

УДК 614.895.5:621.5

МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОЖЕЖНИКА-РЯТУВАЛЬНИКА ПРИ ПОЖЕЖІ У РЕЗЕРВУАРІ З НАФТОПРОДУКТАМИ

С.В. Поздєєв¹, д-р.техн.наук, проф., Т.В. Костенко^{1*}, канд.техн.наук, В.К. Костенко², д-р.техн.наук, проф., О.Л. Зав'ялова², канд.техн.наук, доц.

¹Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, НУЦЗ України

²Донецький національний технічний університет

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 18.04.2017

Пройшла рецензування: 15.06.2017

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

математичне моделювання, температурні розподіли, пожежа у резервуарі з нафтопродуктами

АНОТАЦІЯ

Розглянуто температурні розподіли по поверхнях захисного спорядження та тіла рятувальника під час горіння резервуару з нафтопродуктами на підставі математичної моделі. Виявлено орієнтовні положення зони найбільшої температури нагрівання що знаходяться на відстані від 11 до 17 м від резервуару із пожежею. Встановлено, що поверхня тіла пожежника-рятувальника за 20 хв впливу пожежі при умові її найбільшого розвитку нагрівається до найбільшої температури 56.38 °С. Найбільш нагрітою частиною тіла рятувальника є область ключиці, саме там знаходиться щитоподібна залоза, яка відповідає за терморегуляцію організму, зона передньої частини голови під пожежним шоломом та передні частини стоп.

Актуальність. Пожежі в сховищах нафтопродуктів є одними з масштабніших, складних та небезпечних видів надзвичайних ситуацій. В резервуарних парках сконцентрована значна кількість рідкого пального, яка нараховує десятки тисяч тон речовини, тому при пожежі вилучаються сотні тисяч кубічних метрів токсичних газів, а також величезна теплова енергія. Ліквідація горіння в таких умовах потребує суттєвого об'єму вогнегасних засобів та людських ресурсів для їх подавання. Це визначає значні ризики травмування особового складу рятувальних підрозділів. Статистика свідчить про наявність значного числа теплових травм, таких як опіки, теплові удари, перегрів організму, втрати свідомості, а іноді летальні випадки [1]. Виходячи з цього, актуальними є дослідження, спрямовані на забезпечення безпеки рятувальників під час гасіння пожеж в сховищах нафтопродуктів. Провести повномасштабні експериментальні роботи з дослідження теплової обстановки в подібних умовах є занадто коштовним, тому симуляція з використанням сучасних математичних методів залишається майже єдиним шляхом відображення аварійної обстановки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує значна кількість досліджень присвячених теоретичному вивченню теплових процесів, що відбуваються в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм» (ДПЗЛ) при гасінні пожежі.

Але найчастіше розглядають підсистеми, які включають частину елементів системи, наприклад, «резервуар – факел пожежі – ґрунт» або «факел пожежі – захисне спорядження» [2-4].

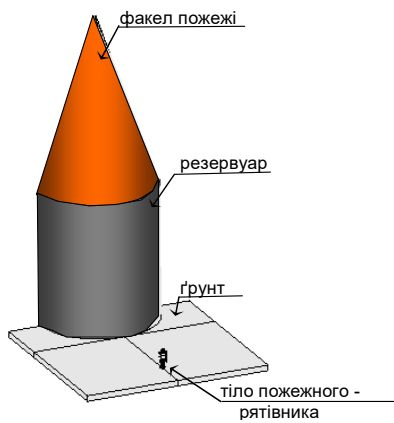
Мета роботи - розробка методичних підходів до математичного моделювання екстремального зовнішнього теплового навантаження на рятувальника в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм» (ДПЗЛ) та встановлення якісно-кількісних закономірностей динаміки температур в елементах цієї системи при гасінні палаючих резервуарів з нафтопродуктами.

Виклад основного матеріалу досліджень. Одним із сучасних способів дослідження складних систем є математичне моделювання за допомогою прикладних програм, що дозволяють вирішувати громіздкі системи рівнянь, зокрема метод кінцевих елементів в механіці твердих тіл, а саме його версія ANSYS 9.0 [5]. У даній роботі зроблена спроба використовувати цей метод для дослідження в статичі і динаміці процесів перенесення тепла в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм» (ДПЗЛ). Слід відмітити, що генерація фізіологічного тепла в даній роботі не враховується, тому одержані результати є ідеалізованими, однак вони чітко відображують рівні зовнішнього теплового навантаження та динаміку їх зміни.

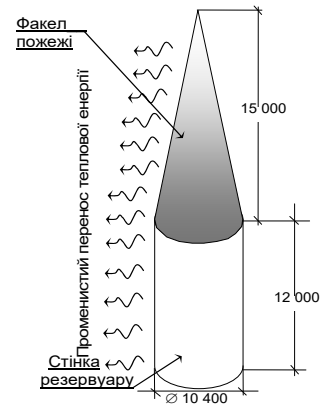
*E-mail: tatiana.kostenko@gmail.com

Сценарії пожежі передбачають варіант, коли нафтопродукт, що горить у факелі пожежі, є бензином, при цьому температура полум'я рівна 1127К.

Джерелом теплового впливу при моделюванні є факел пожежі над резервуаром, що має геометричні параметри, відповідні до схеми,



а)



б)

Рисунок 1 - Схема області моделювання теплового впливу пожежі на пожежника-рятувальника (а), геометрія розташування факелу над резервуаром із пожежею (б)

На рис.2 показана геометрична конфігурація розрахункової схеми тіла пожежника-рятувальника. Основні елементи тіла є роз'єднаними, для зменшення обсягів розрахунку та видалення деталей, наявність яких не впливає на точність розрахунків. Також важливою особливістю є наявність, крім захисного костюму, пожежних чобіт та пожежного шолому, які також наведені на рис. 2. Така постановка розрахункової схеми є принципово новою, вона суттєво розширює можливості дослідження термодинамічних процесів в кожному окремому з елементів системи ДПЗЛ при різних її станах.

При моделюванні розрахункових областей тіла пожежника-рятувальника були прийняті усереднені розміри спорядження щодо бойового одягу пожежного згідно із стандартом [6]. Усереднені розміри наступні - товщина спорядження пожежника-рятувальника для моделювання розрахункових областей (мм): захисного костюма - 8; шолома -5; чобіт пожежника -3. Прийнята товщина спорядження подібна до сучасних багатошарових протитеплових костюмів, наприклад типу ТК-800 або USP 2-2 (Польща).

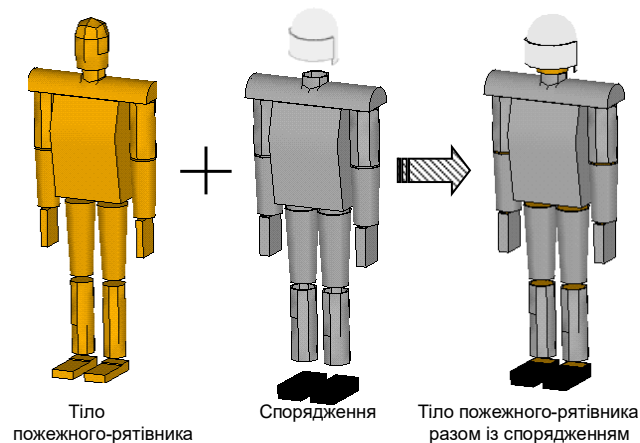


Рисунок 2 - Топологія розрахункових областей тіла пожежника-рятувальника, що використані для моделювання теплового впливу пожежі на нього

На тіло пожежника-рятувальника діє зовнішнє теплове випромінювання факела пожежі, а також відбите від поверхні ґрунту та випромінювання нагрітої поверхні ґрунту. Фізіологічне теплове навантаження пожежника-рятувальника при моделюванні не враховується що обумовлює одержання занижених результатів розрахунку температури в під костюмному просторі, але якісні показники та динаміка їх змін відображаються вірно.

При розгляді теплової дії випромінювання враховується що між внутрішньою поверхнею шолому та поверхнею голови відбувається також теплове випромінювання, як показано на рис.3а. Згідно із цією схемою поверхні сполучення кінцівок пожежника-рятувальника мають нульовий теплообмін, що дозволяє не враховувати це у розрахунковій області.

Крім врахування променистого теплообміну також враховано конвекційне охолодження поверхонь захисного спорядження пожежника-рятувальника та поверхні ґрунту, при їх обтіканні більш холодним оточуючим повітрям. На рис.3б схематично показано поверхні, що охолоджуються більш холодним оточуючим повітрям.

В тому випадку, коли температура повітря перевищує температуру поверхні спорядження відбувається не охолодження, а конвекційний нагрів підсистеми «оточуюче середовище - захисний одяг – тіло пожежника-рятувальника».

Початкові дані, що використовуються згідно з [7-10] для встановлення граничних умов у підсистемі «факел пожежі – ґрунт» при проведенні розрахунків зведені до табл.1.

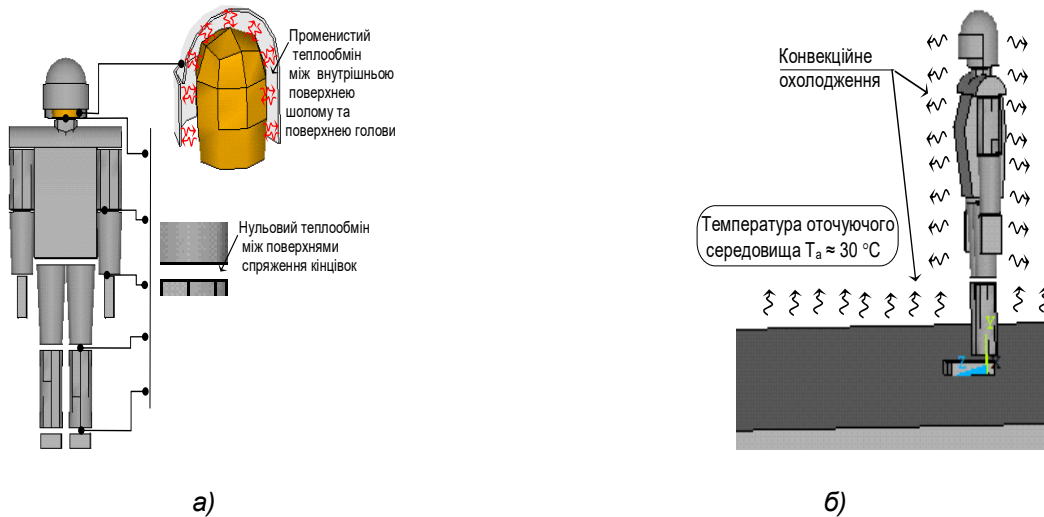


Рисунок 3 - Схеми моделей теплообміну між поверхнями захисного спорядження та тіла пожежника-рятувальника (а) та конвекційного охолодження поверхонь захисного спорядження пожежника-рятувальника та ґрунту (б)

Таблиця 1-Початкові дані до розрахунку температурного розподілу у підсистемі «факел пожежі – ґрунт»

Температура, °С				Ступінь чорноти		
ґрунту (початкова)	стілки резервуару із пожежею	оточуючого повітря,	факелу пожежі над резервуаром	поверхні стінки резервуару	поверхні ґрунту	факелу
30	225	30	Бензин	0,9	0,8	1
			1127			

Початкові дані, що використовуються згідно з [9] для встановлення граничних умов у підсистемі «факел пожежі – тіло пожежника-рятувальника» при проведенні розрахунків зведені до табл.2.

Теплофізичні властивості матеріалів ґрунту та резервуару із пожежею, можна прийняти згідно з рекомендаціями [11-12]. Згідно із цими

рекомендаціями прийняті теплофізичні характеристики подані у табл. 3.

Теплофізичні властивості тканин людини та матеріалів захисного спорядження пожежника-рятувальника, можна прийняти згідно з рекомендаціями [8]. Згідно із ними прийняті теплофізичні характеристики подані у табл.4.

Таблиця 2- Початкові дані до розрахунку температурного розподілу підсистемі «факел пожежі – тіло пожежника-рятувальника»

Поверхня	Початкова температура °C	Ступінь чорноти
Тіло пожежника -рятувальника	37	-
Стінка шолому ,	25	0,8
Пожежні чоботи		
Захисний костюм		

Примітка: Коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному тепло-обміні приймається $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

Таблиця 3- Теплофізичні характеристики матеріалу резервуару та ґрунту

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T), \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	Питома теплоємність, $c_p(T), \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$
Теплофізичні характеристики сталі		
$\lambda = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2}T$ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$	$c_p = 425 + 0,773T - 1,69 \cdot 10^{-3}T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}T^3$ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$ $c_p = 666 - 13002(T - 738)^{-1}$ при $600^\circ\text{C} < T \leq 735^\circ\text{C}$ $c_p = 545 - 17820(T - 731)^{-1}$ при $735^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C}$ $c_p = 650$ при $900^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$	7850
$\lambda = 27,3$ при $800^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$		
Теплофізичні характеристики ґрунту		
1,2	900	2300

Таблиця 4- Теплофізичні характеристики матеріалу резервуару та ґрунту

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T), \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	Питома теплоємність, $c_p(T), \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$
Усереднені теплофізичні характеристики тканин людини		
0.48	3350	1036
Теплофізичні характеристики матеріалу захисного костюму пожежника-рятувальника (брзент)		
0.06	1200	750
Теплофізичні характеристики матеріалу шолома пожежника-рятувальника (полікарбонат)		
0.161	1100	1200
Теплофізичні характеристики ґрунту матеріалу чобіт пожежника-рятувальника (шкіра)		
0.16	1000	1000

Використовуючи описаний вище математичний апарат, для проведення обчислювань була розроблена розрахункова методика з використанням описаних вище сценаріїв пожежі. Згідно із розрахунковою методикою обчислення проводяться за умов виконання наступних процедур.

1. Будується геометрична модель з прикладанням граничних умов відповідно до рисунків 1-3.

2. Організовується цикл в ході якого змінюється час впливу пожежі.

3. Час теплового впливу пожежі складає 60 хв, оскільки попередній розрахунок показав, що тепловий процес за даний час встановлюється сталим.

4. Розрахунок повторюється для резервуару з іншим сценарієм теплового впливу від пожежі.

5. При розгляді різних сценаріїв пожежі змінюють дистанція від пожежника-рятувальника та резервуару із пожежею, а також ступінь чорноти ґрунту.

Для реалізації такого алгоритму були створені кінцево-елементні схеми, які наведені на рис.4.

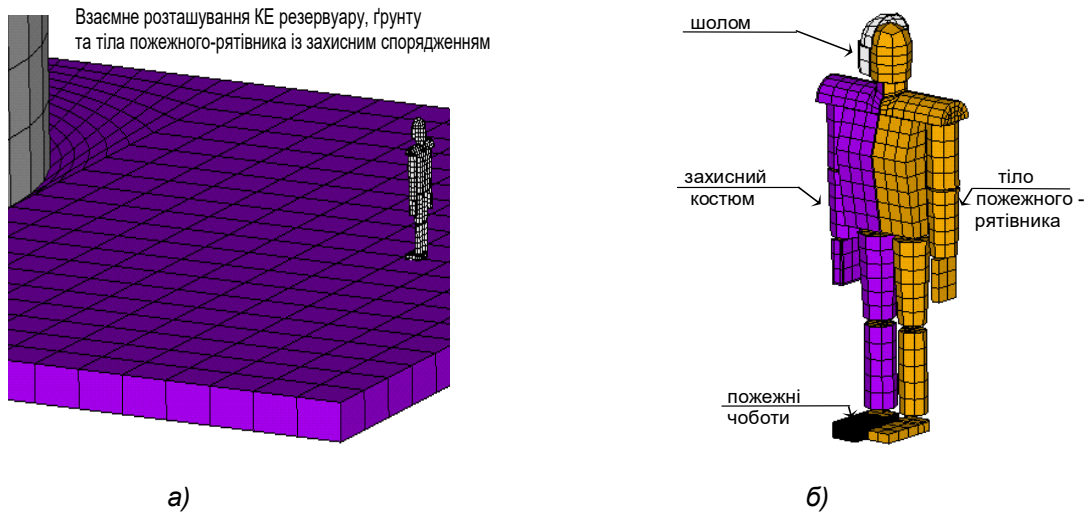


Рисунок 4 - Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелами пожежі над резервуаром, ґрунтом та тілом пожежника-рятувальника у захисному спорядженні:
 а - взаємне розташування кінцевих елементів основних розрахункових областей та положення пожежника-рятувальника;
 б – кінцево-елементна схема тіла пожежника-рятувальника

Дані розрахунків показують що поверхня ґрунту навколо резервуару прогрівається несуттєво, максимально на 7°C поблизу резервуару та 5°C у максимальній зоні нагріву на певній відстані резервуару. На рис.5 наведено графік розподілення температури у радіальному напрямку від резервуару.

Графік температури на рис.5 є ломаним унаслідок нерівномірного рішення рівняння променистого теплообміну для поверхонь кінцевих елементів, розподіл яких також є нерівномірним.

Для більш детального аналізу були побудовані температурні розподілення на поверхні захисного спорядження пожежника-рятувальника для того ж часового інтервалу. Отримані температурні розподілення, що наведені на рис.6. Представлені результати розрахунку з інтервалом п'ять хвилин на протязі 20 хв та відстані 10 м від резервуару. Розрахунки температур в подальшому часі не представлено через те що, як показали подальші розрахунки, в середині захисного костюму настає критична температура 50°C і роботу рятувальника слід негайно припиняти.



Рисунок 5 - Розподілення температури поверхні ґрунту у радіальному напрямку від резервуара на 20 хв продовження розвинутої пожежі над ним.

На даних розподілах можна помітити, що найбільш нагріта зона на поверхні захисного спорядження знаходиться у області грудей у місці

ключиці. Інтенсивне розігрівання цієї ділянки тіла є особливо небезпечним внаслідок того що там знаходиться щитоподібна заліза, яка

відповідає за терморегуляцію організму. Тому ця частина тіла потребує особливих мір захисту від теплового впливу.

Також більш нагрітою зоною, порівняно із іншими, є зона передньої частини пожежного шолома. Вона безпосередньо наближена до

головного мозку – основі центральної нервової системи, нагрівання його підвищує ризик теплового враження рятувальника. В такому місці також потрібний підвищений захист від зовнішнього теплового навантаження

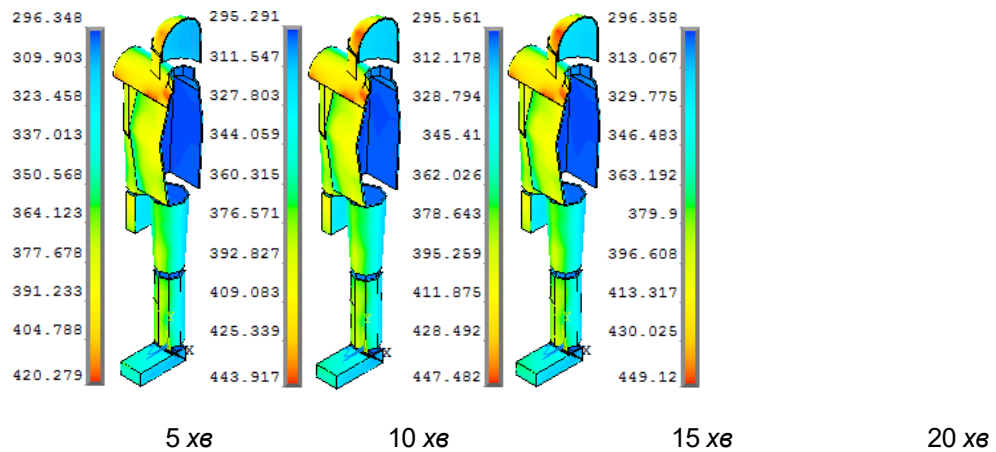


Рисунок 6 - Динаміка розподілення температури (К) на зовнішній та внутрішній поверхнях захисного спорядження на відстані 10 м від резервуару

Обраний методичний підхід до моделювання системи ДПЗЛ дозволяє розглянути температурну динаміку її окремих елементів, наприклад тіла рятувальника, що одягнений в теплозахисний

костюм. На рис.7 представлені результати розрахунку на поверхні тіла пожежника-рятувальника під захисним спорядженням у різні моменти часу на відстані 10 м від резервуару.

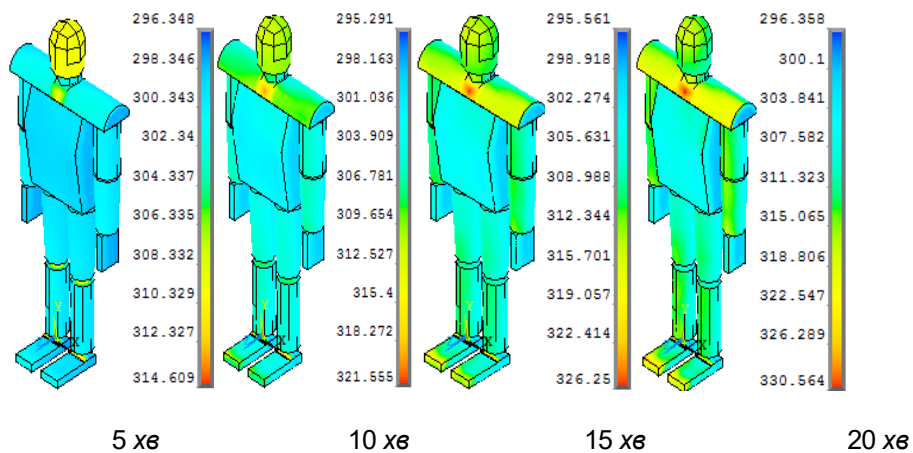


Рисунок 7- Динаміка розподілення температури (К) по поверхні тіла пожежника-рятувальника на відстані 10 м від резервуару.

На даних розподілах можна помітити, що найбільш нагріта зона на поверхні тіла пожежника-рятувальника а знаходиться у області грудей у місці ключиці. Також більш нагрітою зоною порівняно із іншими є зона передньої частини голови під пожежним шоломом та передньої частини стоп.

Аналіз температурних розподілів у тілі пожежника-рятувальника показав, що процес

його нагріву протікає у декілька етапів. На першому етапі до 7 хв температура поверхні тіла пожежника-рятувальника під захисним спорядженням є нижчою за температуру його внутрішніх шарів, що можна побачити на рис. 6-7 у час теплового впливу пожежі 5 хв. На наступному етапі поверхня тіла має температуру, більшу за температуру внутрішніх шарів але вона не перевищує небезпечний показник 50°C, що

дозволяє пожежнику-рятувальнику знаходитися у порівняно безпечному стані.

Аналіз найбільш нагрітих зон поверхні тіла пожежника на останньому етапі показав що найбільш нагрітою областю є область ключиці. На відстані 10 м від резервуара максимальна температура нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника а складає 57 °С у області ключиці, а максимальна температура поверхні пожежника-рятувальника складає 64 °С у області передньої частини стоп.

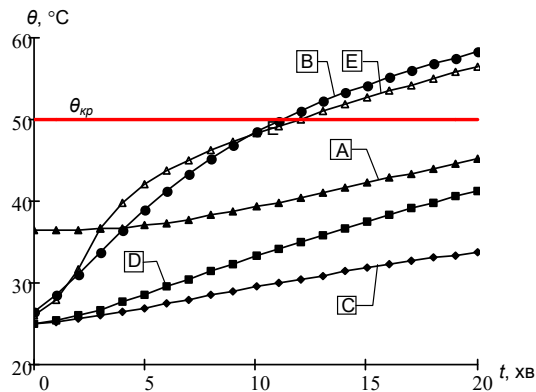
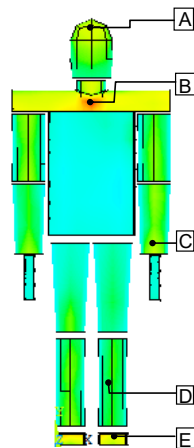


Рисунок 8 - Динаміка нагрівання точок поверхні тіла пожежника-рятувальника у його найбільш нагрітих зонах на відстані від резервуару із пожежею 10 м.

Висновки. 1. На основі аналізу відомих досліджень обставин пожеж у резервуарних парках із нафтопродуктами та небезпечного впливу теплових проявів на особовий склад оперативно-рятувальних підрозділів створено комплексну розрахункову модель перерозподілу тепла у складній системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм». Відмінною особливістю моделі від інших відомих є можливість аналізувати перенос тепла у окремих підсистемах з урахуванням геометричних, фізико-механічних та термодинамічних властивостей елементів цієї підсистеми. Такий методичний підхід до математичного моделювання екстремального теплового впливу на рятувальників реалізовано вперше.

2. Для реалізації розрахунку із використанням створеної моделі був використаний метод кінцевих елементів, що дало можливість вивчати температурні розподіли по поверхні захисного спорядження та поверхні тіла пожежника-рятувальника для досягнення мети роботи.

Для більшого уявлення про процес нагрівання були побудовані графіки режимів нагрівання точок поверхні тіла пожежника-рятувальника у його найбільш нагрітих зонах (рис.8).

Аналізуючи дані, що наведені на рис.8, можна зробити висновок що критична температура для нормального функціонування 50°С пожежника-рятувальника досягається у двох зонах – у області ключиці та передній частині стоп. Критична температура досягається у даних зонах майже одночасно за 12 хв.

3. В умовах факельного горіння нафтопродуктів в резервуарі найбільш нагрітими зонами поверхні тіла пожежника є область ключиці, саме там знаходиться щитоподібна залоза, яка відповідає за терморегуляцію організму. Також інтенсивно нагрітою зоною, порівняно із іншими, є зона передньої частини голови під пожежним шоломом та передні частини стоп.

4. Для конкретного випадку горіння бензину в резервуарі діаметром 10,4 м та висотою 12м виявлено орієнтовні положення зони найбільшої температури нагрівання поверхні ґрунту що знаходяться на відстані від 3 до 17 м від резервуару із пожежею при цьому ґрунт нагрівається за 20 хв якнайбільше на 5...7°С. На відстані 10 м від резервуара максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника зареєстровано через 12...15 хв, вона сягає 57 °С у області ключиці, а максимальна температура поверхні пожежника-рятувальника складає 64 °С у області передньої частини стоп. Слід додати що ці температурні показники є заниженим внаслідок не врахування фізіологічної теплоті що генерується в організмі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Показники виробничого травматизму на підприємствах та в підрозділах ДСНС (МНС) України за 2005 - 2016 рр.
2. Болібрux Б. В. Моделивання теплових процесів в елементах одягу пожежника / Б. В. Болібрux, А. А. Мичко // Пожежна безпека: збірник наукових праць – Львів: ЛШПБ, 2004. С.12-20.
3. Лин А.С. Экспериментальні дослідження за методикою полігонних випробувань оцінювання термозахисних властивостей захисного одягу пожежників / А.С. Лин, А.А. Мичко, А.В. Івахов // Пожежна безпека: збірник наукових праць.– Львів: ЛДУБЖД, - №21. С.205-110.
4. Болібрux Б. В. Особливості проведення випробувань термозахисних властивостей спеціальних матеріалів захисного одягу пожежників / Б. В. Болібрux, Б. В. Штайн, В. В. Присяжнюк // Збірник наукових праць. VI Всеукраїнської наукової конференції – Київ: 2006.- С. 268-270.
5. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
6. ГОСТ Р 53264-2009 Техника пожарная. Специальная защита пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний.
7. ДСТУ Б В.2.6 – 183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів.
8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4;х т. – Т.1. Кн.1. – М.: Наука, 1978. – 496 с
9. EN 1991-1- 2:2002 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: Generalactions –Actions on structures exposed to firePart 1-2: Generalrules – Structural fire design, Brussels, 2002.
10. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 – пожежна безпека / Чернецький Володимир Володимирович. — Лівів, 2016. —121 с.
11. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Малышева А.В., Протодяконова Н.А. Теплофизические свойства талых и мерзлых грунтов, загрязненных дизельным топливом. Вестник Самарского федерального университета им. М.К. Амосова. №2, т.8, 2011. – С. 15 – 19.
12. EN 1994-1- 2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

MODELING OF EXTERNAL THERMAL LOAD ON FIRE RESCUERS DURING A FIRE IN A TANK WITH OIL PRODUCTS

S.Pozdieiev¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, T. Kostenko¹, Candidate of Technical Sciences, V.Kostenko², Doctor of Technical Sciences, Professor, O. Zavialova², Candidate of Technical Sciences, Docent.

¹Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil protection of Ukraine

²Donetsk National Technical University

KEYWORDS

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

ANNOTATION

Temperature distributions on the surfaces of protective equipment and the rescuer's body during the tank fire with oil based on a mathematical model are considered. It is revealed approximate position of the zone of maximum heating temperature at a distance from 11 to 17 m from the tank with fire. It is established that a rescuer's body surface in 20 minutes under fire exposure in the condition of its greatest development is heated to the highest temperature of 56.38 °C. The most heated part of the rescuer's body is collarbone area because there is thyroid gland that is responsible for the organism's thermoregulation, the area of front part of head in a fire helmet and front parts of feet.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОЖАРНЫХ-СПАСАТЕЛЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ В РЕЗЕРВУАРЕ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ

С.В. Поздеев¹, д-р.техн.наук, проф., Т.В. Костенко¹, канд.техн.наук, В.К. Костенко², д-р.техн.наук, проф., О.Л. Завьялова², канд.техн.наук, доц.

¹Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, НУГЗ Украины

²Донецкий национальный технический университет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

математическое моделирование, температурные распределения, пожар в резервуаре с нефтепродуктами

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены температурные распределения по поверхностям защитного снаряжения и тела спасателя во время горения резервуара с нефтепродуктами на основании математической модели. Выявлены ориентировочные положения зоны наибольших температур нагрева, находящиеся на расстоянии от 11 до 17 м от резервуара с пожаром. Установлено, что поверхность тела пожарного-спасателя за 20 мин воздействия пожара при условии ее наибольшего развития нагревается до самой температуры 56.38 °C. Наиболее нагретой частью тела спасателя является область ключицы, именно там находится щитовидная железа, которая отвечает за терморегуляцию организма, зона передней части головы под пожарным шлемом и передние части стоп.