

**dr. inż. Tatiana Kostenko**

**prof. dr hab. Sergej Pozdejew**

*Czerkaski Instytut Bezpieczeństwa Pożarowego nazwany Bohaterami  
Czarnobylu (Czerkasy, Ukraina)*

**prof. dr hab. Wiktor Kostenko**

**dr inż. Darja Makejewa**

*Doniecki Narodowy Uniwersytet Techniczny (Pokrovsk, region Doniecki, Ukraina)*

## **Modelowanie obciążenia cieplnego ratowników podczas pożaru w zbiorniku z produktami naftowymi**

### **Abstrakt**

W artykule, wykorzystując model matematyczny, dokonano analizy rozkładów temperaturowych na powierzchni wyposażenia ochronnego i ciała ratownika w czasie palenia się zbiornika z produktami naftowymi. Wykazano orientacyjne usytuowanie strefy najwyższej temperatury nagrzania, występującej w odległości od 11 do 17 m od zbiornika z pożarem. Stwierdzono, że powierzchnia ciała ratownika w ciągu 20 min oddziaływania pożaru w warunkach jego największego rozwoju rozgrzewa się do temperatury 56,38°C. Najbardziej nagrzanymi częściami ciała są okolice obojczyka, gdyż tam znajduje się tarczyca, która odpowiada za termoregulację organizmu; część głowy znajdująca się pod hełmem i przednie części stóp.

**Słowa kluczowe:** matematyczne modelowanie, temperaturowe rozkłady, pożar w zbiorniku z produktami naftowymi

## **Modeling of Thermal Load on Rescuers During a Fire in a Tank With Oil Products**

### **Abstract**

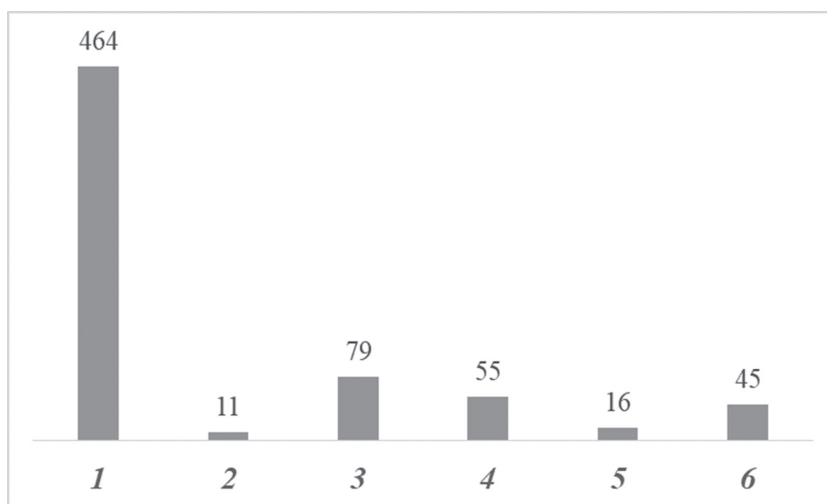
On the basis of the mathematical model the article considers the temperature distributions on the surfaces of protective equipment and the rescuer's body during the combustion tank with oil. It has been revealed that the approximate maximum

heating zone temperature is at a distance of 11 to 17 m from the tank with fire. It has been established that the body surface of a rescuer for 20 minutes of exposure to a fire, under the condition of its greatest development, is heated to the highest temperature of 56.38 °C. The most heated parts of the rescuer's the body is the front of the head under the fire helmet, the front of the feet and the area of the collarbone where he the thyroid gland is situated. It is highly responsible for the body thermoregulation.

**Keywords:** mathematical modeling, temperature distributions, fire in a tank with oil products

## 1. Wprowadzenie

Požary w zbiornikach produktów naftowych należą do jednych z największych, skomplikowanych i niebezpiecznych rodzajów sytuacji nadzwyczajnych. W składach paliwowych znajdują się znaczne ilości paliw płynnych, dlatego podczas pożaru wydzielają się setki tysięcy metrów sześciennych gazów, a także ogromna energia cieplna. Likwidacja pożaru w takich warunkach wymaga znacznej ilości środków gaśniczych oraz dużych zasobów ludzkich potrzebnych do jego stłumienia. To powoduje wysokie ryzyko wypadków wśród osób uczestniczących w działaniach ratowniczych (rys. 1). Statystyki pokazują, że w takich wypadkach mamy do czynienia z występowaniem znacznej liczby obrażeń cieplnych, takich jak oparzenia, udary cieplne, przegrzanie organizmu, utrata przytomności, a niekiedy wypadki śmiertelne [1]. Dlatego tak ważne i aktualne są badania ukierunkowane na zapewnienie bezpieczeństwa ratowników podczas gaszenia pożarów w zbiornikach produktów naftowych. Przeprowadzenie prac eksperymentalnych mających na celu zbadanie uwarunkowań cieplnych, w skali rzeczywistej, jest bardzo kosztowne, dlatego symulacja z wykorzystaniem współczesnych metod matematycznych pozostaje jedynym sposobem odzwierciedlenia sytuacji awaryjnej.



**Rys. 1. Liczba wypadków ratowników Państwowej Służby Ukrainy ds. Sytuacji Nadzwyczajnych w latach 2005-2017**

Obrażenia: 1 –mechaniczne, 2 – elektryczne, 3 – termiczne, 4 – chemiczne, 5 – w wyniku działań antyterrorystycznych w Ukrainie, 6 – inne.

Źródło: opracowanie własne

## 2. Analiza najnowszych badań i cel pracy

Istnieje znaczna liczba badań poświęconych teoretycznemu poznaniu procesów cieplnych zachodzących podczas gaszenia pożaru w systemie „źródło energii cieplnej – przestrzeń wokół ratownika – odzież ochronna – organizm ludzki” (ZPOCz). Najczęściej jednak rozpatruje się część elementów systemu, przykładowo, „zbiornik – płomień pożaru – podłoże” lub „płomień pożaru – wyposażenie ochronne” [2–4]. Szereg prac poświęconych jest zagadnieniom wymiany ciepła w odzieży ochronnej strażaków pod wpływem promieniowania cieplnego [5–8].

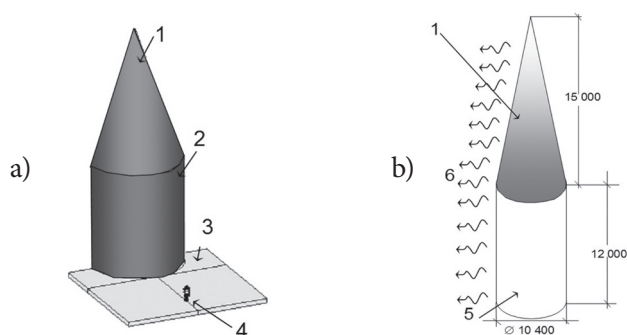
Celem artykułu jest opracowanie metodycznych rozwiązań dla matematycznego modelowania ekstremalnego zewnętrznego obciążenia cieplnego na ratownika w systemie „źródło energii cieplnej – przestrzeń wokół pożaru – odzież ochronna – organizm ludzki” oraz określenie jakościowych i ilościowych zależności dynamiki temperatur w elementach tego systemu przy gaszeniu palących się zbiorników z produktami naftowymi

### 3. Wyniki modelowania

Jednym ze współczesnych sposobów badania skomplikowanych systemów jest matematyczne modelowanie za pomocą programów stosowanych, pozwalających rozwiązać złożone układy równań, w szczególności metody elementów skończonych w mechanice ciała stałego, w tym przypadku za pomocą programu ANSYS 9.0 [9]. W artykule podjęto próbę wykorzystania tej metody dla przebadania w statyce i dynamice procesów przekazywania ciepła w układzie „źródło energii cieplnej – przestrzeń wokół ratownika (strażaka) – odzież ochronna – organizm ludzki”. Należy zauważyć, że nie uwzględniono generowania ciepła fizjologicznego, dlatego uzyskane wyniki mogą być wzorcowe, jednakże wyraźnie odzwierciedlają poziom zewnętrznego obciążenia cieplnego i dynamikę ich zmian.

Scenariusz pożaru przewiduje wariant, gdy palącym się produktem naftowym jest benzyna, wówczas temperatura płomienia wynosi 1127 K.

Źródłem cieplnego oddziaływania podczas modelowania jest płomień pożaru nad zbiornikiem, posiadający parametry geometryczne odpowiadające modelowi przedstawionemu na rys. 2. Na rysunku tym przedstawiono wzajemne usytuowanie ciała ratownika i płomienia pożaru (rys. 2a), co pozwala poznać cieplne oddziaływanie przy różnych odległościach między płomieniem i ciałem. Geometryczne parametry płomienia pożaru nad zbiornikiem modelowano zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 2b.

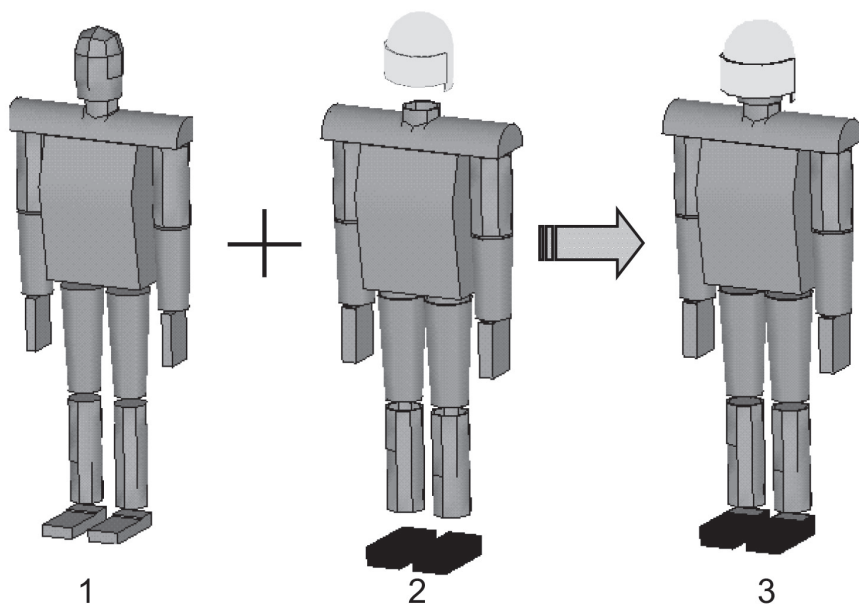


**Rys. 2. Schemat obszarów modelowania cieplnego oddziaływania pożaru na ratownika** – a, geometria usytuowania płomienia nad zbiornikiem z pożarem – b: 1 – płomień pożaru, 2 – zbiornik, 3 – podłoże, 4 – ratownik, 5 – ścianka zbiornika, 6 – promieniowanie energii cieplnej.

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 3 pokazano geometryczną konfigurację modelu obliczeniowego ciała ratownika. Zasadnicze elementy ciała są traktowane rozłącznie, aby zmniejszyć objętość obliczeń i wyeliminować szczegóły, których obecność nie wpływa na dokładność obliczeń. Istotna jest również obecność, oprócz ubrania ochronnego, butów strażackich i hełmu strażackiego, które również przedstawiono na rys. 3. Taki układ modelu obliczeniowego jest zasadniczo nowy, jednak istotnie poszerza możliwości badań termodynamicznych procesów w każdym oddzielnym elemencie systemu (ZPOCz) dla różnych jego stanów.

Przy modelowaniu obliczeniowych części ciała ratownika przyjęto uśrednione rozmiary wyposażenia bojowej odzieży zgodnie ze standardem [10]. Uśrednione rozmiary są następujące – grubość wyposażenia pożarowego dla modelowania obliczeniowych obszarów (mm): ubrania ochronnego – 8; hełmu – 5; butów strażackich – 3. Przyjęta grubość wyposażenia podobna jest do wielu współczesnych ubrań ciepłochronnych, przykładowo typu TK-800 lub USP 2-2.



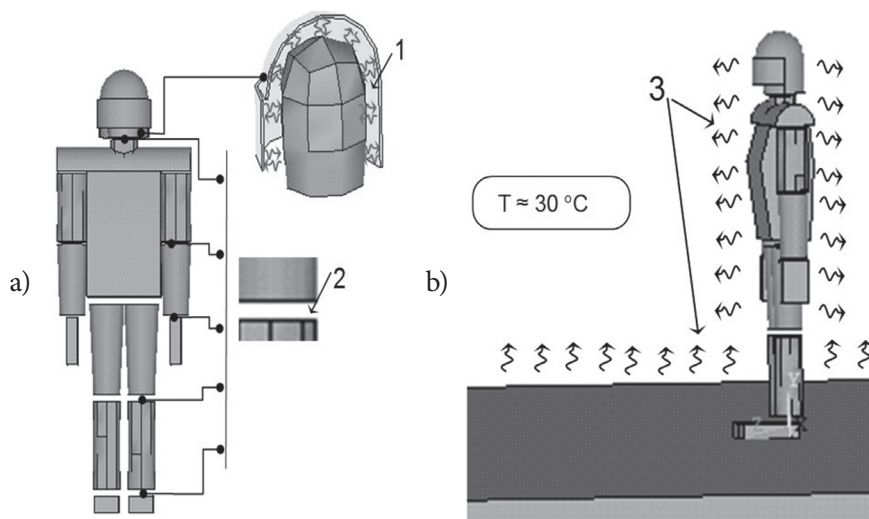
**Rys. 3. Topologia obliczeniowych obszarów ciała ratownika, wykorzystywanych dla modelowania oddziaływania cieplnego pożaru: 1 – ciało ratownika, 2 – wyposażenie ochronne, 3 – ratownik w wyposażeniu ochronnym.**

Źródło: opracowanie własne

Na ciało ratownika oddziałuje zewnętrzne ciepłe promieniowanie płomienia pożaru, a także odbite od podłoża oraz promieniowanie nagrzaną powierzchni podłoża. Fizjologiczne obciążenie ciepłe ratownika podczas modelowania nie zostało uwzględnione, co powoduje uzyskanie zaniżonych wyników obliczeń temperatury w przestrzeni pod ubraniem roboczym, ale jakościowe wskaźniki i dynamika ich zmian są poprawne.

Podczas rozpatrywania ciepłego oddziaływania promieniowania zakłada się, że między wewnętrzną powierzchnią hełmu i powierzchnią głowy występuje również ciepłe promieniowanie, jak pokazano to na rys. 4. Zgodnie z tym schematem, powierzchnie połączenia kończyn ratownika posiadają zerową wymianę ciepłą, co pozwala nie uwzględniać tego w zakresie obliczeń.

Oprócz promieniowej wymiany ciepłej, uwzględniono również konwekcyjne chłodzenie wyposażenia ochronnego ratownika i powierzchni podłoża, przy przepływie chłodniejszego powietrza otoczenia. Na rys. 4b schematycznie pokazano, że powierzchnie chłodzone są przez chłodniejsze powietrze otoczenia.



**Rys. 4. Model wymiany ciepłej pomiędzy powierzchniami wyposażenia ochronnego i ciała ratownika – a oraz konwekcyjnego chłodzenia wyposażenia ochronnego strażaka-ratownika i podłoża – b: 1 – promieniowanie ciepłe pomiędzy wewnętrzną powierzchnią hełmu i powierzchnią głowy, 2 – zerowa wymiana ciepła pomiędzy powierzchniami połączenia kończyn, 3 – chłodzenie konwekcyjne**

Źródło: opracowanie własne

W przypadku gdy temperatura powietrza przewyższa temperaturę powierzchni wyposażenia ratownika, nie następuje ochłodzenie, a konwekcyjne nagrzewanie podsystemu „otoczenie – odzież ochronna – ciało ratownika”.

Wyjściowe dane, wykorzystywane zgodnie [11–14] dla określenia warunków brzegowych w podsystemie „płomień pożaru – podłoże” przy wykonaniu obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

Korzystając z podanych założeń, przyjęto model matematyczny przeniesienia ciepła, który opiera się na niestacjonarnym równaniu cieplnym [15]:

$$\frac{\alpha\theta}{\alpha t} = \frac{\lambda}{C_p\rho} \left( \frac{\alpha^2\theta}{\alpha x^2} + \frac{\alpha^2\theta}{\alpha y^2} + \frac{\alpha^2\theta}{\alpha z^2} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$\theta$  – temperatura, °C;

$t$  – czas, c

$\lambda$  – współczynnik przewodności cieplnej, Wt/(m · °C);

$C_p$  – ciepło właściwe, J/(kg · °C);

$\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>.

Zgodnie z przyjętymi modelami wymiany ciepła, warunki brzegowe zostały ustalone na granicach obliczonych obszarów. Wymiana ciepła odbywa się poprzez wymianę promieniowania cieplnego pomiędzy płomieniem.

Promienną wymianę ciepła pomiędzy odpowiednimi powierzchniami uwzględnia się przez rozwiązanie całkowitego równania [9]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (2)$$

gdzie:

$\delta_{ij}$  – parametr równy 0, jeśli  $i \neq j$ , ta równy 1, jeśli  $i = j$ ;

$q_j$  – strumień ciepła powierzchni przez  $i$ -tą powierzchnię, która wymienia promieniowanie z  $j$ -tą powierzchnią;

$\varphi_{ij}$  – form factor, w zależności od względnego położenia  $i$ -tej i  $j$ -tej powierzchni, które są wymieniane przez promieniowanie i są określone wzorem:

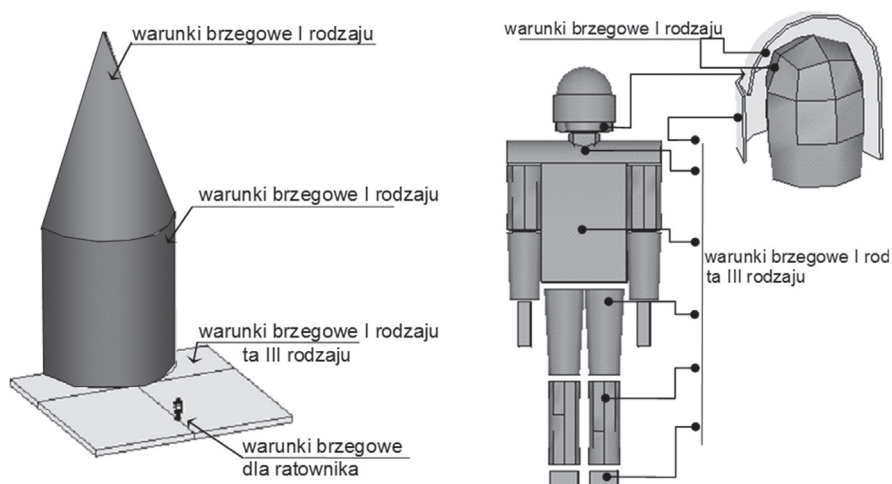
$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (3)$$

We wzorze (3) stosuje się następujące wartości:

$\beta$  – kąt między normalnym elementem a linią łączącą elementy  $i$  i  $j$ ;

$r$  – odległość między środkami elementów  $i$  i  $j$ .

Zgodnie z założeniami, ustalono warunki brzegowe na powierzchniach obliczonych obszarów, jak pokazano na rys. 5.



**Rys. 5. Schemat narzucania warunków brzegowych w formułowaniu zadania przenikania ciepła na powierzchni zbiornika oraz głębie i powierzchnię korpusu kominka z wyposażeniem**

Źródło: opracowanie własne

Według rys. 5 warunki brzegowe nałożone są rejestrowane w formie [16]:

$$\text{WB I rodzaju } \theta_{x,z} = \theta_s \quad (4)$$

$$\text{WB III rodzaju } \lambda(\theta) \frac{\alpha \theta}{\alpha r} = \alpha(\theta_A - \theta_s), \quad (5)$$



gdzie:

$\alpha$  – współczynnik przenikania ciepła konwekcyjnego,  $Wt/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$\theta_A, \theta_s$  – odpowiednio, temperatura otaczającego środowiska i powierzchni związane z wymianą ciepła,  $^\circ C$ ;

$r$  – aktualna współrzędna przestrzenna, m.

**Tabela 1. Wyjściowe dane dla obliczeń rozkładu temperaturowego w podsystemie „płomień pożaru-podłóże”**

Temperatura, $^\circ C$				Stopień czarności		
podłóża (początkowa)	ścianki zbiornika z pożarem	otoczenia	płomienia pożaru nad zbiornikiem	powierzchni ścianki zbiornika	powierzchni podłóża	płomienia
30	225	30	benzyna	0,9	0,8	1
			1127			

Źródło: opracowanie własne

Wyjściowe dane, wykorzystane zgodnie z [13] dla określenia brzegowych warunków w podsystemie „płomień pożaru-ciało ratownika” przy wykonanych obliczeniach zamieszczono w tabeli 2.

Termofizyczne własności materiałów podłóża i zbiornika z pożarem można przyjąć według rekomendacji [17–18]. Zgodnie z nimi, przyjęto termofizyczne parametry, które przedstawiono w tabeli 3.

Termofizyczne własności tkanek ludzkich i materiałów wyposażenia ochronnego ratownika, można przyjąć według rekomendacji [12]. Zgodnie z nimi, przyjęto termofizyczne parametry, które przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 2. Wyjściowe dane dla obliczeń rozkładu temperaturowego w podsystemie „płomień pożaru-ciało ratownika”**

Temperatura początkowa $^\circ C$				Stopień czarności powierzchni			Współczynnik przenikania cieplnego przy konwekcyjnej wymianie ciepłej, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
ciała ratownika	powierzchni hełmu	ubrania ochronnego	butów ratownika	butów ratownika	ubrania ochronnego	powierzchni hełmu	
37	25			0,8			9

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 3. Termofizyczne parametry materiału zbiornika i podłoża**

Współczynnik przewodności cieplnej, $\lambda(T)$ , $W/(m \cdot ^\circ C)$	Ciepło właściwe, $c_p(T)$ , $J/kg \cdot ^\circ C$	Gęstość, $kg/m^3$
Termofizyczne parametry stali		
$\lambda = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2}T$ dla $20^\circ C \leq T \leq 800^\circ C$ $\lambda = 27,3$ dla $800^\circ C < T \leq 1200^\circ C$	$c_p = 425 + 0,773T - 1,69 \cdot 10^{-3}T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}T^3$ dla $20^\circ C \leq T \leq 600^\circ C$ $c_p = 666 - 13002(T-738)^{-1}$ dla $600^\circ C < T \leq 735^\circ C$ $c_p = 545 - 17820(T-731)^{-1}$ dla $735^\circ C < T \leq 900^\circ C$ $c_p = 650$ dla $900^\circ C < T \leq 1200^\circ C$	7850
Termofizyczne parametry podłoża		
1,2	900	2300

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 4. Termofizyczne parametry materiału zbiornika i podłoża**

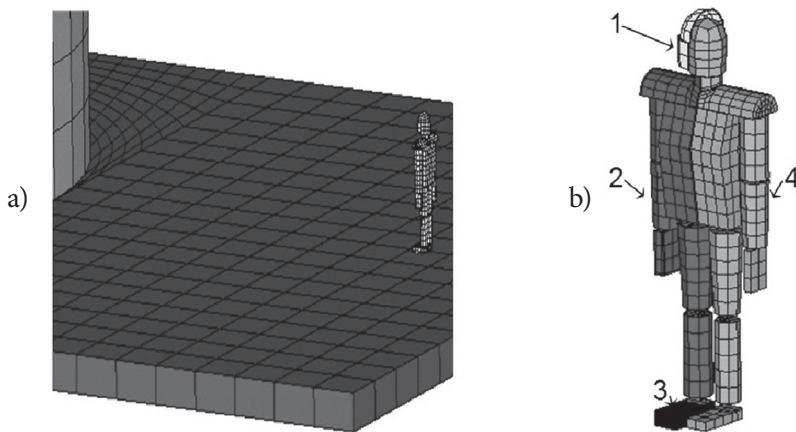
Współczynnik przewodności cieplnej, $\lambda(T)$ , $W/(m \cdot ^\circ C)$	Ciepło właściwe, $c_p(T)$ , $J/kg \cdot ^\circ C$	Gęstość, $kg/m^3$
Uśrednione termofizyczne parametry tkanek ludzkich		
0,48	3350	1036
Termofizyczne parametry materiału kombinezonu ochronnego ratownika (brezent)		
0,06	1200	750
termofizyczne parametry materiału hełmu ratownika (poliwęglan)		
0,161	1100	1200
termofizyczne parametry materiału podeszwy butów ratownika (skóra)		
0,16	1000	1000

Źródło: opracowanie własne

Z wykorzystaniem wyszczególnionego powyżej aparatu matematycznego opracowano obliczeniową metodykę z wykorzystaniem opisanych powyżej scenariuszy pożaru. Zgodnie z obliczeniową metodyką, wyliczenia przeprowadza się przy spełnieniu następujących procedur.

1. Budowa modelu geometrycznego uwzględniającego warunki brzegowe zgodnie z rys. 1–3.
2. Organizacja cyklu w trakcie którego następują zmiany wynikające z oddziaływania pożaru.
3. Czas oddziaływania termicznego pożaru wynosi 60 min, ponieważ wstępne obliczenia wykazały, że proces cieplny dla tego czasu ustala się jako stały.
4. Obliczenia powtarza się dla zbiornika o innym scenariuszu termicznego oddziaływania od pożaru.
5. Rozważając różne scenariusze pożaru zmienia się odległość ratownika od zbiornika z pożarem, a także stopień czarności podłoża.

Dla realizacji takiego algorytmu utworzono schematy układów elementów skończonych, które pokazano na rys. 6.



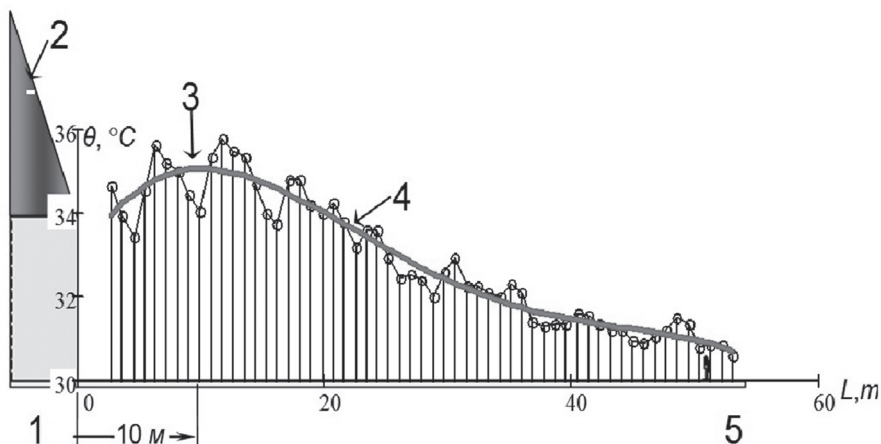
**Rys. 6 Modele elementów skończonych wzajemnego oddziaływania cieplnego między płomieniem pożaru nad zbiornikiem, podłożem i ciałem ratownika w wyposażeniu ochronnym; a wzajemne rozmieszczenie elementów skończonych podstawowych obliczeniowych obszarów i usytuowanie ratownika; b model elementów skończonych ciała ratownika: 1 – maska ochronna, 2 – kombinezon ochronny, 3 – buty ochronne, 4 – ciało ratownika**

Źródło: opracowanie własne

Wyniki obliczeń wskazują, że powierzchnia podłoża wokół zbiornika przegrzewa się nieznacznie, maksymalnie o  $7^{\circ}\text{C}$  w pobliżu zbiornika i  $5^{\circ}\text{C}$  w maksymalnej strefie nagrzania w określonej odległości od zbiornika. Na rys. 7 przedstawiono wykres rozkładu temperatury w kierunku promieniowym od zbiornika.

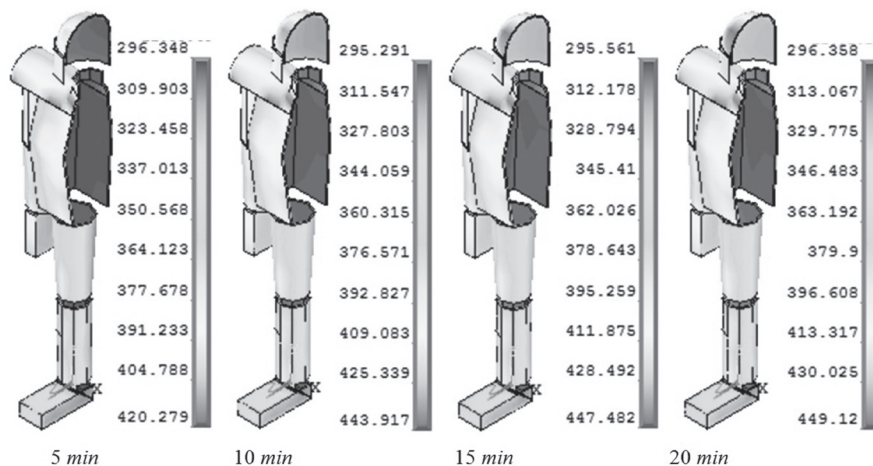
Na rys. 7 przedstawiono krzywą łamaną ze względu na nierównomierne rozwiązania równania promieniowej wymiany ciepłej dla powierzchni elementów skończonych, których rozkład jest również nierównomierny.

W celu bardziej szczegółowej analizy, skonstruowano rozkłady temperatur na powierzchni wyposażenia ochronnego ratownika dla takiego samego przedziału czasowego. Otrzymane rozkłady temperatury zamieszczono na rys. 8. Wyniki obliczeń są prezentowane z odstępem 5 min w czasie 20 min i odległości 10 m od zbiornika. Obliczenia temperatur w większym przedziale czasu nie przedstawiono, ponieważ, jak pokazują dalsze obliczenia, w środku ubrania ochronnego pojawia się temperatura krytyczna  $50^{\circ}\text{C}$  i pracę ratownika należy natychmiast wstrzymać.



**Rys. 7. Rozkład temperatury powierzchni podłoża w kierunku promieniowym od zbiornika w czasie 20 minut trwania pożaru nad nim: 1 – zbiornik, 2 – płomień pożaru, 3 – maksymalna temperatura w odległości od zbiornika, 4 – linia regresji, 5 – ratownik**

Źródło: opracowanie własne



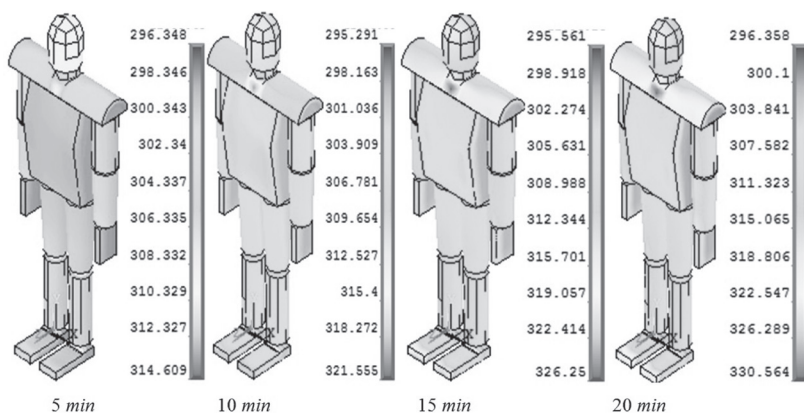
**Rys. 8. Dynamika rozkładu temperatury (K) na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni okrycia ochronnego w odległości 10 m od źródła ognia**

Źródło: opracowanie własne

Na przedstawionych rozkładach można zauważyć, że najbardziej nagrzana strefa na powierzchni wyposażenia ochronnego znajduje się w obszarze klatki piersiowej w okolicach obojczyka. Intensywne rozgrzanie się tej części ciała jest szczególnie niebezpieczne, gdyż w tej okolicy znajduje się tarczyca, która odpowiada za termoregulację organizmu. W związku z tym, ta część ciała wymaga szczególnych środków ochrony przed oddziaływaniem cieplnym.

Również bardziej rozgrzaną strefą, w porównaniu z innymi, jest strefa przedniej części hełmu strażackiego. Jest ona bezpośrednio zbliżona do mózgu, podstawy ośrodkowego układu nerwowego, którego nagrzanie podnosi ryzyko odczuwania termicznego przez ratownika. W tym miejscu również potrzebna jest większa ochrona przed zewnętrznym obciążeniem cieplnym.

Wybrane podejście metodyczne do modelowania systemu ZPOCz pozwala rozpatrzyć dynamikę temperatury poszczególnych jej elementów, na przykład ciała ratownika, ubranego w ubranie termo-ochronne. Na rys. 9 przedstawiono wyniki obliczeń na powierzchni ciała ratownika pod wyposażeniem ochronnym w różnym przedziale w odległości 10 m od zbiornika.



**Rys. 9. Dynamika rozkładu temperatury (K) na powierzchni ciała ratownika w odległości 10 m od zbiornika z ogniem**

Źródło: opracowanie własne

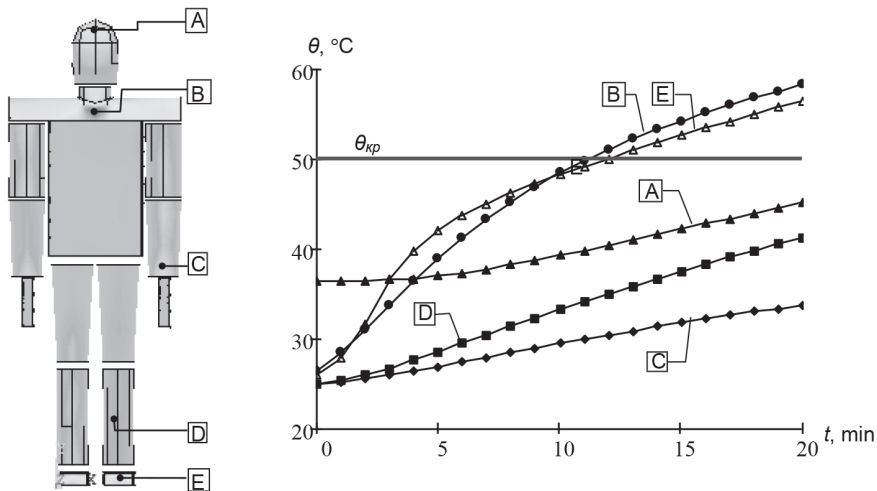
Na przedstawionych rozkładach można zauważyć, że najbardziej nagrzana strefa na powierzchni ciała ratownika znajduje się w obszarze klatki piersiowej okolicy obojczyka. Również bardziej nagrzaną strefą w porównaniu z innymi jest strefa przedniej części głowy pod hełmem i przednie części stóp.

Analiza temperaturowych rozkładów w ciele ratownika wykazała, że proces jego nagrzewania zachodzi w kilku etapach. W pierwszym etapie, do 7 min, powierzchnia ciała ratownika pod wyposażeniem ochronnym jest niższa od temperatury jego wewnętrznych warstw, co można zauważyć na rys. 8 i 9 w dowolnym czasie oddziaływania cieplnego pożaru do 5 min. W kolejnym etapie powierzchnia ciała ma temperaturę przekraczającą temperaturę warstw wewnętrznych, która nie przekracza niebezpiecznej wartości  $50^{\circ}\text{C}$ , co pozwala ratownikowi znajdować się w określonej sytuacji.

Analiza najbardziej rozgrzanych powierzchni ciała ratownika na ostatnim etapie wykazała, że najbardziej ogrzewanym obszarem jest okolica obojczyka. W odległości 10 m od zbiornika maksymalna temperatura nagrzania powierzchni ciała ratownika wynosi  $57^{\circ}\text{C}$  w okolicy obojczyka, a maksymalna temperatura powierzchni ratownika wynosi  $64^{\circ}\text{C}$  w obszarze przedniej powierzchni stóp.

Dla szerszego przedstawienia procesu nagrzewania skonstruowano wykresy reżymów nagrzewania punktów powierzchni ciała ratownika w jego najbardziej negatywnych obszarach (rys. 10).

Analizując dane przedstawione na rys. 10, można wnioskować, że krytyczna temperatura  $50^{\circ}\text{C}$  dla normalnego funkcjonowania ratownika osiągnięta jest w dwóch strefach – w okolicy obojczyka i przedniej części stóp. Krytyczna temperatura osiągnięta jest w danych strefach prawie równomiernie po 12 min.



**Rys. 10. Dynamika nagrzewania się punktów powierzchni ciała ratownika w jego najbardziej nagrzanych strefach w odległości od zbiornika z ogniem 10 m.**

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Wnioski

Na podstawie analizy znanych badań uwarunkowań pożarów w zbiornikach z produktami naftowymi i niebezpiecznego wpływu zjawisk cieplnych na personel jednostek ratowniczych, opracowano kompleksowy model obliczeniowy redystrybucji ciepła w złożonym układzie „źródło energii cieplnej – przestrzeń wokół ratownika – odzież ochronna – organizm ludzki”. Wyróżniającą się cechą tego modelu w porównaniu z innymi znanymi modelami jest możliwość analizy przenikania ciepła w poszczególnych podsystemach z uwzględnieniem geometrycznych, fizyko-mechanicznych i termodynamicznych własności elementów tego podsystemu. Takie podejście metodyczne do modelowania matematycznego ekstremalnego oddziaływania cieplnego na ratowników zostało zrealizowane po raz pierwszy.

Aby wykonać u przy użyciu utworzonego modelu, zastosowano metodę elementów skończonych, co pozwoliło na zbadanie rozkładu temperatury na powierzchni wyposażenia ochronnego i powierzchni ciała ratownika, aby osiągnąć cel pracy.

3. W warunkach palenia płomieniowego produktów naftowych w zbiorniku, najbardziej nagrzanymi strefami powierzchni ciała ratownika są okolice obojczyka, gdzie znajduje się tarczyca, która odpowiada za termoregulację organizmu. Również intensywnie nagrzaną strefą, w porównaniu do innych, jest strefa przedniej części głowy pod hełmem pożarowym i przednie części stóp.
4. Dla konkretnego przypadku palenia się benzyny w zbiorniku o średnicy 10,4 m i wysokości 12 m wyjawiono szacunkowe usytuowania strefy najwyższej temperatury nagrzewania się powierzchni podłoża występującej w odległości od 3 do 17 m od zbiornika z pożarem, przy czym podłoże w ciągu 20 min nagrzewa się bardziej o 5–7°C. W odległości 10 m od zbiornika maksymalną temperaturę nagrzania powierzchni ciała ratownika zarejestrowana po 12–15 min, wynoszącą 57°C w okolicach obojczyka, a maksymalna temperaturze powierzchni ratownika wynosi 64°C w okolicy przedniej części stóp. Należy dodać, że te parametry temperatury są niedoszacowane ze względu na nie uwzględnienie fizjologicznego ciepła generowanego w organizmie.

## Literatura

- [1] Wskaźniki obrażeń przemysłowych w przedsiębiorstwach i podziałów Stanowej Służby Ratowniczej w Ukrainie w latach 2005–2016.
- [2] Б.В. Болібрux, А.А. Мичко, Моделювання теплових процесів в елементах одягу пожежника, Пожежна безпека: збірник наукових праць, ЛПБ, Львів, 2004, с. 12–20.
- [3] А.С. Лин, А.А. Мичко, А.В. Ивахов, Експериментальні дослідження за методикою полігонних випробувань оцінювання термозахисних властивостей захисного одягу пожежників, Пожежна безпека: збірник наукових праць, ЛДУ БЖД, Львів, 2012, №21, с. 205–110.
- [4] Б.В. Болібрux, Б.В. Штайн, В.В. Присяжнюк, Особливості проведення випробувань термозахисних властивостей спеціальних матеріалів захисного одягу пожежників, Збірник наукових праць. VI Всеукраїнської наукової конференції, Київ, 2006, с. 268–270.



- [5] E. Onofrei, D. Dupont, S. Petrusic, D. Soulat, G. Bedek, T.-C. Codau, Modeling of heat transfer through multilayer firefighter protective clothing, *Industria textilă*, 2014, vol. 65 , nr. 5, p. 277–282.
- [6] Ahmed Ghazy, The thermal protective performance of firefighters' clothing: the air gap between the clothing and the body, *Heat transfer engineering* 38:10, p. 975–986.
- [7] P. Łapka, P. Furmański, T.S. Wiśniewski, Numerical modelling of transient heat and moisture transport in protective clothing, *J. Phys. Conf.*, 2016, Ser. 676.
- [8] Yun Su, Jiazhen He, Jun Li, A model of heat transfer in firefighting protective clothing during compression after radiant heat exposure, *Journal of Industrial Textiles*, 2016, p. 1–9.
- [9] ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
- [10] ГОСТ Р 53264-2009 Техника пожарная. Специальная защита пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний.
- [11] ДСТУ Б В.2.6 – 183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів.
- [12] Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4;х т., Т.1. Кн.1, Наука, Москва, 1978.
- [13] EN 1991-1 – 2:2002 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1–2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2002.
- [14] В. В. Чернецький, Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами, Лівів, 2016.
- [15] А. Н. Тихонов, Уравнения математической физики, Высшая школа, Москва, 1976, 664 с.
- [16] А. А. Самарский, Введение в теорию разностных схем, Наука, Москва, 1971, 554 с
- [17] А.М. Тимофеев, О.Н. Кравцова, А.В. Малышев, Н.А. Протождяконова, Теплофизические свойства талых и мерзлых грунтов, загрязненных дизельным топливом. Вестник Самарского федерального университета им. М.К. Амосова, №2, т.8, 2011. с. 15–19.
- [18] EN 1994-1 – 2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design.