

Ю.В. Луценко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф., НУЦЗУ

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ТЕРМОЗАХИСНОГО СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ З КРІОГЕННОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ

(представлено д.т.н. Ключкою Ю.П.)

Запропонована кріогенна система охолодження в термозахисному спецодязі, яка дозволяє суттєво знизити масу комплекту, покращити експлуатаційні показники, збільшити термін захисної дії за рахунок суміщення систем дихання і охолодження використанням суміші азоту з киснем.

Ключові слова: пасивний тепловий захист, активний тепловий захист, кріогенна система, термозахисний спеціальний одяг.

Постановка проблеми. Пасивний тепловий захист людини від дії підвищених температур оточуючого середовища за допомогою теплоізолюючого одягу характеризується досить обмеженими можливостями, в першу чергу за рахунок накопичення в організмі людини метаболічного тепла. Вентиляція простору під одягом частково вирішує проблему, однак, при досить високих температурах середовища не справляється з зовнішніми теплонадходженнями, що призводить до розігрівання внутрішніх шарів одягу. Тому проблема створення термозахисного спеціального одягу з кріогенною системою охолодження, який можливо було б застосовувати при підвищених температурах в зоні ліквідації пожежі чи аварійної ситуації є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті аналізу питань створення ефективного термозахисного одягу встановлено, що існуючі види ТЗСО не повною мірою забезпечують необхідний захист, а в окремих випадках створюють додаткові фактори небезпеки [1-5].

В роботі [1] автори наводять удосконалену модель теплообміну, що може враховувати прогнозування передачі тепла через мокрі захисні матеріали одягу. Результати досліджень, наведені в роботі [2] свідчать, що із застосуванням тканин PCM (матеріали з фазовою зміною – (phase change materials) тепловий захист багатошарових тканин був значно збільшений. В роботі [3] 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 [4] була введена числова модель перенесення тепла та вологи в теплозахисному одязі при впливі спалаху. В роботі [5] наведені результати експериментальних досліджень з визначення теплозахисних характеристик матеріалів з метою їх комплексного дослідження для створення ергономічного та естетичного конкурентоздатного спецодягу з високими показниками надійності.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є роз-

робка моделі теплоперенесення в термозахисному спеціальному одязі (ТЗСО) з активним теплозахистом, яка стане підґрунтям для створення нових видів ТЗСО в системі “навколишнє середовище – ТЗСО — людина” що сприятимуть зниженню травматизму і загибелі особового складу, а також проведенню рятувальних робіт на належному рівні.

Практика роботи в небезпечних зонах при дії високих температур, а також при необхідності пересування рятувальників на великі відстані показують, що пасивний тепловий захист не забезпечує якісного виконання робіт та надійного теплозахисту [6, 7]. Температура зовнішніх шарів одягу, призначеного для захисту людини від впливу екстремальних мікрокліматичних факторів, досягає 150...200 °С. Ця обставина висуває до теплоізоляції одягу, який використовується, особливі вимоги (для стійкого теплового захисту): його термічний опір повинен бути не менше 0,6...0,8 (м²·К)/Вт [8]. Однак теплозахисні пневматичні костюми із звичайною схемою вентиляції рекомендуються для використання при температурі оточуючого середовища до 80 °С, а з модифікованою схемою вентиляції, в якій застосовується додатковий циркуляційний контур, лише до температур 100 °С.

Як варіант пропонується створення термозахисного спеціального одягу (ТЗСО) з криогенною системою охолодження. Вимогами до створення ТЗСО з криогенною системою охолодження є: зменшення маси спорядження рятувальника; підвищення вогнестійкості ТЗСО за рахунок продування азотом; забезпеченням раціональних параметрів дихання; підвищення комфортності в зв'язку з можливістю охолодження голови потоком газу і застосування маски; виключення можливості втрати дихального об'єму респіратора; підвищення надійності захисту дихання, оскільки можливе створення постійного підпору під півмаскою і малотоксичного середовища в підкостюмному просторі; економічність при експлуатації.

Зменшення маси спорядження може бути досягнуто за рахунок відмови від окремого респіратора і зменшення запасу холодоагенту, частина якого необхідна для охолодження газу, який вдихується. Відомі регенеративні респіратори, що забезпечують задовільні умови дихання, без лицьових частин і охолоджуючих елементів мають масу 8,5-11 кг, і під час роботи генерують 15-35 Вт тепла на кожні 100 Вт енерговитрат рятувальника. Для охолодження повітря, яке вдихується протягом 1-1,5 годин пропонується закладання в респіратор льодяного охолоджуючого елемента, який разом із кришкою холодильника має масу всього 900 г. Невелике зменшення маси ТЗСО може бути досягнуто також за рахунок удосконалення системи теплоз'єму, чобіт, світильника і апарату зв'язку.

Підвищення вогнестійкості ТЗСО забезпечується продуванням азоту і кисню, а також наявністю відповідної апаратури для приготування дихальної суміші й видалення її при виході за межі ТЗСО. При цьому, частина азоту, яка залишилася (від 50 до 80 % загальних витрат), може подаватися в підкостюмний простір для створення в ньому безкисневого середовища; повністю виключається можливість спалаху газової суміші в підкостюмному просторі й тління матеріалів, із яких виготовлений спецодяг. Знижується також вірогідність горіння і тління ТЗСО.

Оптимальні умови дихання забезпечуються його відкритою схемою, схожою на схему апаратів на стислому повітрі. Температура повітря може бути від від'ємної і до комфортної (10-20°C) у залежності від ступеня його нагрівання в теплообміннику. Співвідношення вмісту кисню й азоту у суміші, яка вдихується, може бути забезпечене спеціальним змішувачем в оптимальному діапазоні від 20 до 25 % кисню. Вуглекислий газ в суміші відсутній, оскільки вона не регенерується і повторно на дихання не поступає. Оптимальна вологість повітря може бути забезпечена раціональною конструкцією лицевої частини і застосуванням вологообмінника, який при відносно низькій температурі суміші, що вдихується може бути дуже ефективним.

Наявність великої кількості газу дозволяє організувати охолодження голови, і в тому числі обличчя, конвективним способом, що поруч із застосуванням легкої півмаски суттєво підвищує комфортність ТЗСО [9]. Конструкція ТЗСО з криогенною системою охолодження, суміщеною із системою захисту дихання, виключає можливість втрати дихального об'єму. Цей недолік дуже суттєвий для респіраторів з хімічно зв'язаним киснем, (наприклад РХС) і в визначеній мірі притаманний респіраторам із стиснутим киснем, оскільки вимагає забезпечення можливості користування аварійним клапаном респіатора, що у ТЗСО зробити складно.

Оскільки підодяговий простір постійно продувається чистим азотом, а теплоізолююча оболонка ТЗСО відносно герметична, в шоломі комплексу газова суміш буде мати токсичність значно меншу, ніж токсичність навколишнього середовища. Підсмоктування азоту при відкритій схемі дихання небезпеки не представляє. Тому, в ТЗСО можливе застосування півмаски, більш легкої й зручної ніж панорамна маска, герметичність прилягання якої в інших умовах не достатня. Надлишковий тиск під півмаскою може бути забезпечено спеціальною конструкцією легеневого автомата.

Подавання кисню в підкостюмний простір неприпустиме. Кисень в суміші з азотом повинен подаватися лише для дихання, по каналам, які мають малий об'єм, і надійно ізольовані від впливу зовнішнього тепла, тим більше полум'я. Після використання дихальна суміш повинна видалятися в навколишнє середовище. В підкостюмний простір слід подавати азот, якомога в більшій кількості, оскільки він там насичується вологою і з нею видаляється назовні. За рахунок цього охолоджуючий ефект рідкого азоту збільшується на 15-18 %. При цьому можуть бути знижені вимоги до матеріалів, які утворюють теплоізоляційну прокладку, і внутрішніх деталей ТЗСО по відношенню до їх горючості (кисневий індекс може бути нижче 25 і доходити до 10-12).

Припустимий час роботи в комплекті ТЗСО повинен бути менше часу роботи охолоджуючої системи по запасу газу [10]. Термічний опір теплоізоляції R , (м²К)/Вт, що забезпечує певний час роботи, визнається за рівнянням:

$$R = \frac{\Delta TS}{N - Q_n}, \quad (1)$$

де S – площа поверхні костюму, м^2 ; ΔT – різниця температур навколишнього середовища і підкостюмного простору, K ; N – потужність системи охолодження, Вт ; Q_l – метаболізм людини, Вт .

Питомий об'єм газу, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_g = \frac{RT}{\rho} \quad (2)$$

та коефіцієнт використання повітря для дихання на різноманітних режимах роботи системи охолодження, визначаються рівнянням:

$$K = \frac{V_B \cdot n_B}{60 \cdot Q \cdot \rho}. \quad (3)$$

В розрахунках кратності охолодження газу в випаровувачі-теплообміннику виходимо з того, що температура газу на виході в охолоджуючу петлю не повинна бути нижче мінус 10°C , а температура на вході в випаровувач-теплообмінник не вище плюс 10°C . В цьому випадку газ повинен повертатися для охолодження n раз:

$$n = \frac{i_u - i_K}{i_B - i_u}, \quad (4)$$

де i_K – ентальпія рідкого повітря; i_u – ентальпія повітря, яке виходить із випаровувача; i_B – ентальпія повітря на вході в випаровувач.

Висновки. Розроблена модель теплоперенесення в термозахисному спеціальному одязі з активним теплозахистом.

Запропонована кріогенна система охолодження в термозахисному спецодязі, яка дозволяє суттєво знизити масу комплекту, покращити експлуатаційні показники, збільшити термін захисної дії за рахунок суміщення систем дихання і охолодження використанням суміші азоту з киснем. та викиданням повітря, що видихується, в навколишнє середовище.

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. Vol. 46, issue 4. P. 833 – 841. Doi: 10.1007/s10694-010-0139-z.
2. M. Zhao. The usage of phase change materials in fire fighter protective clothing: its effect on thermal protection. OP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 274. P. 012136.
3. 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/annhyg/meu052.

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

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

6. Кошечев В.С., Кузнец Е.И. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур: Москва: Медицина, 1986. 255 с.

7. Колосніченко М.В. Дослідження спецодягу з пасивним та активним теплозахистом. Вісник Технологічного університету Поділля. 2002. Т. 2, №3. С. 262-265.

8. Луценко Ю.В., Тюпін С.О. Визначення гранично-припустимих показників теплового стану людини при роботі в термозахисному спеціальному одязі. Проблеми пожарной безопасности. НУЦЗУ. 2016. Вип. 40. С. 142-146. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1793>.

9. Луценко Ю.В., Курська Т.М. Визначення параметрів системи охолодження в захисному спеціальному одязі рятувника. Проблеми пожарной безопасности. НУЦЗУ, 2017. Вип. 41. С. 108-111. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1801>.

10. Луценко Ю.В., Миргород О.В. Миргород, Гур'єв О.В. Визначення припустимого часу перебування рятувника в зонах теплових впливів. Проблеми пожарной безопасности. НУЦЗУ. 2018. Вип. 43. С. 105-111. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7308>.

Отримано редколегією 25.09.2019

Ю.В. Луценко

Теоретические основы создания термозащитной специальной одежды с криогенной системой охлаждения

Предложена криогенная система охлаждения в термозащитной специальной одежде, которая позволяет существенно снизить массу комплекта, улучшить эксплуатационные показатели, увеличить время защитного действия за счет совмещения систем дыхания и охлаждения использованием смеси зота с кислородом.

Ключевые слова: пассивная тепловая защита, активная тепловая защита, криогенная система, термозащитная специальная одежда.

Yu. Lutsenko

The theoretical basis for the creation of heat-protective special clothing with a cryogenic cooling system

A cryogenic cooling system in thermally protective special clothing is proposed that can significantly reduce the mass of the kit, improve operational performance, and increase the time of the protective effect by combining breathing and cooling systems using a mixture of zot with oxygen.

Keywords: passive thermal protection, active thermal protection, cryogenic system, heat-protective special clothing.