

УДК 614.895.5:621.5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОЖЕЖНИКА-РЯТУВАЛЬНИКА ПРИ ГОРІННІ РІДКИХ НАФТОПРОДУКТІВ В РЕЗЕРВУАРАХ

КОСТЕНКО Т. В.^{1*}, *к.т.н.***ПОЗДЄЄВ С. В.**², *д.т.н., проф.***ЗАВ'ЯЛОВА О. Л.**³, *к.т.н., доц.***КОСТЕНКО В. К.**⁴, *д.т.н., проф.***ЖУРБІНСЬКИЙ Д.А.**⁵, *к.т.н.*

^{1*,2,5} Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, б.8, вул. Онопрієнка, м. Черкаси, Україна +380976208529, +380509873393, E-mail: tatiana.kostenko@gmail.com

^{3,4} - Донецький національний технічний університет, б.2, пл. Шибанкова, м. Покровськ, Донецька область, Україна

Анотація. Мета - аналіз умов і факторів, що визначають екстремальні значення теплового навантаження на рятувальника під час гасіння палаючих резервуарів з нафтопродуктами на основі математичного моделювання термодинамічних процесів в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм» на основі метода кінцевих елементів. За допомогою ANSYS 9.0 обґрунтовано і вивчено роль ряду чинників що суттєво впливають на перерозподіл температур в системі. Новим у підході до моделювання є сукупність елементів системи, що об'єднує в єдиний ланцюг процеси від джерела горіння до поверхні тіла рятувальника з урахуванням властивостей оточуючого середовища, захисного одягу тощо. Для детального аналізу були побудовані температурні розподілення на зовнішній і внутрішній поверхнях захисного спорядження та на поверхні тіла. Розглянуто два варіанта розміщення тіла рятувальника біля джерела горіння, а саме – положення стоячи і лежачи. Отримано розподілення температури по поверхні ґрунту у радіальному напрямку від резервуара на 20-й хвилині продовження розвинутої пожежі. Це дало змогу вивчити залежність максимальної температури та часу нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника від відстані до резервуару із пожежею. При аналізі отриманих розрахункових залежностей для згладжування отриманих даних було побудовано регресійні залежності для параметрів, що характеризують небезпеку термовпливу пожежі над резервуаром для пожежників-рятувальників – максимальної температури нагрівання поверхні тіла та час досягнення критичної температури на поверхні тіла у залежності від дистанції до резервуару із пожежею. У найбільш небезпечній зоні для досліджуваних положень (стоячи та лежачи) його тіла встановлено залежності максимальної температури нагрівання поверхні тіла пожежника-рятувальника та часу досягнення критичної температури від ступеня чорноти поверхні ґрунту. Для побудовання математичної моделі впливу комплексу факторів на тіло пожежника проведено повний факторний експеримент. Виконано планування та розроблено матрицю експерименту, реалізовано моделювання і отримані рівняння регресії, які описують механізм розповсюдження теплоти в системі. Оцінено погрішності моделювання, відносно відхилення не перевищує 5,3%. Отримані результати будуть використані для розробки практичних рекомендацій з профілактики та попередньої підготовки рятувальних підрозділів до ліквідації пожеж в резервуарних парках.

Ключові слова: математичне моделювання; повний факторний експеримент; зовнішнє теплове навантаження рятувальника; критична температура тіла; час захисної дії

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОЖАРНОГО ПРИ ГОРЕНИИ ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕЗЕРВУАРАХ

КОСТЕНКО Т. В.^{1*}, *к.т.н.***ПОЗДЕЕВ С. В.**², *д.т.н., проф.***ЗАВЬЯЛОВА Е. Л.**³, *к.т.н., доц.***КОСТЕНКО В. К.**⁴, *д.т.н., проф.***ЖУРБИНСКИЙ Д.А.**⁵, *к.т.н.*

^{1*,2,5} Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, д.8, ул. Онопрієнка, г. Черкассы, Украина, +380976208529, +380509873393, E-mail: tatiana.kostenko@gmail.com

^{3,4} - Донецкий национальный технический университет, д.2, пл. Шибанкова, г. Покровск, Донецкая область, Украина

Аннотация. Цель - анализ условий и факторов, определяющих экстремальные значения тепловой нагрузки на спасателя при тушении горящих резервуаров с нефтепродуктами на основе математического моделирования термодинамических процессов в системе «источник тепловой энергии - пространство вокруг пожарного - защитная одежда - человеческий организм» на основе метода конечных элементов. С помощью ANSYS 9.0 обоснована и изучена роль ряда факторов которые существенно влияют на перераспределение температур в системе. Новым в подходе к моделированию является такая, что не рассматривали в известных моделях, совокупность элементов системы, объединяющая в единую цепь процессы от источника горения к поверхности тела спасателя с учетом свойств окружающей среды, защитной одежды и тому подобное. Для детального анализа были построены температурные распределения на внешней и внутренней поверхностях защитного снаряжения и на поверхности тела. Рассмотрены два варианта размещения тела спасателя возле источника горения, а именно – положения стоя и лежа. Получено распределение температуры по поверхности грунта в радиальном направлении от резервуара на 20-й минуте продолжение развитого пожара. Это позволило изучить зависимость максимальной температуры и времени нагрева поверхности тела пожарного-спасателя от расстояния до резервуара с пожаром. При анализе полученных расчетных зависимостей для сглаживания полученных данных были построены регрессионные зависимости для параметров, характеризующих опасность термовлияния пожара над резервуаром для пожарных-спасателей – максимальной температуры нагрева поверхности тела и время достижения критической температуры на поверхности тела в зависимости от дистанции до резервуара с пожаром. В наиболее опасной зоне для исследуемых положений (стоя и лежа) его тела установлены зависимости максимальной температуры нагрева поверхности тела пожарного-спасателя и времени достижения критической температуры от степени черноты поверхности почвы. Для построения математической модели влияния комплекса факторов на тело пожарного-спасателя проведен полный факторный эксперимент. Выполнено планирование и разработана матрица эксперимента, реализовано моделирование и получены уравнения регрессии, описывающие механизм распространения теплоты в системе. Оценены погрешности моделирования, относительное отклонение не превышает 5,3%. Полученные результаты будут использованы для разработки практических рекомендаций по профилактике и предварительной подготовки спасательных подразделений к ликвидации пожаров в резервуарных парках.

Ключевые слова: математическое моделирование; полный факторный эксперимент; внешняя тепловая нагрузка на спасателя; критическая температура тела; время защитного действия

MATHEMATICAL MODELING OF EXTERNAL HEAT LOAD ON THE FIREMAN DURING COMBUSTION OF LIQUID OIL PRODUCTS IN RESERVOIRS

KOSTENKO T. V. ^{1*}, **Cand. Sci. (Tech.),**
POZDYEYEV S. V. ², **Dr. Sc. (Tech.), Prof.,**
ZAV'YALOVA O. L. ³, **Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,**
KOSTENKO V. K. ⁴, **Dr. Sc. (Tech.), Prof.**
ZURBINSKIY D.A. ⁵, **Cand. Sci. (Tech.),**

1,2,5 - Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl National University of Civil Protection of Ukraine, 8, Onoprienko St., Cherkassy, +380976208529, +380509873393, E-mail: tatiana.kostenko@gmail.com*

3,4 - Donetsk National Technical University, 2, Shibankova square, Pokrovsk, Donetsk region, Ukraine

Abstract. Purpose is the analysis of conditions and factors that determine extreme values of the heat load on the rescuer during combustion of fire in reservoirs with oil products based on mathematical modeling of the thermodynamic processes in the system "thermal energy source - space around the fire - protective clothing - human body" using the finite element method. With the help of ANSYS 9.0 validated and studied the role of factors that significantly affect the temperature distribution in the system. A new approach to modeling is the totality of the elements of the system that combining into a single chain of processes from the combustion source to the surface body rescuer taking into account the properties of the environment, protective clothing and etc. For detailed analysis were constructed temperature distributions on the outer and inner surfaces of the protective equipment and on the body surface. Two variants of placing the body of the rescuer near the source of combustion are considered, namely, standing and lying. The distribution of temperature along the surface of the soil in the radial direction from the reservoir was obtained in the 20th minute of the continuation of the developed fire. This allowed to study the dependence of the maximum temperature and time of heating the body surface of the firefighter-rescuer from the distance to the reservoir with a fire. When analyzing the obtained calculated dependences for smoothing the obtained data, regression dependences for the parameters that characterizing fire hazard thermal influence over the reservoir for fire-fighters – maximum body surface temperature and heating time to reach the critical temperature of the body surface, depending on the distance to the reservoir with fire. In the most dangerous area for the researched positions (standing and lying) of his body established dependences of the maximum temperature of heating the body surface of the firefighter-rescuer and the time to reach the critical temperature from the degree of blackness of the soil surface. To construct a mathematical model of the influence of a complex of factors on the body of a firefighter-rescuer, a complete factor experiment was carried out. The matrix of the experiment was planned and developed, simulation was realized and regression equations were obtained describing the mechanism of heat propagation in the system. The estimation of the modeling error, the relative deviation does not exceed 5,3%. The results will be used to develop practical recommendations for the prevention and preliminary preparation of rescue units for the combustion of fires in reservoir parks.

Key words: mathematical modeling; full factorial design; external heat load of the rescuer; the critical temperature of the body; the time of protective action

Постановка проблеми. Гасіння великих пожеж різних видів: на нафтосовищах, в лісових масивах, транспортних засобах, таких як залізничні та автомобільні цистерни, конвеєри, на вугільних розрізах тощо, проводять на відкритій місцевості. Загальним для такого виду надзвичайних ситуацій є екстремальне теплове навантаження на рятувальників, що здійснюють гасіння. Серед видів травматизму особового складу при ліквідації подібних пожеж найбільш часті і небезпечні теплові ураження, такі як опіки, перегрів організму, втрата свідомості, теплові удари [1]. Однією з причин, які визначають наявність цього роду травм, є недостатній рівень знань про механізм перенесення тепла в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм». Елементи такої системи характеризуються великою кількістю фізичних, геометричних, біологічних та інших факторів, що одночасно впливають та істотно ускладнюють вивчення зв'язків і відносин у системі системи. Це визначає проблему вироблення ефективних оперативних рішень щодо забезпечення захисту від теплових уражень особового складу аварійно-рятувальних підрозділів, які виконують роботи з гасіння масштабних пожеж.

Тому вдосконалення протитеплових засобів, нормативних документів по оперативній оцінці зовнішньої теплового навантаження на рятувальників і виробленні рішень з ведення робіт є актуальним завданням. Одним із шляхів для вибору засобів і способів підвищення захисту рятувальників від теплових травм, на думку авторів, може бути попереднє прогнозування зовнішнього теплового навантаження на рятувальника при гасінні вірогідної масштабної пожежі, в першу чергу, як показує практика, для палаючих резервуарів з нафтопродуктами [2].

Аналіз відомих літературних джерел. Існує значна кількість досліджень, що присвячені теоретичному вивчанням теплових процесів, що відбуваються в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм» під час гасіння пожежі. Але найчастіше розглядають підсистеми, які включають частину елементів системи, наприклад, «резервуар - факел пожежі - ґрунт» або «факел пожежі - захисне спорядження» [3-5].

Одним із сучасних способів дослідження складних систем є математичне моделювання за допомогою прикладних програм, що дозволяють вирішувати громіздкі системи термодинамічних рівнянь, зокрема метод кінцевих елементів, а саме його версія ANSYS 9.0.

Мета роботи - аналіз умов і факторів, що визначають екстремальні значення теплового навантаження на рятувальника при гасінні палаючих

резервуарів з нафтопродуктами на основі математичного моделювання термодинамічних процесів в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежного - захисний одяг - людський організм» (ДПЗЛ).

Результати досліджень. У даній роботі зроблена спроба використовувати цей метод для дослідження в статичі і динаміці процесів перенесення тепла в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежного - захисний одяг - людський організм». По перше за допомогою ANSYS 9.0 було обґрунтовано і вивчено роль ряду чинників що суттєво впливають на перерозподіл температур в системі ДПЗЛ. Після цього проведено планування та розроблена матриця експерименту, виконано моделювання і отримано рівняння регресії що описують механізм розповсюдження теплоти в системі, що досліджувалась. Наприкінці зроблено оцінювання погрішності моделювання.

Для дослідження температурних перетворень при горінні нафтопродуктів що зберігають у вертикальних металевих резервуарах в якості основи прийнято відому методику [3]. Модель, що досліджували, була доповнена елементами, а саме тілом рятувальника та деталями захисного одягу.

Було використано середні розміри людського тіла чоловічого типу згідно із [6]. При цьому тіло людини моделюється із бойовим одягом, параметри якого відповідають стандарту [7]. Крім цього, для відтворення геометрії та умов теплообміну тіла пожежника-рятувальника передбачена наявність шолома із захисним напівпрозорим екраном. Для відтворення геометричної конфігурації шолому пожежника-рятувальника була розглянута його найбільш поширена конструкція.

При розгляді впливу пожежі у резервуарі також був врахований вплив нагрівання та відбивання теплових променів поверхнею ґрунту, на якому розташований резервуар. При цьому розглядався звичайний суглинок, що властивий для більшості кліматичних зон України з усередненими характеристиками.

Після проведення розрахунків за розробленими методиками, авторами були отримані результати у вигляді температурних розподілів. Типова картина температурних розподілів по поверхні ґрунту навколо резервуару після переходу пожежі в розвитку сталу стадію наведена на рис.1. З нього видно, що у радіальному напрямку від резервуара із факелом пожежі над ним існує зона найбільшого нагріву ґрунту. Поверхня ґрунту навколо резервуару прогрівається несуттєво, максимально на 7°C поблизу резервуару та до 5°C на певній відстані резервуару.

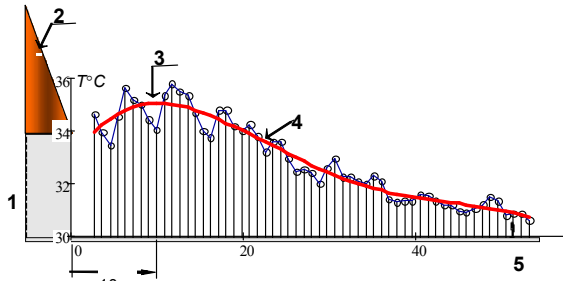


Рис. 1. Розподілення температури по поверхні ґрунту у радіальному напрямку від резервуара на 20-й хвилині продовження розвинутої пожежі: 1 – резервуар; 2 – факел пожежі; 3 – місце максимального нагріву поверхні; 4 – лінія регресії; 5 – пожежник / Distribution of temperature on surface soil in radial direction of the reservoir at 20th minute of developed fire: 1 – reservoir; 2 – torch of fire; 3 – place of maximum heating; 4 – regression line; 5 – fire fighter

Графік температури на рис. 1 є ломаним унаслідок нерівномірного рішення рівняння променистого теплообміну для поверхонь кінцевих елементів (КЕ), розподіл яких також є нерівномірним. Для згладжування отриманих даних була побудована регресійна залежність у вигляді поліному четвертого ступеню:

$$T(l) = a_0 + a_1l + a_2l^2 + a_3l^3 + a_4l^4 \quad (1)$$

Дані щодо коефіцієнтів отриманого поліному регресійної залежності наведено у (2), °C:

$$T(l) = 32.853 + 0.507l - 0.036l^2 + 8.1 \cdot 10^{-4}l^3 - 6.041 \cdot 10^{-6}l^4 \quad (2)$$

За побудованою кривою регресії було отримано відстань до зони із максимальною температурою, що позначено на рис. 1, дана відстань складає 10 м.

Для детального аналізу були побудовані температурні розподілення на поверхні захисного спорядження пожежника-рятувальника. Розглянуто два варіанта розміщення тіла рятувальника, а саме – положення стоячи і лежачи.

Аналогічним образом отримано результати розрахунку температурних розподілень на зовнішній та внутрішній поверхнях захисного спорядження та на поверхні тіла пожежника-рятувальника під захисним спорядженням в інтервалі часу 5...20 хв для двох положень (стоячи та лежачи) на відстанях 5...30 м від палаючого резервуару.

Аналіз температурних розподілів у тілі пожежника-рятувальника показав, що процес його нагріву протікає у декілька етапів. На першому етапі до 7 хв під захисним спорядженням температура поверхні тіла є нижчою за температуру його внутрішніх шарів (37°C). 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 показав що найбільш нагрітою областю при його першому положенні (стоячи) є область ключиці. Найбільш нагрітою

зоною при другому положенні пожежника-рятувальника (лежачи) є область стоп у їх передній частині. У першому положенні (стоячи) на відстані 10 м від резервуара максимальна температура нагріву поверхні тіла складає 57°C у області ключиці, а максимальна температура поверхні пожежника-рятувальника складає 64°C у області передньої частини стоп.

Слід зазначити, що генерація фізіологічного тепла в даній роботі не враховується, тому одержані результати температури поверхні тіла рятувальника є декілька заниженими, а тривалість захисної дії протитеплових засобів – завищеною, однак вони чітко відображують рівні зовнішнього теплового навантаження та динаміку їх зміни.

Аналізуючи дані встановлено, що критична температура для нормального функціонування 50°C пожежника-рятувальника при його положенні лежачи досягається у трьох зонах – у області ключиці, гомілковостопній області та передній частині стоп. Найшвидше критична температура досягається у області стоп на 6 хв. Критична температура у області ключиці та гомілковостопної області досягається на 17 хв.

З огляду на це у якості висновку можна зазначити, що положення лежачи є набагато небезпечніше, оскільки настання критичної температури досягається удвічі швидше. Крім цього за зазначений період більша кількість зон у даному положенні підпадає під ураження теплового впливу імовірної пожежі над резервуаром.

З метою вивчення впливу відстані на максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника під захисним спорядженням були проведені розрахунки, у результаті яких побудовано відповідні графіки для обох положень рятувальника, які наведені на рис. 2.

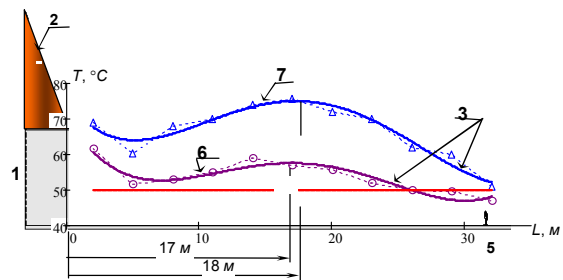


Рис. 2. Залежність максимальної температури нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника від відстані до резервуару із пожежею: 1-5 – як на рис. 1, 6 та 7 – відповідно для положень стоячи та лежачи / Dependence of maximum heating temperature of the firefighters body surface on the distance from reservoir to fire: 1-5 – as in fig. 1, 6, 7 – in accordance with standing and prone position

Також були вивчені залежності часу настання критичної температури у будь-якій зоні поверхні тіла пожежника-рятувальника від відстані його тіла до резервуара із пожежею. Графіки, що відтворюють

дані залежності для положення стоячи та лежачи пожежника-рятувальника наведені на рис.3.

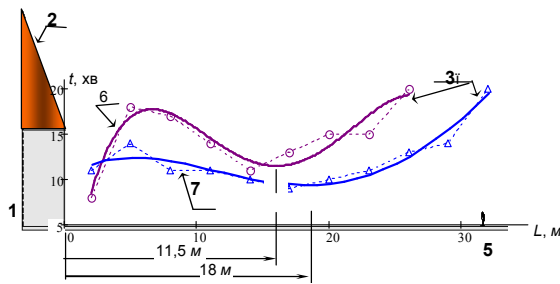


Рис.3. Залежність часу досягнення критичної температури нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника від відстані до резервуару із пожежею: означення як на рис.2 / Dependence of time to achieve the critical temperature of the firefighters body surface of the distance to reservoir with fire: definitions as in fig. 2

Аналіз залежностей максимальної температури нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника від відстані до резервуару із пожежею показує, що знаходження рятувальника у положенні лежачи є набагато небезпечнішим, оскільки максимальна температура є значно більшою, а час нагріву до значення критичної температури є значно меншим. Графіки на рис.2-3 показують наявність найбільш небезпечної зони. Для положення стоячи вона знаходиться на відстані від 11 м до 17 м, а для положення лежачи біля 18 м. Ділянка на якій можливе досягнення на тілі пожежника-рятувальника значення критичної температури 50°C протягом 20 хв для його положення стоячи обмежена відстанню 26 м, а для положення лежачи обмежується відстанню 35 м.

Отримані результати будуть використані для розробки практичних рекомендацій щодо попередньої підготовки рятувальних підрозділів для визначення часу захисної дії протитеплових засобів, безпечних відстаней та рубежів оперативного розгортання при ліквідації пожеж.

З метою вивчення впливу відбивальної здатності поверхні ґрунту було здійснено розрахунок у найбільш небезпечних зонах для двох положень пожежника-рятувальника при варіюванні ступеня чорноти поверхні ґрунту у межах від 0,1 до 1,0. На рис.4 подані графіки залежностей максимальної температури нагрівання поверхні тіла пожежника-рятувальника та часу досягнення критичної температури.

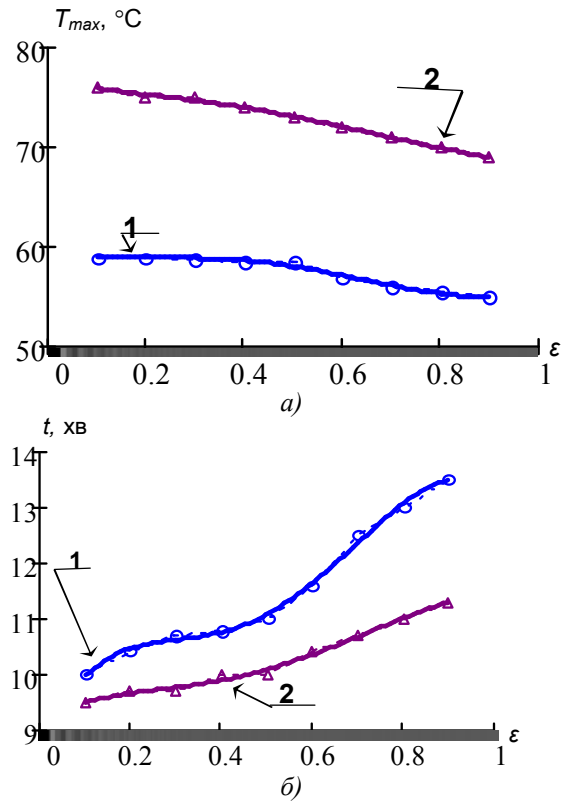


Рис.4. Залежності максимальної температури нагрівання поверхні тіла пожежника-рятувальника (а) та часу досягнення критичної температури (б) від ступеня чорноти поверхні ґрунту (ϵ) у найбільш небезпечній зоні для досліджуваних положень його тіла: 1- положення стоячи; 2 – лежачи / Dependencies maximum heating temperature of the body surface firefighter and time to achieve the critical temperature on the degree blackness of soil surface in the most dangerous area for the studied provisions of his body: 1- standing position; 2 – prone position

Аналізуючи графіки, що наведені на рис.4 можна зазначити, що зміна значення ступеня чорноти поверхні ґрунту менш істотно впливає на максимальну температуру пожежника-рятувальника при тепловій дії на нього факелу пожежі у порівнянні із впливом відстані до резервуару із пожежею. Характерною особливістю є те, що із збільшенням ступеня чорноти поверхні ґрунту максимальна температура нагрівання поверхні тіла пожежника монотонно зменшується, а час нагрівання до значення критичної температури 50°C збільшується. Такий стан пояснюється тим, що збільшення чорноти поверхні ґрунту призводить до більшого поглинання теплової енергії і відповідно зменшення теплового потоку з боку поверхні ґрунту на тіло пожежника-рятувальника, що узгоджується із фізичними уявленнями про даний процес. Хоча вплив чорноти поверхні ґрунту є менш істотним, графіки на рис.5 показують, що їм нехтувати не можна.

При аналізі отриманих розрахункових залежностей для згладжування отриманих даних були побудовані регресійні залежності для

параметрів, що характеризують небезпеку термовпливу пожежі над резервуаром для пожежників-рятувальників – максимальної температури нагрівання поверхні тіла та час досягнення критичної температури на поверхні тіла у залежності від дистанції до резервуару із пожежею.

Максимальна температура поверхні тіла пожежника-рятувальника у залежності від відстані до резервуару із пожежею

для I положення:

$$P_c(T) = 70.484 - 6.233l + 0.724l^2 - 0.031l^3 + 4.292 \cdot 10^{-4}l^4$$

для II положення:

$$P_d(T) = 75.005 - 4.949l + 0.697l^2 - 0.031l^3 + 4.144 \cdot 10^{-4}l^4$$

Час досягнення критичної температури поверхні тіла пожежника-рятувальника у залежності від відстані до резервуару із пожежею

для I положення:

$$P_c(t) = -4.662 + 8.497l - 1.068l^2 + 0.05l^3 - 7.626 \cdot 10^{-4}l^4$$

для II положення:

$$P_d(t) = 10.104 + 0.997l - 0.132l^2 + 5.051 \cdot 10^{-3}l^3 - 5.036 \cdot 10^{-5}l^4$$

Також для згладжування отриманих даних були побудовані регресійні залежності для параметрів, що характеризують небезпеку термовпливу пожежі над резервуаром для пожежників-рятувальників – максимальної температури нагрівання поверхні тіла та час досягнення критичної температури на поверхні тіла у залежності від ступеня чорноти поверхні ґрунту.

Максимальна температура поверхні тіла пожежника-рятувальника у залежності від ступеня чорноти поверхні ґрунту:

для I положення:

$$P_c(T) = 59.511 - 8.684 \epsilon + 46.167 \epsilon^2 - 97.565 \epsilon^3 + 56.527 \epsilon^4$$

для II положення

$$P_d(T) = 76.611 - 8.169 \epsilon + 14.617 \epsilon^2 - 34.9 \epsilon^3 + 20.369 \epsilon^4$$

Час досягнення критичної температури поверхні тіла пожежника-рятувальника у залежності від ступеня чорноти поверхні ґрунту:

для I положення

$$P_c(t) = 8.722 + 18.249 \epsilon - 66.476 \epsilon^2 + 105.063 \epsilon^3 - 52.448 \epsilon^4$$

для II положення

$$P_d(t) = 9.149 + 4.318 \epsilon - 14.232 \epsilon^2 + 24.637 \epsilon^3 + 12.529 \epsilon^4$$

З огляду на проведені дослідження визначені фактори, які мають найбільший вплив на параметри, які визначають небезпеку дії пожежі на тіло пожежника-рятувальника – це максимальна температура нагрівання поверхні тіла та час досягнення критичної температури на поверхні тіла. У якості таких факторів обов'язково розглядати відстань до резервуару із пожежею та ступеня чорноти поверхні ґрунту.

Для побудування математичної моделі впливу комплексу даних факторів на тіло пожежника-рятувальника необхідно провести повний факторний експеримент. З огляду на поведінку графіків, поданих на рис.2–4 встановлено, що для проведення чисельного експерименту доцільно застосувати рототабельний ортогональний центрально-композиційний план, оскільки математична модель за зробленим нами припущенням відповідає

параболічній залежності максимальної температури нагрівання поверхні тіла та часу досягнення критичної температури на поверхні тіла від факторів, яка має такий вигляд [6, 7].

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (3)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – коефіцієнти регресії.

При складанні плану другого порядку вводяться додаткові параметри, що для виразу (3) мають значення, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри рототабельного ортогонального центрально-композиційного плану / Parameters of the rotatable orthogonal central compositional plan

Кількість				Зіркове плече, $\alpha = \sqrt{n}$	Додаток до квадратних членів регресії, S
факторів, n	основних дослідів, $N_0 = 2^n$	центрально-композиційних дослідів, $n_0 = \frac{n-1}{2} + 2n$	дослідів сумарна N		
2	4	8	16	1.414	0.5

Для визначення коефіцієнтів регресії відповідно до формули (3) необхідно провести 16 чисельних експериментів за складеною для цього матриці планування експерименту, що записана у вигляді табл.2.

Таблиця 2

Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичних моделей / Typical matrix of the planning of different factorial experiment for stimulating mathematical models

№	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2 - S$	$x_2^2 - S$	
1	+1	+1	+1	0.5	0.5	Основні
2	-1	+1	-1	0.5	0.5	
3	+1	-1	-1	0.5	0.5	
4	-1	-1	+1	0.5	0.5	
5	-1.414	0	0	1.5	-0.5	Зіркові
6	+1.414	0	0	1.5	-0.5	
7	0	-1.414	0	-0.5	1.5	
8	0	+1.414	0	-0.5	1.5	
9	0	0	0	-0.5	-0.5	Центральні
10	0	0	0	-0.5	-0.5	
11	0	0	0	-0.5	-0.5	
12	0	0	0	-0.5	-0.5	
13	0	0	0	-0.5	-0.5	
14	0	0	0	-0.5	-0.5	
15	0	0	0	-0.5	-0.5	
16	0	0	0	-0.5	-0.5	

Для проведення повного факторного експерименту були використані кінцево-елементні моделі для вирішення теплової задачі. Основні геометричні параметри моделей, теплофізичні властивості та параметри граничних умов надані у

табл. табл. 1-2 та прийняті з літературних даних [8, 9].

Варіюючи параметри і проводячи розрахунки за вищеписаною методикою, були отримані значення параметрів, які визначають небезпеку дії пожежі на тіло пожежника-рятувальника – максимальної температури нагрівання поверхні тіла та час досягнення критичної температури на поверхні тіла.

Отримані дані наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри небезпеки термовпливу пожежі, що отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування / Parameters of fire danger of heat exposure that obtained in conditions of complete factorial experiment

Експериментальна ситуація	Час досягнення критичної температури поверхні тіла, t, хв		Максимальна температура поверхні тіла T _{max} , °C	
	лежачи	стоячи	лежачи	стоячи
1	17,5	23	53,9	47,5
2	11,5	15	66,5	54,2
3	15	21	58,1	48,6
4	10	14	72,7	55,5
5	16	17	52,9	52,1
6	20,1	20,5	48,6	49,7
7	9,8	13	76,6	57,2
8	10,5	14	71,2	55,4
9	9,5	13	73,9	56,7

Використовуючи дані табл. 3 мають бути визначені коефіцієнти регресійної залежності за відомими формулами [8, 9]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - \frac{0,5}{N} \sum_{i=1}^N y_i (x_1^2 - S) - \frac{0,5}{N} \sum_{i=1}^N y_i (x_2^2 - S);$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; \quad b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i;$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i; \quad b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i (x_1^2 - S);$$

$$b_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i (x_2^2 - S) \quad (4)$$

де N = 4 – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту;
 x_i, (x_i - S) – значення кодованих параметрів згідно із матрицею плану (див. табл.2);
 y_i – значення параметра небезпеки термовпливу пожежі, визначене у результаті чисельного експерименту згідно із табл. 3.

У відповідності до отриманих регресійних залежностей впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника були побудовані поверхні, що наведені на рис. 5.

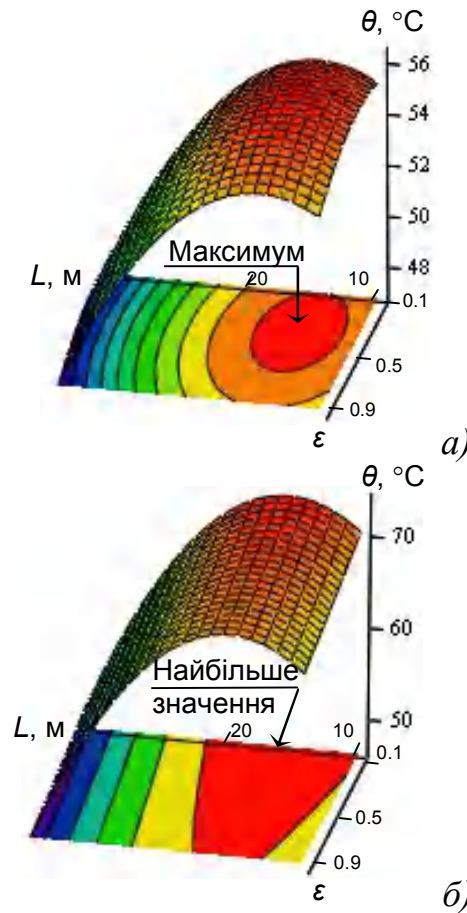


Рис. 5. Поверхні регресійних залежностей впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника: а – для положення стоячи б – для положення лежачи / Surfaces of impact regression distance from the reservoir by a fire and degree blackness of ground for maximum heating temperature of the body surface firefighter: а – for standing position б – for prone position

У відповідності до отриманих регресійних залежностей впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на час досягнення критичної температури 50°C нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника були побудовані поверхні, що наведені на рис.6.

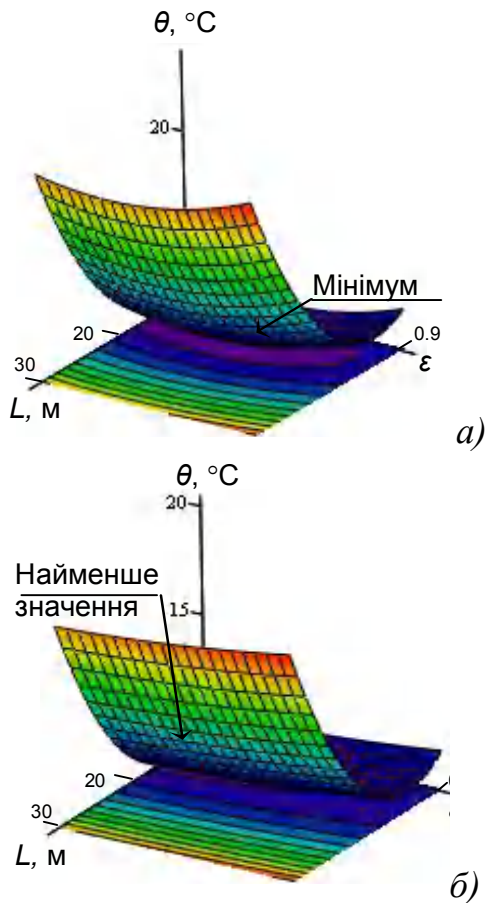


Рис. 6. Поверхні регресійних залежностей впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на час досягнення критичної температури 50°C нагріву пожежника-рятувальника: а – для положення стоячи б – для положення лежачи / Regression surfaces of influence distance from the reservoir with fire and degree of blackness ground at the time of achieving the critical heating temperature of 50°C firefighter's: a – for standing position б – for prone position

Проаналізувавши графіки залежностей, поданих на рис. 6-7, було виявлено, що поверхня залежності впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника у положенні стоячи має чітко виражений максимум, у той же час поверхня залежності впливу відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту на час досягнення критичної температури 50°C нагріву пожежного-рятувальника має чітко виражений мінімум. Ті ж самі параметри для положення пожежника-рятувальника лежачи не мають чітко виражених екстремумів, але є точка де при певному значенні відстані від резервуару із пожежею і мінімальному значенні ступеня чорноти є найбільше значення максимальну температуру нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника та найменше значення часу досягнення критичної температури 50°C нагріву пожежника-рятувальника.

Для визначення величин, при яких спостерігаються екстремуми на відповідних поверхнях складається система рівнянь, вигляд якої наведений нижче [8, 9]:

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = b_2 + b_3 x_1 + 2b_5 x_2 = 0 \tag{5}$$

Так само визначається найбільше значення величин, відповідних максимальним та мінімальним значенням параметрів для положення лежачи. При цьому у якості другої змінної підставляється найменше значення ступеня чорноти поверхні ґрунту. Виконавши відповідні розрахунки були отримані значення відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту, при яких отримані регресійні залежності досягають найбільшого значення для максимальної температури нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника. Отримані значення наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Значення відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту при яких отримані регресійні залежності досягають мінімальних та максимальних значень / The value of the distance from the reservoir by a fire and degree of blackness ground at which obtained regressions depending achieve the minimum and maximum values

Відстань від резервуару із пожежею, L, м	Ступінь чорноти ґрунту, ε	Максимальна температура нагріву поверхні тіла, T _{max} , °C
Перше положення (стоячи)		
11.22	0.38	56.38
Друге положення (лежачи)		
12.92	0.1	73.972

Також були отримані значення відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту, при яких отримані регресійні залежності досягають найбільшого значення для часу досягнення критичної температури 50°C нагріву пожежника-рятувальника. Отримані значення наведені у табл. 5.

Використовуючи дані щодо розрахунку для параметрів безпеки впливу пожежі на тіло пожежника-рятувальника була визначені характеристики адекватності отриманих результатів з використанням визначених регресійних залежностей В якості критеріїв адекватності результатів, визначених за регресійною моделлю розглянуті абсолютне та відносне відхилення. Отримані значення наведені у табл. 6.

Дані табл. 5 показують, що похибка результатів, отриманих за регресійною моделлю є незначною і

визначені регресійні залежності можуть бути використані для обґрунтування відстаней безпеки при виконанні оперативно-рятувальними підрозділами дій щодо локалізації пожеж та рятувальних операцій на підприємствах, де зберігаються нафтопродукти.

Таблиця 5

Значення відстані від резервуару із пожежею та ступеня чорноти ґрунту при яких отримані регресійні залежності досягають мінімальних та максимальних значень при досягненні критичної температури 50°C нагріву пожежника-рятувальника / The value of the distance from the reservoir by a fire and degree of blackness ground at which obtained regressions depending achieve the minimum and maximum values at the time of achieving the critical heating temperature of 50°C firefighter's

Відстань від резервуару із пожежею, $L, м$	Ступінь чорноти поверхні ґрунту, ε	Час досягнення критичної температури 50°C нагріву поверхні тіла, $t, хв$
І положення (стоячи)		
11.4	0.42	13.191
ІІ положення (лежачи)		
12.28	0.1	9.702

Таблиця 6

Адекватність результатів, що визначені за регресійною залежністю / Adequacy of results that determined by regression dependence

Показник	Критерій Фішера	Табличне значення критерію Фішера	Абсолютне відхилення,	Відносне відхилення, %
Максимальна температура поверхні тіла пожежника-рятувальника °C	для І положення			
	0.921	1.01	4	4,3
Час досягнення критичної температури поверхні тіла, хв	для ІІ положення			
	0.884	1.01	4.8	5,3
Час досягнення критичної температури поверхні тіла, хв	для І положення			
	0.89	1.01	1.2	3,8
Час досягнення критичної температури поверхні тіла, хв	для ІІ положення			
	0.86	1.01	1.6	4,6

Висновки і пропозиції.

- З використанням методу кінцевих елементів виконано аналіз умов і факторів, що визначають екстремальні значення теплового навантаження на рятувальника при гасінні палаючих резервуарів з нафтопродуктами шляхом математичного

моделювання термодинамічних процесів в системі «джерело теплової енергії - простір навколо пожежника - захисний одяг - людський організм».

- Новим у підході до моделювання є така, що не розглядали у відомих моделях, сукупність елементів системи, яка об'єднує в єдиний ланцюг процеси від джерела горіння до поверхні тіла рятувальника з урахуванням властивостей оточуючого середовища, захисного одягу тощо.

- За допомогою ANSYS 9.0 виявлено роль ряду чинників що суттєво впливають на перерозподіл температур в системі, а саме відстань до факелу горіння та ступінь чорноти поверхні ґрунту.

- Найбільш небезпечна зона для положення стоячи знаходиться на відстані від 11 м до 17 м, а для положення лежачи біля 18 м. Ділянка на якій можливе досягнення на тілі пожежника-рятувальника значення критичної температури 50°C протягом 20 хв для його положення стоячи обмежена відстанню 26 м, а для положення лежачи обмежується відстанню 35 м.

- Найбільш нагрітою областю при положенні пожежника-рятувальника стоячи є область ключиці на відстані 10 м від резервуара максимальна температура нагріву поверхні тіла пожежника-рятувальника складає 57°C. Найбільш нагрітою зоною при положенні лежачи є область стоп у їх передній частині, максимальна температура поверхні пожежника-рятувальника складає 64°C у області передньої частини стоп.

- Із збільшенням ступеня чорноти поверхні ґрунту максимальна температура нагрівання поверхні тіла пожежника-рятувальника монотонно зменшується, а час нагрівання до значення критичної температури 50°C збільшується. Це пояснюється тим, що збільшення чорноти поверхні ґрунту призводить до більшого поглинання теплової енергії і відповідно зменшення теплового потоку з боку поверхні ґрунту на тіло пожежника-рятувальника.

- Для побудовання математичної моделі впливу комплексу факторів на тіло пожежника-рятувальника проведено повний факторний експеримент. Виконано планування та розроблена матриця експерименту, реалізовано моделювання і отримані рівняння регресії, що описують механізм розповсюдження теплоти в системі ДПЗЛ. Оцінено погрішності моделювання, відносне відхилення не перевищує 5,3%.

- Отримані результати будуть використані для розробки практичних рекомендацій щодо попередньої підготовки до надзвичайних ситуацій резервуарних парків (визначення чорноти поверхні ґрунту, безпечних відстаней та часу захисної дії протитеплох засобів), рубежів оперативного розгортання рятувальних підрозділів при ліквідації пожеж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костенко Т. В. Повышение безопасности и тактических возможностей спасателей с высоким тепловыделением / Т. В. Костенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2016. - Вип.33. С. 198-205.
2. Костенко Т. В. Разработка метода оперативного прогноза тепловой нагрузки на спасателей при тушении горящих резервуаров с нефтепродуктами / Т. В. Костенко, В. К. Костенко // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси - 2017. - Т.1. - С.54-62.
3. Волков О. М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. / О. М. Волков. - Москва: Недра, 1984. - 151 с.
4. Болібрух Б. В. Моделювання теплових процесів в елементах одягу пожежника / Б. В. Болібрух, А. А. Мичко // Пожежна безпека: збірник наукових праць - 2004. - С.12-20.
5. Лин А. С. Експериментальні дослідження за методикою полігонних випробувань оцінювання термозахисних властей востей захисного одягу пожежників / А. С. Лин, А. А. Мичко, А. В. Ивахов // Пожежна безпека: збірник наукових праць - №21. - С.205-110.
6. EN 547-3:1997 «Safety of machinery - Human body measurement - Part 3: Anthropometric data»
7. ГОСТ Р 53264-2009 Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний.
8. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс - Москва: Книга по Требованию, 2013. - 203 с.
9. Сидняев Н. И. Введение в теорию планирования эксперимента : учеб. пособие / Н. И. Сидняев Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 463 с.

REFERENCES

1. Kostenko T.V. *Povysheniye bezopasnosti i takticheskikh vozmozhnostey spasateley s vysokim teplovydeleniyem* [Increased safety and tactical abilities of rescuers in liquidation of fires with high heat release]. *Visnyk Pryazov'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu* [Reporter of the Priazovskiy State Technical University]. SHEE "PSTU". Mariupol, 2016, no. 33, pp. 198-205. (in Russian)
2. Kostenko T.V. and Kostenko V.K. *Razrabotka metoda operativnogo prognoza teplovoj nagruzki na spasateley pri tushenii goryashchikh rezervuarov s nefteproduktami* [Development of methods for operational forecasts heat load on rescuers in firefighting of burning reservoirs with oil products]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi* [Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus]. University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. Minsk, 2017, no. 1, pp. 54-61. (in Russian)
3. Volkov O.M. *Pozharnaya bezopasnost' rezervuarov s nefteproduktami* [Fire safety of tanks with oil products]. Moscow: Nedra., 1984, 151p. (in Russian)
4. Bolibrukh B. V. and Mychko A.A. *Modelyuvannya teplovykh protsesiv v elementakh odyahu pozhzhnyka* [Modeling of thermal processes in the elements of clothing firefighter]. *Pozhezhna bezpeka: zbirnyk naukovykh prats'* [Fire safety: collection of scientific works]. Lviv, 2004, pp.12-20. (in Ukrainian)
5. Lyn A. S., Mychko A.A. and Ivakhov A.V. *Eksperymental'ni doslidzhennya za metodykoyu polihonnykh vyprobuvan' otsinyuvannya termozakhysnykh vlasty vostey zakhysnoho odyahu pozhzhnykiv* [Experimental research methodology site trials evaluating termozahysnyh lifetime of cryogenic protective clothing firefighters]. *Pozhezhna bezpeka: zbirnyk naukovykh prats'* [Fire safety: collection of scientific works]. Lviv, 2012, no.21, pp.12-20. (in Ukrainian)
6. EN 547-3:1997 «Safety of machinery - Human body measurement - Part 3: Anthropometric data»
7. Khiks Ch. *Osnovnyye printsipy planirovaniya eksperimenta* [Basic principles of experiment planning]. Moscow: Book on Demand, 2013, 203p. (in Russian)
8. Sidnyayev N.I. *Vvedeniye v teoriyu planirovaniya eksperimenta : uchebnoye posobiye* [Introduction to the theory of experiment planning: a tutorial]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2011, 463p. (in Russian)

Стаття поступила до редколегії 26.04.2017