

*Ю.В. Луценко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф., НУЦЗУ,
О.В. Миргород, к.т.н., доцент, с.н.с., доцент каф., НУЦЗУ,
О.В. Гур'єв, директор, ТОВ «Центр аудиту безпеки»*

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИПУСТИМОГО ЧАСУ ПЕРЕБУВАННЯ РЯТІВНИКА В ЗОНАХ ТЕПЛОВИХ ВПЛИВІВ

(представлено д.т.н. Ключкою Ю.П.)

Розроблена математична модель та розраховані (визначені) значення припустимого та граничного часу роботи рятувальника, побудовані залежності впливу параметрів середовища (температури, ергономічного навантаження, вологості, рухливості повітря) на припустимий та граничний час роботи.

Ключові слова: тепловий баланс, припустимий час перебування, граничний час роботи.

Постановка проблеми. В реальних умовах пожежі на тепловий стан людини і на припустимий час роботи суттєвий вплив спричиняють не тільки температура повітря, а також його вологість, швидкість руху, температура поверхні оточуючих об'єктів, і фізичне навантаження при роботі і пересуванні.

Роботи, як правило, проводяться при дефіциті часу, нестачі (надлишку) інформації, під впливом різноманітних зовнішніх і внутрішніх перешкод. Тому існує потреба у визначенні кількісних і якісних закономірностей функціонування фізіологічних систем в високотемпературних умовах в стані спокою, при м'язовій роботі і під час відновлюючого періоду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Діяльність людини при веденні робіт в зонах теплових навантажень вивчається вже давно. Аналіз проблеми створення ефективного термозахисного одягу показав, що існуючі види спеціального захисного одягу (СЗО) не повною мірою забезпечують необхідний захист, а в окремих випадках створюють додаткові фактори небезпеки. В роботі [1] автори наводять удосконалену модель теплообміну, що може враховувати прогнозування передачі тепла через мокрі захисні матеріали одягу. В роботі [2] наведені результати експериментальних досліджень впливу добавок кремнеземного аерогелю (silica aerogel felt- SAF) до захисного одягу пожежних (irefighters' protective clothing – FPC). Теплозахисні характеристики FPC з SAF підвищилися зі збільшенням товщини SAF. Результати досліджень, наведені в роботі [3] свідчать, що із застосуванням тканин PCM (матеріали з фазовою зміною – (phase change materials) тепловий захист багат шарових тканин був значно збільшений. В роботі [4] були розроблені та співставлені моделі прогнозування множинної лінійної регресії та штучної нейронної мережі (ANN). Найкращі моделі ANN забезпечують базовий інструмент для вивчення теплозахисних характеристик тканин. В роботі [5] була введена числова модель перенесення тепла та вологи в теплозахисному одязі при впливі спалаху. Модель була розроблена з

урахуванням того, що текстиль розглядається як пористе середовище. В роботі [6] наведені результати експериментальних досліджень з визначення теплозахисних характеристик матеріалів з метою їх комплексного дослідження для створення ергономічного та естетичного конкурентноздатного спецодягу з високими показниками надійності.

Постановка завдання та його вирішення. Розробка спецзасобів, і в першу чергу засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), здійснюється для профілактики і уникнення явищ, коли в умовах комбінованого впливу високих температур і агресивного середовища людина піддається дії небезпечного отруєння, опіків, травм і професійних захворювань. Однак доцільно приділити більше уваги відповідній підготовці персоналу і навчанню безпечним прийомам роботи, а також вивченню впливу ергономічних навантажень і розробці методик для визначення часу припустимого перебування в небезпечній зоні.

Доцільно розробити математичну модель визначення припустимого часу безперервного перебування і пересування працюючого в зонах теплових впливів в залежності від важкості робіт.

Встановлено [7, 8], що теплообмін кондукцією і диханням грає незначну роль, тому тепловий баланс Q можна представити в наступному вигляді

$$Q = Q_R + Q_c + Q_e + Q_M(1 - \mu). \quad (1)$$

Для того щоб в організмі підтримувалася теплова рівновага, тобто було відсутнє теплонакопичення ($Q = 0$), повинно витримуватися наступне співвідношення

$$Q_e = -(Q_R + Q_c + Q_M(1 - \mu)). \quad (2)$$

В цьому випадку все тепло, що надходить за рахунок конвекції, випромінювання і фізичного навантаження компенсується тепловідведенням шляхом випаровування поту. Однак, така компенсація можлива тільки до тих пір, поки необхідне випаровування поту не досягне максимально можливого значення. Подальше збільшення теплового впливу викликає порушення теплової рівноваги і поступове підвищення температури тіла, що приводить до обмеження часу перебування і робіт в даних умовах.

Розглянута ситуація відноситься до таких умов оточуючого середовища, при яких випаровування поту ще можливе. Якщо ж за умовами середовища випаровування поту стає неможливим, то починається зворотній процес – конденсація вологи на поверхні шкіри. В цьому випадку вираз (2) втрачає фізичний зміст, а в рівнянні (1) складова Q_e повинна бути замінена на $Q_{e_{\max}}$.

Припустимий час роботи $\tau_{\text{пр}}$, с, визначається [9] припустимим приростом теплоти в організмі $\Delta Q_{\text{пр}}$, Вт, віднесеним до результуючого теплового потоку, Q , Вт, який підведений до тіла людини

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\Delta Q_{\text{пр}}}{Q}. \quad (3)$$

Для розрахунку прийняті чотири вихідні параметри, які характеризують мікроклімат оточуючого середовища і ступінь важкості виконуваної роботи (температура оточуючого повітря по сухому термометру, $t_c, ^\circ\text{C}$, температура оточуючого повітря по мокрому термометру, $t_m, ^\circ\text{C}$, швидкість руху повітря, $\vartheta, \text{м/с}$, потужність енерговитрат рятувальника, що відповідають ступеню важкості виконуваних робіт, $Q_M, \text{Вт}$).

Енерговитрати приймаємо в залежності від важкості виконуваної роботи. При виконанні різноманітних видів робіт, енерговитрати приймають по найбільш важкому виду. Орієнтовну оцінку енерговитрат можна виконувати по наступній шкалі:

- легка робота – 250 Вт;
- робота середньої важкості – 350 Вт;
- важка робота – 450 Вт;
- дуже важка робота – 550 Вт і більше.

Математична модель теплообміну з оточуючим середовищем рятувальника, який вдягнутий в спецодяг, побудована на основі фізичних закономірностей, отриманих експериментальним шляхом. Після підстановки числових значень сталих величин і коефіцієнтів, модель приводиться до наступного вигляду:

$$\tau_{\text{пр}} = 10^4 / Q, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{гр}} = 1,4 \cdot \tau_{\text{пр}}, \quad (5)$$

$$Q = Q_c + Q_R + Q_{E_{\text{max}}} + 0,8Q_M, \quad (6)$$

$$q_c = \frac{T_c - 35}{0,06 / \vartheta_{\text{от}}^{0,6} + 0,08}, \quad (7)$$

де $\vartheta_{\text{от}}$ – відносна швидкість руху повітря і людини, м/с;

$$\vartheta_{\text{от}} = V + 3 \cdot 10^{-3} Q_M - 0,3, \quad (8)$$

$$Q_R = 4,12 \cdot 10^{-8} \left((T_c + 273)^4 - 9 \cdot 10^9 \right), \quad (9)$$

$$Q_{E_{\text{max}}} = \frac{P_c - 5623}{6 / \vartheta_{\text{от}}^{0,6} + 8}, \quad (10)$$

$$P_c = k \exp \left(\frac{1514 + 23,6 T_M}{236 + T_M} \right) - 67(T_c - T_M), \quad (11)$$

де, P_c – парціальний тиск водяної пари в оточуючому повітрі, Па; k – коефіцієнт пропорційності.

З використанням розробленої математичної моделі теплообміну рятувальника були проведені розрахунки припустимого і граничного часу роботи і побудовані графіки (рис. 1–3).

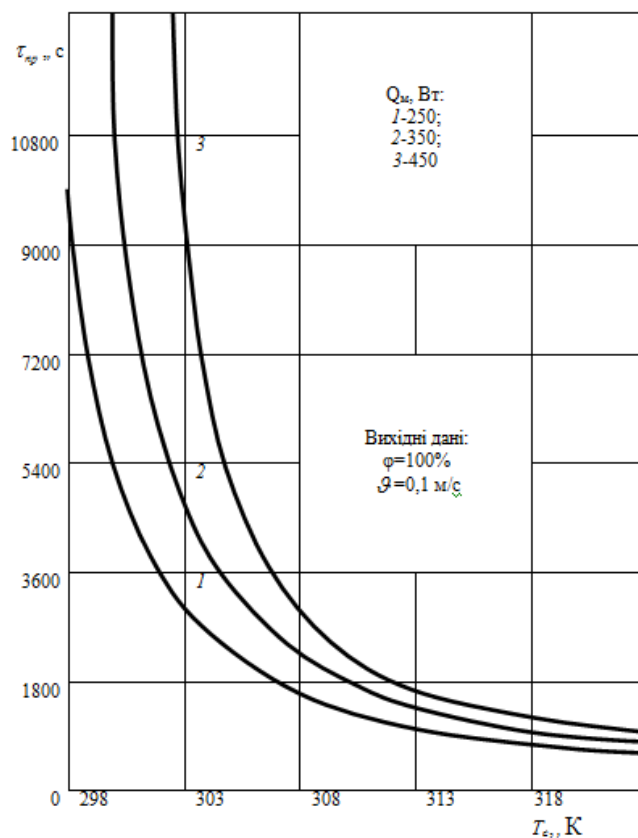


Рис. 1. Вплив температури і навантаження на припустимий і граничний час роботи

Графіки (рис. 1–3) показують, що вплив вологості має ту ж закономірність, що і вплив фізичного навантаження. Вплив зміни вологості повітря проявляється в більшій мірі зі зменшенням температури повітря.

Зміна температури повітря більш значно відбивається на зміні припустимого часу роботи в зоні температур приблизно до 35°C . Тут також при невеликій зміні температури може суттєво змінитися припустимий час роботи.

На графіку (рис. 3) всі криві сходяться і перетинаються в одній точці при температурі 35°C , яка приблизно дорівнює температурі шкіри.

При температурі менше 35°C збільшення швидкості руху повітря сприяє покращенню тепловіддачі і збільшенню припустимого часу роботи, а при температурі вище 35°C – навпаки, зі збільшенням швидкості руху повітря покращується теплоприток. Це важлива закономірність, яка в практичній роботі не завжди враховується. В цілому ж зміна швидкості руху повітря в зоні температур $35\text{--}50^\circ\text{C}$ мало впливає на припустимий час роботи. На всіх трьох розглянутих графіках (рис. 1–3) будь-яка пряма, проведена паралельно вісі абсцис, є лінією еквівалентних умов, оскільки ця лінія відповідає однаковому припустимому часу, а відповідно, і однаковому тепловому стану людини. Таким чином, ця лінія дозволяє встановити еквівалентні сполучення навантаження, температури і вологості, температури і швидкості руху повітря, що спричиняють однаковий вплив на людину.

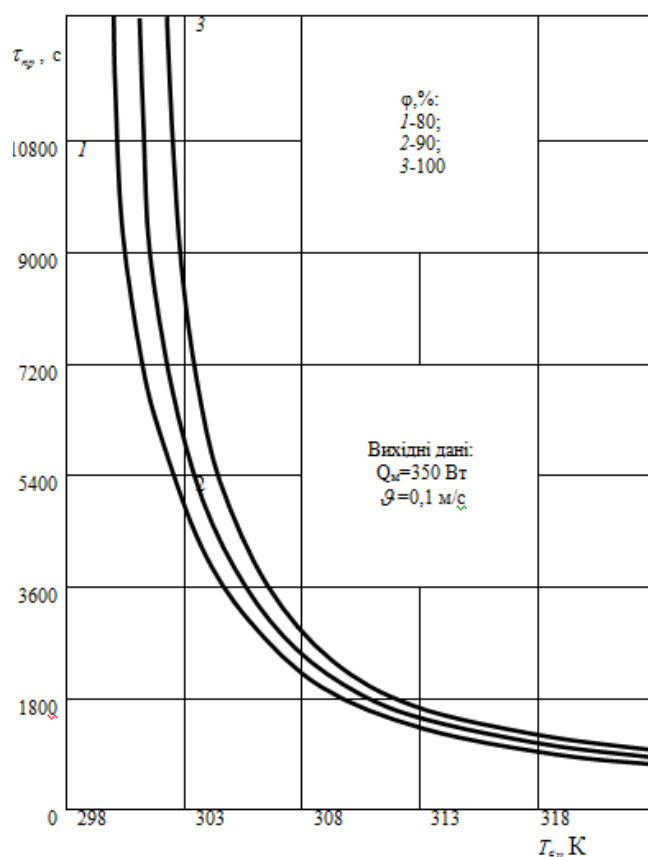


Рис. 2. Вплив температури і вологості повітря на припустимий і граничний час роботи

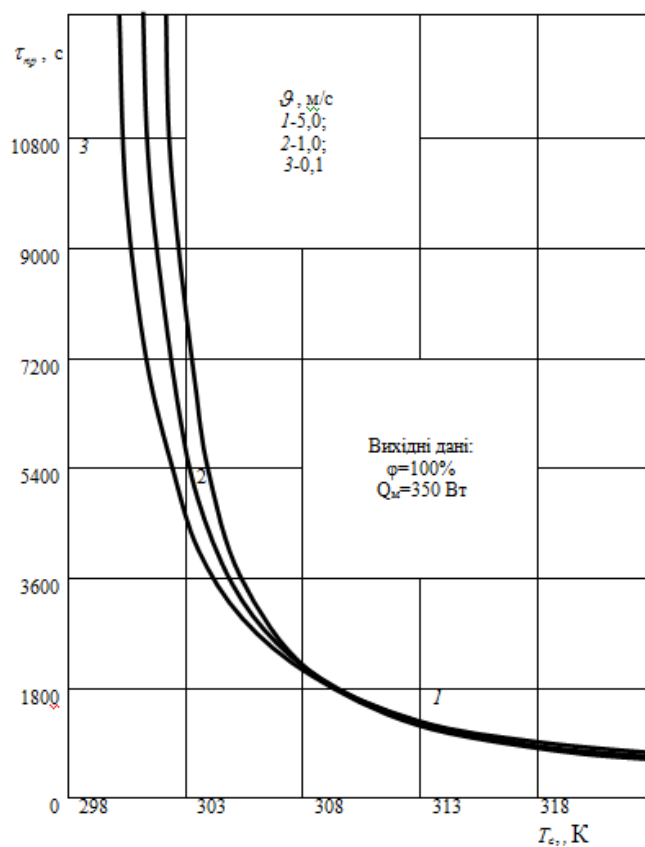


Рис. 3. Вплив температури і рухливості повітря на припустимий і граничний час роботи

Для позначення рівності між теплотворенням і тепловіддачею прийнятий термін "тепловий баланс", що припускає наявність стану рівноваги, а точніше – "стійкий стан". Обидві частини рівності, що характеризують цей стійкий стан – теплотворення і теплопловіддача, є змінними величинами, що залежать як від фізіологічних, так і від фізичних параметрів.

Однак, теплотворення значно більше залежить від фізіологічних, ніж від зовнішніх фізичних факторів, обумовлених умовами експлуатації. На противагу цьому тепловіддача в більшому ступені залежить від фізичних факторів, не зменшуючи значення фізіологічних. Представлення по цьому питанню в літературі [7, 10] були дуже заплутані, поки не було усвідомлено, що залежність тепловіддачі від фізіологічних факторів, з однієї сторони, і від фізичних – з іншої, може бути розмежована.

Такий розподіл зробити досить просто, тому що фізіологічні перемінні головним чином регулюють передачу тепла від внутрішніх шарів до шкіри, тоді як фізичні фактори створюють вплив в зоні підодягового мікроклімату між шкірою і навколишнім середовищем

Тому загальний градієнт температури (від температури "серцевини" до температури навколишнього середовища) доцільно розділити на дві частини:

- "фізіологічний градієнт" – від температури "серцевини" до температури шкіри;
- "фізичний градієнт" – від температури шкіри до температури навколишнього середовища.

Тепловіддача в обох цих ділянках залежить від відповідних температурних градієнтів, що зв'язано з основним законом теплопередачі.

Висновки. Теоретично обґрунтовані методи визначення складових теплового балансу тіла людини при пасивному теплозахисті. Показано, що припустимий і граничний час роботи людини в термозахисному спецодязі залежать від приросту кількості теплоти в організмі людини та результуючого теплового потоку. Розроблена математична модель та розраховані (визначені) значення припустимого та граничного часу роботи рятувальника, побудовані залежності впливу параметрів середовища (температури, ерготермічного навантаження, вологості, рухливості повітря) на припустимий та граничний час роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. J. R. Lawson, W. E. Mell, K. Prasad. A Heat Transfer Model for Firefighters' Protective Clothing, Continued Developments in Protective Clothing Modeling // Fire Technology. 2010. volume 46 issue 4. P. 833 – 841. Doi: 10.1007/s10694-010-0139-z.

2. D. Huang, C. Guo. Thermal Protective Performance under Fire Conditions of Silica Aerogel Felt-bedded Firefighters' Protective Clothing // Materials Science. 2017. Vol. 23 issue 4. P. 335-341.

3. M. Zhao. The usage of phase change materials in fire fighter protective clothing: its effect on thermal protection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 274. P. 012136.

4. S. Mandal, G. Song. An Empirical Analysis of Thermal Protective Performance of Fabrics Used in Protective Clothing // The Annals of Occupational Hygiene. 2014. Vol. 58, Issue 8. P. 1065–1077. Doi: 10.1093/ann-hyg/meu052.

5. G. Song, P. Chitrphimsri, D. Ding. Numerical Simulations of Heat and Moisture Transport in Thermal Protective Clothing Under Flash Fire Conditions // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. Volume 14. issue 1 on pages 89 – 106. doi.org/10.1080/10803548.2008.11076752.

6. Колосніченко О.В. Експериментальні дослідження матеріалів для створення теплозахисного спецодягу / О.В. Колосніченко, Т.О. Полька, М.В. Колосніченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2015. № 1. С.191-198

7. Кузнец Е.И. Физиология терморегуляции. – Л.: Наука, 1984. – 470 с.

8. Луценко Ю.В. Визначення гранично-припустимих показників теплового стану людини при роботі в термозахисному спеціальному одязі / Ю.В. Луценко, С.О. Тюпін // Проблеми пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – вип. 40. – С. 142-146.

9. Slomanov S. N., Klimenko Yu. V., Mariychyk I. Ph. Heat protection of mine workers and mine rescuers / 29-th Institute, Katowice, Poland, 2001. – P. 161–164.

10. Лиопо Т.Н., Циценко Г.В. Климатические условия и тепловое состояние человека. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971. – 151 с.

Отримано редколлегією 14.03.2018

Ю.В. Луценко, О.В. Миргород, А.В. Гурьев

Определение допустимого времени пребывания спасателя в зонах тепловых воздействий

Разработана математическая модель и определены значения допустимого и предельного времени работы спасателя, построены зависимости влияния параметров среды (температуры, эрготермической нагрузки, влажности, подвижности воздуха) на допустимое и предельное время работы.

Ключевые слова: тепловой баланс, допустимое время пребывания, предельное время работы.

Yu. Lutsenko, O. Mirgorod, A. Guryev

Determination of the allowable time of the lifesaver's stay in the zones of thermal effects

A mathematical model has been developed and the values of the permissible and limiting lifetime of the rescuer have been determined, and the dependences of the influence of environmental parameters (temperature, ergothermic load, humidity, air mobility) on the permissible and limiting operating time have been constructed.

Key words: heat balance, allowable time of overstrain, maximum operating time.