

КОЛОСНІЧЕНКО О.В., ОСТАПЕНКО Н.В., СТРУМІНСЬКА Т.В.,
ЛУЦКЕР Т.В., МАМЧЕНКО Я.О., РЕМЕНЕВА Т.В., ЯЛОВИЙ В. В.,
КОЛОСНІЧЕНКО М.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ПРОЄКТУВАННІ ОДЯГУ З АКТИВНИМ ТЕПЛОЗАХИСТОМ

Мета. Аналіз досвіду проєктування теплозахисного спецодягу для прогнозування параметричних особливостей захисних елементів одягу. Визначення часу захисної дії комплектів теплозахисного одягу з активним тепловим захистом при використанні охолоджуючих елементів, а також оптимізації співвідношень потужності системи охолодження залежно від маси та товщини шарів теплоізоляції при надвисоких теплових впливах оточуючого середовища.

Методика дослідження побудована на системному підході, застосовано загальнонаукові методи аналізу та синтезу, узагальнення, порівняння. Методологія досліджень включає теоретичне обґрунтування вибору матеріалів, базується на основних положеннях теорії тепломасопереносу.

Результати. Дослідженнями доведено, що пасивний тепловий захист у комплектах спецодягу не дозволяє повною мірою забезпечити захист працівників під час виконання робіт у високотемпературному середовищі, тому потребує застосування систем з активним теплозахистом. Отримано рівняння залежності роботи системи теплозахисту в одязі з автономною системою життєзабезпечення для визначення часу захисної дії комплексу аварійного спецодягу при роботі людини у надвисокому температурному середовищі.

Наукова новизна. Науково обґрунтовано припущення щодо реалізації принципу поєднання пасивних і активних способів захисту при створенні ефективних засобів індивідуального захисту від впливу екстремальних температур. Вирішено задачу розподілу температур в пакеті матеріалів в теплозахисному спецодязі з активним теплозахистом на основі теорії тепломасопереносу та виходячи з прийнятих гіпотез, граничних умов та припущень. Наголошено необхідність створення раціональних композитних пакетів шарів матеріалів для проєктуванні різновидів ефективного аварійно-захисного одягу, склад яких потребує застосування існуючих та створення новітніх інноваційних матеріалів.

Практична значимість. Проаналізовано матеріали з нових хімічних волокон та їх комбінацій, здатних забезпечити багатоманітність використання різновидів теплозахисного спецодягу з урахуванням умов середовища. Доведено, що принцип багатошаровості одягу потребує класифікації матеріалів для його виготовлення, а також дослідження їх теплозахисних характеристик для подальшого формування у сегментальні композити пакетів з метою прогнозуванні часу захисної дії. Запропоновано застосування наноструктурованого інноваційного текстильного матеріалу із влученням наночастинок срібла в якості білизняного шару при проєктуванні ТЗСО.

Ключові слова: проєктування одягу, тепловий захист людини, теплозахисний одяг спеціального призначення, текстильні бар'єрні матеріали, багатошаровий аварійно-рятувальний одяг, теплозахисні характеристики матеріалів

INTERRELATIONSHIP OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS IN THE DESIGN OF CLOTHING WITH ACTIVE THERMAL PROTECTION

KOLOSNICHENKO O., OSTAPENKO N., STRUMINSKA T., LUTSKER T., MAMCHENKO Ya., REMENEVA T., YALOVYI V., KOLOSNICHENKO M.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

Purpose. *Analysis of the experience of designing heat-protective workwear to predict the parametric features of protective clothing elements. Determination of the protective action time of sets of heat-protective clothing with active thermal protection when using cooling elements, as well as optimization of the power ratios of the cooling system depending on the mass and thickness of thermal insulation layers at ultra-high thermal effects of the environment.*

Methodology *of researching is built on a systematic approach, utilizing general scientific methods of analysis and synthesis, as well as generalization and comparison. The research methodology includes a theoretical justification for the choice of materials, based on the fundamental principles of heat and mass transfer theory.*

Results. *Research has proven that passive thermal protection in sets of overalls does not provide complete protection for workers in high-temperature environments; therefore, it requires the use of systems with active thermal protection. An equation describing the dependence of the thermal protection system's operation on clothing with an autonomous life support system was obtained to determine the time required for protective action when a person works in an ultra-high temperature environment.*

Scientific novelty. *The assumption regarding the implementation of the principle of combining passive and active methods of protection when creating effective means of individual protection against the effects of extreme temperatures was scientifically substantiated. The problem of temperature distribution in a package of materials in heat-protective overalls with active thermal protection was solved based on the theory of heat and mass transfer, utilizing accepted hypotheses, boundary conditions, and assumptions. The need to create rational composite packages of layers of materials for designing various effective emergency protective clothing, the composition of which requires the use of existing and the development of new innovative materials, is emphasized.*

Practical significance. *Materials from new chemical fibers and their combinations are analyzed, enabling the diversity of use of various heat-protective special clothing, taking into account environmental conditions. It has been proven that the principle of multilayer clothing requires the classification of materials for its manufacture, as well as the study of their heat-protective characteristics, to form segmental composite packages further and predict the time of protective action. The use of a nanostructured, innovative textile material incorporating silver nanoparticles as a linen layer in the design of heat-protective special clothing is proposed.*

Keywords: *clothing design, human thermal protection, special-purpose heat-protective clothing, textile barrier materials, multilayer emergency rescue clothing, heat-protective characteristics of materials.*

Вступ. Процес проектування і вибір конструктивних форм виробу має ряд особливостей, пов'язаних, головним чином, з захисними функціями одягу та вимагає обліку в комплексі ергономічних, гігієнічних, захисних, експлуатаційних, естетичних вимог, а також показників економічності і технологічності виробу.

Головною вимогою при проектуванні теплозахисного одягу спеціального призначення є збільшення часу захисної дії, що забезпечує якісне виконання роботи та безпечний вихід із аварійної зони з мінімальними ризиками. На показник часу захисної дії майже не впливає особливості

різновидів одягу (костюм, комбінезон, накидка тощо) та характер виконання робіт, але він суттєво залежить від умов експлуатації, способу захисту і його ефективності, а також маси одягу. Особливе відношення до показника часу захисної дії складається при проектуванні аварійно-рятувального і аварійно-захисного спецодягу, оскільки поряд з вимогою економії матеріальних засобів висувається найбільш вагоме і значиме – соціальне.

Процес створення нових видів спецодягу включає наступні етапи: розробка конструкції виробу з врахуванням властивостей матеріалів (пакетів матеріалів); розробка конструктивно-

технологічної документації; виготовлення експериментальних зразків і дослідних партій виробів; проведення комплексних (лабораторних, стендових, натурних та ін.) досліджень матеріалів і виробів; розробка проекту нормативної та (або) технічної документації.

В широкому сенсі теплозахисний спеціальний одяг (ТЗСО) є комплектом виробів, що носить людина, які забезпечують можливість виконання нею роботи в зоні підвищених температур середовища і в атмосфері, непридатній для дихання. Перелічимо основні вироби, які входять в комплект: спеціальний захисний одяг з багат шарового поліфункціонального композитного пакету матеріалів, який складається із тепловідбиваючого, теплоізоляційного, підкладкового шарів, білизни та може бути виконаний у вигляді комбінезону або куртки і брюк; окремо капюшона; рукавиць; спецвзуття, теплоізолюючих бурок; ілюмінатору; системи охолодження, яка складається із джерела або акумулятора холоду; системи теплоз'єму з насосом, теплообмінником тощо; нижньої білизни; системи захисту органів дихання; апарату зв'язку та світильника (за необхідності). Інколи конкретні моделі ТЗСО можуть не мати в комплекті більшості перерахованих виробів, а найпростіша теплозахисна накидка пожежного є єдиним виробом. Таким чином, в основу розробки фізичних моделей при пасивному і активному теплових захистах мають бути покладені основні вимоги до ТЗСО з урахуванням температурних діапазонів, складності робіт та часу перебування працюючого у високотемпературних зонах.

Аналіз досліджень та постановка завдання. До недавнього часу показник часу захисної дії визначається шляхом лабораторних, камерних і натурних досліджень, що не надавало можливості їх оптимізації [1]. Це пов'язано з необхідністю вирішення не завжди коректної багатокритеріальної задачі взаємозв'язків параметрів – маси комплекту спецодягу, його ергономічних характеристик, властивостей матеріалів та характеристик ефективності теплозахисту (коефіцієнта теплопровідності, коефіцієнта теплообміну, термічного опору тощо), економічної доцільності використання комплектів. Так при пасивному способі теплозахисту, час захисної дії напряму залежить від маси комплекту спецодягу з врахуванням показників температури оточуючого середовища і теплового випромінювання; важкості виконуваної роботи; кількості теплоти і поту, які

виділяються організмом людини; властивостей матеріалів, що використовуються; кількості і товщини шарів теплоізолюючої оболонки тощо. При активному способі теплозахисту до перерахованих факторів слід додати вид холодоагенту і його масу з деталями системи охолодження; температури в підодяговому просторі; способі видалення метаболічного тепла; наявності (або відсутності) автономної дихальної апаратури тощо.

Важливим напрямом сучасних досліджень є вивчення впливу фізико-механічних і теплофізичних властивостей текстильних матеріалів на параметри одягу вже на етапі проектування. Так, у роботі [2] авторами досліджено взаємозв'язок властивостей тканин пальтової групи (товщини, поверхневої щільності, жорсткості, драпірувальності, типу переплетення) з формоутворенням та стабільністю об'ємно-силуетних форм жіночого одягу. Отримані результати підтверджують доцільність параметричного підходу до проектування одягу, заснованого на попередньому аналізі властивостей матеріалів, що є методологічно близьким до завдань даного дослідження, спрямованого на визначення раціональних теплофізичних параметрів і часу захисної дії теплозахисного одягу з активним теплозахистом.

Відомо декілька способів активного теплозахисту людини в умовах високих і надвисоких теплових впливів: конвективний, кондуктивний, комбінований [3]. Вони у свою чергу передбачають теплоз'єм вентиляцією (шланговий, радіаційно-конвективний, контактано-газовий, рідинний, локально-контактний), а також теплоз'єм з використанням в якості холодоагенту сухого льоду.

Конвективний передбачає вентиляцію підодягового простору шляхом різноманітних технічних рішень. Різнманітні способи вентиляції підодягового простору об'єднує загальність ідеї видалення після вентиляції підодягового простору метаболічного тепла людини, парів поту і газоподібних антропогенних токсинів в оточуюче середовище крізь товщину теплоізолюючого одягу, що вентилюється рівномірним потоком по всій його поверхні. В процесі такої фільтрації між повітрям і матеріалом одягу проходить безперервний тепловий обмін при обмеженому температурному перепаді, що супроводжується мінімальною термодинамічною необерненістю [4, 5].

Вентиляція простору під одягом частково вирішує проблему, однак, при досить високих

температурах середовища не справляється з зовнішнім теплонадходженням, що приводить до розігрівання внутрішніх шарів одягу. По цій причині теплозахисні пневматичні костюми з звичайною схемою вентиляції рекомендуються для використання при температурі оточуючого середовища до 800С, а з модифікованою схемою вентиляції, в якій застосовується додатковий циркуляційний контур – лише до температур 1000С. Однак, температура зовнішніх шарів одягу, призначеного для захисту людини від впливу екстремальних мікрокліматичних факторів, досягає 150 – 200 0С. 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. При такій величині термічного опору, одяг стає менш потрібним для робітників аварійно-рятувальних служб за ергономічними показниками.

Шлангові конструкції передбачають аналогічний принцип теплоз'єму, при цьому в залежності від конструктивно-технологічного рішення і різноманітних товщинах теплоізоляції витрати охолоджуючого газу майже на порядок вище (негатив!), в той же час при цьому не допускається проникнення вологи в підкостюмний простір (позитив!), що різко знижує тепловий опір за рахунок випадання конденсату.

Конвективно-радіаційна система передбачає використання в якості холодоагенту водяного льоду в пластикових ампулах, розміщених у внутрішніх решітчастих кишнях одягу, розташованих в області тулуба, голови, рук, ніг. Охолоджене повітря, яке подається в підкостюмний простір, використовується також для дихання. Введення в дані системи респіраторів кращої модифікації, наприклад, з хімічно-зв'язаним киснем і підсилені пластиковими ампулами з льодом в області стегон, стоп і кистей рук дозволяє суттєво покращити час захисної дії.

Криогенна система охолодження була реалізована в протитепловому одязі в скафандрах типу "Гатескаф" ще у 1965-1970 рр. [1, 6]. Резервуар, розташований за межами костюму, вміщав 10 кг суміші азоту і кисню; охолодження підкостюмного простору здійснювалося цією газоподібною сумішшю, кількість якої регулювалася шляхом випаровування рідини в випаровувачі, розташованому ззовні. Таким чином, для охолодження використовувався тільки холод, який отримується при нагріванні газу в підкостюмному просторі від температури випаровування (біля 85 0С) до приблизно 300

0С. Невдала конструкція костюмів, складність у постачанні костюмів рідким азотом і киснем примусили відмовитись від цієї моделі. Крім того, конструкція була потенційно небезпечною, оскільки в кінці терміну захисної дії концентрація кисню в підкостюмному просторі досягла 60%, а матеріали костюма не були вогнетривкими. Слід визнати, що потенційні можливості криогенної схеми в ТЗСО не були до кінця реалізовані, про що свідчать попередні дослідження, оскільки криогенна система охолодження може мати суттєві переваги в порівнянні з іншими як та, що забезпечує одночасно охолодження підодягового простору і захист органів дихання з високою працездатністю.

У вентиляційному одязі використання активного теплозахисту забезпечується поданням прохолодного повітря у підодяговий простір з подальшим виведенням використаного повітря крізь теплоізоляційний пакет матеріалів. В результаті такої фільтрації, між повітрям і ізотермічними шарами одягу проходить безперервний теплообмін при незначному температурному перепаді, що зводить його до мінімуму. Таким чином, повітря залишає одяг при температурі, близької до температури зовнішніх шарів, повністю вичерпавши свої потенційні можливості як холодоагенту в максимально вигідному термодинамічному процесі, що є беззаперечною перевагою існуючих систем охолодження.

Завданням дослідження стало визначення часу захисної дії комплектів теплозахисного одягу з активним тепловим захистом при використанні охолоджуючих елементів, а також оптимізації співвідношень потужності системи охолодження залежно від маси та товщини шарів теплоізоляції при надвисоких теплових впливах оточуючого середовища.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз матеріалів, що застосовуються для виготовлення ТЗСО показав, що в теперішній час стрімко збільшується інформація про кількість вогнетеплозахисних матеріалів, які швидко з'являються на ринку товарів та послуг. Це пов'язано з появою нових хімічних волокон і їх комбінацій, здатних забезпечити багатоманітність використання матеріалів з урахуванням умов середовища.

Для створення ТЗСО з високими теплозахисними властивостями, досліджують теплофізичні характеристики матеріалів і пакетів, виконують їх аналіз, обґрунтовують вибір, досліджують взаємозв'язок, і лише потім формують матеріали в пакети, розробляють

конструктивно-технологічні параметри і створюють нові види захисного спецодягу з прогнозованими властивостями.

Фізичну модель комплектів ТЗСО з пасивним теплозахистом та схему пакету представлено у [3], де досліджено особливості проектування одягу з пасивним теплозахистом в умовах його функціонування у високотемпературних середовищах до 600С. Модель передбачає багат шаровий пакет із матеріалів, що включають тепловідбиваючий, вологозахисний, теплоізоляційний, паропроникний, а також гігієнічний (сорбуючий) шари матеріалів, призначення кожного з яких передбачає виконання самостійної і взаємопов'язаної з іншими шарами функції. При цьому передбачається також застосування композиційних матеріалів, які виконують комплексну функцію [7]. Разом з тим, перспективними продуктами на цьому ринку є: легкі високопрочні шаруваті композиційні метал-інтерметаллідні матеріали, зручні до експлуатації в умовах високої температури і критичних по величинах температурних

9]. Такі інноваційні нонструктуровані текстильні матеріали, в тому числі із влученням наночастинок срібла [10, 11], нами пропонується використовувати в якості білизняного шару при проектуванні комплекту одягу.

Також зазначимо, що згідно вимог до ТЗСО, нами запропоновано класифікацію матеріалів, в основу якої покладено три основні класи за способом їх отримання та складу сировини (рис. 1). Відомо [1-5], що останніми десятиліттями у колі уваги розробників та виробників захисного спецодягу знаходяться всі матеріали з просочуванням (клас 1) та матеріали з покриттям (клас 3). Матеріали класу 2 слід застосовувати в одязі дуже обережно, постійно слідкуючи за їх поведінкою в часі при дослідженні в лабораторних та натурних умовах. Найбільш придатними для термозахисного спецодягу є полібензогетероциклічні, поліамідні та полігетероциклічні види. Забороненими для одягу є матеріали з натуральних та хімічних волокон неорганічного походження. Методологія досліджень ґрунтується на



Рис. 1. Загальна класифікація основних видів термостійких матеріалів для одягу

градієнтів; жаростійкі композиційні покриття, які міцні нанорозмірними силіцидами, що дозволяє збільшити температуру і тривалість експлуатації виробів, а також суттєво збільшити їх надійність; вуглеволоконні композити з металевою матрицею для виробництва теплостійких конструкційних виробів із заданою наноструктурою [8,

системному підході та включає теоретичне обґрунтування вибору матеріалів для виготовлення теплозахисного одягу з активним теплозахистом на основі положень теорії тепломасопереносу, променевого теплообміну та термопружності оболонок і пластин.

У межах роботи застосовано аналітичні методи теплотехнічних розрахунків для оцінювання теплофізичних характеристик матеріалів і багатошарових композитних пакетів. Зовнішнє теплове навантаження на одяг оцінювали з використанням закону Стефана–Больцмана з урахуванням коефіцієнта опромінювання, що відображає геометричне взаємне розташування джерела випромінювання та захищеної поверхні. Розрахунок теплового балансу системи «людина-одяг-середовище» здійснювали з урахуванням теплопереносу крізь багатошаровий пакет матеріалів, метаболічного тепловиділення організму людини та параметрів системи активного теплозахисту. Для визначення часу захисної дії комплектів теплозахисного одягу застосовано модель енергетичного балансу з використанням поняття приведенного питомого ресурсу холодоагенту, що дало змогу встановити раціональні співвідношення між товщиною теплоізоляційних шарів і потужністю системи охолодження за різних температурних режимів експлуатації. Методи експертного опитування та багатофакторного аналізу використано для виявлення найбільш впливових чинників, що визначають експлуатаційні властивості виробів з гнучкою морфологічною структурою.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз аварійних ситуацій різноманітних наземних і підземних об'єктів, що загорілися, передбачає особливості їх розвитку, організації тушіння пожеж, а також виконання інших функцій при веденні ліквідаційних робіт. Локалізація і тушіння пожеж по прибуванні ліквідаторів є одною із зовнішніх задач. В той же час, неможливість підходу до місця горіння без захисних засобів (або виходу працюючих із зони горіння) ставить задачу розробки різноманітних видів надійних захисних комплектів спецодягу, а також необхідність розрахунків безпечної відстані до палаючих об'єктів, де може знаходитись особистий склад необмежений час без захисних засобів

Термічний опір спеціального теплозахисного одягу з пасивним теплозахистом за міркуваннями ергономіки обмежено величинами, близькими до 0,8–1,0 (м²·К)/Вт, що не гарантує надійного теплового захисту людини від екстремальних теплових впливів оточуючого середовища [12, 13]. Так, вже при помірно високих температурах близько 40–600С при виконанні фізичної роботи швидко настає перегрівання організму, і необхідне застосування одягу з активним теплозахистом (вище 600С). Відповідно до вищезазначеного, пакети з

активним теплозахистом мають додатковий шар охолоджуючих елементів залежно від способу підтримання теплового гомеостазу організму людини.

Маса комплекту спецодягу включає в себе сумарне значення таких її складових: зовнішнього шару (оболонки) спецодягу; одного або декількох об'ємних теплоізолюючих шарів із легких нетканних матеріалів; підкладки (внутрішнього шару); холодоагенту; системи охолодження. Поверхнева щільність і товщина зовнішнього і внутрішнього шарів у різноманітних видах теплозахисного спецодягу приблизно однакові, тобто їх тепловий опір і щільність можна вважати постійними. Найбільший вплив на характеристики теплозахисного спецодягу створюють такі чинники: волоконний склад різновидів, товщина і кількість шарів теплоізолюючих матеріалів; конструкція одягу; кількість (маса) холодоагенту та спосіб його подачі в підкостюмний простір. Теоретичні основи розрахунку променевого потоку, що впливає на теплозахисний комплект захисного спецодягу ліквідатора є узагальненими, однак, для кожного конкретного випадку існують окремі параметри з урахуванням типу пожежі, інтенсивності розгорання і динаміки горіння.

Відповідно до закону Стефана-Больцмана, сумарна потужність теплового випромінювання, Вт/м², дорівнює [12]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (1)$$

де ε – ступінь чорноти тіла; σ – постійна Стефана-Больцмана; T – абсолютна температура тіла, К.

Врахування геометричного зв'язку між випромінюючим тілом і тілом, яке сприймає випромінювання проводиться за допомогою коефіцієнта опромінювання. Напівсферичний променевий потік, що характеризує потужність випромінювача і рівний повній кількості енергії, яка випромінюється елементом поверхні dF , м², в півпростір за одиницю часу, Q , Вт, враховуючи його нерівномірну щільність, розглядають в диференційному вигляді $dQ = E \cdot dF$, Вт (E – поверхнева щільність потоку випромінювання) (рис. 2).

У зв'язку з суттєвою неоднорідністю об'ємної структури осередку пожежі (факелу), різноманітної орієнтації і віддаленості оточуючих предметів від поверхонь (корпусів машин і механізмів; матеріалів одягу і відкритих ділянок тіла людини тощо), променевий тепловий потік розподіляється на них нерівномірно.

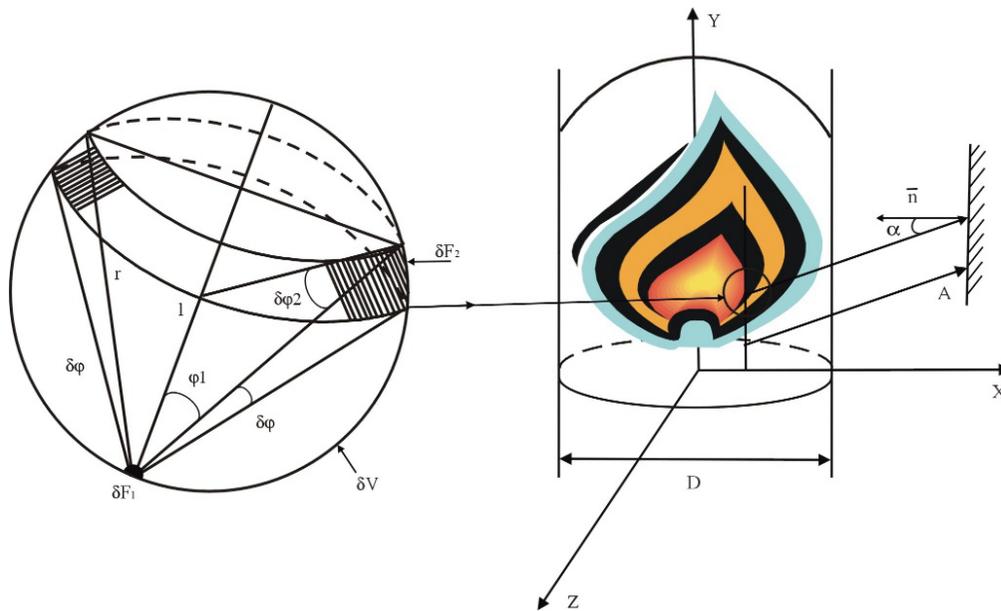


Рис. 2. Схема осередку пожежі у оточуючій сферичній оболонці

Будемо вважати $\delta V(x, y, z)$, m^3 – елементарний об’єм поглинаючого і розсіюючого середовища в області факелу, його температура T , K , характерний розмір l , m . Розглянемо променевий теплообмін між об’ємом середовища δV і оточуючою їй сферичною оболонкою. Визначимо випромінювання dQ елементарного кільцевого пояса dF_2 сферичної оболонки на елемент поверхні dF_1 через кульовий поглинаючий шар (рис 2).

Площа елементарного кільцевого поясу:

$$dF_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \frac{r \cdot d\varphi}{\cos \varphi_2}, \quad (2)$$

де $\rho = r \cdot \sin \varphi$. Для сфери $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, тоді

$$dQ = 2E_0 \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot dF_1.$$

Для визначення енергії, що поглинається середовищем із випромінювання, яке надсилається сферичною оболонкою на елемент dF_1 , інтегруємо останній вираз за φ від 0 до $\pi/2$, тоді:

$$dq_{\text{погл}} = -2E \cdot k \cdot l \cdot dF_1 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \varphi \cdot d(\cos \varphi) = \frac{2}{3} E \cdot k \cdot l \cdot dF_1 \quad (3)$$

На рис. 2 позначимо: A – відстань від елементарного об’єму δV до довільно орієнтованої площадки з нормаллю n , α – кут між напрямком нормалі і прямою, яка з’єднує центри сфери, що випромінює, та площадки, що поглинає. Тоді відношення інтенсивностей

теплових потоків крізь сферу δV і сферу радіусом A буде обернено пропорційне відношенню площин сфер, радіусом $l/2$ і A , тобто інтенсивність теплового потоку крізь сферу радіусом A з врахуванням закону Ламберта дорівнює:

$$\delta q = \frac{1}{\pi \cdot A^2} \cdot k \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha = k_0 \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot dv, \quad (4)$$

де величина:

$$k_0 = \frac{k \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot A^2}, \quad (5)$$

називається коефіцієнтом опромінювання. Саме цим коефіцієнтом можна врахувати розташування об’єктів в просторі по відношенню до поверхні, яка випромінює. Вираз (4) дозволяє за відомим законом просторового розподілу температури і коефіцієнтів послаблення в факелі полум’я розрахувати щільності падаючих променевих потоків крізь поверхні різноманітної орієнтації. Це допоможе визначити відстань від осередку пожежі до людини, яка одягнена у комплект спецодягу.

Система охолодження термозахисного спецодягу з автономною системою життєзабезпечення основана, як правило, на застосуванні холодоагенту, який поглинає теплоту при фазовому перетворенні: випаровуванні або таненні. Для розміщення холодоагенту в одязі потрібен ряд деталей і пристроїв, маса яких пропорційна масі холодоагенту (оболонки охолоджуючих

елементів, кишені для їх розміщення, теплоізолюваний резервуар тощо), тому в подальшому будемо використовувати термін приведенного питомого ресурсу холодоагенту. Таким чином, основне завдання зводиться до визначення оптимального співвідношення товщини шарів теплоізоляції і маси (або потужності) системи охолодження, що дасть можливість в кінцевому випадку отримати максимальний термін захисної дії термозахисного спецодягу при мінімальній масі комплекту.

Представимо баланс теплової енергії Q , Дж, в спрощеному вигляді:

$$Q = Q_T + Q_n, \quad (6)$$

де Q – загальна кількість теплоти, накопичена в системі охолодження; Q_T – кількість теплоти, яка проникає крізь оболонку одягу в період дії системи охолодження; Q_n – сумарна кількість теплоти, яка утворюється за рахунок метаболізму організму людини, припливів повітря крізь шви і з'єднання конструкції одягу, утворення інею на деталях системи охолодження, теплопровідності людського тепла, втрат вологого повітря з під оболонки одягу тощо. Оскільки:

$$Q = \psi_p \cdot m_x; \quad \psi_p = \frac{\psi}{1 + \frac{m_0}{m_x}}, \quad (7)$$

$$Q_T = \frac{(T - T_k)S\tau}{\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}; \quad m_T = \rho h S, \quad (8)$$

де m_x – маса холодоагенту, кг; m_0 – маса деталей і пристроїв системи охолодження, кг; ψ_p – приведений питомий ресурс холодоагенту, Дж/кг; ψ – питомий ресурс холодоагенту, Дж/кг; T – температура оточуючого середовища, К; T_k – середня температура в просторі під одягом, К; S – площа поверхні теплоізолюючої оболонки, м²; τ – час захисної дії системи охолодження або одягу, с; δ – товщина шарів теплоізоляції, м; λ – коефіцієнт теплопровідності шарів теплоізоляції, Вт/(м·К); α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі зовнішнього і внутрішнього шарів оболонки, Вт/(м²К); m_T – маса шарів теплоізоляції, кг; ρ – щільність шарів теплоізоляції, кг/м³, то після підстановки виразів (7) і (8) отримуємо:

$$m_x = \frac{\left[\frac{(T - T_k)S\tau}{\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} + Q_n \right]}{\psi_p} \quad (9)$$

Відповідно до сталих значень

$Q_n, \psi_p, \frac{m_0}{m_x}$, та при обмеженні (9), цільова функція виглядатиме:

$$Z = m_x(\delta) + m_0(\delta) \rightarrow \min, \quad (10)$$

Підставивши вирази m_x та m_T , отримаємо:

$$Z(\delta) = \frac{\left[\frac{(T - T_k)S\tau}{\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} + Q_n \right]}{\psi_p + \rho S} \quad (11)$$

Також відповідно до (9) та (10) зазначимо, що збільшення товщини шарів теплоізоляції дозволяє зменшити кількість холодоагенту. Такий підхід приваблює зменшенням маси комплекту спецодягу, одночасно погіршуючи показники ергономічності (значна товщина пакету матеріалів). Отже, дослідження властивостей матеріалів, створення пакетів з них з урахуванням захисних сегментів одягу відповідних товщин, а також інших вхідних параметричних величин, надає змогу визначити значення часу захисної дії для систем охолодження або різновидів комплектів одягу. Результати досліджень по визначенню раціональних співвідношень потужності системи охолодження N , маси шарів теплоізоляції m_T і товщини шарів теплоізоляції при зміні температури оточуючого середовища 600С – 2000С наведено на рис. 3.

Зазначимо, що стале значення величини Q_n визначено горизонтальною прямою 2; потужність системи охолодження представлена сімейством кривих 3, 5-8, кожна з яких, залежно від температури оточуючого середовища, асимптотично наближуються до прямої 2 при ($\delta \rightarrow \infty$). Точки перетину прямої 1 з сімейством кривих 3, 5-8 визначають раціональну масу шарів теплоізоляції при відповідному значенні δ . Пряма 4 для значень $m_T = -\rho S$ при перетинанні з кривими 3, 5-8 (точка А) (рис.3) дозволяє визначити найбільш

раціональні значення у співвідношенні товщини шарів ізоляції і потужності системи охолодження для заданої температури оточуючого середовища.

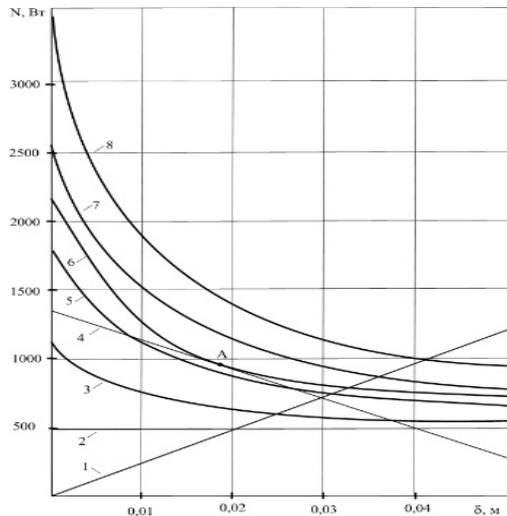


Рис. 2.6. Графік залежності потужності системи охолодження від товщини шарів теплоізоляції термозахисного спецодягу:
 1- графік функції $f=mT(\delta)$;
 2- графік функції $f=Q_n(\delta)$;
 3, 5-8 - сімейство кривих функції $f=N(\delta)$ при температурах оточуючого середовища відповідно 60; 100; 120; 150 і 200 °С;
 4- графік функції $f=mT(\delta)$. А- точка оптимума

Рис. 3. Графік залежності потужності системи охолодження від товщини шарів теплоізоляції термозахисного спецодягу:
 1 – графік функції $f=mT(\delta)$; 2 – графік функції $f=Q_n(\delta)$; 3, 5-8 – сімейство кривих функції $f=N(\delta)$ при температурах оточуючого середовища відповідно 60; 100; 120; 150 і 200 °С; 4 – графік функції $f=mT(\delta)$;
 А – точка оптимума

Висновки. Представленими дослідженнями доведено, що для створення ефективних комплектів теплозахисного одягу для роботи у надвисоких та екстремальних температурних впливах слід дотримуватись таких вимог, як : забезпечення регіонального (сегментального) теплознімання з урахуванням анатомічних, фізіологічних і психологічних особливостей даної структури теплообміну; автоматичне регулювання параметрів функціонального стану людини в системах і засобах штучного охолодження; надійність систем активного підтримування теплового гомеостазу при роботі в екстремальних теплових умовах, що реалізується за допомогою дублювання і застосування додаткових пристроїв. Все це дозволяє забезпечити найкращі умови функціонування терморегуляції людини за допомогою використання системи біологічного зворотного зв'язку, а також можливість швидкого залишення небезпечної робочої зони у випадку відмови основних систем.

Отримані залежності теоретично обумовлюють можливість проєктування термозахисного спецодягу у відповідності з заданим часом захисної дії. Крім того, різноманітні варіації вищевказаних параметрів дозволяють щільно підійти до проєктування термозахисного спецодягу з врахуванням маси комплекту спецодягу, що значно покращить його ергономічні показники і підвищить ефективність при виконанні аварійно-рятувальних робіт.

Список літературних джерел

1. Волокнисті матеріали та виробы легкої промисловості з прогнозованими бар'єрними медикобіологічними властивостями : монографія. В 2 ч. Ч. 1. Теоретичні засади технологій виробництва волокнистих матеріалів з прогнозованими бар'єрними медико-біологічними властивостями / С. М. Березненко, В. І. Власенко, І. А. Ігнат'єва, М. В. Колосніченко та ін. К. : КНУТД, 2014. 404 с.
2. Pashkevich K. L., Kolosnichenko M. V., Yezhova O. V., Kolosnichenko O. V., Ostapenko N. V. Study of Properties of Overcoating Fabrics during Design of Women's Clothes in Different Forms. *Tekstilec*. 2018. Vol. 61, No. 4. P. 224–234. DOI: <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2018.61.224-234>
3. Kolosnichenko O. V., Ostapenko N. V., Struminska T. V., Barabash M. Yu., Leonov D. S., Skliarenko N. V., Lutsker T. V., Remeniya T. V., Oliinyk H. M., Navolska L. V., Kolosnichenko M. V. Peculiarities of Nanostructured Fabrics for Operation Under Thermal Impact. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii*. 2024. Vol. 22, No.

References

1. Bereznenko, S. M., Vlasenko, V. I., Ihnatieva, I. A., Kolosnichenko, M. V., et al. (2014). *Voloknysti materialy ta vyrobny lehkoj promyslovosti z prohnozovanyymi bariernymi medyko-biologichnyimi vlastyostyami*. Ch. 1. *Teoretychni zasady tekhnologii vyrobnystva voloknystykh materialiv z prohnozovanyymi bariernymi medyko-biologichnyimi vlastyostyami* [Fibrous materials and light-industry products with predicted barrier medico-biological properties. Pt. 1. Theoretical foundations of technologies for producing fibrous materials with predicted barrier medico-biological properties]. Kyiv: KNUTD, 404 p. [in Ukrainian].
2. Pashkevich, K. L., Kolosnichenko, M. V., Yezhova, O. V., Kolosnichenko, O. V., & Ostapenko, N. V. (2018). Study of properties of overcoating fabrics during design of women's clothes in different forms. *Tekstilec*, 61(4), 224–234. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2018.61.224-234> [in English].
3. Kolosnichenko, O. V., Ostapenko, N. V., Struminska, T. V., Barabash, M. Yu., Leonov, D. S., Skliarenko, N. V., Lutsker, T. V., Remeniya, T. V., Oliinyk, H. M., Navolska, L. V., Kolosnichenko, M. V. (2024). Peculiarities of nanostructured fabrics for operation under thermal impact. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii*, 22(4), 985–1000. [https://doi.org/10.14502/Nanosistemi,22\(4\),985-1000](https://doi.org/10.14502/Nanosistemi,22(4),985-1000)

4. P. 985–1000. DOI: <https://doi.org/10.15407/nnn.22.04.985>

4. Ostapenko N., Kolosnichenko M., Tretiakova L., Lutsker T., Pashkevich K., Rubanka A., Tokar G. Definition of the Main Features of Material Assemblies for Thermal Protective Clothing During External High-temperature Effect Modelling. *Tekstilec*. 2021. Vol. 64, No. 2. P. 136-148.

5. Інноваційні технології виробництва текстильних матеріалів і виробів спеціального та військового призначення: монографія / О.В. Чепелюк, Ю.Г. Сарібекова, О.Я. Семешко, П.І. Ванкевич, А.Д. Черненко, Н.В. Остапенко, О.В. Колосніченко, А.С. Прохоровський. Херсон, Олді-Плюс, 2021. 408 с.

6. Fromer N. A., Eggert R. G., Lifton J. Critical Materials For Sustainable Energy Applications. Resnick Sustainability Institute. CA: Pasadena: California Institute of Technology, 2011. 46 p.

7. Kolosnichenko O. V., Ostapenko N. V., Kolosnichenko M. V. The development of new forms of special clothes by design projecting methods. *Vlakna a textile*. 2016. Vol. 2. P. 3-9.

8. Atalay A., Sanchez V., Atalay O., Vogt D.M., Haufe F., Wood R.J., Walsh C.J., Batch fabrication of customizable silicone-textile composite capacitive strain sensors for human motion tracking. *Advanced Materials Technologies*. 2017, 2, 1700136. DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.201700136>

9. Wang Y. J., Chen H. Z., Wang J. M., & Wang M. Z. Heat-transfer stability of porous fibrous composition under different condition. *Advanced Materials Research*. Vol. 1004-1005, 2014. P. 557-561.

10. Блюм Я.Б., Пірко Я.В., Круподьорова Т.А., Даниленко І.А., Ємець А. І., Власенко В.І., Березненко С.М., Кучеренко В.І., Арабулі С. І., Смертенко П.С., Наумов В.В. Спосіб одержання текстильного матеріалу з наночастинками срібла. Патент України №141094 від 25.03.2020, Бюл. № 6. Рішення від 17.12.2019 р.

11. Колосніченко О.В. Розробка дизайн-ергономічних рішень функціонального адаптивного одягу для важкохворих і військовослужбовців в умовах запобігання нового спалаху пандемії COVID-19 : звіт про НДР (№ держ. реєстрації 0121U109720) / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. Київ, 2021.

12. Врагов А. П. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв : навч. посіб. / А. П. Врагов. – Суми : Університетська книга, 2015. 262 с. ISBN 978-966-680-268-6.

13. Struminska T.V., Prasol S.I., Kolosnichenko E.V., Chuprina N.V., Ostapenko N.V. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties. *Vlákna a textil*, 2019. № 4, Vol. 26. P. 84–95.

[org/10.15407/nnn.22.04.985](https://doi.org/10.15407/nnn.22.04.985) [in English].

4. Ostapenko, N., Kolosnichenko, M., Tretiakova, L., Lutsker, T., Pashkevich, K., Rubanka, A., & Tokar, G. (2021). Definition of the main features of material assemblies for thermal protective clothing during external high-temperature effect modelling. *Tekstilec*, 64(2), 136–148 [in English].

5. Чепелиук, О.В., Сарібекова, Ю.Г., Семешко, О.Я., Ванкевич, П.І., et al. (2019). Innovatsiini tekhnolohii vyrobnytstva tekstylnykh materialiv i vyrobiv spetsialnoho ta viiskovoho pryznachennia [Innovative technologies for the production of textile materials and products for special and military purposes] : monohrafiia. Kherson, Oldi-Plus, 408 p. [in Ukrainian].

6. Fromer N. A., Eggert R. G., Lifton J. (2011). Critical Materials For Sustainable Energy Applications. Resnick Sustainability Institute. CA: Pasadena: California Institute of Technology, 2011. 46 p. [in English].

7. Kolosnichenko, O. V., Ostapenko, N. V., & Kolosnichenko, M. V. (2016). The development of new forms of special clothes by design projecting methods. *Vlakna a Textil*, 2, 3–9. [in English].

8. Atalay, A., Sanchez, V., Atalay, O., Vogt, D. M., Haufe, F., Wood, R. J., & Walsh, C. J. (2017). Batch fabrication of customizable silicone-textile composite capacitive strain sensors for human motion tracking. *Advanced Materials Technologies*, 2, 1700136. <https://doi.org/10.1002/admt.201700136>. [in English].

9. Wang, Y. J., Chen, H. Z., Wang, J. M., & Wang, M. Z. (2014). Heat-transfer stability of porous fibrous composition under different condition. *Advanced Materials Research*, 1004, 557-561. [in English].

10. Блюм, Я. Б., Пірко, Я. В., Круподорова, Т. А., Даниленко, І. А., Яметс, А. І., Власенко, В. І., Березненко, С. М., Кучеренко, В. І., Арабулі, С. І., Смертенко, П. С., Наумов, В. В., inventors (2020). Sposib oderzhannia tekstylnoho materialu z nanochastynkami sribla [Method for producing a textile material with silver nanoparticles]. Ukraine, patent no. 141094, published March 25, 2020. [in Ukrainian].

11. Kolosnichenko, O. V. (2021). Rozrobka dyzain-erhonomichnykh rishen funktsionalnoho adaptivnoho odiahu dlia vazhkokhvorykh i viiskovosluzhbovtziv v umovakh zapobihannia novoho spalakhu pandemii COVID-19: Zvit pro NDR (No. 0121U109720) [Development of design-ergonomic solutions for functional adaptive clothing for seriously ill patients and military personnel under the conditions of preventing a new outbreak of the COVID-19 pandemic. Research report]. Kyiv National University of Technologies and Design. [in Ukrainian].

12. Vragov, A. P. (2015). Teploobminni protsesy ta obladnannia khimichnykh i hazonaftopererobnykh vyrobnytstv: Navchalnyi posibnyk [Heat exchange processes and equipment of chemical and gas-oil refining industries: A textbook]. Sumy: Universytetska knyha. 262 p. ISBN 978-966-680-268-6. [in Ukrainian].

13. Struminska, T., Prasol, S., Kolosnichenko, E., Chuprina, N., Ostapenko, N. (2019). Designing of special clothing based on experimental researches of material properties. *Vlákna a textil*, № 4, Vol. 26, 84–95. [in English].