

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЧАСУ РОБОТИ ПОЖЕЖНИКА В ТЕПЛОЗАХИСНОМУ ОДЯЗІ НА ОСНОВІ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ

Розроблено тривимірну модель теплового стану організму пожежного у теплозахисному одязі. Представлені основні допущення, що враховують процеси та вихідні дані моделі. Параметри моделі визначені за даними експериментальних досліджень теплового стану пожежника, а також за літературними даними. За допомогою моделі проведено ряд розрахунків щодо визначення граничного безпечного часу роботи пожежника у костюмі USP 2-2 польської фірми «GO WEST» за різних температур (від кімнатних до 250°C), що мають місце під час пожежі.

Ключові слова: тепловий стан пожежного, теплозахисний одяг, експериментальне дослідження пожежного в теплозахисному одязі, моделювання.

B.V. BOLIBRUKH
NU "Lviv Polytechnic"

DETERMINATION OF THE MAXIMUM OPERATING TIME OF THE FIRE-FIGHTER IN HEAT PROTECTIVE SUIT ON THE BASIS OF THREE-DIMENSIONAL MODEL

A three-dimensional model of the thermal state of the fire-fighter body in heat protective suit was developed by the author. The main assumptions, taking into account the processes and initial data of the model, were presented. The model parameters were determined according to experimental studies of the thermal state of the fire-fighter, and according to the literature. Using the model, the author performed a series of calculations relating to the maximum safe operation time of a fire-fighter in a suit USP 2-2 of the Polish firm "GO WEST" for different temperatures (from room temperature up to 250°C), which take place during a fire.

Key words: thermal state of the fire-fighter, heat protective suit, experimental investigation of a fire-fighter in heat protective suit, modelling.

Робота пожежного пов'язана з великою небезпекою для життя і здоров'я. Небезпечні фактори пожежі (НФП), якими є підвищена температура і тепловий потік, змушують пожежних використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) [1], в число яких входить теплозахисний одяг пожежного (ТЗОП). Дана робота присвячена моделюванню нестационарного теплового стану пожежного в ТЗОП в умовах дії ОФП за допомогою тривимірної комп'ютерної моделі, розробленої в середовищі ANSYS FLUENT. За основу дослідження ТЗОП був взятий теплозахисний одяг USP 2-2 польської фірми «GO WEST».

Аналіз літератури показав, що існує ряд робіт, присвячених розробці моделей теплового стану людини, які відрізняються між собою призначенням, ступенем деталізації уявлення людського тіла, а також процесами, що враховуються в моделі. Найбільш прості моделі, наприклад представлені в [2–4], мають слабку деталізацію і не враховують такі фізіологічні процеси, як кровообіг, дихання, зміна тепловиділення залежно від фізичного навантаження, потовиділення. Більш складні моделі, зокрема представлені в [5, 6], враховують частину цих процесів і мають ступінь деталізації, що залежить від конкретних цілей тієї чи іншої моделі. Як правило, такі моделі складаються з циліндричних сегментів і в тій чи іншій мірі представляють основні теплові процеси, однак процеси терморегуляції та фізіологічні зміни за мінливих теплових умов в таких моделях не враховуються. Модель, представлена в [7], є однією з найбільш складних. Вона складається з 51 розрахункового вузла, кожен з яких представляє ту чи іншу частину людського організму, при цьому враховується наявність кровоносної системи, внутрішніх органів, зовнішніх тканин і шкіри і т. д. Така модель є моделлю з зосередженими параметрами, в якій кожен вузол представляє той чи інший обсяг пожежника і костюма. Робота [8] присвячена дослідженню та моделюванню теплового стану теплозахисного одягу пожежника при впливі інтенсивних теплових навантажень, однак вона не враховувала стан організму людини і його можливий перегрів. В [9] розглянуто процеси терморегуляції і побудована двовимірна модель теплового стану пожежного в ТЗОП. Дана робота є її продовженням.

Аналіз умов пожежогасіння [10, 11] показує, що температура в приміщенні, де виникла пожежа на момент локалізації, може становити до 700–900°C, щільність теплового потоку до 20–45 кВт/м², при цьому гранично допустимі значення НФП, що діють на людину, складають 70°C і 1,5 кВт/м². Граничний час роботи пожежного визначається виникненням опіків внаслідок дії вище описаних НФП, а також підвищенням внутрішньої температури тіла людини (так званого теплового ядра) вище критичного рівня. Для збільшення безпеки роботи пожежників вкрай важливо знати граничний час роботи пожежника (ГЧРП) в тих чи інших умовах гасіння пожежі і не допустити його перевищення. Це граничний час залежить від характеристик ТЗОП (кількість, матеріал і товщина шарів), температури, вологості і швидкості обдування захисного одягу навколишнім повітрям, а також важкості виконуваного навантаження.

На відміну від критичної температури «теплового ядра», певною нижчою, в даній роботі буде використовуватися умовне поняття нормальної температури «теплового ядра», під яким мається на увазі температура внутрішніх органів здорової людини в стані спокою, який не був схильний до перегріву або переохолодження і має значення 37,0–37,5°C. В разі перегріву, зокрема внаслідок виконання фізичного навантаження, внутрішня температура може істотно підвищуватися. В [12, 13] зазначено, що під час виконання спортивних вправ або нормативів при досить широкому розмаїтті видів навантажень внутрішня

температура тіла підвищується до 38.5°C, а у випадках великих навантажень – до 38,8–39.1°C або навіть вище. При цьому підвищення температури до рівня 38,8–39.1°C може вважатися навіть необхідним, так як призводить до прискорення метаболізму і підвищення фізичних показників. Подальше ж підвищення внутрішньої температури призводить до зниження фізичних показників і небезпеки для здоров'я і життя. Такий рівень температури теплового ядра, за якого стан людини погіршується і виникає небезпека для його здоров'я і життя, назвемо критичною температурою «теплового ядра», значення якої в даній роботі прийнято рівним 39,0°C. Слід зазначити, що температура поверхні тіла (поверхневого шару) не відіграє такої суттєвої ролі і може значно відрізнятися від температури ядра. Саме ж поняття "теплового ядра" є умовним, так як воно не має постійних меж розташування і його розміри можуть істотно варіюватися залежно від умов навколишнього середовища.

Огляд існуючих робіт показує, що актуальним завданням є розробка розрахункових методів і моделей теплового стану організму пожежного у теплозахисного одягу, які дозволили б оцінювати час роботи пожежника в захисному одязі залежно від рівнів фізичного навантаження і температурних умов середовища, в якому він працює. Для розв'язання такої задачі необхідні як досить адекватна модель теплового стану організму пожежника у теплозахисному одязі, так і методика визначення параметрів цієї моделі.

Ідея даної роботи полягає в побудові вдосконаленої моделі теплового стану людини, параметри якої визначаються з експерименту, проведеного при кімнатній температурі, які потім використовуються для визначення теплового стану пожежного та визначення граничного часу його роботи при підвищених температурах пожежі.

Метою даної роботи є розробка більш адекватної тривимірної моделі теплового стану пожежного в теплозахисного одягу і визначення параметрів цієї моделі для аналізу та прогнозування граничного часу роботи пожежного в умовах дії небезпечних факторів пожежі.

Для визначення параметрів моделі використовується так званий розрахунково-експериментальний підхід, за якого недостатньо відомі параметри моделі визначаються шляхом їх ідентифікації за даними експериментів, або з використанням літературних даних. У психолого-тренувальному центрі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (ЛДУБЖД) проведені експерименти, в ході яких були отримані залежності температури від часу в різних точках спеціального захисного одягу і тіла пожежника за різного рівня інтенсивності роботи і різних температур навколишнього середовища. За даними цього експерименту, а також за наявними в літературі даними, були визначені параметри моделі, а потім були проведені розрахунки нестационарного теплового стану пожежного в ТЗОП для аналізу граничного часу його роботи пожежника в різних температурних умовах пожежі.

Фізичні процеси, що враховуються в моделі. Тривимірна геометрична модель побудована в програмному комплексі ANSYS Fluent і геометрично близька до форми і розмірів тіла людини. Модель містить обсяги теплового ядра, поверхневого шару, а також шари захисного одягу. Такий вид моделі дозволяє врахувати нерівномірність температури різних частин тіла, а також вплив початкового розподілу температур на тепловий стан організму. Схема теплообміну пожежного в ТЗОП з навколишнім середовищем представлена на рис. 1. Як видно зі схеми, модель тіла пожежного складається з «теплового ядра», що має відгалуження, що йдуть в руки і ноги, за рахунок чого може створюватися ефект прискореного переносу теплоти великими кровоносними судинами, що проходять в кінцівках. Модель тіла пожежного містить також поверхневий шар, через який відбувається теплообмін ядра з костюмом і навколишнім середовищем. Підкостюмний простір і натільний одяг враховуються в моделі як термічний опір на поверхні контакту об'єму захисного одягу і поверхневого шару тіла. Його величина була визначена, виходячи з величини перепаду температур шкіри і підкостюмного простору, виміряного в ході експерименту в психолого-тренувальному центрі ЛДУБЖД.

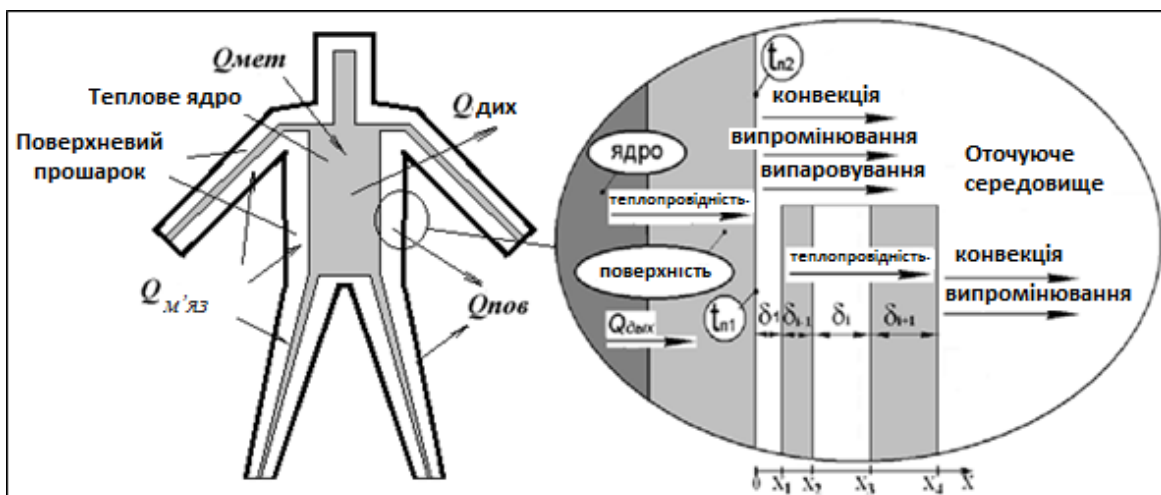


Рис. 1. Схема теплообміну пожежника в ТЗОП з навколишнім середовищем:

t_{n1} – температура поверхні тіла, покритої костюмом; t_{n2} – температура поверхні тіла, не покритої костюмом; x_1-x_4 – координати між шарів теплозахисного костюма

У моделі враховується метаболічне тепловиділення $Q_{мет}$, м'язове тепловиділення $Q_{м'яз}$, теплові втрати на обігрів і зволоження повітря, що видихається $Q_{дих}$, відведення теплоти через поверхню одягу $Q_{пов}$, теплота, що віддається потовиділенням $Q_{пот}$, яка для випадку моделювання людини в захисному одязі може знижуватися до мінімуму, так як піт не може випаровуватись через герметично закритий підкостюмний простір.

Кількість метаболічної теплоти $Q_{мет}$ залежить від виду фізичної активності і наводиться в ряді літературних джерел. Частина цієї теплоти йде на зміну температури тіла, частина $Q_{дих}$ – на підігрів повітря, а решта передається поверхні організму, а потім в навколишнє середовище. В реальності процес теплообміну через тканини організму здійснюється переважно за рахунок перенесення теплоти з циркулюючою кров'ю, однак у моделі такий теплообмін представлений кондуктивним теплообміном через обсяг поверхневого шару тіла і при цьому коефіцієнт теплопровідності є функцією температури теплового ядра, що більш докладно описано нижче.

Метаболічне тепловиділення задається як розподілене тепловиділення в обсязі "теплового ядра" моделі. З цього тепловиділення віднімається теплота, що втрачається організмом з диханням. М'язове тепловиділення $Q_{м'яз}$ також задається об'ємним джерелом тепловиділення в поверхневому шарі об'єму тіла. Значення тепловиділень в ядрі і поверхневому шарі тіла залежно від інтенсивності навантаження наведено в табл. 1. Такий поділ повного тепловиділення на метаболічну і м'язову частини є одним з припущень моделі. Вважається, що в спокої м'язове тепловиділення дорівнює нулю, а всі метаболічні тепловиділення відбуваються в тепловому ядрі. Зі збільшенням навантаження до середнього і важкого рівня метаболічне тепловиділення дещо збільшується, а м'язове тепловиділення становить частину повного тепловиділення.

Таблиця 1

Рівні тепловиділень в ядрі і об'ємі тіла залежно від інтенсивності навантаження

Рівень навантаження	Повне тепловиділення, Вт	Тепловиділення в ядрі, Вт	Тепловиділення в поверхневому шарі тіла, Вт
В стані спокою	150	150	0
Легке навантаження	400	150	350
Середнє навантаження	600	200	400
Важке навантаження	700	200	500

В стаціонарному стані сума розглянутих вище тепловиділень та теплостоків дорівнює нулю, що може бути записано як тепловий баланс людського тіла:

$$Q_m + Q_{м'яз} + Q_{дих} + Q_{пов} + Q_{пот} = 0. \quad (1)$$

Якщо сума в лівій частині (1) позитивна, то організм перегрівається через перевищення тепловиділень над тепловтратами, якщо ж вона від'ємна, то тіло буде, навпаки, охолоджуватися.

Вихідні дані для моделювання. Для даної моделі були прийняті наступні середні фізичні параметри людини: ріст $h=175$ см, вага $m=75$ кг, площа поверхні тіла 2 м². Характеристики основних обсягів тіла, прийняті в моделі, представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Об'єми і теплофізичні властивості частин тіла

Назва частин об'єму тіла	Об'єм, м ³	Густина, кг/м ³	Теплоємність, КДж/(кг*К)	Теплопровідність, Вт/(м*с)
Теплове ядро	0,024	1000	3500	400
Поверхневий шар тіла	0,074	1000	3500	$f(t_k)$

У моделі прийняті параметри реального теплозахисного одягу пожежника USP 2-2, який був одягнений на волонтерів в ході випробування (рис. 6-7). Розташування шарів, товщини і теплофізичні властивості шарів теплозахисного одягу наведені в [8, 9], на рис. 1 і в таблиці 3.

Таблиця 3

Геометричні і фізичні властивості шарів теплозахисного одягу

Назва і призначення шару теплозахисного одягу	Товщина, м	Густина, кг/м ³	Теплоємність, Дж/(кг*С)	Теплопровідність при 20 ⁰ С, Вт/(м*С)
Теплозахисний шар ARALITE	0,00359	74,2	700	0,036
Вологостійкий матеріал, неопрен	0,00051	800	2000	0,012
Верх (Nomex® IIIA Rajama Check® Crosstech®)	0,00052	316,8	1300	0,047

Теплообмін в тепловому ядрі, поверхневих шарах тіла і шарах захисного одягу описується тривимірним нестационарним рівнянням теплопровідності (енергії):

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q_v, \quad (2)$$

де c , ρ і λ – теплоємність, щільність і коефіцієнт теплопровідності об’ємів тіла і шарів одягу, представлені в таблиці 2, 3, які залежать від координат і в ряді випадків – від температури t . Дане рівняння вирішується чисельно з застосуванням методу кінцевих об’ємів [14], для чого розрахункова геометрична область розбивається на необхідну кількість розрахункових осередків. В представленій моделі розрахункова сітка моделі складалася з 7 тис. осередків. Сітка моделі і теплове поле температур наведені на рис. 2.

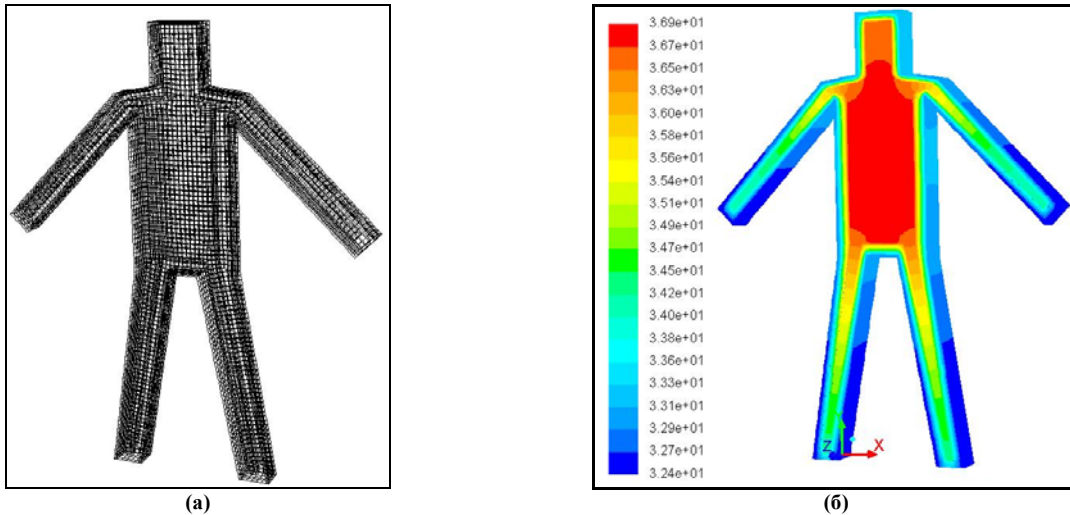


Рис. 2. Розрахункова сітка моделі (а) та типове поле температур, отримані в результаті розрахунків (б)

Граничні умови. На зовнішній поверхні з температурою $t_{нов}$ в напрямку нормалі n до поверхні моделі задані суміщені конвективно-радіаційні граничні умови теплообміну з навколишнім середовищем, що має температуру t_{oc} :

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{конв} + q_{рад}, \quad (3)$$

де

$$q_{конв} = \alpha (t_{нов} - t_{oc}), \quad (4)$$

$$q_{рад} = 5,67 \cdot \varphi \cdot \xi \left(\left(\frac{t_{нов} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{oc} + 273}{100} \right)^4 \right). \quad (5)$$

При цьому коефіцієнт тепловіддачі α прийнятий рівним 5 Вт/(м²/К), ступінь чорноти ξ прийнята рівною 0,7, кутовий коефіцієнт φ прийнятий рівним 1.

Граничні умови на зовнішній поверхні шкіри, не покритій одягом, мають наступний вигляд:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{конв} + q_{рад} + q_{no}, \quad (6)$$

де q_{no} – тепловий потік, що враховує відведення теплоти при випаровуванні поту на зовнішній поверхні тіла, описаний нижче.

Механізми терморегуляції реального організму в моделі реалізовані за рахунок скидання тепла в тепловому ядрі, що відводиться диханням і скиданням теплоти з поверхні тіла від теплового ядра через поверхневий шар і одягу в навколишнє середовище з урахуванням потовиділення. Теплопередача через поверхневий шар є важливим фактором теплового стану організму, інтенсивність якої у пропонованій моделі автоматично регулюється змінним коефіцієнтом теплопровідності поверхневого шару, що імітує залежність інтенсивності теплообміну організму з навколишнім середовищем від інтенсивності кровообігу.

Таким чином, величина коефіцієнта теплопровідності поверхневого шару регулює теплообмін між тканинами тіла за рахунок посилення кровообігу при перегріві і являється одним з головних керуючих параметрів розглянутої частини моделі для терморегулювання людського організму. В авторській роботі [9] це явище також було реалізовано в моделі за рахунок завдання ефективного коефіцієнта теплопровідності поверхневого шару, функціонально залежить від температури теплового ядра в спрощеному вигляді.

В даній роботі і розглянутій моделі такий механізм терморегуляції реалізований складніше за допомогою алгоритму керування коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{ми}$ поверхневого шару, величина якого змінюється так, щоб підтримувати температуру ядра на постійному нормальному рівні. Алгоритм ґрунтується на тому, що коли температура теплового ядра підвищується вище нормального рівня 37,0°C

внаслідок виконання роботи та/або підвищення ефективності температури навколишнього середовища, величина λ_{nu} також підвищується, що призводить до зменшення термічного опору поверхневого шару і, отже, зниження температури теплового ядра t_j , і, навпаки, при зниженні температури теплового ядра знижується і λ_{nu} , що призводить до збільшення t_j . Таким чином алгоритм управління в кожний момент часу нестационарного стану організму шукає таке значення λ_{nu} , яке забезпечує температуру теплового ядра на комфортному рівні (в даному випадку $37,0^\circ\text{C}$) в межах відхилення $\delta = \pm 0,05^\circ\text{C}$.

$$(37,0 - \delta) \geq t_j \geq (37,0 + \delta). \quad (7)$$

Робота алгоритму у моделі реалізована наступним чином.

При знаходженні t_j в діапазоні комфортних значень, тобто при виконанні умови (7), λ_{nu} не змінюється в часі:

$$\frac{d\lambda_{nu}}{d\tau} = 0. \quad (8)$$

При перевищенні температури ядра (t_j) комфортного рівня (7), коефіцієнт теплопровідності поверхневого шару λ_{nu} збільшується таким чином, щоб зменшити температуру ядра і виконати умову (7), при цьому швидкість зміни λ_{nu} не може перевищувати деяку величину:

$$\frac{d\lambda_{nu}}{d\tau} > 0; \left| \frac{d\lambda_{nu}}{d\tau} \right| < V_{\max}. \quad (9)$$

При цьому V_{\max} залежить від конкретного значення λ_{nu} :

$$V_{\max} = 0,2 \lambda_{nu} / 30. \quad (10)$$

Якщо шляхом збільшення λ_{nu} не вдається виконати умову (7), що може бути підвищений при температурі середовища або великому фізичному навантаженні, то λ_{nu} продовжує збільшуватися з часом за дотримання умов (9)-(10). При зниженні температури середовища та/або навантаження температура тіла буде знижуватися до нормального рівня, а потім знову підтримуватися на нормальному рівні за рахунок підібраної величини λ_{nu} .

Аналогічно для випадку, коли температура ядра з різних причин стає нижче комфортного рівня, значення λ_{nu} зменшується сильніше:

$$\frac{d\lambda_{nu}}{d\tau} < 0; \left| \frac{d\lambda_{nu}}{d\tau} \right| < V_{\max}. \quad (11)$$

Значення λ_{nu} повинно бути менше деякого максимального рівня, $\lambda_{nu\max}$:

$$\lambda_{nu} \leq \lambda_{nu\max}. \quad (12)$$

Для проведених нижче розрахунків було обрано в ході ідентифікації параметрів і було рівним $45\text{--}50$ Вт/(м*град), що забезпечує відповідний теплообмін між тканинами тіла і достатню рівномірність температури в його об'ємі.

Під час чисельного розв'язання рівнянь математичної моделі (1)–(6) на кожному кроці за часом ітераційним методом послідовних наближень знаходиться таке λ_{nu} , яке забезпечує задоволення умови (7). Таким чином, в моделі враховується прискорення кровообігу при підвищенні навантаження, що призводить до більш інтенсивного переносу теплоти від внутрішніх органів і м'язів реального організму до його поверхні.

Наведений вище алгоритм є алгоритмом пропорційного регулювання величини λ_{nu} для задоволення критерію регулювання (7). Він є більш досконалим, оскільки позбавляє від необхідності підбирати залежність λ_{nu} від температури для кожного конкретного випадку, як це розглядалося в [9].

Так, для людини в ТЗОП для умов моделювання, наведених на рис. 9 для $T_{oc}=40^\circ\text{C}$, залежність теплопровідності поверхневого шару тіла від часу і детальне поле температур в площині симетрії представлені на рис. 3. Видно, як значення λ_{nu} від часу зростають внаслідок підвищення внутрішнього тепловиділення в тілі при середньому навантаженні і після деякого моменту часу стають постійними, що призводить до перегріву організму. Для інших мінливих умов фізичного навантаження пожежника, температур навколишнього середовища в часі і типів костюмів поведінка кривої λ_{nu} від часу буде якісно подібною, але кількісно може бути іншою.

Теплообмін потовиділенням. Аналогічно [9] максимальний рівень тепловіддачі потовиділенням розраховується в моделі за залежністю:

$$q_{\max} = k \cdot r \cdot G_n \quad (13)$$

де k – коефіцієнт від 0 до 1, який може враховувати неповне випаровування виділеного поту, наприклад за підвищеної вологості навколишнього середовища або обмеженості відведення вологого повітря від поверхні в захисному одязі, r – теплота пароутворення води, G_n – швидкість випаровування поту з поверхні тіла (кг/с), параметр, який визначається залежно від умов навколишнього середовища та інтенсивності роботи.

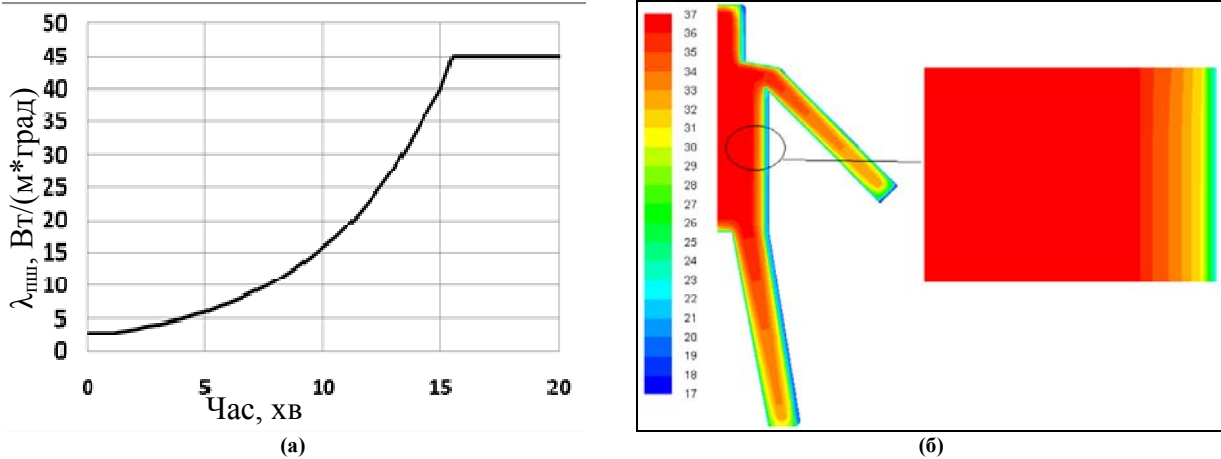


Рис. 3. Залежність теплопровідності поверхневого шару тіла від часу (а) і детальне поле температур тіла пожежника в одязі (б) для умов моделювання, наведених на рис. 9 для $t_{oc}=40^{\circ}\text{C}$

У моделі інтенсивність потовиділення залежить від температури ядра у залежності:

$$q_{no} = \begin{cases} 0, & t_{я} < 37.0 \\ (0.9 - 33.65 \cdot t_{я}) \cdot q_{nmax}, & 37.0 \leq t_{я} \leq 38.5 \\ q_{nmax}, & t_{я} > 38.5 \end{cases} \quad (14)$$

Так, за нормальної температури ядра $37,0^{\circ}\text{C}$ і нижче тепловіддача потовиділенням відсутня, в межах від $37,0$ до $38,5$ вона зростає в лінійній залежності, а вище $38,5$ дорівнює максимуму. Слід зазначити, що в даній роботі в ході розгляду пожежника в ТЗОП теплота, що віддається потовиділенням, не враховується, так як вважається, що піт не може випаровуватися з-за закритого підкостюмного простору. У той же час, в ході моделювання теплового стану людей у теплокамері (в легкому одязі) потовиділення відіграє ключову роль.

Теплообмін диханням. Теплота, що відводиться з диханням $Q_{дох}$, задається в комп'ютерній моделі як внутрішнє негативне джерело теплоти, що діє в обсязі теплового ядра. Вона обчислюється як сума теплоти, що йде на підігрів повітря до температури тіла і на випаровування вологи в легенях (прийнято допущення, що видихуване повітря повністю насичене водяними парами) за залежності, використовуваної також в [9]

$$Q_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} = G_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} \cdot \left((m_{i\dot{a}\dot{n}}^{t_{\dot{y}}} - m_{i\dot{a}\dot{n}}^{t_{i\dot{n}}}) (100\% - W) \right) \cdot r_i + \dot{n}_o \rho (t_{\dot{y}} - t_{i\dot{n}}) \quad (15)$$

де $G_{дох}$ – об'ємна витрата повітря, що проходить через легені, m^3/c ; $m_{нас}$ – вологовміст насиченого вологого повітря при температурі ядра і температурі навколишнього середовища, kg/m^3 , r_n – теплота пароутворення води, $\text{Дж}/\text{кг}$; W – відносна вологість повітря; c_p – питома теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ і ρ – щільність повітря, kg/m^3 . Об'ємна витрата повітря в моделі виражена у вигляді лінійної функції виду:

$$G_{дох} = 2,609 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{я} - 2,13 \cdot 10^{-4} \quad (16)$$

Процедура ідентифікації параметрів моделі полягає в пошуку значень невідомих параметрів моделі, при яких результати розрахунків температур в моделі збіглися б з експериментальними. Доцільно шукати значення параметра в умовах його максимального впливу, а також мінімального впливу інших параметрів.

Основні вимоги до моделі, після задоволення яких її можна вважати адекватною і придатною для прогнозних розрахунків, такі:

1. Забезпечення номінальної температури ядра ($37-37,5^{\circ}\text{C}$) в стаціонарному стані в діапазоні температур навколишнього середовища $18-31^{\circ}\text{C}$ в захисному одязі і в легкому одязі. При цьому температура поверхні тіла повинна бути в межах, зазначених у літературі.

2. Збіг залежності зміни внутрішньої температури тіла у часі, виміряної в експерименті, з залежністю, отриманою на моделі з заданими умовами аналогічно експериментальним.

В даній роботі для налаштування моделі була використана наступна інформація: дані про стаціонарні температури тіла при різних температурах навколишнього середовища [12, 13]; дані про зміну температури у часі при випробуваннях, виконаних у психолого-тренувальному центрі ЛДУБЖД, а також дані випробувань в тепловій камері при різних температурах навколишнього повітря [15].

Для ідентифікації параметрів моделі в нестационарному режимі нагріву використовувалися експериментальні дані з літератури. Так, в [15] представлені результати випробувань, наведених у тепловій камері з різними температурами навколишнього повітря від 30 до 80°C , тривалість яких була від 20 хв при 80°C , до 60 хв при менших температурах. Ці умови навколишнього середовища були підставлені в модель як вихідні дані, при цьому ідентифікувалися (підбиралися) параметри тепловідведення потовиділенням, а також характер зміни коефіцієнта теплопровідності поверхневого шару тіла від часу (максимальне значення і швидкість зміни), описані у відповідному розділі опису моделі. Отримані в ході розрахунків залежності температури теплового ядра в моделі були порівняні з експериментальними і наведені на рис. 4.

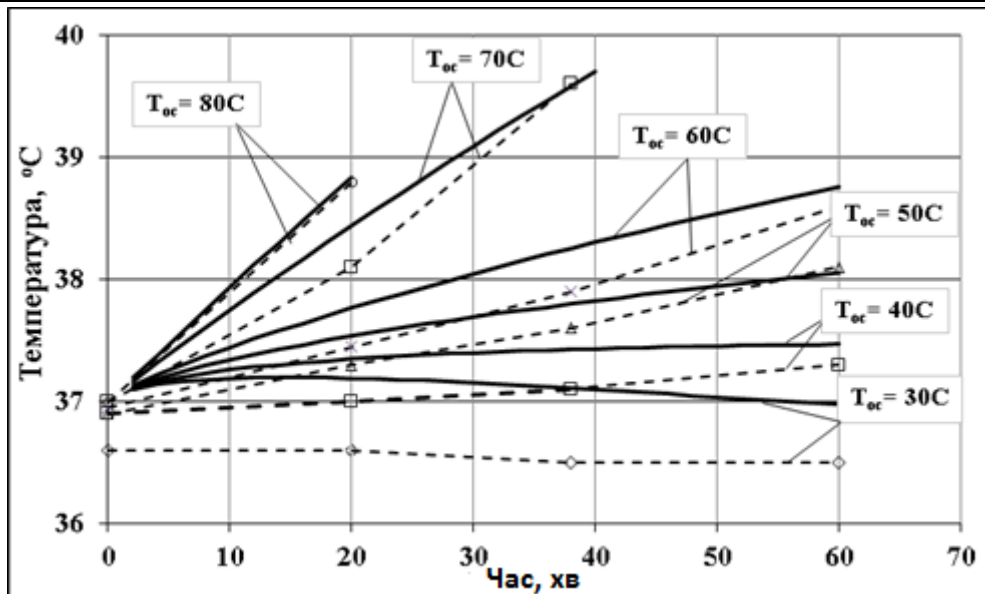


Рис. 4. Залежність температури ядра тіла людини від часу, отримана моделюванням (суцільні лінії) і експериментально в теплокамері (пунктир) [15] за різних температур навколишнього середовища t_{oc}

Опис випробувань в ЛДУБЖД. В даній роботі для верифікації моделі використовуються дані експериментальних досліджень, проведених у психолого-тренувальному центрі, який розташований у приміщенні навчальної пожежно-рятувальної частини на території ЛДУБЖД [9]. Тренажерний зал центру призначений для надання з допомогою тренажерів дозованого фізичного навантаження різного рівня складності. У ньому встановлені 4 тренажера: велоергометр, степпер і бігова доріжка (рис. 5).



Рис. 5. Волонтер у процесі випробування на біговій доріжці

Випробування проводилися як в умовах звичайної температури, коли температура оточуючого середовища становила близько 18°C , так і при підвищеній температурі повітря (до 43°C) у спеціальній тепловій камері. У випробуваннях брали участь волонтери, які виконують фізичне навантаження різної інтенсивності.

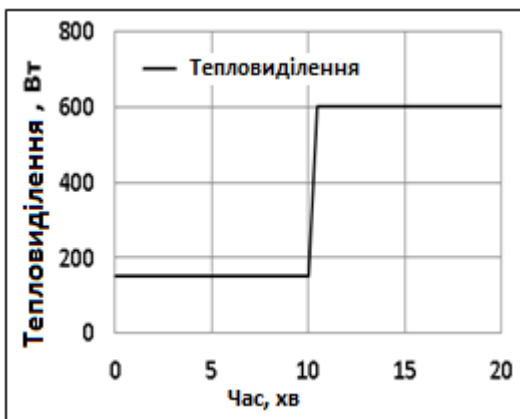
Кожне випробування проводилося за наступною програмою: волонтер одягав захисний одяг і вимірювальні датчики, після чого 15 хвилин перебував у спокої, потім він приступав до виконання навантаження протягом заданого проміжку часу (близько 10–15 хвилин), після чого відпочивав не знімаючи ТЗОП 15 хвилин, а потім повторював виконання навантаження.

В ході проведених випробувань були виміряні температури поверхні тіла і підкостюмного простору залежно від часу. Вимірювання температури проводилися за допомогою термодатчиків, розташованих у точках T1–T8 (рис. 6): T1 – спина (на тілі); T2 – груди (на тілі); T3 – пах (підкостюмний простір пожежного); T4 – груди (підкостюмний простір пожежного); T5 – пахви (підкостюмний простір пожежного); T6 – ліва частина спини (область серця) (підкостюмний простір пожежного); T7 – спина (область печінки) (підкостюмний простір пожежного); T8 – зовнішнє середовище. В результаті випробувань були отримані значення вимірюваних температур у часі, котрі потім були порівняні з результатами, отриманими розрахунковим шляхом з допомогою описаної вище комп'ютерної моделі.

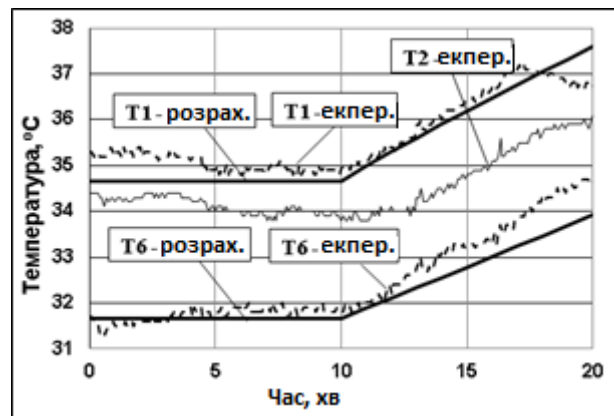


Рис. 6. Схема розміщення датчиків на тілі пожежного і в підкожному просторі

Вихідні дані моделі були задані відповідними умовами експерименту. Для моделювання роботи волонтера в кімнатних умовах температура повітря t_{oc} була задана рівній 18°C , сумарне тепловиділення задавалося залежністю від часу, яка представлена на рис. 8(a), тепловідведення за рахунок потовиділення не враховувалось. Результати порівняння експериментальної і розрахункової температур шкіри і підкожного простору для рівня середнього навантаження представлені на рис. 7(б).



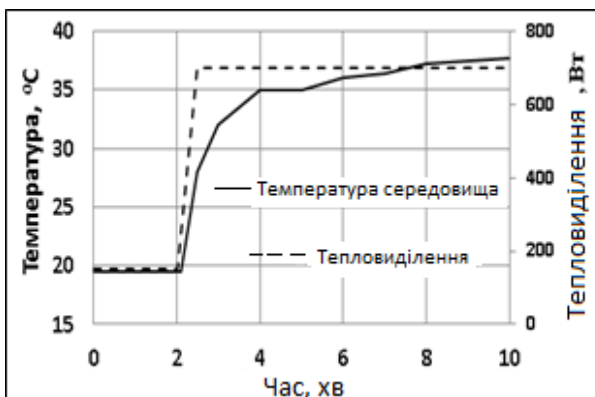
а)



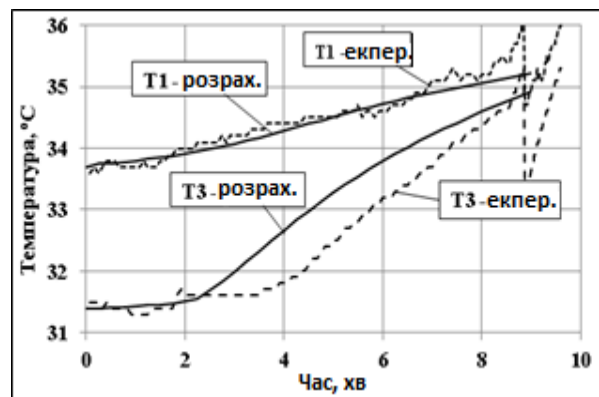
б)

Рис. 7. Залежність тепловиділення пожежного від часу (а), температури шкіри (Т1, Т2) і підкожного простору (Т6) в області грудей і на спині, отримані експериментально (експ.) і моделюванням (розрахунок) для умов кімнатної температури (б)

Для моделювання теплового стану пожежного в умовах підвищеної температури використовувалися такі умови: температура повітря t_{oc} і тепловиділення у результаті навантаження задавалися у вигляді залежностей від часу, представлених на рис. 9(a); тепловідведення за рахунок потовиділення також не враховувалися. Результати порівняння експериментальної і розрахункової температур шкіри і підкожного простору для рівня середнього навантаження представлені на рис. 8(б).



а)



б)

Рис. 8. Залежність тепловиділення пожежного і температури повітря в термокамері від часу (а), температури шкіри (Т1) і підкожного простору в області грудей (Т3) (б), отримані експериментально (експ.) і моделюванням (розрахунок)

Як видно з рис. 8(б), температурні криві, отримані в результаті моделювання, якісно і кількісно

близькі з експериментальними кривими. Наявні відмінності можуть бути викликані припущеннями, прийнятими в моделі, а також низкою природних факторів, таких як індивідуальні особливості організму, якість і щільність прилягання датчиків, циркуляція повітря в подкостюмном просторі і т. д. Такі фактори викликають досить сильні флуктуації в рівнях вимірюваних температур. В цілому ж можна зробити висновок про придатність моделі для прогнозування теплового стану пожежника при впливі НФП.

Визначення часу роботи в умовах дії НФП. Для аналізу і прогнозування теплового стану пожежного в ТЗОП при впливі НФП (підвищеної температури) був проведений ряд розрахунків при різних рівнях температур навколишнього середовища в діапазоні від 40°C до 250°C, для яких було визначено час граничної роботи за критерієм перевищення внутрішньої температури вище 39°C.

Для даної групи розрахунків були прийняті наступні консервативні допущення: прийнято малий термічний опір натільного одягу, початковий розподіл температур прийнято таким, в якому температура поверхневого шару близька до температури ядра. Внутрішнє тепловиділення відповідало середньому навантаженню (табл. 1). В результаті розрахунків були отримані залежності температури теплового ядра від часу, а також залежність граничного часу роботи пожежного в костюмі USP 2-2 польської фірми «GO WEST» від температури навколишнього середовища (рис. 10).

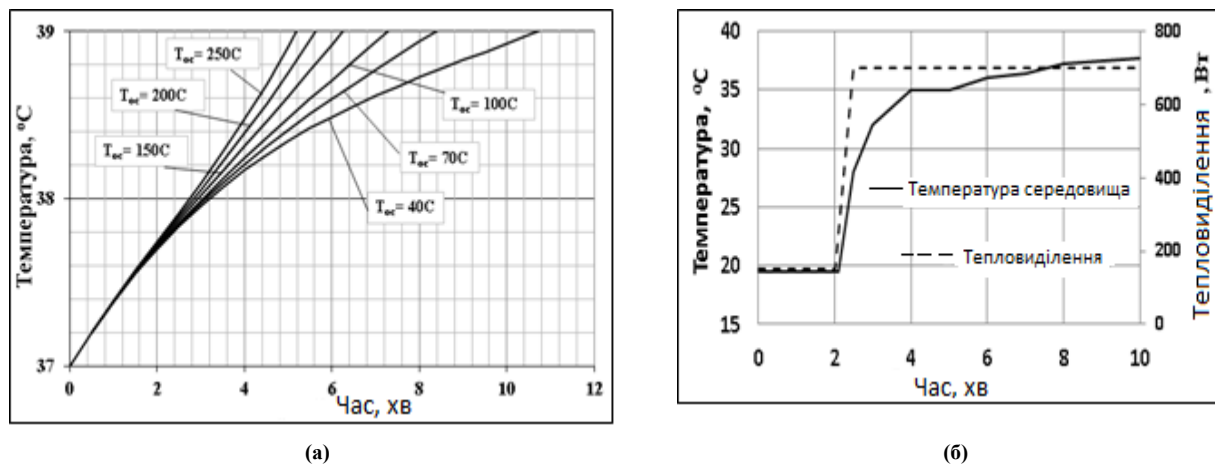


Рис. 9. Залежності температури теплового ядра пожежного від часу для різних температур навколишнього середовища при пожежі (а) і граничного часу роботи пожежного в костюмі USP 2-2 польської фірми «GO WEST» від температури навколишнього середовища при пожежі (б)

Умови отримання залежності температури теплового ядра від часу для температури середовища 40°C найбільш близькі до наявних у тепловій камері ЛДУБЖД. Слід зазначити, що за даними розрахунків внутрішній перегрів організму в усіх випадках настає раніше, ніж внутрішня поверхня костюма прогріється вище 50°C (умова виникнення опіків), що свідчить про важливість урахування загального теплового стану пожежного при оцінці часу, протягом якого можливі роботи з гасіння пожеж при впливі НФП. Для всіх розглянутих рівнів температури середовища час до настання перегріву знаходиться в межах від 5 до 10 хв (рис. 8б). На цьому малюнку верхні значення кривої корелюють з експериментальними і розрахунковими результатами, проведеними в тепловій камері ЛДУБЖД.

Запропонована модель може бути використана для оцінки граничного часу роботи пожежних за умов, що відрізняються від представлених в даній роботі. Так, в якості вихідних даних у модель можуть бути підставлені інша температура навколишнього середовища, інтенсивність навантаження, властивості і конфігурація матеріалів ТЗОП. В результаті розрахунків можуть бути отримані залежності і поля температур різних частин тіла, і одягу від часу і визначено граничний час роботи пожежника в різних умовах.

Висновки:

1. Розроблена і верифікована тривимірна модель теплового стану пожежного в ТЗОП, що враховує основні механізми теплообміну і терморегуляції людського організму і захисного костюма.
2. Для обліку механізму терморегуляції за рахунок мінливих швидкості кровообігу вперше запропоновано алгоритм, що реалізує принцип термостатування внутрішньої температури теплового ядра організму шляхом управління теплопровідністю зовнішнього шару тіла пожежника.
3. Проведений ряд експериментів за участю волонтерів, які виконують фізичне навантаження в умовах кімнатної температури, а також в умовах підвищеної температури. В ході експериментів були виміряні температури поверхні тіла і підкостюмного простору залежно від часу.
4. Шляхом ідентифікації визначено ряд параметрів моделі, з експериментальними даними, отриманими як в ЛДУБЖД, так і зазначеними в літературі.
5. Отримана залежність граничного часу роботи пожежного в костюмі USP 2-2 польської фірми «GO WEST» залежно від температури навколишнього середовища за критерієм вище внутрішньої температури граничного значення.
6. Представлена в роботі модель також може бути використана для оцінки граничного часу роботи

пожежників для захисного одягу і умов (властивості ТЗОП, параметри навколишнього середовища, навантаження), що відрізняються від представлених в даній роботі.

Література

1. Одяг спеціальний захисний. Загальні вимоги : ДСТУ EN 340:2001 (EN 340:1993, IDT). – [Чинний від 01 липня 2003 року] / Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon.golovbukh.ua/regulations/10637/478742/>
2. Stolwijk J. A. J. Matematikal model of physiological temperature regulation in man / J. A. J. Stolwijk, J. D. Hardi. – Washington, 1971.
3. Ермакова И.И. Исследование динамических процессов в системе терморегуляции человека методом цифрового моделирования : дис. ... к. т. н. / Ермакова И.И. – К., 1974. – 162 с.
4. Бартон А. С. Людина в умовах холоду / А. С. Бартон, О. Ж. Эдхолм. – М. : Иноземна література, 1957. – 346 с.
5. Черунова В. В. Математичне моделювання в рамках гнучкого проектування теплозахисного одягу / Черунова В. В. – М. : Швейна промисловість. – 2006. – № 5. – С. 37–38.
6. Галузо Ю. А. Аспекти математичних моделей теплового променю з тілом людини / Ю. А. Галузо, В. В. Черунова, В. В. Куренова // Сучасні наукові технології. – 2013. – № 8 (частина 1). – С. 30–31.
7. Kurmazenko E. A. A detailed simulation model of the human organism thermoregulation system / E. A. Kurmazenko, T. V. Matjushev, N. V. Soloshenko // Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, Noordwijk, Netherlands, 20–22 May. – 1997. – SP-400. – P. 815–821.
8. Болібрух Б.В. Разработка и верификация расчетной модели теплового состояния теплозащитной одежды пожарного при различных видах испытаний / Б.В. Болібрух, М. Хмель // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. Jozefow, Kwartalnik CNBOP-PIB. – 2015. – № 2. – С. 53–63.
9. Bolibrukh B.V. A Model of a Firefighter's Thermal Condition when Attired in Protective Clothing / B.V. Bolibrukh, M. Chmiel, Yu. Mazur // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. Jozefow, Kwartalnik CNBOP-PIB. – 2016. – № 1. – С. 37–47.
10. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій / Шналь Т. М. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 176 с. – ISBN 978-966-553-945-2.
11. Wei Lu Advanced steel structures. Structural fire design. Fatiguedesign / Wei Lu, Pentti Mäkeläinen / Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures publications. – 2003.
12. Павлов А. С. Термофізіологія м'язової роботи і спортивного стресу : монографія / Павлов А. С. – Донецьк : ДонНУ, 2007. – 79 с.
13. Asmussen E. Body temperature and capacity for a work / E. Asmussen // Acta Physiol. Scand. – 1945. – № 10. – P. 1–22.
14. Дульнев Р. Н. Застосування ЕОМ для вирішення задач теплообміну / Р. Н. Дульнев, В. Р. Парфонов, А. В. Сигалов. – М. : Вища школа, 1990. – 192 с.
15. Чвырев В. Р. Тепловий стрес / В. Р. Чвырев, А. Н. Ажаев, Р. Н. Новожылов. – М. : Медицина, 2000. – 296 с.

Рецензія/Peer review : 28.1.2017 р.

Надрукована/Printed : 6.2.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Карван С.А.