po długości fali spektralnych właściwości optycznych. Z kolei promieniowanie cieplne w szczelinach powietrznych zamodelowano przyjmując, że znajdujący się tam gaz jest transparentny, a warstwy tkanin były traktowane jak nieskończone cieknie powierzchni, które absorbowały, emitowały i dyfuzyjnie odbijały i transmitowały promieniowanie cieplne. W pierwszej kolejności model został zweryfikowany poprzez porównanie wyników uzyskanych numerycznie z wynikami otrzymanymi analitycznie dla uproszczonego problemu jednoczesnego przewodzenia ciepła i promieniowania cieplnego w cienkiej półprzezroczystej warstwie. Następnie model został zwalidowany na podstawie porównania z wynikami uzyskanymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych dla trójwarstwowego

ubrania ochronnego. Kolejny model cieplny dla ubrań ochronnych składających się z pojedynczych warstw tkaniny nałożonych na specjalny manekin pomiarowy oraz poddanych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych krótkotrwałej ekspozycji na działanie gwałtownego pożaru opracowali Song et al. [4]. Autorzy rozważali wymianę ciepła na drodze przewodzenia ciepła i promieniowania cieplnego w podobny sposób jak w cytowanych wcześniej pracach [1-3]. Opracowany model uwzględniał charakterystykę eksperymentalnie symulowanego gwałtownego pożaru, zmiany właściwości termofizycznych tkanin i szerokości szczelin powietrznych pomiędzy ubraniem a manekinem spowodowanych wysoką temperaturą. Następnie model został zwalidowany przy wykorzystaniu pomiarów eksperymentalnych w warunkach gwałtownych pożarów wykonanych z użyciem oprzyrządowanego manekinu. W kolejnej pracy [5] przedstawiono model cieplny, który uwzględniał sprzężony przepływ ciepła na drodze przewodzenia ciepła i promieniowania cieplnego oraz transport wilgoci w wielowarstwowym strażackim ubraniu ochronnym podczas krótkotrwałej ekspozycji na działanie gwałtownego pożaru i w następującym po nim procesie chłodzenia. W tej pracy tkaniny były traktowane jako higroskopijne ośrodki porowate, które składały się z włókien tkaniny, związanej w nich wody oraz mieszaniny powietrza suchego i pary wodnej wypełniającej pory. Promieniowanie cieplne w warstwach tekstylnych było modelowane w uproszczony sposób podobnie jak w pracy [1]. Model został zwalidowany wykorzystując pomiary eksperymentalne różnych ochron osobistych ochronnych (jedno- i dwu- oraz wielowarstwowe ubranie ochronne) wykonane w różnych konfiguracjach (bez oraz ze szczeliną powietrzną). Otrzymano dobrą zgodność wyników z modelowania numerycznego z wynikami z pomiarów eksperymentalnych. Następny model wymiany ciepła w pojedynczej warstwie tkaniny ognioodpornej opracowali Ghazy i Bergstrom [6]. W porównaniu do wcześniejszych prac w bardziej zaawansowany sposób potraktowali wymianę ciepła w szczelinie powietrznej pomiędzy wewnętrzną stroną ubrania a powierzchnią skóry. Zastosowali model bazujący na prawie Beera do opisu radiacyjnej wymiany ciepła w tkaninie (eksponencjalne osłabienie padającego ze źródła radiacyjnego strumienia ciepła), natomiast w szczelinie powietrznej rozwiązali równanie transportu promieniowania metodą objętości kontrolnych. Zaproponowany model został zwalidowany poprzez symulację testów ciepłych ochron osobistych i porównanie uzyskanych wyników z wynikami pomiarów eksperymentalnych.

Uzyskano dobrą zgodność wyników. Następnie zaproponowany model został rozszerzony na trójwarstwowe ubrania ochronne, w których tkaniny były odseparowane dwiema cienkimi szczelinami powietrznymi [7]. W następnej pracy Zhu i Li [8] opracowali i zwalidowali bardzo interesujący model wymiany ciepła i masy w pojedynczych warstwach tkaniny, które w trakcie ogrzewania wysychały, a następnie podlegały procesowi pirolizy. Model opisywał zmiany właściwości termofizycznych tkanin na skutek wysokiej temperatury (pyroliza). Wiarygodność modelu została potwierdzona poprzez porównanie uzyskanych wyników numerycznych z wynikami zmierzonymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych dla pojedynczych warstw tkaniny bawełnianej. Obliczone i zmierzone rozkłady ubytku masy tkaniny, profile temperatury w tkaninie i w symulatorze skóry (sensor) oraz czasy do wystąpienia oparzeń drugiego stopnia były w dobrej zgodności. Analizę wymiany ciepła w ognioodpornej tkaninie, która przykrywała cylinder symulujący kończynę ludzką i była wystawiona na konwekcyjne oraz radiacyjne oddziaływanie płomienia przeprowadzili Zhu et al. [9]. Zaproponowany model, który uwzględniała zmiany właściwości termofizycznych tkaniny i powietrza na skutek wysokiej temperatury, bazował na modelu zaprezentowanym w pracy [1], ale w odróżnieniu od cytowanych wcześniej prac [1-8], zastosowano cylindryczny układ współrzędnych. Numerycznie przewidywane czasowe zmiany temperatury na czołowej oraz tylnej powierzchni pojedynczej warstwy tkaniny oraz na powierzchni sensora symulującego skórę były zgodne ze zmierzonymi eksperymentalnie. Interesujący zintegrowany numeryczny symulator do oceny cieplnych właściwości ochronnych tkanin został przedstawiony przez Jiang et al. [10]. Model składał się z ogólnego trójwymiarowego symulatora do obliczeń wymiany ciepła i przepływu płynu w trakcie pożaru oraz z jednowymiarowego symulatora do obliczeń przewodzonego i radiacyjnego strumienia ciepła przez ubranie ochronne oraz imitator skóry ludzkiej. Autorzy opracowali specjalne dwukierunkowe algorytmy sprzęgające oba symulatory. Następnie przeprowadzili analizę walidacyjną porównując wyniki uzyskane z symulacji numerycznej z wynikami zmierzonymi w trakcie eksperymentów benchmarkowych w pełnej skali. Przewidziane rozkłady temperatury w ubraniu ochronnym, strumienie ciepła docierające do powierzchni imitatora skóry oraz stopnie występujących oparzeń były zgodne ze zmierzonymi eksperymentalnie. Z kolei Fu et al. [11] zaprezentował model transportu ciepła i wilgoci przez wielowarstwowe ubranie ochronne ze szcze-

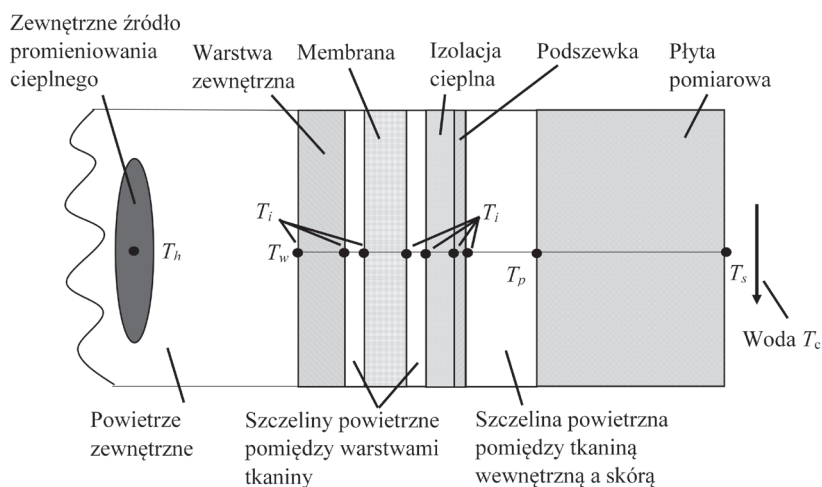
linami powietrznymi pomiędzy tkaninami, które było wystawione na długotrwałe działanie promieniowania cieplnego o niskim natężeniu strumienia ciepła. W pracy uwzględnili absorpcję promieniowania cieplnego przez wilgotny gaz wypełniający przestrzeń powietrzną oraz pory w tkaninie. Następnie z powodzeniem zweryfikowali i zwalidowali zaproponowany model. W zacytowanych pracach opracowano wiele zaawansowanych modeli transportu ciepła i wilgoci w ubraniach ochronnych poddanych działaniu konwekcyjnych i radiacyjnych strumieni ciepła. Większość autorów analizowała wiarygodność zaproponowanych modeli na podstawie porównań z rozwiązaniami analitycznymi bądź numerycznymi oraz z wynikami pomiarów eksperymentalnych.

Ostatnio Łapka et al. [12-14] zaproponowali nowy model transportu ciepła i masy w wielowarstwowych ubraniach ochronnych, na które padał zewnętrzny radiacyjny strumień ciepła emitowany przez gorący obiekt (ciało stałe lub gaz). W odniesieniu do innych prac [1-11], model opracowany w [12-14] w bardzo dokładny sposób uwzględniał obecność promieniowania cieplnego, które penetrowało ubiór ochronny. Przyjęto, że półprzezroczyste warstwy tekstylne mogły absorbować, emitować oraz anizotropowo rozpraszać promieniowanie cieplne. Dodatkowo uwzględniono różne wartości współczynników załamania światła elementów składowych ubioru ochronnego oraz złożone zjawiska optyczne występujące na granicach pomiędzy tkaninami i szczelinami powietrznymi lub pomiędzy tkaninami w przypadku braku szczelin powietrznych. Ponadto, w celu dokładnego wyznaczenia temperatur, gęstości pary wodnej oraz intensywności promieniowania cieplnego na granicach warstw ubioru ochronnego sformułowano na nich złożone warunki bilansu ciepła i masy oraz padających i emitowanych radiacyjnych strumieni ciepła. Pomimo, że opracowany model pozwalał na otrzymanie fizycznie poprawnych wyników [12-14], jego dokładność nie została udowodniona. Z tego powodu w poniższym artykule zostanie przedstawiona analiza wiarygodności zaproponowanego zaawansowanego modelu poprzez porównanie uzyskanych wyników numerycznych z wynikami pomiarów testowych na stanowisku badawczym.

2. SFORMUŁOWANIE MODELU

Model ubrania ochronnego, który był rozważany w pracy, składał się z czterech warstw: tkanina zewnętrzna, membrana oraz izolacja termiczna zintegrowana

z podszewką oraz z płyty pomiarowej stabilizującej temperaturę w trakcie eksperymentów. Tkaniny były oddzielone cienkimi szczelinami powietrznymi. Największa szczelina powietrzna była pomiędzy wewnętrzną powierzchnią tkaniny a powierzchnią płyty pomiarowej. Analizowany układ przedstawiono na rys. 1. Zewnętrzne źródło promieniowania ciepłego znajdowało się po lewej stronie, natomiast płyta pomiarowa była chłodzona konwekcyjnie przez przepływającą wodę. W zaproponowanym modelu przyjęto jednowymiarowy przepływ ciepła i wilgoci ze względu na małą grubość ubioru ochronnego w porównaniu do wymiarów poprzecznych oraz założenie o braku zmian warunków brzegowych w tych kierunkach.



Rys.1. Model ubrania ochronnego oraz stanowiska pomiarowego (gdzie: T_c , T_h , T_p , T_w , T_s i T_i to temperatury wody chłodzącej, zewnętrznego źródła ciepła, granic pomiędzy tkaninami lub tkaninami i szczelinami powietrznymi, powierzchni płyty pomiarowej, prawej oraz lewej granicy obszaru)

Źródło: opracowanie własne

2.1. Model transportu ciepła i masy w tkaninach i szczelinach powietrznych oraz w płycie pomiarowej

Pomijając konwekcję w higroskopowej porowatej tkaninie oraz w szczelinach powietrznych, zanedbując obecność swobodnej ciekłej wody w tkaninach

(tzn. uwzględniając tylko ciekłą wodę związaną z włóknami tkaniny), zakładając, że pory wypełnia powietrze wilgotne (powietrze suche jest nieruchome, wilgoć może dyfundować) oraz przyjmując, że tkaniny są półprzezroczyste, równanie opisujące transport energii w ubiorze ochronnym można zapisać w następującej postaci:

$$(\rho c)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{ef} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{v-a,ef} \frac{\partial \rho_v}{\partial x} c_{p,v} T \right) + \dot{m}_{v-bw} (\Delta h_{vap} + \Delta h_{abs}) - \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad (1)$$

gdzie: pierwszy wyraz po prawej stronie reprezentuje przewodzenie ciepła w tkaninie lub w szczelinach powietrznych, drugi człon jest związany z przepływem ciepła wraz z dyfundującą parą wodną w tkaninie i szczelinach powietrznych, trzeci wyraz reprezentuje ciepło wydzielane lub pochłaniane w trakcie przejścia pary wodnej do stanu ciekłego związanego z włóknami tkaniny lub wody związanej do stanu gazowego, natomiast czwarty człon dotyczy absorpcji i emisji promieniowania cieplnego przez tkaniny (powietrze jest traktowane jako ośrodek transparentny). Wyznaczanie powyższych członów opisano szczegółowo w [5, 12-15].

Równanie ciągłości dla wody związanej w włóknach tkaniny, które opisuje procesy sorpcji i desorpcji ciekłej wody w włóknach tkaniny przyjmuje postać:

$$\frac{\partial \rho_w \varepsilon_{bw}}{\partial t} = \dot{m}_{v-bw} \quad (2)$$

Z kolei dyfuzję pary wodnej przez pory tkaniny i w szczelinach powietrznych (z uwzględnieniem przejście wilgoci do i ze stanu związanego z włóknami tkaniny) opisuje następujące równanie:

$$\frac{\partial \rho_v \varepsilon_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_{v-a,ef} \frac{\partial \rho_v}{\partial x} - \dot{m}_{v-bw} \quad (3)$$

W płycie pomiarowej uwzględniono tylko przewodzenie ciepła, dlatego równanie energii uproszczono do postaci:

$$(\rho c)_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Wielkości, które występują w równaniach (1)-(4) oznaczają kolejno: c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, D_{eff} – efektywna dyfuzyjność pary

wodnej w powietrzu, k_{eff} – efektywny współczynnik przewodzenia ciepła, m_{v-bw} – strumień masowy wilgoci przechodzącej ze stanu ciekłego związanego z włóknami tkaniny do stanu gazowego (człon ten ma zerową wartość w szczelinach powietrznych), q_r – radiacyjny strumień ciepła, T – temperatura, Δh_{abs} – ciepło sorpcji, Δh_{vap} – ciepło parowania, ε – udział objętościowy, ρ – gęstość oraz $(\rho c)_{\text{eff}}$ – efektywna pojemność cieplna. Suma udziałów objętościowych wszystkich składników w tkaninie lub szczelinach powietrznych spełnia następujący warunek: $\varepsilon_{\text{bw}} + \varepsilon_f + \varepsilon_g = 1$ lub $\varepsilon_g = \varepsilon_a + \varepsilon_v = 1$. W równaniach zaprezentowanych powyżej indeksy dolne: a, bw, f, g, p, i v odnoszą się kolejno do: powietrza suchego, wody związanej z włóknami tkaniny, suchej tkaniny, powietrza wilgotnego, płyty pomiarowej i pary wodnej. Więcej szczegółów dotyczących wyznaczania efektywnych właściwości termofizycznych oraz innych nieznanymi wielkośći, które występują w równaniach (1)-(4) można znaleźć w pracach [5, 12-15].

2.2. Radiacyjna wymiana ciepła

W pracy przyjęto, że ubranie ochronne składa się z półprzeźroczystych tkanin o spektralnych właściwościach optycznych. Z tego powodu rozkład monochromatycznej intensywności promieniowania cieplnego był dany przez następujące równanie transportu promieniowania cieplnego [16-19]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -(K_{a,\lambda} + K_{s,\lambda})I_\lambda + K_{a,\lambda}I_{b,\lambda} + \frac{K_{s,\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda \Phi_\lambda(\mathbf{s}' \rightarrow \mathbf{s}) d\Omega \quad (5)$$

gdzie: I to intensywność promieniowania cieplnego, I_b – intensywność emitowana przez ciało doskonale czarne [16], K_a i K_s – liniowe współczynniki absorpcji i rozpraszania promieniowania cieplnego, \mathbf{s} – wektor kierunkowy rozchodzenia się promieniowania cieplnego, Φ – funkcja fazowa rozpraszania (w tkaninach przyjęto rozpraszanie izotropowe), λ – długość fali promieniowania cieplnego oraz Ω – kąt bryłowy.

2.3. Warunki brzegowe, na granicach pomiędzy warstwami ubioru ochronnego oraz warunek początkowy

Założono, że promieniowanie cieplne jest obecne w warstwach tekstylnych oraz szczelinach powietrznych natomiast płyta pomiarowa jest nieprzeźro-

czysta. Dodatkowo zewnętrzne i wewnętrzne granice pomiędzy tkaninami lub tkaninami i szczelinami powietrznymi były modelowane jako transparentne, dyfuzyjnie odbijające i transmitujące padające promieniowanie ciepłe.

Przy powyższych założeniach warunki brzegowe na zewnętrznych i wewnętrznych granicach dla równań energii (1) i (4) oraz dla równania ciągłości dla pary wodnej (3) przyjmowały następującą postać:

- Lewa zewnętrzna ścianka:

$$-k_{ef} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_f - D_{v-a,ef} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_f c_{p,v} T_w + q_e + \int_0^\infty \left[q_{\lambda,f}^{in} - \bar{r}_{\lambda,f} q_{\lambda,f}^{in} - (1 - \bar{r}_{\lambda,a}) q_{\lambda,e}^{in} + \right. \\ \left. q_{\lambda,e}^{in} - \bar{r}_{\lambda,a} q_{\lambda,e}^{in} - (1 - \bar{r}_{\lambda,f}) q_{\lambda,f}^{in} \right] d\lambda = 0 \quad (6)$$

$$h_{m,e} (\rho_{v,e} - \rho_{v,w}) = -D_{v-a,ef} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_w \quad (7)$$

Intensywność promieniowania cieplnego na transparentnej granicy dla $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_f > 0$ (gdzie: \mathbf{n}_f to wektor normalny wewnętrzny do granicy rozpatrywanego obszaru) była wyznaczana w następujący sposób:

$$I_{\lambda,w} = \bar{r}_{\lambda,f} \frac{q_{\lambda,f}^{in}}{\pi} + (1 - \bar{r}_{\lambda,a}) \frac{q_{\lambda,e}^{in}}{\pi} \quad (8)$$

- Granica pomiędzy tkaniną a szczeliną powietrzną lub pomiędzy dwiema tkaninami w przypadku braku szczelin powietrznych (gdzie: L i R odpowiednio oznaczają lewą i prawą stronę granicy):

$$-k_L \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_L - D_{v-a,ef,L} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_L c_{p,v} T_i - k_R \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_R - D_{v-a,ef,R} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_R c_{p,v} T_i + \\ \int_0^\infty \left[q_{\lambda,L}^{in} - \bar{r}_{\lambda,L} q_{\lambda,L}^{in} - (1 - \bar{r}_{\lambda,R}) q_{\lambda,R}^{in} + \right. \\ \left. q_{\lambda,R}^{in} - \bar{r}_{\lambda,R} q_{\lambda,R}^{in} - (1 - \bar{r}_{\lambda,L}) q_{\lambda,L}^{in} \right] d\lambda = 0 \quad (9)$$

$$-D_{v-a,ef,L} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_L = -D_{v-a,ef,R} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right|_R \quad (10)$$

Dla granic transparentnych oraz dla $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_L > 0$ i $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_R > 0$ (gdzie: \mathbf{n}_L i \mathbf{n}_R oznaczają wewnętrzne wektory normalne do granicy skierowane w odpowiednio w lewą i prawą stronę) intensywności promieniowania cieplnego były dane następującymi zależnościami:

$$I_{\lambda,L} = \widehat{r}_{\lambda,L-R} \frac{q_{\lambda,L}^{in}}{\pi} + (1 - \widehat{r}_{\lambda,R-L}) \frac{q_{\lambda,R}^{in}}{\pi} \quad \text{i} \quad I_{\lambda,R} = \widehat{r}_{\lambda,R-L} \frac{q_{r,\lambda,R}^{in}}{\pi} + (1 - \widehat{r}_{\lambda,L-R}) \frac{q_{r,\lambda,L}^{in}}{\pi} \quad (11)$$

- Powierzchnia płyty pomiarowej:

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_a - k_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_p + \int_0^\infty [q_{\lambda,a}^{in} - \varepsilon_{\lambda,p} E_{b,\lambda}(T_p) - (1 - \varepsilon_{\lambda,p}) q_{\lambda,a}^{in}] d\lambda = 0 \quad (12)$$

$$-D_{v-a,ef} \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \Big|_p = 0 \quad (13)$$

Dla granicy nieprzeźroczystej oraz dla $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_p > 0$ (gdzie: \mathbf{n}_p to wektor normalny wewnętrzny do granicy płyty) intensywność promieniowania ciepłego była następująca:

$$I_{\lambda,p} = \varepsilon_{\lambda,p} I_{b,\lambda}(T_p) + (1 - \varepsilon_{\lambda,p}) \frac{q_{r,\lambda,a}^{in}}{\pi} \quad (14)$$

- Prawa granica obszaru obliczeniowego:

$$-k_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s = h_s (T_s - T_c) \quad (15)$$

Zewnętrzne konwekcyjne i radiacyjne strumienie ciepła docierające do powierzchni ubrania ochronnego, które występują w równaniach (6) i (8) wyznaczano z następujących zależności:

$$q_e = h_e (T_e - T_w) + h_h (T_h - T_w) + h_{m,e} (\rho_{v,e} - \rho_{v,w}) c_{p,v} T_e \quad (16)$$

i

$$q_{\lambda,e}^{in} = \varepsilon_{\lambda,h} E_{b,\lambda}(T_h) + \varepsilon_{\lambda,e} E_{b,\lambda}(T_e)$$

W powyższych równaniach indeksy dolne oraz górne: a, c, e, f, h, i, in, p, s, w, L oraz R kolejno oznaczają: powietrze, wodę chłodzącą, otoczenie, tkaniny, gorące gazy lub źródło promieniowania ciepłego, granicę, padający radiacyjny strumień ciepła, powierzchnie płyty pomiarowej, prawą i lewą stronę granicy. Z kolei E_b to emisyjność ciała doskonale czarnego [16], h i h_m – konwekcyjne współczynniki przejmowania ciepła i masy, q – strumień

ciepła, \bar{r} – półsferyczny współczynnik odbicia na granicy transparentnej [16, 18, 19] oraz ε – emisyjność.

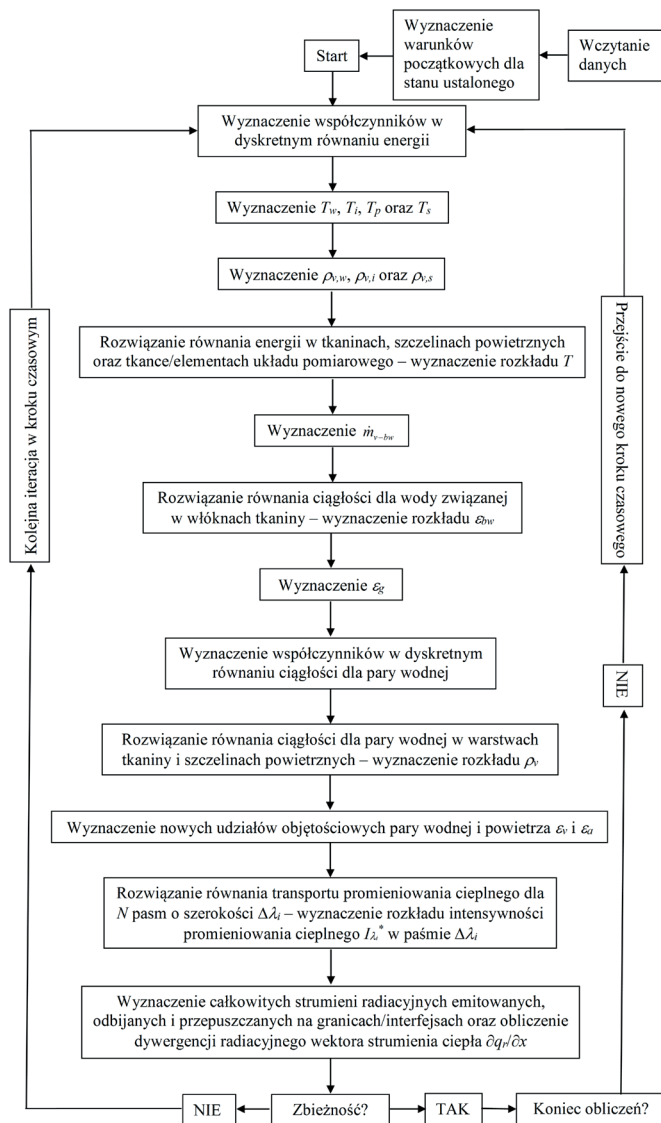
Nieznane temperatury na granicach warstw: T_w , T_i , T_p i T_s oraz nieznane gęstości pary wodnej: $\rho_{v,w}$, $\rho_{v,i}$ i $\rho_{v,p}$ były wyznaczone z warunków bilansu energii i masy podanych zależnościami (6), (9), (12) i (15) oraz (7), (10) i (13). Równania (8) i (11) zakładają *na granicy dyfuzyjne odbicie i przepuszczenie padającego promienia*, ponieważ po obu jej stronach ośrodki mają inne wartości współczynników załamania światła. Więcej szczegółów na temat modelowania promieniowania cieplnego oraz zjawisk optycznych na granicach można znaleźć w *pracach* [18-20].

Warunki początkowe dla równań (1)-(4) – rozkłady temperatury w ubraniu ochronnym, szczelinie powietrznej i płycie pomiarowej, udziały objętościowe wody związanej w tkaninach oraz gęstości pary wodnej w tkaninach i w szczelinach powietrznych – wyznaczono, przyjmując, że układ jest w równowadze z otoczeniem o temperaturze T_e i wilgotności względnej φ_e .

3. MODEL NUMERYCZNY

Równania energii (1) i (4), bilansu masy (2) i (3) oraz równanie transportu promieniowania cieplnego (5) zdyskretyzowano metodą objętości kontrolnych [21]. Równania (1)-(4) zostały scałkowane względem elementarnej długości dx oraz elementarnego przedziału czasu dt , podczas gdy równanie transportu promieniowania zostało scałkowane względem elementarnej długości dx , elementarnego kąta bryłowego $d\Omega$ i elementarnej szerokości widma promieniowania cieplnego $d\lambda$. W ten sposób otrzymano nieliniowy sprzężony układ równań dyskretnych. Nieznane temperatury na wewnętrznych i zewnętrznych granicach zostały wyznaczone numerycznie dyskretyzując metodą objętości kontrolnych nieliniowe warunki bilansowe (6), (9) i (12) oraz stosując iteracyjną metodę Newtona-Raphsona [22] wyznaczania pierwiastków funkcji. Z kolei gęstości pary wodnej na tych granicach obliczono dyskretyzując warunki bilansu masy (7), (10) i (13). W celu uwzględnienia spektralnych właściwości optycznych zastosowano model pasmowy [16].

Otrzymany w wyniku dyskretyzacji silnie nieliniowy i sprzężony układ równań dyskretnych wymagał opracowania specjalnego algorytmu rozwiązania, który został zaimplementowany w języku programowania C. Ogólny schemat autorskiego algorytmu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Ogólny schemat autorskiego algorytmu obliczeniowego

Źródło: opracowanie własne

4. WYNIKI SYMULACJI I ICH OMÓWIENIE

Najistotniejsze dane potrzebne do przeprowadzenia symulacji walidacyjnej przyjęto na podstawie pomiarów eksperymentalnych niektórych właściwości

termofizycznych tkanin [23] oraz informacji na temat warunków w jakich wykonano pomiary eksperymentalne na stanowisku badawczym z promiennikiem podczerwieni do ponadnormatywnych badań ochron osobistych [24, 25]. Prace te wykonano w ramach realizacji projektu INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych”. Pozostałe parametry np.: te związane z transportem wilgoci oraz z radiacyjną wymianą ciepła określono na podstawie obszernych studiów literaturowych [1-16] oraz informacji na stronach internetowych producentów ubrań oraz tkanin (ze względu na naukowy charakter pracy nazwy producentów nie zostały wymienione).

W tabeli 1 przedstawiono wymiary i konfigurację analizowanego pakietu ubraniowego oraz nazwy materiałów, z których były wykonane tkaniny. W tabeli 2 przedstawiono właściwości termofizyczne suchych włókien tkanin. Z kolei tabela 3 zawiera efektywne właściwości optyczne tkanin – przyjęto, że tkaniny to ośrodki szare, dla których albedo wynosi $\omega = 0.5$. Pozostałe parametry potrzebne do przeprowadzenia symulacji były następujące: $\rho_w = 998.2 \text{ kg m}^{-3}$, $c_w = 4185 \text{ J (kgK)}$, $k_w = 0.5984 \text{ W/(mK)}$ (gdzie indeks w oznacza ciekłą wodą), $k_v = 0.018 \text{ W/(mK)}$, $T_e = 28.5^\circ\text{C}$, $p = 101325 \text{ Pa}$, $\varphi_e = 0.6$, $\epsilon_e = 1.0$, $\epsilon_h = 0.0$, $h_e = 14 \text{ W (m}^2\text{K)}$, $h_h = 0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ oraz $h_m = 0.021 \text{ m/s}$. Płyta pomiarowa była wykonana z aluminium o następujących właściwościach: $\rho_p = 2800 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 913 \text{ J/(kgK)}$, $k_p = 165 \text{ W/(mK)}$ oraz $\epsilon_p = 0.1$. Płyta miała grubość $L_p = 0.012 \text{ m}$ i była chłodzona konwekcyjnie wodą o temperaturze $T_c = 32^\circ\text{C}$. Przyjęto, że współczynnik przejmowania ciepła wynosił $h_c = 100 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. W trakcie symulacji walidacyjnej zewnętrzny radiacyjny strumień ciepła, który docierał do pakietu ubrań wynosił $q_{\text{total}} = 20 \text{ kW/m}^2$, a czas ekspozycji był równy $t_e = 6.5 \text{ s}$. Były to wielkości zgodne z wartością gęstości radiacyjnego strumienia ciepła padającego na pakiet ubrań oraz czasem ekspozycji zmierzonymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych [24, 25]. Po ekspozycji pakiet ubrań był chłodzony w otoczeniu.

Tabela 1. Konfiguracja ubrania ochronnego oraz grubości warstw tkaniny – opracowanie własne.

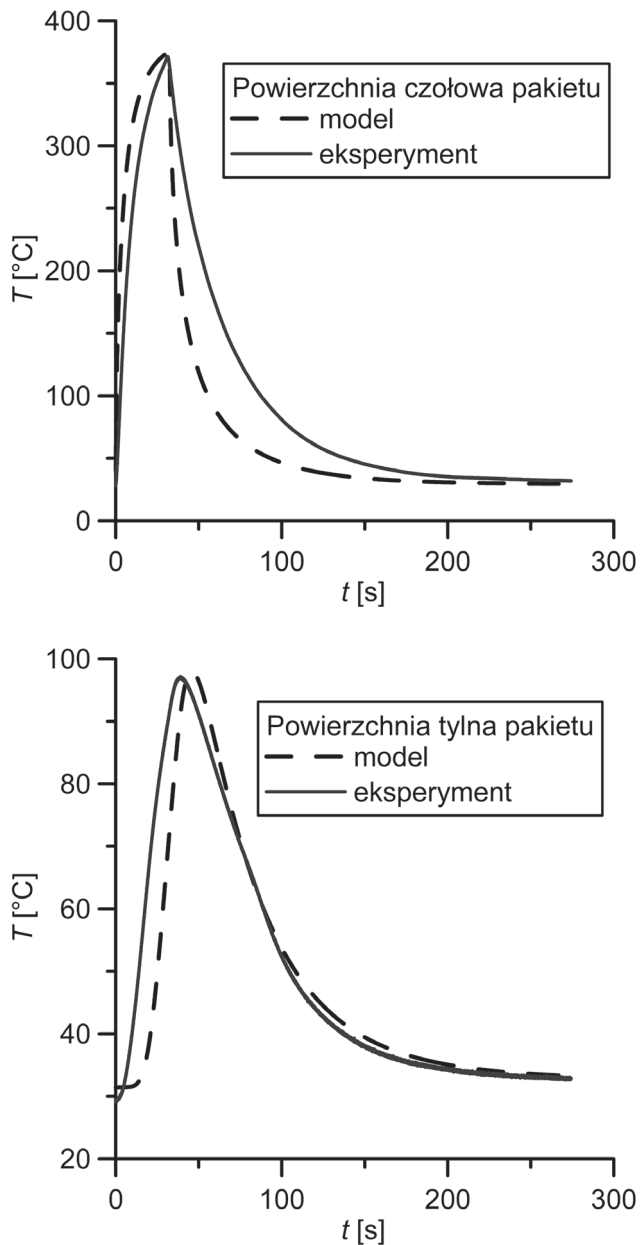
	Warstwa I (włókna aramidowe)	Szczelina powietrzna I	Warstwa II (Kevlar laminowany poliuretanem)	Szczelina powietrzna II	Warstwa III (włókna aramidowe)	Warstwa IV (wiskoza)	Szczelina powietrzna III
grubość warstwy [mm]	0,54	0,1	1,13	0,1	1,72	0,39	0,55

Tabela 2. Właściwości termofizyczne suchych tkanin (gdzie: $R_{f,\varphi=0.65}$ to zawartość wilgoci w włóknie przy wilgotności względnej $\varphi = 0.65$ w powietrzu, D_f – efektywna dyfuzyjność ciekłej wody w włóknach tkaniny, d_f – średnia średnica włókien tkaniny, τ – krętość, pozostałe wielkości wyjaśniono w tekście)

	Warstwa I: zewnętrzna (włókna aramidowe)	Warstwa II: membrana (Kevlar laminowany poliuretanem)	Warstwa III: izolacja cieplna (włókno aramidowe)	Warstwa IV: podszywka (wiskoza)
ρ_f [kg/m ³]	1340,0	1356,0	1340,0	1435,0
c_f [J/(kgK)]	1172,36	1536,26	1797,68	2017,12
k_f [W/(mK)]	0,04	0,117	0,08	0,39
ε_f	0,2965	0,0924	0,0681	0,2258
$R_{f,\varphi=0.65}$	0,04	0,045	0,04	0,075
τ	1,50	1,25	1,0	1,0
D_f [m ² /s]	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-14}$
d_f [m]	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Źródło: opracowanie własne

Wyniki symulacji – czasowe zmiany temperatury na czołowej i tylnej powierzchni pakietu wraz z wynikami otrzymanymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych przedstawiono na rys. 3. Przebiegi nie są idealnie zgodne, ale mając na uwadze złożoność zaproponowanego modelu można uznać, że symulacja dość dobrze odtwarza procesy zachodzące w badanym pakiecie ubrania ochronnego. Model przewiduje bardzo dobrze maksymalne temperatury występujące w ubraniu ochronnym. Na powierzchni czołowej podczas ogrzewania i chłodzenia otrzymano podobny charakter zmian temperatury. Różnice mogą wynikać z niewłaściwego oszacowania parametrów związanych z warunkami brzegowymi na powierzchni zewnętrznej pakietu tkanin. Z kolei na powierzchni tylnej przebiegi temperatury są bardzo podobne. Obliczona temperatura maksymalna występuje nieco wcześniej niż zmierzona. Może być to związane z niewłaściwym oszacowaniem właściwości termofizycznych tkanin.



Rys. 3. Porównanie czasowych rozkładów temperatury na czołowej i tylnej powierzchni pakietu tkanin obliczonych numerycznie ze zmierzonymi w trakcie pomiarów eksperymentalnych

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3. Właściwości optyczne tkanin (gdzie: n to współczynnik załamania światła)

Źródło: opracowanie własne

	K_a [1/m]	K_s [1/m]	n	Φ
Warstwa I	4111,76	4111,76	1,24	izotropowa
Warstwa II	3154,23	3154,23	1,06	izotropowa
Warstwa III	1387,1	1387,1	1,05	izotropowa
Warstwa IV	1387,1	1387,1	1,15	izotropowa

Oceniając wiarygodność zaproponowanego modelu, należy mieć na uwadze szereg problemów związanych z jego weryfikacją. Najistotniejsze to:

Bardzo dużo parametrów wejściowych do modelu. Niektóre z nich były bardzo trudne do oszacowania lub zmierzenia więc zostały przyjęte arbitralnie na podstawie dostępnych danych literaturowych. Jako przykład można podać szerokość szczelin powietrznych pomiędzy tkaninami – nie było możliwości wiarygodnego zmierzenia tego parametru.

W trakcie realizacji projektu badawczego INNOOS przewidziano pomiary tylko niektórych efektywnych właściwości termofizycznych tkanin. Nie wykonano pomiarów właściwości termofizycznych elementów stanowiska pomiarowego. Z tego powodu potrzebne brakujące dane dla tkanin i elementów układu pomiarowego przyjęto na podstawie studiów literaturowych.

W badanym układzie występował bardzo duży zakres temperatur. W trakcie modelowania przyjęto stałe średnie wartości właściwości termofizycznych i optycznych, ale większość z nich silnie zależy od temperatury. Dodatkowo wysokie temperatury mogą prowadzić do zmian właściwości termofizycznych i optycznych oraz struktury tkanin na skutek reakcji termochemicznych, których nie uwzględniono w modelu.

Nie wszystkie procesy transportu energii zostały zamodelowane np.: pominięto konwekcję w tkaninie, przemiany chemiczne czy oddziaływanie powietrza wilgotnego z promieniowaniem cieplnym.

Przeprowadzone pomiary eksperymentalne [24] nie miały cech typowych eksperymentów walidacyjnych [26] z powodu braku ścisłej separacji układu oraz kontroli wszystkich parametrów. Dlatego wystąpiły trudności z dokładnym odtworzeniem warunków początkowych oraz brzegowych.

Zakres tematyczny projektu INNOOS nie przewidywał wykonania stanowisk do weryfikacji model obliczeniowych, więc do uwiarygodnienia zaproponowanego modelu obliczeniowego wykorzystano zbudowane w ramach projektu stanowisko do ponadnormatywnych badań ochron osobistych [25], które nie pozwalało na przeprowadzenie pomiarów w ściśle kontrolowanych warunkach.

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono zaawansowany model transportu ciepła i masy w wielowarstwowych ubraniach ochronnych poddanych działaniu wysokiej temperatury otoczenia lub dużych radiacyjnych strumieni ciepła emitowanych przez gorące ciała. Zaproponowany model uwzględniał przewodzenie ciepła i promieniowanie cieplne w warstwach tkaniny o spektralnych właściwościach optycznych i w transparentnych szczelinach powietrznych oraz transport energii związany z dyfuzją wilgoci oraz z procesami sorpcji i desorpcji ciekłej wody w włóknach tkaniny. Model bardzo dokładnie traktował granice warstw ubioru ochronnego, na których sformułowano złożone warunki bilansu energii i masy oraz warunki optyczne. Następnie opracowano autorski algorytm numeryczny, który posłużył do rozwiązania równań modelowych.

Opracowany model poddano analizie wiarygodności poprzez porównanie otrzymanych wyników z wynikami przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych dla wybranego ubrania ochronnego. W modelu obliczeniowym odtworzono warunki występujące w trakcie pomiarów na stanowisku badawczym oraz oszacowano wszystkie niezbędne właściwości termofizyczne i optyczne tkanin oraz innych elementów układu pomiarowego. Następnie wykonano symulacje numeryczne. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami, które zmierzono w trakcie eksperymentów. Opracowany model przewidywał taki sam zakres maksymalnych temperatur oraz odtwarzał ten sam charakter zmian czasowych temperatury na czołowej i tylnej powierzchni ubioru. Biorąc pod uwagę, że wykonane eksperymenty nie miały charakteru typowych eksperymentów walidacyjnych (stanowiska opracowano w celu ponadnormatywnych badań ochron osobistych), można uznać, że przeprowadzona walidacja potwierdziła wiarygodność zaproponowanego zaawansowanego modelu numerycznego.

LITERATURA

- [1] Torvi D. A., Dale J. D.: *Fire Technology* 1999, nr 35, s. 210-231.
- [2] Torvi D. A., Threlfall T. G.: *Fire Technology* 2006, nr 42, s. 27-48.
- [3] Mell W. E., Lawson J. R.: *Fire Technology* 2000, nr 35, s. 39-68.
- [4] Song G., Barker R. L., Hamouda H., Kuznetsov A. V., Chitrphiromsri P., Grimes R. V.: *Textile Research Journal* 2004, nr 74, s. 1033-1040.
- [5] Song G., Chitrphiromsri P., Ding D.: *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 2008, nr 14, s. 89-106.
- [6] Ghazy A., Bergstrom D. J.: *Numerical Heat Transfer Part A* 2010, nr 58, s. 702-724.
- [7] Ghazy A., Bergstrom D. J.: *Numerical Heat Transfer Part A* 2012, nr 61, s. 569-593.
- [8] Zhu F., Li K.: *Fire Technology* 2011, nr 47, s. 801-819.
- [9] Zhu F., Zhang W., Song G.: *Fire Safety Journal* 2008, nr 43, s. 401-409.
- [10] Jiang Y. Y., Yanai E., Nishimura K., Zhang H., Abe N., Shinohara M., Wakatsuki K.: *Fire Safety Journal* 2010, nr 45, s. 314-326.
- [11] Fu M., Yuan M. Q., Weng W. G.: *International Journal of Thermal Science* 2015, nr 96, s. 201-201.
- [12] Łapka P., Furmański P., Wiśniewski T. S.: *Journal of Physics: Conference Series* 2016, nr 676, s. 012014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wiśniewski T., Furmański P., Łapka P.: Problemy związane z oceną ochron osobistych poddanych obciążeniu cieplnemu, *Problemy monitoringu eksploatacji sprzętu i wyposażenia w Straży Pożarnej*, 2015, s. 85-106.
- [16] Howell J. R., Siegel R., Mengüç M. P.: *Thermal Radiation Heat Transfer*, CRC Press, Boca Raton 1992.
- [17] Łapka P., Furmański P.: *Journal of Heat Transfer* 2010, nr 132, s. 023504

- [18] Łapka P., Furmański P.: International Journal of Heat and Mass Transfer 2012, nr 55, s. 4941-4952.
- [19] Łapka P., Furmański P.: International Journal of Heat and Mass Transfer 2012, nr 55, s. 4953-4964.
- [20] Seredyński M., Łapka P., Banaszek J., Furmański P.: International Journal of Heat and Mass Transfer 2015, nr 90, s. 790-799.
- [21] Versteeg H. K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Pearson Education Ltd, Harlow 2007.
- [22] Ferziger J. H., Peric M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin 2002.
- [23] Pietrak K., Kubiś M., Wiśniewski T. S.: Badanie właściwości cieplnych materiałów ochron osobistych, Zeszyty Naukowe SGSP 2016 – w druku.
- [24] Bugaj M. A., Cieślíkiewicz Ł., Wiśniewski T. S. : Badania materiałów odzieży ochronnej będącej w kontakcie z ciałami o podwyższonej temperaturze, Zeszyty Naukowe SGSP 2016 – w druku.
- [25] Roguski J., Błogowski M., Kubis D.: Safety and Fire Technique 2015, nr 39, s. 43-57.
- [26] Banaszek J.: Credibility analysis of computer simulation of complex heat transfer problems, Conference Proceedings of the Numerical Heat Transfer 2005 – Eurotherm Seminar No. 82, 2005, nr 1, s. 141-161.

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.