

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДОВГАНОВСЬКИЙ МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 535.343.2: 699.86

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ
ОБ'ЄКТІВ

263 – Цивільна безпека

26 – Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.О. Довгановський

Науковий керівник: Глива Валентин Анатолійович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Довгановський М.О. Екранування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону для забезпечення термоізоляції об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 26 – «Цивільна безпека», за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека» – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2026.

Електромагнітні випромінювання є вагомим чинником впливу на людей і технічні засоби. Електромагнітне випромінювання інфрачервоного діапазону є тепловим, тому його блокування є важливим аспектом цивільної безпеки. через необхідність захисту людини від термічних впливів, витоку теплової енергії й підвищення енергоефективності будівель і споруд. Розповсюдження інфрачервоних випромінювань має декілька фізичних механізмів, тому створення ефективної теплоізоляції об'єктів є складною технічною задачею. Більшість існуючих термоізолюючих матеріалів мають великі масогабаритні параметри або складну структуру й характеризуються високою вартістю. Особливо це стосується засобів захисту людини від термічних впливів низьких температур та інфрачервоного камуфляжу. Тому постає задача створення інноваційних матеріалів достатньої ефективності й прийнятної вартості для захисту людей та підвищення енергоефективності об'єктів будівництва.

У першому розділі розглянуто біологічну дію інфрачервоних випромінювань та проаналізовано чинну нормативну базу з блокування електромагнітних випромінювань та термоізоляції об'єктів. Досліджено сучасний стан питання щодо блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону й практики розроблення і впровадження захисних матеріалів. Визначено низку невирішених й недостатньо вирішених питань. Найбільш важливими з них є необхідність вдосконалення засобів моделювання теплопереносу крізь шаруваті структури й розроблення теоретичних засад застосування певних матеріалів для виготовлення захисних конструкцій. Відсутні напрацювання щодо захисного

матеріалу малої товщини й прийнятних ефективності та вартості.

У другому розділі розроблено методи і методики визначення ефективності матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону.

У третьому розділі обґрунтовано обирання компонентів для розроблення матеріалів і конструкцій для блокування інфрачервоних випромінювань. Показана прийнятність застосування для блокування інфрачервоного випромінювання склотканини та базальтової тканини. Визначено засади розмиття теплової сигнатури захисними матеріалами. Розроблено й випробувано матеріал для одночасного захисту об'єктів від впливу електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та радіочастот.

У четвертому розділі надані базові засади проєктування захисних матеріалів методами моделювання поширення теплових потоків крізь шаруваті структури й проведено верифікацію результатів проєктування. Наведено результати впровадження досліджень у практичну діяльність компанії ТОВ НВП «Талан-Пожтех» під час проєктування та виготовлення сучасних групових та індивідуальних засобів захисту з обґрунтованими технічними характеристиками, які виготовляються для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України та інших об'єктів критичної інфраструктури. Результати досліджень впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

Вперше:

- теоретично обґрунтовано застосування скловолокна для блокування випромінювань усього інфрачервоного діапазону шляхом врахування поглинальних властивостей скловолокна у діапазоні довжин хвиль 8–10 мкм;
- експериментально визначено ефективність застосування матеріалів на основі склотканини для теплоізоляції об'єктів та інфрачервоного камуфляжу, що дозволило використовувати захисний шар завтовшки 1–2 мм з поверхневою

густиною 200 г/м^2 для повного блокування інфрачервоного випромінювання за градієнтів температури 20–30 К.

Вдосконалено:

– методичні засади проєктування одягу для захисту людей від термічних впливів та підтримання теплового режиму шляхом визначення температурних параметрів окремих шарів одягу та захисного шару, що дозволяє раціоналізувати обрання матеріалів для їх виготовлення.

Набули подальшого розвитку:

– методичні підходи до моделювання поширення теплового потоку крізь шарувату структуру у просторі і часі за рахунок врахування наявності повітряних прошарків між окремими шарами конструкції, що дозволяє знизити похибки у процесах проєктування шаруватих матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- Розроблений матеріал придатний для виготовлення захисного одягу для підтримання теплового режиму тіла людини;
- Мала товщина й питома вага матеріалу забезпечує ергономічність одягу, виготовленого з такого матеріалу.
- Високі поглинальні властивості у інфрачервоному діапазоні дозволяють використати його для створення засобів непомітності людей і технічних засобів детекторами інфрачервоного випромінювання.
- Розроблення моделей поширення теплового потоку крізь шарові структури у 2D та 3D форматі дозволяє спростити процеси проєктування засобів блокування інфрачервоних випромінювань на принципах розумної достатності. Отримані моделі скорочують час і матеріальні витрати на розроблення засобів захисту.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, інфрачервоне випромінювання, термоізоляція, моделювання, тепломасоперенос, енергоефективність.

ABSTRACT

Dovhanovskyi, M.O. Shielding of infrared electromagnetic radiation to ensure thermal insulation of structures. – Qualification thesis in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 26 – ‘Civil Safety’, specialisation 263 – ‘Civil Safety’ – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

Electromagnetic radiation is a significant factor affecting people and technical equipment. Electromagnetic radiation in the infrared range is thermal in nature, so its blocking is an important aspect of civil safety due to the need to protect people from thermal effects, heat loss and to improve the energy efficiency of buildings and structures. The propagation of infrared radiation involves several physical mechanisms, making the creation of effective thermal insulation for structures a complex technical challenge. Most existing thermal insulation materials are bulky or have a complex structure and are characterised by high cost. This is particularly true for means of protecting people from the thermal effects of low temperatures and infrared camouflage. Therefore, the task arises of creating innovative materials of sufficient effectiveness and acceptable cost to protect people and improve the energy efficiency of buildings.

The first chapter examines the biological effects of infrared radiation and analyses the current regulatory framework for blocking electromagnetic radiation and the thermal insulation of structures. The current state of the art regarding the blocking of infrared electromagnetic radiation and the practice of developing and implementing protective materials has been investigated. A number of unresolved and insufficiently resolved issues have been identified. The most important of these are the need to improve methods for modelling heat transfer through layered structures and the development of theoretical foundations for the application of specific materials in the manufacture of protective structures. There is a lack of research on protective materials of small thickness with acceptable efficiency and cost.

The second chapter develops methods and techniques for determining the effectiveness of materials for blocking electromagnetic radiation in the infrared range.

The third chapter justifies the selection of components for the development of materials and structures for blocking infrared radiation. The suitability of glass fabric and basalt fabric for blocking infrared radiation is demonstrated. The principles of thermal signature blurring using protective materials are established. A material has been developed and tested for the simultaneous protection of objects from the effects of electromagnetic radiation in the infrared range and radio frequencies.

The fourth chapter presents the basic principles of designing protective materials using methods for modelling the propagation of heat fluxes through layered structures, and the design results have been verified. The results of applying the research to the practical activities of the company LLC Scientific and Technological Enterprise "Talan-Pozhtech" during the design and manufacture of modern group and individual protective equipment with substantiated technical characteristics, which is produced for the fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine and other critical infrastructure facilities, are presented. The research results have been incorporated into the teaching programme at the Kyiv National University of Construction and Architecture.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following:

For the first time:

- the use of glass fibre to block radiation across the entire infrared spectrum has been theoretically substantiated by taking into account the absorption properties of glass fibre in the 8–10 μm wavelength range;
- the effectiveness of using glass fabric-based materials for thermal insulation of objects and infrared camouflage has been experimentally determined, enabling the use of a protective layer 1–2 mm thick with a surface density of 200 g/m² to completely block infrared radiation across temperature gradients of 20–30 K.

The following have been improved:

- methodological principles for designing clothing to protect people from thermal effects and maintain thermal conditions by determining the temperature parameters

of individual layers of clothing and the protective layer, which allows for the rational selection of materials for their manufacture.

The following have been further developed:

- methodological approaches to modelling the propagation of heat flux through a layered structure in space and time by taking into account the presence of air gaps between individual layers of the structure, which allows for a reduction in errors in the design processes of layered materials for blocking infrared radiation.

The practical significance of the results obtained lies in the following:

- The developed material is suitable for the manufacture of protective clothing to maintain the human body's thermal regime;
- The material's low thickness and specific weight ensure the ergonomics of clothing made from it.
- High absorption properties in the infrared range allow it to be used for creating means of rendering people and technical equipment invisible to infrared radiation detectors.
- The development of models for heat flux propagation through layered structures in 2D and 3D formats simplifies the design of infrared radiation blocking devices based on the principle of reasonable sufficiency. The resulting models reduce the time and material costs involved in developing protective equipment.

Keywords: electromagnetic radiation, infrared radiation, thermal insulation, modelling, heat and mass transfer, energy efficiency.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus)

1. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskyi, M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against

electromagnetic radiation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10 (131), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>

2. V. Glyva, N. Burdeina, L. Levchenko, G. Krasnianskyi, Y. Biruk, M. Dovhanovsky. (2024). Modelling the thermal resistance of layered structures for blocking infrared radiation. Strength of Materials and Theory of Structures, (113), pp. 329–336, DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.329-336>

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Glyva, V., Krasnianskyi, G., Dovhanovskyi, M., & Krasnianskyi, T. (2024). Розроблення і дослідження захисних властивостей матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 3(77), 203-205. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.203>

4. В. А. Глива, М. О. Довгановський (2025). Проектування одягу для захисту від термічних впливів та збереження тепла. Системи управління, навігації та зв'язку, 1 (79), с. 169-171, <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.169-171>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Глива В. А., Довгановський М.О. Композиційні матеріали для відновлення термоізоляції ушкоджених будівель і споруд. Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика»: НАУ, Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 - 24 травня 2024 року – С.30

6. G. Krasnianskyi, I. Aznauryan, M. Dovhanovskyi, O. Besarab, V. Okhrysko. Evaluation of the effectiveness of infrared radiation shielding with glass fiber. REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, p. 102

7. Grygorii Krasnianskyi, Iryna Aznauryan, Maksym Dovhanovskyi, Denys Kurylo. Calculation of thermal insulation efficiency of a building wall. REPORTS of the

6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 84-85.

Авторські свідоцтва, дипломи, патенти

8. Патент України на корисну модель МПК G02B5/20, C03C27/12. № 158878. Екран для інфрачервоного випромінювання / Винахідники: Глива В.А., Краснянський Г.Ю., Довгановський М.О., Олексин А.В. — заявл: 21.02.2024, опубл. 02.04.2025, Бюл. № 14/2025.

ЗМІСТ

ГЛОСАРІЙ.....	12
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЧИННОЇ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ТА ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ.....	18
1.1. Електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону як біологічно активний фактор.....	18
1.2. Аналіз чинної нормативної бази з блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та забезпечення термоізоляції об'єктів.....	19
1.3. Сучасні підходи до блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та розроблення матеріалів для термоізоляції об'єктів.....	21
Висновки по розділу 1.....	31
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ.....	31
2.1. Методи і методики аналітичного визначення ефективності матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону.....	32
2.2. Постановка завдання вимірювань теплової сигнатури об'єкта.....	42
2.3. Опис методики вимірювань.....	43
Висновки по розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ.....	52

3.1. Обґрунтування обирання компонентів для розроблення матеріалів і конструкцій для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону.....	52
3.2. Дослідження ефективності матеріалу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону на основі компонентів високої теплоємності.....	59
3.3. Дослідження ефективності матеріалу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону на основі склотканини.....	69
Висновки по розділу 3.....	83
РОЗДІЛ 4. ЗАСАДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ.....	85
4.1. Базові засади виготовлення шаруватих матеріалів для термоізоляції будівель.....	85
4.2. Базові засади конструювання захисного одягу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону.....	89
4.3. Впровадження результатів дослідження та їх ефективності.....	96
Висновки до розділу 4.....	97
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТОК А.....	113
ДОДАТОК Б.....	115
ДОДАТОК В.....	116

ГЛОСАРІЙ

Густина матеріалу	маса одиниці об'єму матеріалу.
Дальня зона	зона сформованої електромагнітної хвилі, у якій одночасно виконуються нерівності $r \gg \lambda/2\pi$ та $r \geq 2D^2/\lambda$, D – максимальний розмір джерела випромінювання.
Електромагнітне випромінювання	електромагнітні хвилі, випромінювані зарядженими частинками, атомами, молекулами, антенами та іншими випромінювальними системами.
Електромагнітна сумісність	здатність радіоелектронних засобів і вимірювальних пристроїв одночасно функціонувати з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації з урахуванням впливу радіозавад і не створювати неприпустимих радіозавад іншим радіоелектронним засобам.
Інфрачервоне випромінювання	випромінювання, що охоплює спектральну область між червоною межею видимого світла з довжиною хвилі 700 нм та мікрохвильовим випромінюванням з довжиною хвилі 1 мм.
Коефіцієнт теплопровідності	кількість теплоти, яка проходить крізь одиницю площі поверхні в одиницю часу за різниці температур між носіями в 1 К.
Питома теплоємність	кількість тепла, яка підвищує температуру одиниці маси матеріалу на 1 К.
Температурний градієнт	векторна фізична величина, що характеризує зміну температури на одиницю довжини по нормалі до ізотермічної поверхні, спрямовані у бік зростання температури.

Температуропровідність	фізична величин, яка характеризує швидкість вирівнювання температури речовини у нерівноважних теплових процесах.
Теплова сигнатура	ідентифікація об'єкта на основі теплового зображення.
Тепловий опір	спроможність тіла перешкоджати поширенню теплового потоку.
Теплопровідність	спроможність матеріальних тіл проводити теплову енергію від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих.
Термоізоляція	елементи конструкції, які зменшують процес теплопередачі й виконують роль основного термічного опору у конструкції.
Щільність енергії потоку	векторна фізична величина, яка характеризується кількістю енергії, що протікає за одиницю часу через одиницю площі, орієнтовану перпендикулярно до спрямованості потоку.

ВСТУП

Актуальність теми. Електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону є тепловими випромінюваннями, тому для підтримання теплового режиму людини, запобігання втрат тепла й підвищення енергоефективності будівель важливим є розроблення й впровадження термоізоляційних матеріалів високої ефективності та прийнятної вартості. Дослідження з блокування інфрачервоних випромінювань відбувається у двох напрямках – розроблення та впровадження будівельних та оздоблювальних матеріалів з високими теплоізоляційними властивостями та захисного одягу для захисту людей від термічних впливів та підтримання їх теплового режиму. Розроблення матеріалів для проєктування одягу є найбільш складною задачею через необхідність забезпечення його ергономічності. Особливо актуальною ця задача є в Україні через потребу виготовлення великої кількості матеріалів, яким забезпечують інфрачервоний камуфляж. Не дивлячись на велику кількість розробок захисних матеріалів і одягу, задача залишається актуальною через необхідність зниження питомої ваги матеріалу, товщини, підвищення ефективності та зниження вартості. Певним чином складність вирішення наведених задач обумовлена відсутністю теоретичного обґрунтування обирання компонентів захисного матеріалу, відсутності реальної моделі проходження теплового потоку крізь шари матеріалів з різними термофізичними властивостями, зокрема відсутності врахування повітряних прошарків між окремими шарами. Тому потребує обґрунтування обирання найбільш раціонального захисного матеріалу, виготовлення захисних матеріалів, та їх випробування у лабораторних умовах й умовах реальної експлуатації. Наведене обумовлює тему дисертаційного дослідження як актуального науково-прикладного завдання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до «Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні», схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12.12.2018 р. № 989–р. та у рамках виконання

держбюджетних тем: «Дослідження фізичних факторів техногенного походження виробничих ризиків та засоби їх зниження. № 0121U111535».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є забезпечення нормативних температурних режимів людей, зниження витоку тепла і блокування інфрачервоного випромінювання людей та інших об'єктів за рахунок застосування захисних матеріалів.

Завдання:

- Провести аналіз ефективності та умов застосування існуючих матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань та термічного захисту;
- Розробити теоретичні засади проєктування матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань з урахуванням теплопровідності окремих шарів матеріалів, поглинання інфрачервоного випромінювання та товщини захисного шару;
- Дослідити ефективність матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань у лабораторних умовах і умовах реального застосування;
- Розробити моделі поширення теплових потоків крізь шаруваті структури з різними термофізичними властивостями шарів й урахуванням наявності повітряних прошарків для автоматизації проєктування захисного одягу й термоізоляції інших об'єктів.

Об'єкт дослідження – процеси теплопередачі крізь шаруваті матеріали з різними термофізичними властивостями.

Предмет дослідження – залежності інтенсивності витоку теплової енергії крізь шаруваті структури з різними коефіцієнтами теплопровідності, поглинаннями інфрачервоного випромінювання та товщинами.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- теоретично обґрунтовано застосування скловолокна для блокування випромінювань усього інфрачервоного діапазону шляхом врахування поглинальних властивостей скловолокна у діапазоні довжин хвиль 8–10 мкм;

- експериментально визначено ефективність застосування матеріалів на основі склотканини для теплоізоляції об'єктів та інфрачервоного камуфляжу, що дозволило використовувати захисний шар завтовшки 1–2 мм з поверхневою густиною 200 г/м^2 для повного блокування інфрачервоного випромінювання за градієнтів температури 20–30 К.

Вдосконалено:

- методичні засади проєктування одягу для захисту людей від термічних впливів та підтримання теплового режиму шляхом визначення температурних параметрів окремих шарів одягу та захисного шару, що дозволяє раціоналізувати обрання матеріалів для їх виготовлення.

Набули подальшого розвитку:

- методичні підходи до моделювання поширення теплового потоку крізь шарувату структуру у просторі і часі за рахунок врахування наявності повітряних прошарків між окремими шарами конструкції, що дозволяє знизити похибки у процесах проєктування шаруватих матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- Розроблений матеріал придатний для виготовлення захисного одягу для підтримання теплового режиму тіла людини;
- Мала товщина й питома вага матеріалу забезпечує ергономічність одягу, виготовленого з такого матеріалу.
- Високі поглинальні властивості у інфрачервоному діапазоні дозволяють використати його для створення засобів непомітності людей і технічних засобів детекторами інфрачервоного випромінювання.
- Розроблення моделей поширення теплового потоку крізь шарові структури у 2D та 3D форматі дозволяє спростити процеси проєктування засобів блокування інфрачервоних випромінювань на принципах розумної достатності. Отримані моделі скорочують час і матеріальні витрати на розроблення засобів захисту.

Особистий внесок здобувача. У [1] експериментально визначено блокування електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону облицювальними матеріалами. У [2] вихідні дані для здійснення моделювання поширення теплового випромінювання та верифікація матеріалів. У роботі [3] експериментально визначено ефективність блокування інфрачервоного випромінювання у реальних умовах експлуатації матеріалу. У [4] ідея, засади проектування захисного одягу. У [8] випробування захисних властивостей матеріалу за різних градієнтів температур.

Апробація результатів дослідження.

Результати дослідження доповідалися на:

1. Міжнародній науково-методичній конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика», Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 – 24 травня 2024 р.
2. Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія». Україна, Київ, 22 – 24 листопада 2023 р.
3. 6 INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27 – 29, 2024, Kyiv. Ukraine

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 8 наукових працях, серед яких 2 статті у наукометричних базах «WoS» та «Scopus», 2 статті у наукових фахових періодичних виданнях рекомендованих Міністерством освіти і науки України, 3 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій, 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 116 сторінок, з них: 101 сторінка основного тексту, список використаних джерел із 94 найменувань на 11 сторінках; 3 додатків на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЧИННОЇ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ТА ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

1.1. Електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону як біологічно активний фактор

Високі температури можуть бути небезпечними для здоров'я людей. У роботі [1] показано, що теплові стреси можуть збільшувати смертність і захворюваність людей, а також негативно впливати на психічне здоров'я людей. Високий тепловий стрес також може знизити фізичну працездатність і моторно-когнітивні показники, що негативно позначиться на продуктивності та збільшить ризик професійних проблем зі здоров'ям. Це особливо важливе для працівників державної служби з надзвичайних ситуацій, гірничої та металургійної галузі промисловостей, військових. Також шкідливий вплив можуть мати низькі температури внаслідок гіпотермії [2, 3]. Під впливом гіпотермії відбувається спонтанне зниження кровообігу, що може обмежити працездатність людей, а також викликати проблеми серцево-судинної системи. У дослідженні [4] було узагальнено усі можливі негативні впливи на людей внаслідок дії низьких та високих температур. Встановлено, що теплові режими, які забезпечує одяг впливають не тільки на комфортність людини, й на сенсорні відчуття і продуктивність праці. Зокрема, на ці параметри впливають розмір одягу, силу вітру й вологість. Показано перевагу багатошарового одягу внаслідок зміни вологості у підкостюмному розмірі. Зокрема розміри одягу й прошарки на 20 % можуть знижувати рівні теплопередачі. У той же час значний вплив – до 33 % має вітер, який сприяє тепловідведенню. Зроблено висновок, що теплоізолюючі властивості можна забезпечити тільки на комплексній основі, що створює безпечні і комфортні умови для людей. Але крім цього захисний одяг для блокування інфрачервоних випромінювань в умовах України виконує і додаткові безпекові функції. В умовах

війни створення інфрачервоного камуфляжу сприяє збереженню життя й здоров'я людей. Тобто, запобігання витоку тепла назовні захисного одягу сприяє безпеці людей. Це ж стосується зниження теплової сигнатури транспортних засобів та бойової техніки, якими користуються Збройні сили України.

1.2. Аналіз чинної нормативної бази з блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та забезпечення термоізоляції об'єктів

Нормативна база щодо спеціального одягу для захисту людей від впливу високих та низьких температур стосується, в основному, спеціального (захисного) одягу для працюючих у небезпечних умовах. Національні стандарти, ідентичні європейським стандартам [5, 6], визначають вимоги до робочого одягу для виконання робіт в умовах впливу холоду. Норматив [7] розглядає оцінювання теплоізоляції за впливу високих температур. Разом з цим міжнародний стандарт [8] визначає вплив паропроникності одягу в умовах великих градієнтів температур. Усі ці нормативи формують виключно вимоги до одягу з точки зору підтримання теплового режиму людини. Загальні рекомендації щодо матеріалів та концептуального підходу до їх обирання відсутні. Європейська директива [9] наголошує на необхідності зниження ризиків для здоров'я працюючих внаслідок таких впливів. Це ж стосується системи управління гігієною та безпекою праці [10]. Частково термічні впливи на людей регламентуються методичними рекомендаціями щодо режимів роботи у засобах індивідуального захисту особового складу державної служби надзвичайних ситуацій [11]. Стандарти [12, 13] також регламентують виключно фактичний тепловий вплив на людину. У державному стандарті України [14] розглядається ергономіка теплового середовища й методи оцінювання реакції людини. Ергономіці теплового середовища присвячений національний стандарт [15]. Його перевагою є аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків. Це дає

певні орієнтири для процесів проектування захисного одягу. Щодо одягу для зниження теплового впливу або захисту від впливу низьких температур, то нормативи розглядають виключно виробничі умови. Ніяким чином не регламентується застосування матеріалів для виготовлення інфрачервоного камуфляжу, що цілком логічно і зрозуміло. Цей напрям не можна регламентувати через необхідність максимального блокування інфрачервоного випромінювання. Через актуальність задач енергоефективності будівель найбільш унормованою є галузь забезпечення температурного режиму у будівлях і спорудах. Сучасний міжнародний стандарт [16] регламентує відбивні властивості і матеріали, тобто з низькою відбивальною здатністю при низькій випромінювальній здатності на відповідній довжині хвилі. Стандарт розглядає зменшення тепловіддачі тепловим випромінюванням поверхнями зменшуючи променисте тепло. Такі поверхні утворюються на інших матеріалах, які повністю або частково прозорі для інфрачервоного випромінювання (волокниста ізоляція низької щільності). Вони також зменшують передачі променистого тепла крізь повітряні зазори. Вимоги цього стандарту, в принципі, можна частково застосовувати як для проектування термоізоляції, так і для інфрачервоного камуфляжу. Важливою вимогою стандарту є регламентація розумної довговічності матеріалу. Тобто, визначається термін його гарантованої експлуатації. Але цей стандарт не замінює існуючі процедури для визначення теплових характеристик продуктів. Він не надає і не може надати експлуатаційне або проєктне значення теплових характеристик. Стандарт [17] регламентує теплоізоляційні вироби, компоненти і системи. Він розглядає стандартизацію та специфікацію теплоізоляційних виробів, компонентів і систем для застосування у будівлях. Зокрема, ізоляцію для обладнання, промислову ізоляцію, включаючи специфікацію необхідних властивостей, специфікацію конкретних методів випробування для продукції, компонентів та систем. Національний стандарт [18] стосується методу вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Він установлює методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення житлових, громадських та

промислових будівель під час проектування, нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, зокрема з метою термомодернізації та спрямований на виконання положень ДБН В.1.2-11 та ДБН В.2.6-31. Усі розробки щодо теплового захисту та термоізоляції будівель і споруд в умовах України потрібно здійснювати з урахуванням вимог до споруд спеціального призначення, а також закладів освіти і громадських будинків і споруд [19–22]. Зокрема, це стосується як створення, так і утримання фонду захисних споруд цивільного захисту [23]. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту у складі проєктної документації на будівництво об'єктів напряду не визначають вимоги до теплового захисту. [24–27]. Але враховуючи перебування в них людей з непередбаченими строками, такий захист повинен бути. Це і визначає необхідність розроблення та впровадження інноваційних матеріалів та конструкцій для теплоізоляції.

1.3. Сучасні підходи до блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та розроблення матеріалів для термоізоляції об'єктів

Найбільш актуальними задачами, принаймні в Україні, є створення захисного одягу для блокування інфрачервоних випромінювань не тільки для підтримання теплового режиму працюючих, а й для створення інфрачервоного камуфляжу. На сьогодні існують багато досліджень і прикладних розробок щодо цього напряду. У роботі [28] наведено результати розроблення візуально прозорого та відбиваючого інфрачервоного випромінювання покриття для терморегулювання та теплового камуфляжу людини. Наведено результати розроблення покриття прозорого у видимій області спектра і відбиваюче інфрачервоне випромінювання. Це досягається нанесенням тришарової сітки частинок оксид-метал-оксид нанорозмірів. За високої ефективності він має низку недоліків, нестабільність покриття при згинних деформаціях і високу вартість. У роботі [29] наведені результати розроблення й випробування захисту від

інфрачервоного випромінювання на основі поліефірних тканин з покриттями оксидів титану та міді. Нанесення досягається методом магнетонного розпилення захисних матеріалів. У результаті отримуються сендвіч-структура діоксид титану-мідь-діоксид титану. Було оцінено відбиття інфрачервоних хвиль з довжинами від 8 до 14 мкм. За малих товщин, 200 нм одного шару, час виготовлення напилення одного шару досить великий – 30 хвилин, а матеріал працює на відбиття. Поліефірна тканина, та ще з відбиттям усередину малопридатна для виготовлення одягу. Для захисту технічних об'єктів – автомобілів, акумуляторів, військової техніки вона ефективна, але має високу вартість. Високу вартість також мають матеріали, описані у [30]. Такі матеріали відбивають до 0,7 інфрачервоного випромінювання. Його перевагою є можливість нанесення на бавовняні матеріали, а недоліком є робота на відбиття з повною відсутністю поглинальних властивостей. В оглядовій роботі [31] описано захисти від видимого та інфрачервоного випромінювання на основі біотехнологій. Але робота має дещо декларативний характер. Не додаючи конкретних параметрів і можливості прикладного застосування такого підходу. Також оглядовий характер має робота [32]. Наведено переваги камуфляжу на текстильній основі. Але відсутня конкретика щодо індуктивних та кондуктивних характеристик інфрачервоного захисту. Викликає сумніви можливість одного шару текстильного матеріалу забезпечити поглинання інфрачервоного випромінювання, тобто через променевий теплообмін. А неефективність щодо теплопровідності не може бути прийнятною. У роботі [33] досліджено засади розроблення мультиспектрального камуфляжу. Зокрема поєднання інфрачервоного захисту з захистом у видимому світлі. Пропонується розроблення окремих матеріалів для різних умов застосування, що є очевидним. У ґрунтовній роботі [34] визначено засади створення адаптивного камуфляжу для військових. Підкреслено, що існуючі види камуфляжу повинні бути вдосконалені через розвиток галузі виявлення теплового випромінювання. Перевагою роботи є те, що враховується можливість отримання контуру розмитої інфрачервоної сигнатури та мінливість середовища, що вимагає адаптації захисту. Розглянуто

матеріали, адаптивність яких реалізується шляхом інтеграції матеріалів зі зміною фази та низькою випромінювальною здатністю у текстиль з камуфляжним малюнком. Також розглянуто комфортність солдатів у одязі з такого матеріалу. Слід зазначити, що будь-який матеріал зі зміною фази має певну товщину, тобто можуть виникати проблеми з ергономічністю. У дослідженні [35] визначено зміни дифузного відбиття тканин із суміші бавовни та нейлону, оброблених діоксидом цирконію, церію, та лимонною кислотою у спектральних діапазонах ближнього та короткохвильового інфрачервоного випромінювання. У роботі досліджено спектр ближнього та короткохвильового випромінювання тканин покритих неорганічними сполуками, щоб налаштувати їх дифузне відбивання відповідно до тих, що мають лісове або пустельне тло. Тканини з суміші бавовни та нейлону покриті чотириколірним цифровим візерунком використовувалися як підкладина, на яку наносилися різні концентрації діоксидів цирконію та церію з лимонною кислотою. Використовувався метод сухого затвердіння. Технологія виготовлення досить складна, бо діоксиди металів використовувалися у вигляді наночастинок. Наведено, що за концентрацій частинок від 1,0 до 1,5 % маскувальний ефект був задовільний. Але, слід враховувати що такі технології не зовсім прийнятні для широкого застосування. У [36] представлено так звані розумні текстильні вироби для видимого та інфрачервоного камуфляжу. Взагалі розглядався захисний текстиль, включаючи довговічність, стійкість до умов навколишнього середовища та ергономічність. Наведено, що результати розробки задовільні. Але не показано яким чином відбувається адаптація захисту до зовнішніх умов. Зміна фази, як і у попередньому дослідженні, не завжди прийнятна. Навіть застосування сучасних технологій автоматизації виробництва не завжди дає бажаний ефект. Дослідження [37] присвячене дослідженню теплоізоляційних характеристик тканин на основі відбивних пігментів на основі барію і олова легованим залізом. Представлені теоретичні засади обирання вмісту захисного покриття, що є перевагою роботи. Але матеріал придатний тільки для захисту у ближньому інфрачервоному діапазоні. Важливою перевагою роботи є теоретичне обґрунтування застосування

захисних сполук та її стійкість до фізичних впливів. Камуфлююче покриття, яке за спектральним складом подібне до листя насаджень на основі полімерного неорганічного композиту представлено у роботі [38]. Фактично пропонується гіперспектральний камуфляж. Наповнювачами є хлорид літію та оксиди хрому. Досвід досліджень свідчить, що принаймні оксиди хрому недостатньо ефективні у інфрачервоній області. Більш прийнятним є інфрачервоний та кольоровий захист на поліефірних тканинах з різними варіантами комбінацій оксиду титану та міді [39]. Ефективність такого покриття дуже висока. Але поліефірні тканини у поєднанні з відбиттям теплових потоків усередину захисту викликають сумніви щодо прикладного значення такої конструкції. У роботі [40] наведено результати розроблення і дослідження матеріалу з низькою інфрачервоною випромінювальною здатністю. Але наповнювачем захисного шару є наночастинки. Носієм є поліуретан, а захисною субстанцією – нанометровий пігмент та алюміній. Як вже зазначалося нанотехнології не завжди доцільні для виготовлення виробів широкого застосування. Крім того, наведений матеріал сильно змінює захисні властивості за зміни градієнту температур. Цінність роботи полягає у розробленні теоретичної моделі для пояснення механізмів зміни коефіцієнтів випромінювання за рахунок різного розташування частинок у процесі сушіння. Головну роль тут мають нанорозміри захисної субстанції. У [41] інфрачервоний камуфляж досягається за рахунок так званого фотонного кристалу з розсіюванням тепла випромінювання. Такий камуфляж широкодіапазонний, тобто охоплює усю інфрачервону галузь спектра. Але його розробка стосується високих температур. Для сумісності видимого та інфрачервоного спектра використовувалася матриця апертур у плівці окису цинку – срібла-окису цинку. Фактично кожен шар покриття виконує окрему функцію. Завдяки широкому перфорованому шару срібла досягається як низькі коефіцієнти випромінювання, так і високу пропускну здатність щодо розсіювання тепла. Недоліком є те, що це камуфляж є високотемпературним. У [42] розглянуті матеріали для мультиспектрального камуфляжу інфрачервоного випромінювання та мікрохвиль. Наведено розробку

ієрархічного матеріалу з керуванням сигналу при розсіюванні поглиненої енергії мікрохвиль через вибіркове випромінювання інфрачервоних хвиль від структури елементарної комірки матеріалу. Склад матеріалу не наведено, тільки надано відомості, що його відбивальні властивості кращі за властивості золота. У [43] досліджено адаптивний термохромний камуфляж для військового одягу. Тобто, адаптація полягає у підлаштуванні захисту до навколишнього середовища. Було розроблено спеціальні термохромні чорнила. Нанесений кольоровий візерунок змінює колір у залежності від умов. Але найбільша ефективність досягається у видимій частині електромагнітного спектра, у той час як інфрачервоне випромінювання блокується слабо. Дуже високу ефективність демонструє інфрачервоний камуфляж, описаний у [44]. Захисною субстанцією тут є графенові плівки, виготовлені методом хімічного осадження з парової фази. Такий метод дозволяє знизити крихкість покриття. Фактично отримана папероподібна плівка з графенової тканини. Ця структура захищає від витоку інфрачервоного випромінювання, але графенові технології мають дуже високу вартість і проблематичні з точки зору деградації у процесі експлуатації. У дослідженні [45] наведено результати виготовлення високотемпературного інфрачервоного камуфляжу. Ця розробка важлива з точки зору приховування високотемпературних об'єктів. Експериментально показано, що такий камуфляж має ефективне керування температурою. Застосовано кремнеземний аерогель для теплоізоляції та багатошаровий випромінювач на основі германію і цинку для одночасного радіаційного охолодження. У експериментах показано, що температура об'єкта різко зменшується. При цьому, навіть за її помітності розмиває інфрачервону сигнатуру, але усі відомі аерогелі не є стабільними структурами що обмежує їх використання. Багато досліджень присвячено впливу низької температури на людей і засобам захисту від них. У роботах [46, 47] розглянуто вплив низької температури з комбінованим впливом вітру. У дослідженнях [48, 49] розроблено моделі зміни температури відкритих частин моделі тіла людини. Але вони тільки встановлюють факт зниження температури, а не надають інструментарію щодо її

нормалізації. Моделі, наведені у [50–52] стосуються моделей зниження передачі тепла від людини. Але вони мають дещо абстрактний характер і не враховують реальних процесів теплопередачі крізь шарувату структуру [53]. У роботах [54–56] розглянуто і науково обґрунтовано визначення оптимального часу працівника служби надзвичайних ситуацій в умовах позарегламентних температур. Це є стосується оглядового дослідження [57]. Фактично вдосконаленню захисного одягу присвячені роботи [58, 59]. Але вони стосуються роботи в особливих умовах, у яких термічний захист є другорядним фактором. Можна дійти висновку, що не дивлячись на актуальність проблематики розроблення сучасних матеріалів й захисного одягу з них, кількість доступних досліджень у цьому напрямі досить обмежена. Це можна пояснити тим, що у багатьох країнах такі відомості є інформацією з обмеженим доступом, а роботи щодо розроблення спецодягу є закритими.

Значна кількість робіт стосується створення інфрачервоного камуфляжу та термоізоляцій будівель з точки зору зниження помітності великих технічних об'єктів та енергоефективності. Дослідження [60] присвячене розробці переносного інфрачервоного екрана на основі композитного волокна поліуретан-сурма-олово-оксид олова. Такі волокна ефективно блокують інфрачервоне випромінювання від людського тіла (до 98 %) у температурах від -20 до 80°C. При цьому волокна мають високі механічні властивості. Але такий матеріал достатньо складний у виробництві і має низьку паропровідність. У дослідженні [61] наведено експериментальні дані щодо теплового камуфляжу фазозмінного матеріалу на основі германію, олова, телуру. Він має високі захисні властивості й перевагу, яка полягає у незалежності випромінювальної здатності від кута огляду. Але фазозмінний матеріал майже завжди має велику товщину і складність технологій практичного застосування. Прикладна робота [62] пропонує теплоеластичні, теплоізоляційні легкі піни, непомітні інфрачервоними детекторами. Важливим є що, занадто високий ступінь блокування інфрачервоного випромінювання може зробити помітним об'єкт. Цьому запобігає меламінова піна. Вона одночасно

забезпечує теплоізоляцію об'єкта та інфрачервону малопомітність. Але найбільш ефективною вона є на частотах роботи звичайних радарів. Тобто, поєднує властивості з непомітності у інфрачервоному та радіочастотному діапазонах. Такий матеріал має велике значення у військовій сфері, але товщина піни заздалегідь велика, враховуючи довжини радіодіапазону. Велике практичне значення має ультратонкий текстиль з одночасним пасивним обігрівом [63]. Фактично він блокує випромінювання, яке поступає ззовні забезпечуючи обігрів внутрішнього об'єму. Але його виготовлення дуже складне і його можливо застосувати тільки в приміщеннях. Фактично такий матеріал виготовляється на основі нанотехнологій, що не завжди рентабельно використовувати. Також нанотехнології стосується розробка [64], матеріал на основі стибію і окису олова. Їх застосовують для створення так званого розумного скла, як забезпечує пасивне охолодження. У цих покриттів синтезується нанокристал діаметром 10 нм з використанням золь-гель технологій. Технологія дуже складна і дорога, а покриття не може бути нанесене на гнучкі поверхні. Це робить його придатним тільки для облицювання приміщень з екстремальними умовами та приміщень спеціального призначення.

У дослідженні [65] наведено результати випробувань скла та плівок для блокування інфрачервоного випромінювання. Вони призначені для застосування у енергозберігаючих технологіях. Не дивлячись на те, що носії недорогі, захисним шаром є нанокристали, які блокують інфрачервоне випромінювання. Ефективність залежать від форми і розмірів кристалів. За високої ефективності технології їх отримання – метод газофазного виділення складна і дорога. Тобто, анонсування матеріалу як недорогого сумнівне. Але у роботі надано модель, отриману чисельним методом, що є корисним для проєктування матеріалів і конструкцій для енергозберігаючих технологій. Подібне дослідження [66] стосується ефективності блокування інфрачервоного випромінювання композитами на основі полівінілового спирту з наповнювачами із сульфіді кадмію та сульфіді цинку нанорозмірів. Показано, що за рівномірного розподілу наночастинок матеріал дуже

стабільний, але результати щодо ступеня блокування інфрачервоного випромінювання не наведено. Багато досліджень стосується теплоізоляційних матеріалів для будівель і споруд, що обумовлено потребами підвищення енергоефективності. У [67] надано економічні розрахунки щодо оптимізації характеристик теплоізоляції. Цей підхід важливий з точки зору розроблення матеріалів на принципах розумної достатності. У роботі [68] розглянуто вплив теплової маси та ізоляції будівельних конструкцій на енергоефективність. Показано, що можливо розробити методологію, яка дозволяє оптимізувати розміри конструктивних елементів будівлі на стадії проектування для мінімізації експлуатаційного споживання енергії. Це дозволяє спроектувати структурні компоненти з достатньою тепловою масою для зниження енергоспоживання. Надано залежності впливу теплоізоляції на витрати. У [69] наведено результати випробувань екологічно чистого солом'яного утеплювача для будівель. Певним чином де данина моди переходу на натуральний продукт. Не дивлячись на високу ефективність такої ізоляції, вона безперспективна з точки зору широкого застосування. У дослідженні [70] наведено результати випробувань армованих волокнами термопластичних композитних панелей для ізоляції будівель. Не дивлячись на використання натурального матеріалу – джгуту, композиція з поліестером і поліпропіленом методом компресійного формування дає дуже високі теплоізоляційні характеристики, що встановлено методом інфрачервоної термографії. При цьому індекси зниження шуму складають 12,21 дБ, що дуже високий показник для одношарового покриття. В цілому такий матеріал є перспективним. В оглядовому дослідженні [71] наведено порівняльний аналіз властивостей та ефективностей будівельних ізоляційних матеріалів. Зокрема показано, що для деяких умов будівельні стіни з нижчим термічним опором є більш економічно ефективними через надмірні підвищення температур, що є небажаним. А оптимізація у процесі проектування термозахисту повинна включати чотири компоненти: енергія, навколишнє середовище, економіка, комфорт. Важливим аспектом проектування і впровадження теплового захисту є життєвий цикл

матеріалів [72]. Відомо, що будь-які матеріали деградують внаслідок структурних змін накопичення вологи тощо. У роботі представлено структурований огляд наявних напрацювань щодо будівельних теплоізоляційних матеріалів. Дослідження надає можливість обрати найбільш придатні матеріали у залежності від термінів експлуатації, які до цього матеріалу передбачаються. У [73] оглянуто термоакустичні властивості матеріалів для дерев'яного домобудівництва. Надана вихідна інформація придатна для моделювання теплових процесів та поглинання шуму у екологічних будівлях. Але загальні технічні проблеми для проєктування термозахисту відсутні. Цінність роботи полягає у розробленні загальних засад комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів та матриць переносу. У оглядовій роботі [74] проаналізовано усі існуючі теплоізоляційні матеріали з точки зору співвідношення ефективності теплоізоляції та вартості виробів. Зокрема показано, що теплоізоляція може стосуватися матеріалів, що використовуються для зниження швидкості теплопередачі або методів і процесів, які використовуються для зменшення теплопередачі. Розглянуто усі типи передачі тепла – провідність, конвекція, випромінювання або зміна фази. Підкреслена важливість наявності точних вхідних даних. Зокрема, для параметрів одягу. Показано, що зазвичай такі дані представлені у положенні тіла стоячи, але рідко розглядаються локально окремі частини тіла. Важливим є розподіл повітряного зазору, на який сильно впливає конкретне положення тіла, є критичним для ізоляційних показників одягу. У огляді [75] проаналізовані усі фактори, які впливають на теплопровідність будівельних теплоізоляційних матеріалів. Поряд з стандартними величинами і підходами у роботі класифіковано впливи на коефіцієнти теплопровідності, головними з яких є різниця температур, вміст вологи і насипна густина. Тобто узагальнено усі критичні фактори, які впливають на теплопровідність у реальних умовах. Дослідження [76] стосується спінених полімерів у багатофункціональних ізоляційних покриттях. Показана необхідність врахування функціональної спрямованості конструкції. Реалізація концепції безшовних теплоізоляційних покриттів дозволяє підвищити

ефективність теплоізоляції з використанням спінених полімерів. Надано кількісні дані щодо ефективності різних спінених матеріалів. Важливим є те, що представлені й механічні властивості матеріалів, а також інтенсивність поглинання ними вологи. Також представлені практично значущі дані щодо стійкості матеріалів в умовах змінних температур. У [77] досліджено стійкість зовнішність теплоізоляції до механічних впливів, зокрема до граду. Представлено дослідження стійкості покриттів на основі лабораторних випробувань й розроблена відповідна методика. Зокрема показано, що теплоізоляційні матеріали з дисперсійним клеєм в армуванні мають найбільшу стійкість до ударних пошкоджень. У багатьох випадках, особливо в умовах бойових дій, необхідно одночасно забезпечувати екранування інфрачервоних випромінювань та електромагнітної сумісності електронного обладнання (захищеність від несанкціонованих електромагнітних впливів). Стійкість електронної апаратури щодо електромагнітних впливів регламентується низкою міжнародних стандартів, наприклад, [78, 79]. На сьогодні існує багато захисних композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів випромінювань [80–82]. Вони мають високі коефіцієнти екранування, але призначені для нанесення на тверді поверхні. Крім того, такі матеріали мають високі відбивальні властивості, що підвищує електромагнітну сигнатуру об'єкта і надає можливість його виявлення за відбитим сигналом. Малі відбивальні властивості мають нанокompозити на еластичній основі [83, 84], але полімери типу латекса не екранують електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону.

В умовах бойових дій засоби радіоелектронної боротьби перебувають безпосередньо поблизу людей, що може спричиняти шкідливий вплив на них через високі щільності потоків енергії від цього обладнання.

Нанокompозити на текстильній основі [85, 86] ефективні щодо радіодіапазону й придатні для виготовлення одягу. Вони виготовляються насиченням льняної тканини наночастинками магнетиту. Але концентрація магнетиту й товщина матеріалу недостатні для екранування інфрачервоного

випромінювання. Тому існує задача отримання матеріалу для одночасного захисту людей від витоку інфрачервоного випромінювання й впливу електромагнітних випромінювань радіодіапазону.

Висновки по розділу 1

1. У результаті проведеного аналізу доступних джерел встановлено, що існує потреба у розробленні матеріалу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону, який має малі масогабаритні параметри й низьку вартість.

2. Для захисту людей від термічних впливів, підвищення енергоефективності будівель і споруд, зниження теплової сигнатури об'єктів захисний матеріал повинен мати різні властивості, як з точки зору маси і габаритів, так і ефективності захисту. Тому необхідно розробити зручний у користуванні математичний апарат для прогнозування захисних властивостей матеріалу у залежності від потреб.

3. Для зниження теплової сигнатури об'єктів однією з головних вимог є поглинання інфрачервоного випромінювання, тобто зниження індуктивного проходження випромінювання. Особливо це стосується зниження проходження інфрачервоного випромінювання крізь тонкий шар матеріалу.

4. Для проєктування захисного одягу необхідно розробити практично значущі моделі теплопередачі крізь шарувату структуру. Необхідно врахувати термофізичні параметри як звичайного одягу, так і захисного шару. Обов'язковим є врахування повітряних зазорів між окремими шарами матеріалів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

2.1. Методи і методики аналітичного визначення ефективності матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону.

Розрахунки щодо перенесення тепла крізь матеріал з певними термофізичними властивостями описується фундаментальними співвідношеннями термодинаміки. [87–89]. Для визначення основних показників матеріалу на основі суцільних або шаруватих структур доцільно використовувати рівняння і підходи математичної фізики [90].

У загальному випадку процеси теплообміну описуються рівнянням:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + I_q, \quad (2.1)$$

де c – питома теплоємність середовища,

ρ – густина середовища,

T – температура,

t – час,

λ – питома теплоємність,

I_q – джерело тепла,

∇ – оператор Гамільтона.

Для стаціонарного стану $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right)$ за відсутності внутрішніх джерел тепла ($I_q = 0$) диференційне рівняння (2.1) набуває вигляду:

$$\operatorname{div}(\lambda \nabla T) = 0, \quad (2.2)$$

Для одномірного температурного поля, коли температура залежить тільки від однієї координати X (тепло розповсюджується від більш нагрітого тіла у одному напрямку) розв'язок диференційного рівняння (2.2) за сталого коефіцієнта теплопровідності ($\lambda = \text{const}$) має вигляд для пласкої поверхні:

$$T = B_1 x + B_2, \quad (2.3)$$

Сталі B_1 і B_2 визначаються з граничних умов:

За граничних умов першого роду (при $x = 0, T = T_1$; при $x = L, T = T_2$) розв'язок рівняння (2.3) має вигляд:

$$T = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)x}{L},$$

де L – товщина матеріалу.

Потік тепла q згідно закону Фур'є:

$$B_1 = \frac{T_1 - T_2}{\lambda \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_2} \right)},$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти теплообміну з середовищем двох поверхонь матеріалу.

$$B_2 = T_1 + \frac{\lambda}{\alpha_1} \cdot B_1,$$

А розподіл температур набуває вигляду:

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} \right), \quad (2.4)$$

Зі співвідношення (2.4) отримуємо кількісне значення теплового потоку:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (T_1 - T_2),$$

У цьому співвідношенні тепловий опір матеріалу R:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2},$$

Для багат шарового матеріалу:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

Але у реальних умовах процес теплопередачі складається з двох складових – теплопровідності та променевого (радіаційного) теплообміну. При цьому існує також конвективний теплообмін. Найбільш складною задачею є визначення ефективності захисту тонкими матеріалами від теплового випромінювання, тобто променевого теплопереносу.

Для визначення математичного апарату, найбільш приданого для цілей розроблення термоізоляції людей та інших нагрітих об'єктів, критично важливим є визначення початкових умов.

Диференціальне рівняння теплопровідності встановлює зв'язок між тимчасовими та просторовими змінами температури тіла; воно математично визначає перенесення тепла всередині тіла. Для того щоб знайти температурне

поле всередині тіла в будь-який момент часу, тобто вирішити диференціальне рівняння, треба знати розподіл температури всередині тіла в початковий момент часу (початкова умова), геометричну форму тіла та закон взаємодії між навколишнім середовищем та поверхнею тіла (гранична умова).

Сукупність початкової та граничної умов називається крайовими умовами; початкова умова називається тимчасовою початковою умовою, а гранична умова – просторовою крайовою умовою. Початкова умова визначається завданням закону розподілу температури всередині тіла в початковий момент часу, тобто при

$$\tau = 0, \quad T_0 = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_0(x_i), \quad (2.5)$$

де $f_0(x_i)$ – відома функція координат $x_1, x_2, \dots, x_n$.

В декартових координатах

$$f_0(x_i) = f(x, y, z), \text{ так, як } x_1 \equiv x, x_2 \equiv y, x_3 \equiv z.$$

У багатьох задачах приймають рівномірний розподіл температури в початковий момент часу, тоді:

$$T_0 = \text{const}. \quad (2.6)$$

Гранична умова може бути задана різними способами.

1. Гранична умова першого роду полягає в завданні розподілу температури по поверхні тіла в будь-який момент часу, тобто:

$$T_s = \varphi_0(\tau, x_{is}), \quad (2.7)$$

де s – індекс поверхні тіла.

В окремому випадку $T_s = T_c = \text{const}$, тобто температура на поверхні постійна протягом усього процесу теплообміну (однорідна гранична умова першого роду). Це може бути здійснено за штучної підтримки постійної температури або за особливих умов теплообміну між навколишнім середовищем та поверхнею тіла (див. граничну умову третього роду).

2. Гранична умова другого роду полягає у завданні щільності теплового потоку кожної точки поверхні тіла як функції часу, тобто:

$$\lambda_{js} = \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s = q_{js}(\tau, x_{is}), \quad (2.8)$$

де $j = 1, 2, 3, \dots; k$ – число суцільних граничних поверхонь тіла; наприклад, для паралелепіпеда $k = 6$.

Найпростіший випадок граничної умови другого роду (однорідна гранична умова другого роду) полягає в сталості густини теплового потоку:

$$-\lambda_{js} = \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s = q_c = \text{const}. \quad (2.9)$$

Такий випадок теплообміну має місце під час нагрівання тіл у високотемпературних печах, де передача тепла здебільшого відбувається за допомогою випромінювання за законом Стефана-Больцмана, коли температура тіла значно менша за температуру випромінювальної поверхні.

3. Зазвичай гранична умова третього роду характеризує закон конвективного теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем за постійного потоку тепла (стаціонарне температурне поле). У цьому разі кількість тепла, що

переходить за одиницю часу з одиниці площі поверхні в навколишнє середовище з температурою T_c у процесі охолодження ($T_s > T_c$), прямо пропорційна пропорційності температур поверхні тіла та навколишнього середовища, тобто:

$$q_{js} = \alpha_j (T_{js} - T_c), \quad (2.10)$$

де $j = 1, 2, \dots, k$,

α_j – коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт теплообміну).

Для процесу нагрівання тіла можна написати аналогічне співвідношення, помінявши місцями T_{js} і T_c . Коефіцієнт теплообміну чисельно дорівнює кількості тепла, що його віддає (або отримує) одиниця площі поверхні тіла за одиницю часу за різниці температур між поверхнею і навколишнім середовищем 1 К.

Співвідношення (2.10) можна отримати із закону теплопровідності Фур'є, вважаючи, що під час обтікання поверхні тіла рідиною або газом передавання тепла від рідини до тіла поблизу його поверхні відбувається за законом Фур'є:

$$\vec{q}_{js} = \lambda_z \left(\frac{\partial T_z}{\partial n_j} \right) \vec{I}_{n_j} = \frac{\lambda_z (T_{js} - T_c) \vec{I}_{n_j}}{\delta_j} = \alpha_j (T_{js} - T_c) \cdot (-\vec{I}_{n_j}), \quad (2.11)$$

λ_z – коефіцієнт теплопровідності газу,

δ_j – умовна товщина граничного шару,

$\vec{I}_{n_j}$ – одиничний вектор по нормалі до ізотермічної поверхні, $\alpha_j = \lambda_z / \delta_j$.

Отже, вектор теплового потоку $\vec{q}_{js}$ спрямований по нормалі n_j до ізотермічної поверхні і його скалярна величина дорівнює q_{js} .

Умовна товщина прикордонного шару δ_j залежить від швидкості руху рідини та її фізичних властивостей. Тому коефіцієнт теплообміну залежить від швидкості

руху рідини та її температури і змінюється вздовж поверхні тіла в напрямку руху. Як наближення можна вважати коефіцієнт теплообміну постійним, незалежним від температури, і однаковим для всієї поверхні тіла.

Співвідношення (6) справедливе тільки при постійній температурі T_{js} . Однак у більшості випадків T_{js} змінюється вздовж поверхні тіла. Ця зміна залежить від властивостей обтічного тіла. Тому в разі конвективного теплообміну співвідношення (2.10) можна прийняти як граничну умову як розрахункову схему першого наближення. Граничні умови третього роду можуть бути використані при розгляді нагрівання або охолодження тіл випромінюванням.

По закону Стефана-Больцмана променевий потік тепла між двома поверхнями дорівнює:

$$\vec{q}_{js} = \sigma'_j (T_{js}^4 - T_a^4), \quad (2.12)$$

де σ'_j – приведений коефіцієнт випромінювання

T_a – абсолютна температура поверхні теплосприймаючого тіла.

При малій різниці температур $T_{js} - T_a$ співвідношення (2.12) можна записати так:

$$q_{js} = \alpha_j(T) \cdot (T_{js} - T_a), \quad (2.13)$$

де $\alpha_j(T)$ – коефіцієнт променевого теплообміну, який має таку ж розмірність, що і коефіцієнт конвективного теплообміну:

$$\alpha_j(T) = (T_{js} + T_a) \cdot (T_{js}^2 + T_a^2) \sigma'_j = \sigma'_j k(T). \quad (2.14)$$

Хоча співвідношення (2.13) схоже на вираз (2.10) для закону конвективного теплообміну при постійному потоці тепла, його фізичний сенс зовсім інший. Коефіцієнт променевого теплообміну $a_j(T)$ залежить від температури, а також від властивостей поверхні тіл, що беруть участь у променевому теплообміні. Якщо температура T_{js} змінюється незначно, то коефіцієнт $a_j(T)$ наближено можна прийняти як постійний.

Якщо температура навколишнього середовища (повітря) T_c і температура теплосприймаючого тіла T_a однакові, а коефіцієнт променепоглинання середовища дуже малий, то в співвідношенні (2.13) замість T_a можна написати T_c . При цьому невелика частка потоку тепла, що віддається тілом шляхом конвекції, може бути рівною $\alpha_{jk}\Delta T$, де α_{jk} – коефіцієнт конвективного теплообміну. У цьому випадку у співвідношенні:

$$q_{js} = \alpha_j (T_{js} - T_c), \quad (2.15)$$

коефіцієнт α_j буде сумарним коефіцієнтом теплообміну:

$$\alpha_j = \alpha_{jk} + \alpha_j(T). \quad (2.16)$$

Надалі теплообмін тіла, механізм якого описується співвідношенням (2.15), будемо називати теплообміном за законом Ньютона.

За законом збереження енергії кількість тепла q_{js} відданого поверхнею тіла, дорівнює кількості тепла, яке підводиться зсередини до поверхні тіла в одиницю часу до одиниці площі поверхні шляхом теплопровідності, тобто:

$$\lambda_{js} \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s + \alpha_j T_{js} = \alpha_j T_c + f(x_{si}, \tau), \quad (2.17)$$

Де для спільності постановки задачі температура T_c вважається змінною, а коефіцієнт теплообміну $\alpha_j(T)$ приблизно сталим $[\alpha_j(T) = \alpha_j = \text{const}]$.

У випадку однорідної граничної умови маємо:

$$\lambda_{js} \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s + \alpha_j [T_{js} - T_c] = 0. \quad (2.18)$$

Із граничної умови третього роду як окремий випадок можна отримати граничну умову першого роду. Якщо відношення α/λ наближається до нескінченності (коефіцієнт теплообміну має велике значення $\alpha \rightarrow \infty$ або коефіцієнт теплопровідності мале $\lambda_j \rightarrow 0$), то:

$$T_{js} - T_c = \lim_{\frac{\alpha_j}{\lambda_{js}} \rightarrow \infty} \left[\frac{\lambda_{js}}{\alpha_j} \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s \right] = 0, \quad (2.19)$$

звідки $T_{js} = T_c$, тобто температура поверхні тепловіддаючого тіла дорівнює температурі навколишнього середовища. Аналогічно при $\alpha_j \rightarrow 0$ з (2.18) отримуємо окремий випадок граничної умови другого роду — рівність нульовому потоку тепла через поверхню тіла.

4. Гранична умова четвертого роду відповідає теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем (конвективний теплообмін тіла з повітрям) або теплообміну дотичних твердих тіл, коли температура тіл, що стикаються, однакова. При обтіканні твердого тіла потоком повітря передача тепла від повітря до поверхні тіла в безпосередній близькості від поверхні тіла (ламінальний прикордонний шар або ламінальний підшар) відбувається за законом теплопровідності (молекулярна передача тепла), тобто відбувається теплообмін, що відповідає граничній умові четвертого роду:

$$T_{js}(x_{is}, \tau) = [T_c(x_i, \tau)]_{js}. \quad (2.20)$$

Окрім рівності температур, має місце рівність потоків тепла:

$$-\lambda_{cj} \left(\frac{\partial T_c}{\partial n_j} \right)_n = -\lambda_{js} \left(\frac{\partial T}{\partial n_j} \right)_s. \quad (2.21)$$

Диференціальне рівняння разом з початковими і граничними умовами повністю визначає задачу, тобто знаючи геометричну форму тіла, початкові і граничні умови, можна диференціальне рівняння вирішити до кінця і, отже, знайти функцію розподілу температури в будь-який момент часу. Таким чином, в результаті рішення повинна бути знайдена функція:

$$T(x_i, \tau) = \varphi(x_i, \tau). \quad (2.22)$$

Функція $\varphi(x_i, \tau)$ повинна задовольняти диференціальне рівняння (при підстановці його замість T в диференціальне рівняння теплопровідності воно повинно звертатися в тотожність), а також початковій і граничній умовам.

За теоремою єдності розв'язку, якщо деяка функція $T(x_i, \tau)$ задовільняє диференціальне рівняння теплопровідності, початкові і граничні умови, то вона є єдиним вирішенням даної задачі.

Для променевого теплообміну найбільш коректним є застосування граничних умов третього роду. Для проєктування захисних матеріалів, згідно EN ISO 15831:2007 конвективний теплообмін приймався $2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Рівняння променевого теплопереносу не мають точних рішень. Тому для розв'язання прикладних задач необхідно використовувати прийнятні припущення

і спрощення. Це потребує розроблення відповідного розрахункового апарату у кожному конкретному випадку з урахуванням параметрів, якими можна нехтувати або вважати некритичними, порівняно з інтенсивністю променевого переносу тепла.

2.2. Постановка завдання вимірювань теплової сигнатури об'єкта

Основною метою запланованих досліджень є визначення коефіцієнта ефективності досліджуваного зразка екрануючої (маскувальної) тканини. Випробування спрямовані на встановлення здатності матеріалу мінімізувати ризики детекції об'єктів у тепловому (інфрачервоному) спектрі.

Зокрема, оцінюється захист від виявлення теплових сигнатур технічних засобів із підвищеним рівнем теплової емісії (автотранспорту, спеціалізованої техніки, автономних джерел живлення, генераторів тощо).

Напрямки експериментальних випробувань

У процесі практичних тестів необхідно кількісно та якісно оцінити результативність використання маскувального покриття для екранування двох категорій об'єктів:

1. Біологічних об'єктів (тіла людини);
2. Технічних об'єктів середніх габаритів із високим рівнем тепловиділення.

Методологія досліджень передбачає комплексний аналіз стійкості матеріалу до впливу всіх ключових механізмів теплопередачі, що виникають між об'єктом захисту та навколишнім простором:

- (а) Радіаційного переносу (емісії теплових хвиль);
- (б) Кондуктивного переносу (прямої теплопровідності);
- (в) Конвективного переносу (динамічного теплообміну з повітряним середовищем).

Фізична природа та специфіка процесів теплообміну

- Радіаційний теплообмін (інфрачервоне випромінювання)

Являє собою процес генерації та поширення теплової енергії у формі електромагнітних хвиль (або квантів) як у вакуумі, так і в матеріальних середовищах. Цей тип перенесення енергії зумовлений хаотичним тепловим рухом мікрочастинок, що мають електричний заряд у структурі речовини. Відповідно до законів термодинаміки, будь-яке фізичне тіло, температура якого перевищує абсолютний нуль є джерелом такого електромагнітного випромінювання.

- Кондуктивний (трансмісійний) теплообмін

Процес перерозподілу кінетичної енергії на мікрорівні між безпосередньо контактуючими тілами або окремими зонами одного тіла з різними температурними показниками. Характерною ознакою теплопровідності є те, що вирівнювання температур відбувається без макроскопічного переміщення самої речовини.

- Конвективний теплообмін (конвекція)

Механізм перенесення внутрішнього тепла, який реалізується виключно через рух макроскопічних елементів (потоків) газуватого чи рідкого середовища. У речовинах, що перебувають у твердому агрегатному стані, конвективні процеси неможливі. У глобальних масштабах саме конвекція є рушійною силою природних явищ, таких як вітрові навантаження в атмосфері, а також циркуляція холодних і теплих океанічних течій.

2.3. Опис методики вимірювань

З інженерно-технічної точки зору, ключова задача експерименту полягає в оцінюванні здатності оптико-електронних засобів спостереження ідентифікувати цілі, екрановані (закриті або повністю обгорнуті) досліджуванним зразком текстилю. У випадку виявлення незадовільних захисних чи термоізоляційних

показників матеріалу, у межах дослідження мають бути розроблені науково обґрунтовані рекомендації та комплекс конструктивно-технологічних заходів для підвищення ефективності його термомаскувального потенціалу.

Для детекції та візуалізації об'єктів, які емітують теплову енергію в навколишній простір, традиційно використовуються прилади інфрачервоного бачення (тепловізійні системи). Слід зауважити, що радіометричні датчики таких пристроїв реєструють не саме інфрачервоне випромінювання у вільному просторі чи локально нагріті повітряні маси, а виключно радіаційну температуру зовнішніх поверхонь непрозорих тіл. Нагрів цих поверхонь відбувається або внаслідок дії ендогенних (внутрішніх) джерел тепла, або через поглинання екзогенної (зовнішньої) теплової енергії, що передається об'єкту через три раніше описані механізми термодинамічного обміну.

Для реалізації вимірювального етапу досліджень було залучено комерційну тепловізійну систему Testo 881-2 (модифікація Profi 0563 0881 V6) виробництва Німеччини, доукомплектовану телеоб'єктивом та спеціалізованим високотемпературним оптичним фільтром. Функціональний алгоритм цього апарату базується на трансформації потоку інфрачервоного випромінювання в аналогово-цифрові електричні сигнали з їх подальшою реконструкцією у видиму термограму.

У загальній інженерній практиці зазначений прилад застосовується переважно для неруйнівного контролю (дефектоскопії) будівельних матеріалів, елементів огорожувальних конструкцій, а також внутрішніх інженерних мереж. Це дозволяє здійснювати просторову візуалізацію локальних порушень теплоізоляційної оболонки та дефектів комунікацій житлових, адміністративних і промислових споруд на стадії їх експлуатаційного моніторингу. Окрім цього, пристрій є ефективним інструментом для аудиту енергетичних втрат на виробничих потужностях, що мінімізує ризики техногенних аварій, коротких замикань та виникнення осередків займання. Проте базовим вектором експлуатації цієї моделі залишається теплоаудит будівель, спрямований на оптимізацію

енергоспоживання та зниження витрат на опалення.

Нижче наведено функціональні та технічні характеристики тепловізора Testo 881-2 (Profi 0563 0881 V6):

1. Функціональні характеристики:

- Розмір детектора 160 x 120 пікселів.
- Хороша якість знімка NETD < 50mK.
- Високоякісний стандартний об'єктив 32 ° x 23 °.
- Вбудована цифрова камера з потужним підсвічуванням LED.
- Автоматичне розпізнавання Гор/Хол точки.
- Динамічний моторизований фокус.
- Температурний діапазон -20 до +350°C.
- 33 Гц (в ЄС, за 9 Гц).
- Відображення розподілу поверхневої вологості.
- Гарнітура для запису голосових коментарів.
- Відображення ізотерми у приладі.
- Мін/Макс області.

2. Технічні характеристики:

- Дисплей: 3.5" LCD з 320 x 240 пікселів.
- Темп. Зберігання: -30 до +60 °C.
- Робоча температура: -15 до +40 °C.
- Тип батареї: швидко заряджається, Li-іон акумулятор, можна міняти на місці обстеження.
- Ресурс (тривалість) роботи: 5 год.
- Вага: 901 г.
- Габарити: 153 x 108 x 262 мм.
- Матеріал корпусу: ABS.
- Тип зонду: Інфрачервоний.

- Діапазон вимірів: -20 до +100 °C; 0 +350 °C (переключається); до +550 °C з високотемпературним фільтром.
- Похибка: ± 2 °C $\pm 2\%$ від змін. значення.

Також для визначення ефективності термоізоляції було використано тепловізор масового використання UNI-T UTi120S, що дозволить раціоналізувати параметри захисного матеріалу з точки зору розумної достатності.

Технічні характеристики тепловізора:

- Датчик – неохолоджуванний інфрачервоний тепловізійний датчик у фокальній площині
- Розмір пікселів – 17 μm
- Пропускна здатність інфрачервоного спектру – 8-14 μm
- Тепловізійні пікселі – 10800 (120'90)
- Тепловізійна чутливість – <60 мК
- Поле зору(FOV) – 50°(В) x 38°(В)
- Просторова роздільна здатність (IFOV) – 7.6 mrad
- Швидкість – 25 Hz
- Мінімальна відстань зображення – 0.1 m
- Без фокусу
- Температурний діапазон – -20 °C - 400 °C
- Точність – ± 2 °C або $\pm 2\%$ залежно від того, що більше (-10°C – 400°C кімнатна температура 25°C)
- Одиниці вимірювання – °C / °F
- Дозвіл – 0.1 °C
- Емісійність 0.95 (за замовчуванням) 0.01 – 0.99
- Дисплей температури – Температура центральної точки, відстеження високої/низької температури
- Палітри – лава, райдуга НС, чорний гарячий, розжарене до білого, залізо, веселка
- Тип дисплея – 2.4-дюймовий TFT-РК-дисплей

- Роздільна здатність дисплея – 320 x 240

Для вимірювання щільностей потоків енергії електромагнітних випромінювань радіодіапазону використовувався калібрований прилад ПЗ-31.

Технічні характеристики вимірювача рівнів електромагнітних випромінювань ПЗ-31:

- Робочий діапазон частот для щільності потоку енергії (ЩПЕ), антена А1 – 300÷40 000 МГц;
- Робочий діапазон частот для електричної складової поля (Е), антена А4 – 0,03÷300 МГц;
- Робочий діапазон частот для магнітної складової поля (Н), антена А5 – 0,01÷30 МГц;
- Межі вимірювань – 0,265÷100000 мкВт/см²;
- Межі вимірювань для антени А1 – 1÷615 В/м;
- Межі вимірювань для антени А4 в діапазоні частот від 0,03 до 0,1 МГц – 4÷600 В/м;
- Межі вимірювань для антени А4 в діапазоні частот від 0,1 до 300 МГц – 2÷600 В/м;
- Межі вимірювань для антени А5 в діапазоні частот від 0,01 до 0,1 МГц – 3÷16 А/м;
- Межі вимірювань для антени А5 в діапазоні частот від 0,1 до 30 МГц – 0,5÷16 А/м;
- Межі допустимої основної похибки вимірювання щільності потоку енергії та напруженості Е і Н поля визначеної частоти – 2,7 дБ.

Для об'єктивного оцінювання захисної здатності досліджуваного текстильного матеріалу під час екранування людського організму необхідно детально вивчити закономірності їхньої взаємної теплової взаємодії. Фізична суть теплопередачі полягає в перерозподілі внутрішньої енергії від більш нагрітого тіла до менш нагрітого середовища до моменту встановлення термодинамічної рівноваги.

Повністю заблокувати цей процес між фізичними тілами з різним температурним потенціалом неможливо. Проте інтенсивність теплового потоку можна мінімізувати до рівня, за якого реєстрація змін градієнта температур оптико-електронними приладами спостереження (зокрема, тепловізорами) стає практично неможливою.

Альтернативним методом є просторове приховування теплового потоку за допомогою екрануючих конструкцій, віддалених на певну відстань. Вони переривають пряму видимість джерела та блокують проходження радіаційної складової до приймальних датчиків спостерігача.

Під час моніторингу процесів теплообміну людини з довкіллям через тепловізійну техніку першочерговою вимогою є мінімальна швидкість та акумуляція нагріву самого маскувального покриття. Захисний ефект досягається тоді, коли енергія, що передається від тіла до тканини, розсіюється в просторі у настільки малих обсягах, що потужність випромінювання перебуває нижче порогу чутливості або роздільної здатності детектора тепловізора.

З практичної точки зору, базове завдання зводиться до придушення всіх трьох каналів теплопередачі між захисним текстилем та об'єктом:

- (а) Радіаційна складова (теплове випромінювання):

Вимагає підвищення термічного опору матеріалу для обмеження безконтактного радіаційного перенесення енергії від тіла до внутрішньої поверхні екрана. Одночасно необхідно забезпечити високу відбивальну здатність зовнішнього шару тканини. Ефект віддзеркалення фонового випромінювання довкілля дезінформує оператора системи спостереження, формуючи аномальну (хибну) термограму в зоні розташування екрана.

- (б) Кондуктивна складова (пряма теплопровідність):

Передбачає максимальне обмеження безпосереднього фізичного контакту між шкірними покривами та внутрішньою стороною тканини. За умов, коли повне виключення контакту неможливе, захист базується виключно на високих теплоізоляційних характеристиках і термічному опорі структури матеріалу.

- (в) Конвективна складова (конвекція):

Регулюється забезпеченням оптимального повітряного проміжку між тілом та покриттям. Величина зазору має бути такою, за якої швидкість та об'єм циркуляції внутрішніх повітряних потоків не здатні підтримувати інтенсивне перенесення тепла.

Програма та послідовність експериментальних дій

Для визначення ступеня впливу деструктивних чинників, що активізують теплообмін та погіршують захисні властивості покриття, впроваджується наступний алгоритм випробувань:

1. Аналіз мікроструктурної щільності екрана. Оцінка радіаційного каналу.

Перевірка щільності переплетення волокон або однорідності композитної мембрани/плівки. Визначається наявність наскрізних мікрозасорів, які можуть пропускати пряме інфрачервоне випромінювання від тіла людини в зовнішнє середовище.

2. Тестування за умов прямого контакту. Оцінка кондуктивного каналу

Вимірювання динаміки та інтенсивності передачі теплової енергії на зовнішню поверхню тканини під час безпосереднього дотику ділянок тіла до матеріалу.

3. Дослідження близько розташованого покриття. Оцінка конвективного каналу.

Фіксація параметрів конвективного нагріву тканини за умов її розташування у безпосередній близькості до об'єкта, але без прямого фізичного контакту з ним.

Оцінювання ефективності застосування матеріалу для захисту технічних засобів, обладнання, машин чи агрегатів із надмірним тепловиділенням здійснюється за аналогічним принципом, але з урахуванням низки ускладнюючих факторів:

Температура працюючих технічних вузлів суттєво перевищує температуру людського тіла. Через високу щільність радіаційного та кондуктивного потоків такі

об'єкти інтенсивно нагрівають суміжні елементи та повітря навколо себе. Це вимагає збільшення площі покриття для формування просторових шатрів та екранів. Високий температурний градієнт створює чіткий контраст на термограмах, що значно підвищує ризик детекції.

Важливим етапом досліджень є проведення тестів за різних умов відносної вологості матеріалу. Оскільки коефіцієнт теплопровідності води значно вищий за коефіцієнт сухої структури тканини, насичення матеріалу вологою призводить до різкого падіння його термічного опору. Як наслідок, інтенсифікується кондуктивний обмін, і захисний ефект нівелюється.

Для створення надійного термокамуфляжу та захисту від температурних коливань пріоритет слід віддавати гідрофобним матеріалам із мінімальним водопоглинанням. Експерименти в обов'язковому порядку мають охоплювати широкий спектр температурних градієнтів.

Під час моделювання експериментів штучно створювалися умови для зведення до мінімуму стороннього конвективного обміну, зумовленого рухом повітряних мас у приміщенні (протягів). Контрольні параметри дистанцій взаємодії становили:

Об'єкт дослідження	Допустима відстань індуктивного впливу
Людський організм	Не більше 1–2 см
Технічні засоби / обладнання	В межах 50–60 см

Як базові термічні моделі використовувалися природні теплові сигнатури людського тіла, розігріті компоненти технічних вузлів, а також контрольні зразки будівельних матеріалів із різним рівнем початкового нагріву.

Кількісна різниця між радіаційною температурою зовнішнього шару маскувального покриття та температурою навколишнього природного фону.

Фіксація, реєстрація та просторовий аналіз розподілу температурних полів виконувалися в режимі реального часу за допомогою колірної шкали та оптичної матриці тепловізора.

Висновки по розділу 2

1. Для прогнозування захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів інфрачервоного діапазону доцільно застосовувати фундаментальні співвідношення термодинаміки та теплопереносу. За основу беруться фундаментальні рівняння математичної фізики щодо теплопереносу крізь суцільну або шарувату структуру. Обов'язковим є умова розділення механізмів кондуктивного та індуктивного (променевого) переносу тепла. При цьому слід враховувати неможливість точного розрахунку променевого теплообміну без введення прийнятних припущень та спрощень.

2. Вимірювання теплових сигнатур виконується каліброваними детекторами інфрачервоного випромінювання (тепловізорами). Доцільним є застосування кількох тепловізорів для порівняння результатів вимірювань. Розмиття теплової сигнатури здійснюється порівнянням максимальної температури захисного шару та температури оточуючого середовища.

3. Моделювання поширення тепла крізь матеріал, призначений для розроблення захисного одягу здійснюється для реальних матеріалів з обов'язковим врахуванням повітряних прошарків між ними. Верифікація результатів матеріалів здійснюється на основі врахування реальних теплофізичних характеристик матеріалів одягу та захисного шару. При цьому слід враховувати, що шкіра людини є одним з шарів, для якого також слід враховувати термофізичні характеристики.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Обґрунтування обирання компонентів для розроблення матеріалів і конструкцій для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону

Усі математичні функції щодо явищ переносу теплової енергії базуються на диференційному рівнянні Фур'є-Кірхгофа. У залежності від переважних механізмів теплопереносу (теплопровідність, променевий теплообмін, конвекційний теплообмін) рівняння застосовуються у різних варіантах з урахуванням коректних припущень і спрощень.

Кількість тепла, яке передається крізь одиничну площу однорідного матеріалу визначається як:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,

$\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури у товщі матеріалу,

T_1 – температура внутрішньої поверхні матеріалу,

T_2 – температура зовнішньої поверхні матеріалу,

d – товщина матеріалу,

α_1, α_2 – коефіцієнти теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхонь з оточуючим середовищем.

У цьому випадку тепловий опір матеріалу:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (3.2)$$

Для багат шарової структури:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (3.3)$$

Параметри α_1 , α_2 для визначених середовищ є сталими. Тобто, підвищення термічного опору шаруватої структури можливо тільки за рахунок збільшення товщини матеріалу, шарів матеріалів, та зниження теплопровідності.

Процес теплопередачі визначається рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3.4)$$

де T – температура,

t – час,

λ_x – коефіцієнт теплопровідності у напрямку x .

Оцінимо температуру зовнішньої поверхні екрануючого матеріалу T_2 , якщо температура внутрішньої поверхні T_1 задана. Для цього розглянемо перенесення тепла матеріалом. Воно може відбуватися як через випромінювання, так і теплопровідністю. При цьому внесок теплопровідності у процес перенесення порівняно з випромінюванням характеризується параметром [90]:

$$N = \frac{\lambda \kappa}{4\sigma T_1^3}, \quad (3.5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

k – коефіцієнт поглинання випромінювання середовищем;

σ – константа Стефана-Больцмана;

T_l – абсолютна температура внутрішньої (холоднішої) поверхні матеріалу.

Чим менше значення N , тим менший внесок теплопровідності. Оскільки для склотканини $\lambda \sim 10^{-2}$ Вт/мК, теплопровідністю будемо нехтувати.

Рівняння перенесення випромінювання немає точних рішень. Однак у конкретних задачах за наявності відповідних спрощень рішення можливі. Надалі припускати, що екрануючий матеріал являє собою сіре середовище (коефіцієнт поглинання k не залежить від довжини хвилі випромінювання), що знаходиться між двома сірими і дифузними плоско-паралельними поверхнями. У загальному випадку зазначені припущення фізично мало реальні. Однак, оскільки інфрачервоний спектр поглинання скловолокна з Е-скла, що використовується для виготовлення склотканини, яка пропонується як екрануючий матеріал, практично суцільний в діапазоні, що нас цікавить, 8–14 мкм, ці припущення можуть застосовуватися для отримання оціночних співвідношень.

Інтенсивність випромінювання, що проходить середовище, зменшується за рахунок поглинання. При цьому середовище нагрівається і саме стає джерелом теплового випромінювання. Таким чином, поряд із зменшенням інтенсивності внаслідок поглинання відбувається її збільшення, зумовлене власним випромінюванням. Тоді при одномірному перенесенні випромінювання вздовж осі x , що перпендикулярна матеріалу, для зміни інтенсивності I в шарі середовища товщиною dx в рамках наближення, що розглядається, можна записати:

$$dI = (-kI + J)dx, \quad (3.6)$$

де J – енергія випромінювання, що випускається одиничним об'ємом середовища в одиничному тілесному куті за одиницю часу.

Відомо, що в умовах термодинамічної рівноваги (в даному випадку, внаслідок неізотермічності середовища – термодинамічної рівноваги для кожного елементарного об'єму)

$$J = kI^o, \quad (3.7)$$

де I^o – інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі середовища.

З урахуванням (3.7) із (3.6) для інтенсивності випромінювання I_2 після проходження шару середовища товщиною h в результаті інтегрування отримуємо:

$$I_2 = I_1 e^{-kh} + I_R, \quad (3.8)$$

де I_1 – інтенсивність випромінювання на вході середовища;

I_R – інтенсивність власного випромінювання середовища, що виникає в елементарних об'ємах довжиною dx і послаблене елементарними об'ємами на шляху від x до h , де $0 \leq x \leq h$:

$$I_R = \int_0^h \kappa I^o(x) e^{-\int_x^h \kappa dx'} dx. \quad (3.9)$$

Враховуючи зв'язок інтенсивності із щільністю потоку напівсферичного випромінювання абсолютно чорного тіла E^o

$$I^o = \frac{E^o}{\pi}, \quad (3.10)$$

у відповідності із законом Стефана-Больцмана маємо:

$$I^o(x) = \frac{E^o(x)}{\pi} = \frac{\sigma T^4(x)}{\pi}, \quad (3.11)$$

де $T(x)$ – температура у шарі середовища з координатою x . Із (3.11) випливає, що для інтегрування (3.9) необхідно знати явний вигляд залежності $T(x)$. Як перше наближення використаємо лінійну залежність $T^4(x)$, яка має місце у випадку оптично щільного середовища ($\kappa d \gg 1$) [91]:

$$T_x^4 = T_1^4 - bx, \quad (3.12)$$

де b – константа.

Тоді, підставляючи (3.11) в (3.9), з урахуванням (3.12) знаходимо:

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{\kappa\sigma}{\pi} \int_0^h (T_1^4 - bx) e^{-\kappa(h-x)} dx = \frac{\kappa\sigma}{\pi} (T_1^4 \int_0^h e^{-\kappa(h-x)} dx - b \int_0^h x e^{-\kappa(h-x)} dx) = \\ &= \frac{\sigma}{\pi} (T_1^4 (1 - e^{-\kappa h}) - b(h - \frac{1}{\kappa}(1 - e^{-\kappa h}))). \end{aligned} \quad (3.13)$$

І нарешті, виразивши I_1 і I_2 через температури поверхонь екрануючого матеріалу:

$$I_1 = \varepsilon \frac{E_1^0}{\pi} = \varepsilon \frac{\sigma T_1^4}{\pi}; \quad I_2 = \varepsilon \frac{E_2^0}{\pi} = \varepsilon \frac{\sigma T_2^4}{\pi}, \quad (3.14)$$

де ε – ступінь чорноти поверхонь;

E_1^0 і E_2^0 – щільності потоків випромінювання абсолютно чорного тіла при температурах поверхонь, і враховуючи, що в умовах термодинамічної рівноваги на підставі закону Кірхгофа ступінь чорноти поверхні дорівнює її поглинальній здатності α :

$$\varepsilon = \alpha = 1 - e^{-\kappa h}, \quad (3.15)$$

із (3.7) після підстановки (3.13) – (3.15) в результаті простих перетворень отримуємо:

$$T_2^4 = T_1^4 (1 + e^{-\kappa h}) - \left(\frac{bh}{1 - e^{-\kappa h}} - \frac{1}{\kappa} \right). \quad (3.16)$$

Відмітимо, що у граничному наближенні оптично щільного середовища при великих значеннях κ цей вираз переходить у відому лінійну залежність:

$$T_2^4 = T_1^4 - bh. \quad (3.17)$$

В цьому випадку, використовуючи (3.17), можна оцінити термічний опір теплопередачі випромінюванням:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q}, \quad (3.18)$$

де q – щільність потоку результуючого випромінювання в екрануючому матеріалі.

Врахуємо, що абсолютні температури внутрішньої і зовнішньої поверхні матеріалу не надто відрізняються, тобто:

$$T_1 - T_2 \ll \bar{T}; \quad T_1 = \bar{T} + \frac{T_1 - T_2}{2}; \quad T_2 = \bar{T} - \frac{T_1 - T_2}{2}, \quad (3.19)$$

де $\bar{T}$ – середня температура матеріалу.

Тоді легко показати, що (3.17) з достатнім ступенем точності перетворюється до вигляду:

$$T_1^4 - T_2^4 = 4\bar{T}^3(T_1 - T_2) = bh. \quad (3.20)$$

Оскільки відповідно до [81] величина b визначається як:

$$b = \frac{3q\kappa}{4\sigma}, \quad (3.21)$$

із (3.18), (3.20), (3.21) для оцінки термічного опору теплопередачі випромінюванням отримуємо вираз:

$$R = \frac{3\kappa h}{16\sigma\bar{T}^3}. \quad (3.22)$$

Вибір склотканини в якості матеріалу, що екранує теплове випромінювання, зумовлений її низькою теплопровідністю та значним поглинанням інфрачервоного випромінювання в області спектру 8–14 мкм, яка є робочим діапазоном більшості тепловізорів. Дійсно, до хімічного складу скловолокна з Е-скла, яке використовується для виготовлення склотканини, що пропонується як екрануючий матеріал, входить, зокрема 53–55 % SiO_2 , 17–21 % CaO , 5–10 % B_2O_3 . Частоти коливань зв'язків Si - O перекривають практично весь діапазон від 600 до 1100 cm^{-1} , зв'язків Ca - O – знаходяться в діапазоні 700–1400 cm^{-1} , B - O – 130 – 1400 cm^{-1} . Це обумовлює наявність інтенсивних смуг поглинання в області довжин хвиль, що нас цікавить.

Відомо, що для цілей теплоізоляції використовується нітрид бору і оксид хрому, що обумовлено їх великими теплоємностями. Крім того, у багатьох випадках поряд з вирішенням задачі теплоізоляції у напряду створення інфрачервоного камуфляжу потрібне зниження електромагнітної сигнатури

об'єкта (електромагнітної сигнатури). Наприклад, це стосується радіоелектронної апаратури, а також джерел її живлення. Для цього доцільно застосовувати магнетит і лускатий графіт [91–93]. Недоліком скловолокна є складність його застосування без захисного покриття через його шкідливість для людей. У багатьох випадках потребується розбиття інфрачервоної сигнатури, тобто приховування чітких контурів об'єкта. Тому для вирішення цієї задачі доцільно застосовувати базальтові волокна, які за своїми теплофізичними властивостями близькі до скловолокна [94].

3.2. Дослідження ефективності матеріалу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону на основі компонентів високої теплоємності

Для виготовлення матеріалів, які блокують електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону, у якості основи було обрано стандартну синтетичну тканину. У якості рідкої субстанції для нанесення на тканину екрануючих елементів використовувався стандартний лак ХС. Теоретичні міркування свідчать, що матеріалами, які поглинають інфрачервоне випромінювання можуть бути нітрид бору та оксид хрому. Ці матеріали широко використовуються у промисловості. Нітрид бору використовується для вогнетривких покриттів, а оксид хрому (тривалентний) у якості зеленого пігменту та абразиву. Додатково у зразки додавався магнетит для поглинання електромагнітних випромінювань надзвичайно високих та ультрависоких частот. У частину зразків додавався дрібнодисперсний графіт, що підвищувало питому провідність матеріалу. Ступені блокування інфрачервоного випромінювання контролювався за допомогою серійного тепловізора.

Було проведено випробування матеріалів з різними вмістами за масою захисних компонентів (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1

Покриття для блокування інфрачервоного випромінювання

Фактори, вигляд		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	нижній, -1	середній, 0	верхній, +1	
Магнетит, %	X ₁	30	37,5	45	7,5
Графіт, %	X ₂	1,5	3	4,5	1,5
Нітрид бору, %	X ₃	7,5	16,25	25	8,75
Оксид хрому, %	X ₄	1,5	4,5	7,5	3

№	Фактори в кодованому вигляді				Фактори в натуральному вигляді			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Fe ₃ O ₄ , %	C, %	BN, %	Cr ₂ O ₃ , %
1	0	0	0	0	37,5	3	16,25	4,5
2	1	-1	-1	-1	45	1,5	7,5	1,5
3	1	1	1	1	45	4,5	25	7,5
4	-1	-1	1	1	30	1,5	25	7,5
5	-1	1	-1	1	30	4,5	7,5	7,5
6	-1	1	1	-1	30	4,5	25	1,5
7	0	1	-1	-1	37,5	4,5	7,5	1,5
8	0	-1	1	-1	37,5	1,5	25	1,5
9	0	-1	-1	1	37,5	1,5	7,5	7,5
10	-1	0	-1	-1	30	3	7,5	1,5
11	1	0	1	-1	45	3	25	1,5
12	1	0	-1	1	45	3	7,5	7,5
13	-1	-1	0	-1	30	1,5	16,25	1,5
14	1	1	0	-1	45	4,5	16,25	1,5
15	1	-1	0	1	45	1,5	16,25	7,5
16	-1	-1	-1	0	30	1,5	7,5	4,5
17	1	1	-1	0	45	4,5	7,5	4,5
18	1	-1	1	0	45	1,5	25	4,5

Молярні теплоємності компонентів складали – нітрид бору – 298 Дж/моль·К, магнетит – 230 Дж/моль·К, оксид хрому – 119 Дж/моль·К. Послідовність нанесення компонентів на підкладку: перший шар – нітрид бору, другий шар – магнетит, третій шар – оксид хрому. У частині зразків третім шаром був графіт. Усі компоненти розчинялися у лаку ХС. Вміст нітриду бору за масою складав 16–25 %, оксиду хрому – 4,5–7,5 %, магнетиту – 30–40 %, графіту – 1,5–3,0 %. За різних кількостей наповнювачів ступені блокування інфрачервоного випромінювання наведені на рис. 3.1.



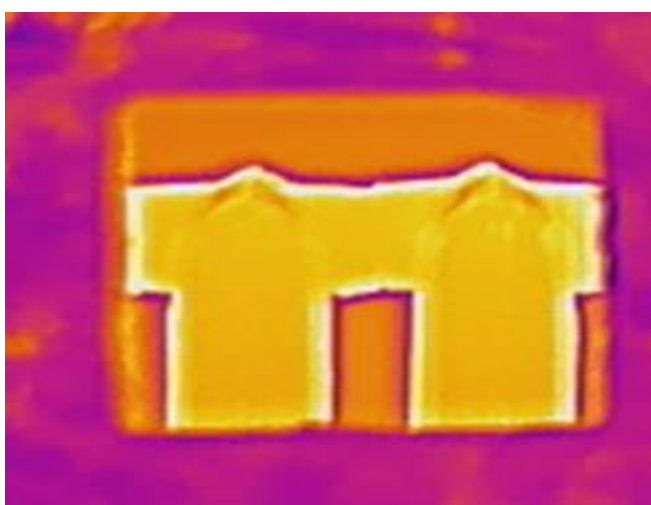
а)



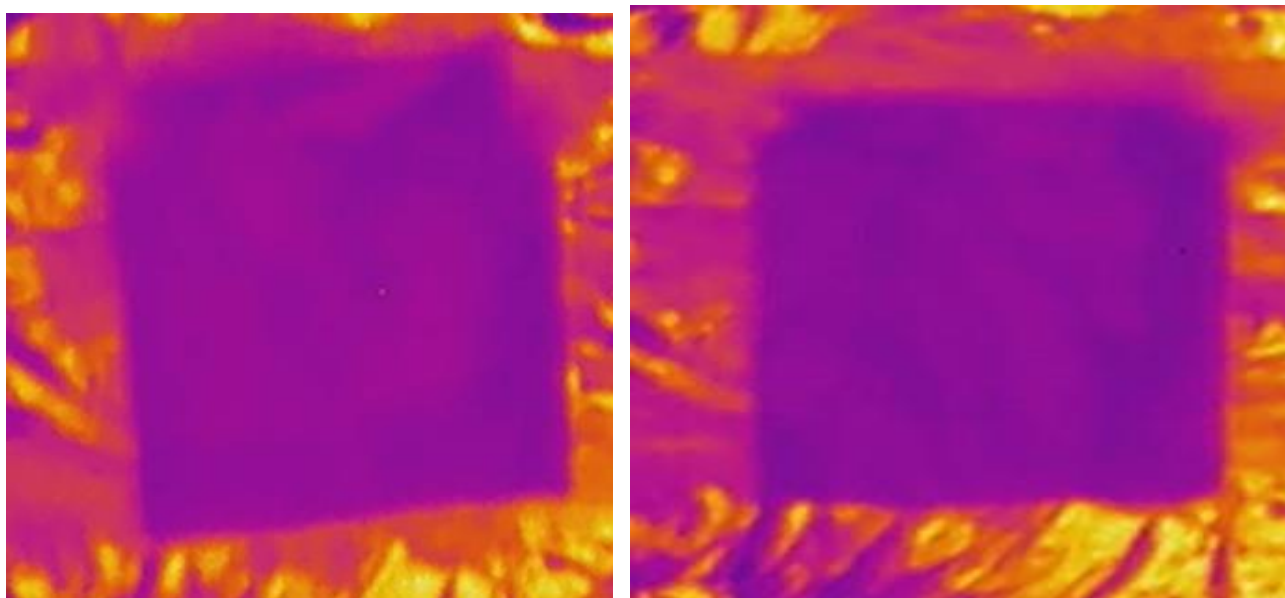
б)



в)



г)



д)

е)

Рис. 3.1. Блокування інфрачервоного випромінювання

а), г) зображення джерела випромінювання без захисного екрана; б) мінімальні кількості наповнювачів; в) максимальна кількість оксиду хрому, д), е) зображення зразка з вмістом магнетиту з мінімальним д) та максимальним е) вмістом нітриду бору.

Як видно з рис. 1, 2 має місце зниження теплової сигнатури об'єкту, перекритого дослідними зразками. Розглядаючи колірні температури, можна визначити, що матеріал (рис. 1 б) знижує інтенсивність інфрачервоного випромінювання на 25–28 %, на рис. 1 в – 40–45 %.

Найбільш прийнятні результати надають зразки, зображення яких наведено на рис. 1 г – е.

Зразок на рис. 1 д знижує інтенсивність інфрачервоного випромінювання на 75–80 %, а на рис. 1 е – 85–90 %. Такі результати можна вважати цілком задовільними. Але у реальних умовах експлуатації матеріалів ефективність може бути значно нижчою. Це пояснюється можливістю нагрівання самого захисного екрана внаслідок тривалого теплового впливу. Однією з можливостей уникнення такого ефекту є нанесення на основу у якості першого шару металовмісного матеріалу, наприклад, дрібнодисперсного алюмінієвого порошку. При цьому слід

враховувати, що алюмінієвий порошок погано розчиняється у синтетичних лаках. Такий процес вимагає застосування швидкісного дисольвера.

Ефект різниці температури об'єкта, зафіксованої на інфрачервоному зображенні й фактичної температури об'єкта можна врахувати розрахунком:

$$T_k = CP_{об}(T) = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{об}(\lambda_1 T) d\lambda = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{об}(\lambda) \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda, \quad (3.23)$$

де T_k – температура об'єкта, визначена інфрачервоною камерою,

C – питома константа інфрачервоної камери,

$P_{об}$ – потужність випромінювання об'єкта,

$I_{об}$ – спектральна яскравість об'єкта,

$\varepsilon_{об}$ – коефіцієнт випромінювання об'єкта, (коефіцієнт «сірості» об'єкта),

λ_1, λ_2 – спектральний діапазон інфрачервоної камери.

За допомогою таких розрахунків можливо порівняти зображення об'єкта з температурними зображеннями природних об'єктів. Наприклад, коефіцієнти випромінювання ґрунту, трави, кущів відомі, і складають 0,91; 0,95; 0,98 і близькі до показників абсолютно чорного тіла (1,0).

Було визначено, що розроблені покриття мають коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависокої частоти на рівні 6,0–6,5, що прийнятно для вирішення задач електромагнітної сумісності електронного обладнання. Додавання графіту у кількостях до 3,0 % підвищує коефіцієнти екранування до 8,2–8,5.

Було проведено випробування матеріалів на реальних об'єктах.

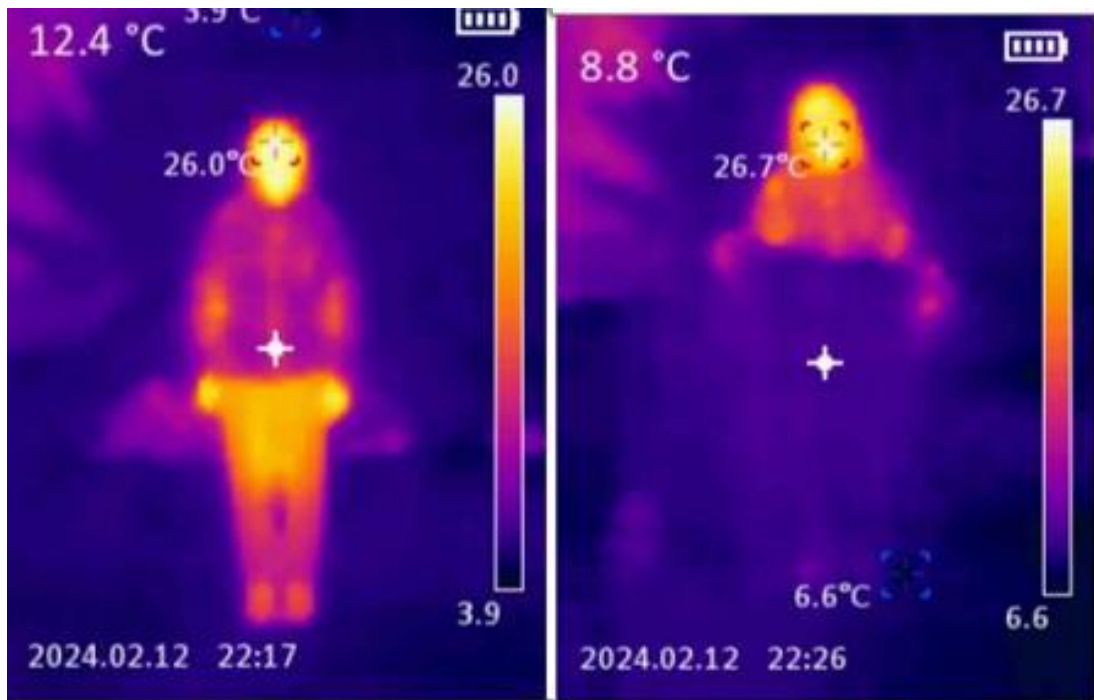


Рис 3.2. Зображення об'єкта:

а– у інфрачервоній області електромагнітного спектра;

б – захищеного поглинальним матеріалом

Товщина зразка складала 1 мм, різниця температур зовнішньої та внутрішньої поверхонь зразків становила 3 К. Потужність теплового випромінювання, що падала на зовнішню поверхню зразка – 90 Вт/м².

Виходячи зі співвідношення переносу тепла:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dS, \quad (3.24)$$

де Q – кількість теплоти, що переноситься матеріалом, Дж,

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – градієнт температури у матеріалі, К/м,

dS – площа матеріалу, м²,

та отриманих експериментальних даних коефіцієнт теплопровідності

отриманого композиційного матеріалу складав $0,030\text{--}0,031\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

З довідкових джерел відомо, що коефіцієнт теплопровідності коркових покриттів складає $0,042\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, скловати – $0,037\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Таким чином, такий неоднорідний матеріал можна використовувати для термоізоляції.

На основі співвідношень розділу 3.1 було проведено моделювання термічного опору матеріалу з довільною кількістю шарів із різними теплофізичними характеристиками з використанням пакету COMSOL. Моделювання здійснювалося з використанням явної різницевої схеми. Значення температури визначалося у центрах різницевих комірок. Розрахункова область різницевої схеми представлена на рис. 3.3.

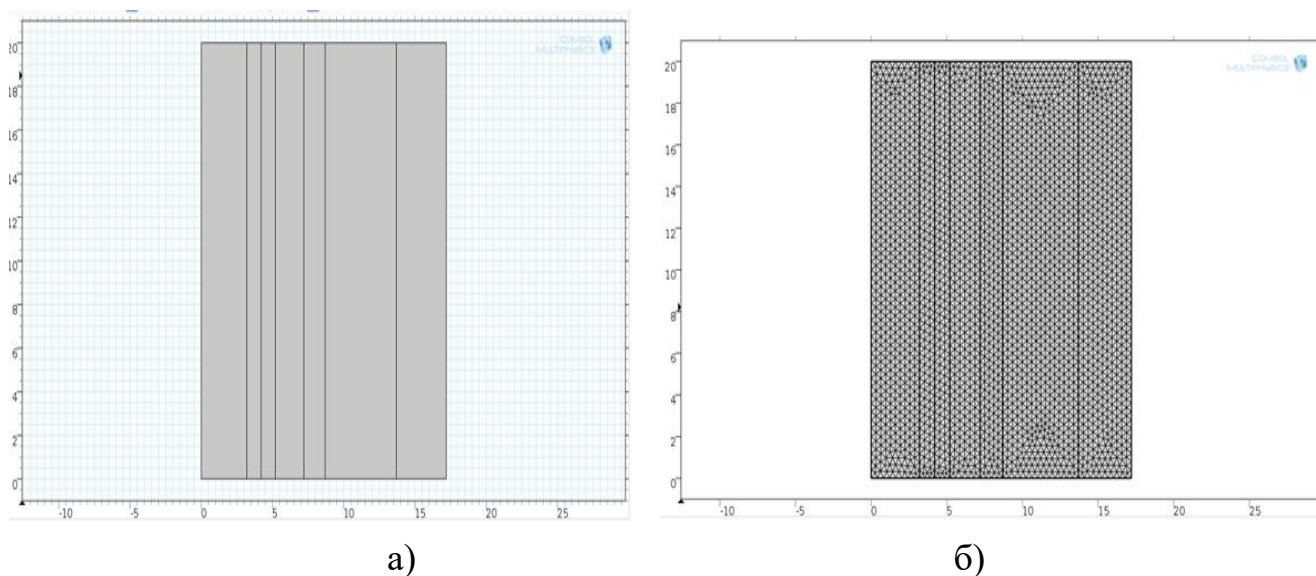


Рис. 3.3. Розрахункова область різницевої схеми. По вісі ординат – відстань у сантиметрах, по вісі абсцис – відстань у міліметрах:
а) – схема матеріалу з кількома шарами матеріалу;
б) – кінцевоелементна сітка.

Результати моделювання проходження тепла крізь шарувату структуру наведені на рис. 3.4.

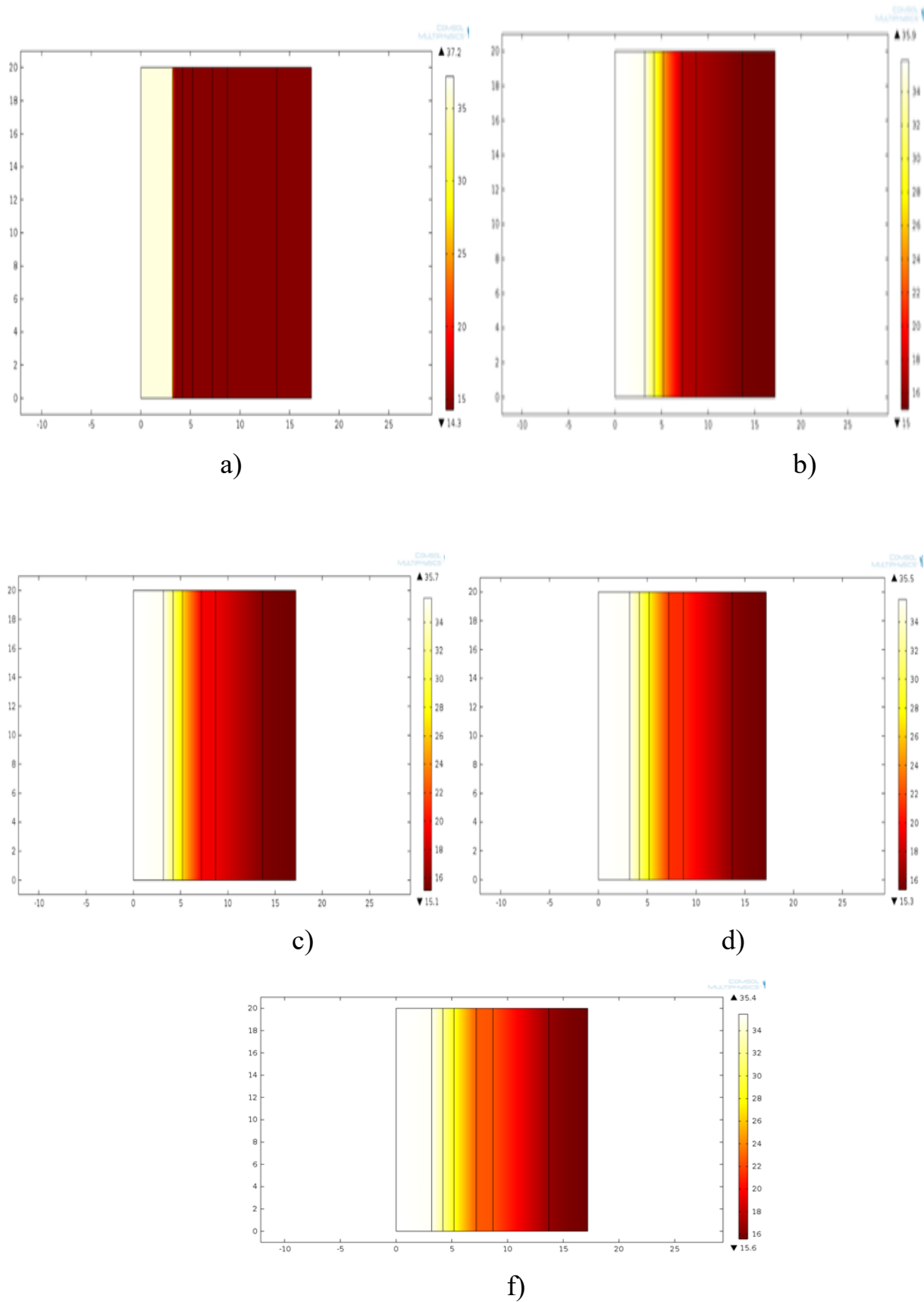


Рис. 3.4. Моделювання проходження тепла крізь шарувату структуру: *a, b, c, d, f* відповідає часовим інтервалам 0, 1, 2, 3, 4 годин. Шкала температур – праворуч.

У даній моделі вихідна температура приймалася близько 40 °C (ліворуч). Температура зовні – 15 °C (праворуч). Можна дійти висновку, що у наведений спосіб можна оцінити термічний опір будь-якої шаруватої структури за наявності даних щодо теплофізичних характеристик кожного шару.

Оскільки основний (зовнішній) шар вважався зробленим зі скловолокна, то для верифікації результатів моделювання був виготовлений зразок зі склотканини. Другий і третій шар – два різних текстильних матеріали.

Випробування проводилися з використанням професійного тепловізора UNI-T UTi120S.

На рис. 3.5 наведено вихідне фото об'єкта у інфрачервоній області електромагнітного спектра.

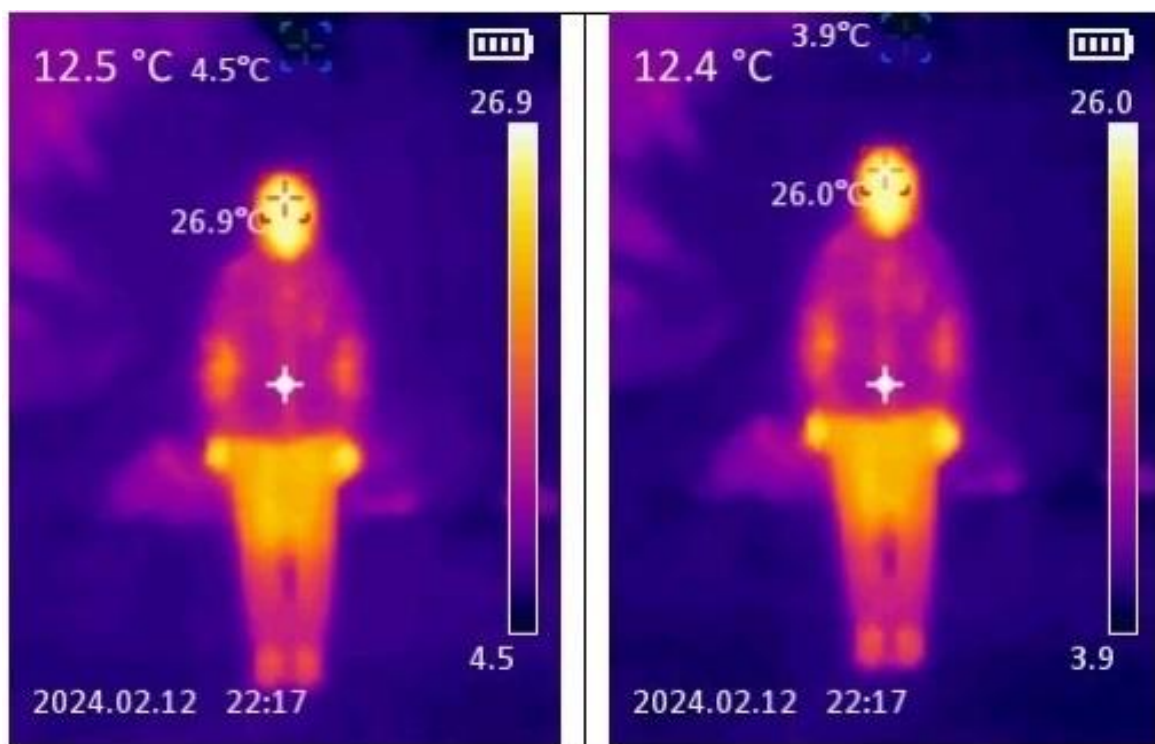


Рис. 3.5. Об'єкт у інфрачервоній області електромагнітного спектра

На рис. 3.6 фото об'єкта, захищеного шаруватою структурою на основі склотканини.

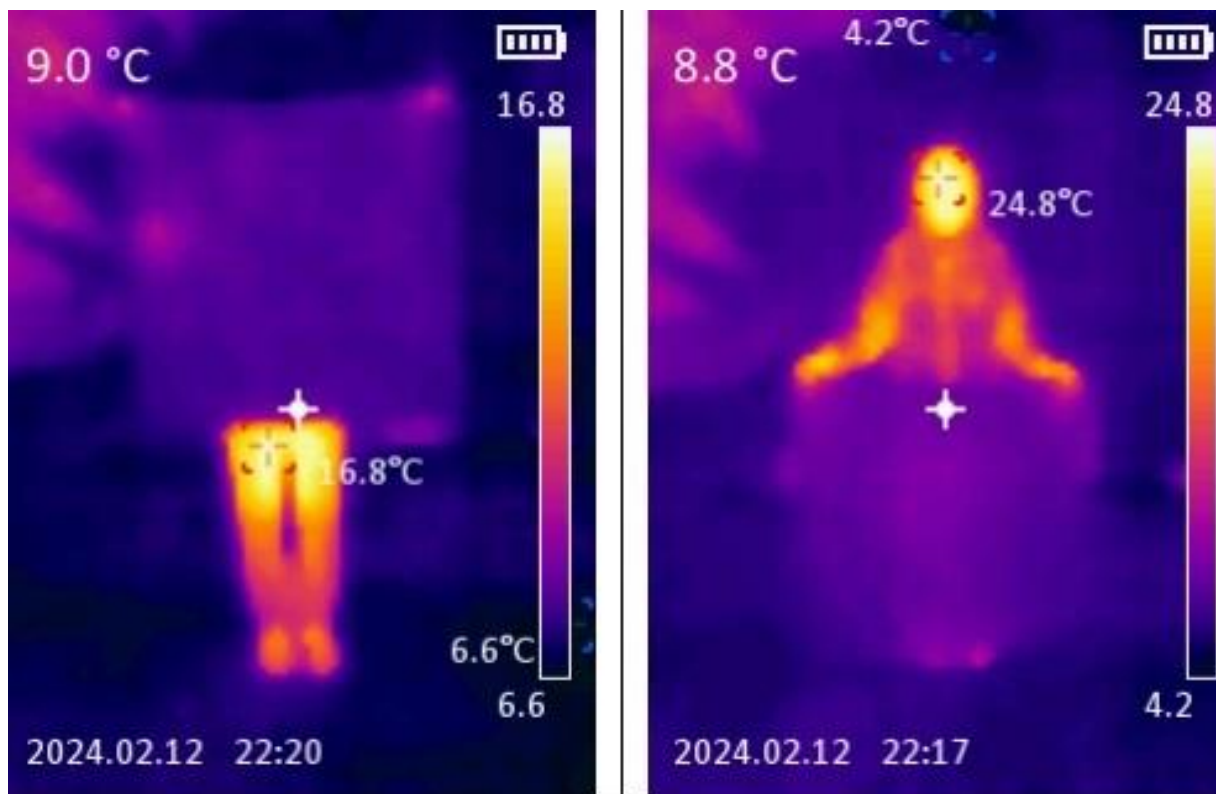


Рис. 3.6. Ефективність теплового захисту шаруватої структури на основі склотканини.

Як видно з наведених рисунків проходження інфрачервоного випромінювання крізь тестовий зразок мінімальне.

Важливим є розділення механізмів індуктивної та кондуктивної теплопередачі. Тобто, опору переносу тепла за рахунок теплопровідності та променевої теплопередачі. Було порівняно отримані результати з ефективністю зразка стандартної термоковдри європейського виробництва (рис. 3.7).

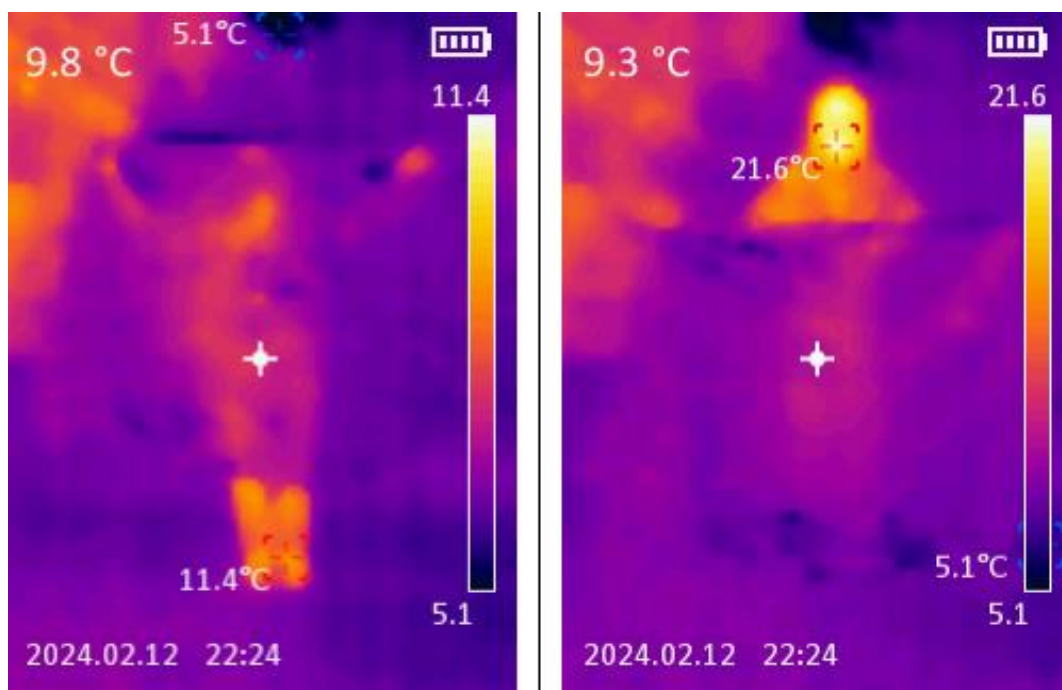


Рис. 3.7. Ефективність теплового захисту термоковдри.

Порівнюючи дані рис. 3.7 і рис. 3.6 можна дійти висновку, що структура на основі склотканини є ефективнішою за термоізоляційне покриття. Тобто, головним механізмом термозахисту у склотканині є розсіювання інфрачервоного випромінювання у скловолокнах.

Також можна дійти висновку, що проектування шаруватих конструкцій для блокування інфрачервоного випромінювання шляхом моделювання термоопору має прийнятну збіжність з експериментом.

3.3. Дослідження ефективності матеріалу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону на основі склотканини

На основі попередніх досліджень було розроблено і виготовлено промислові зразки інфрачервоного камуфляжу на основі склотканини. Зовнішній шар виготовлявся у вигляді камуфляжу у видимій частині інфрачервоного спектра. Вони призначені для маскування людей, автомобільної та бойової техніки. Зовнішній вигляд захисту представлено на рисунку 3.8.



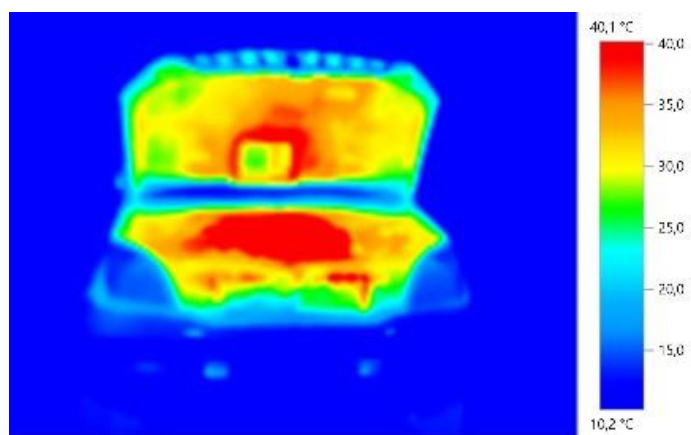
а)



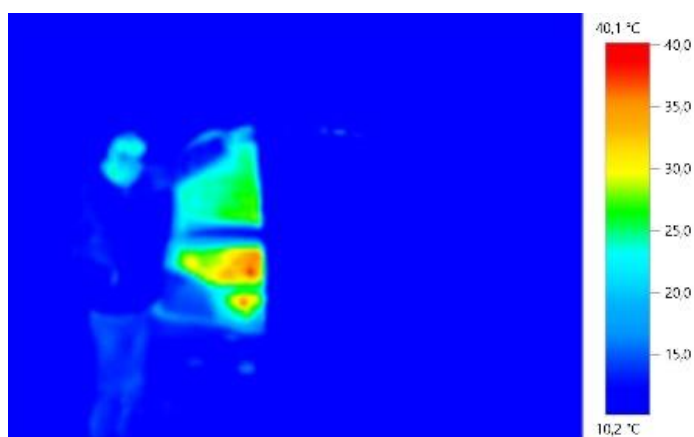
б)

Рис. 3.8 Зовнішній вигляд матеріалу: а) в упаковці; б) без упаковки

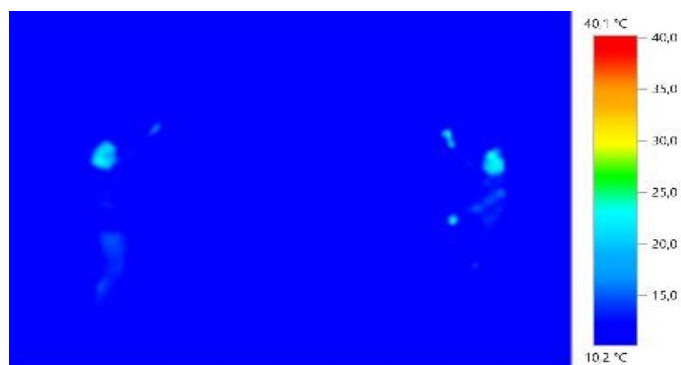
Ефективність інфрачервоного камуфляжу була випробувана у реальних умовах експлуатації. На рис. 3.9 представлена інфрачервона сигнатура позашляховика з відкритим капотом.



а)



б)



в)

Рис. 3.9. Теплова сигнатура позашляховика: а) з відкритим капотом; б) частково перекритий захисним матеріалом; в) повністю закритий захисним матеріалом.

Важливим аспектом застосування інфрачервоного захисту у бойових умовах є його масогабаритні параметри. Тому було досліджено застосування склотканини різної поверхневих густини – 100–200 г/м³.

Джерелом інфрачервоного випромінювання була людина (рис. 3.10).

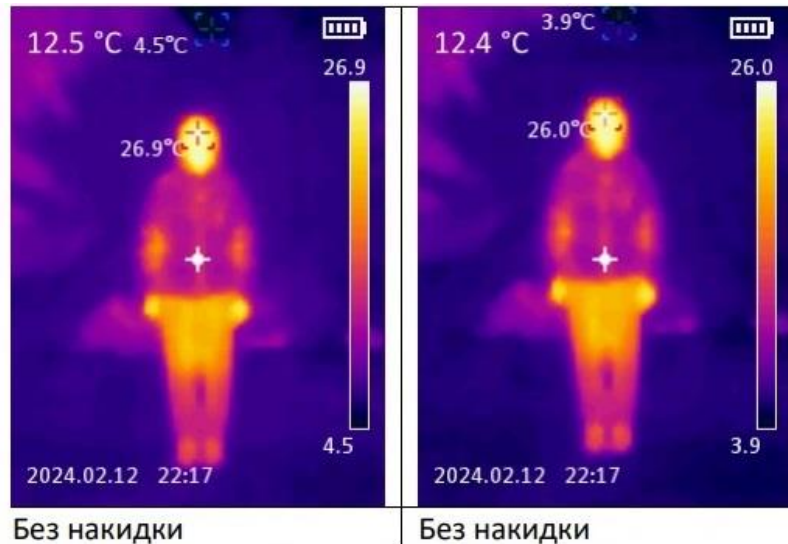


Рис. 3.10. Зображення людини у інфрачервоному діапазоні. Кольорові температури наведені на шкалі праворуч

Було зроблене фото цієї ж людини, захищеної матеріалом з поверхневою густиною 100 г/м². (рис. 3.11).

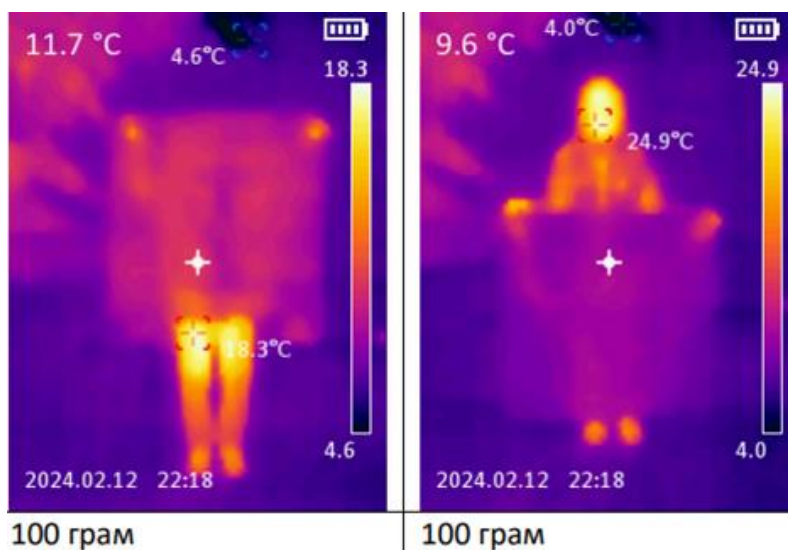


Рис. 3. 11. Зображення людини у інфрачервоному діапазоні, захищеної матеріалом з поверхневою густиною 100 г/м².

Як видно з рис. 3.11 відбувається часткове поглинання інфрачервоного випромінювання і розмивання теплової сигнатури. Але ступінь захисту, тобто забезпечення непомітності об'єкта недостатній.

Результати випробування матеріалу густиною 200 г/м^2 наведено на рис. 3.12.

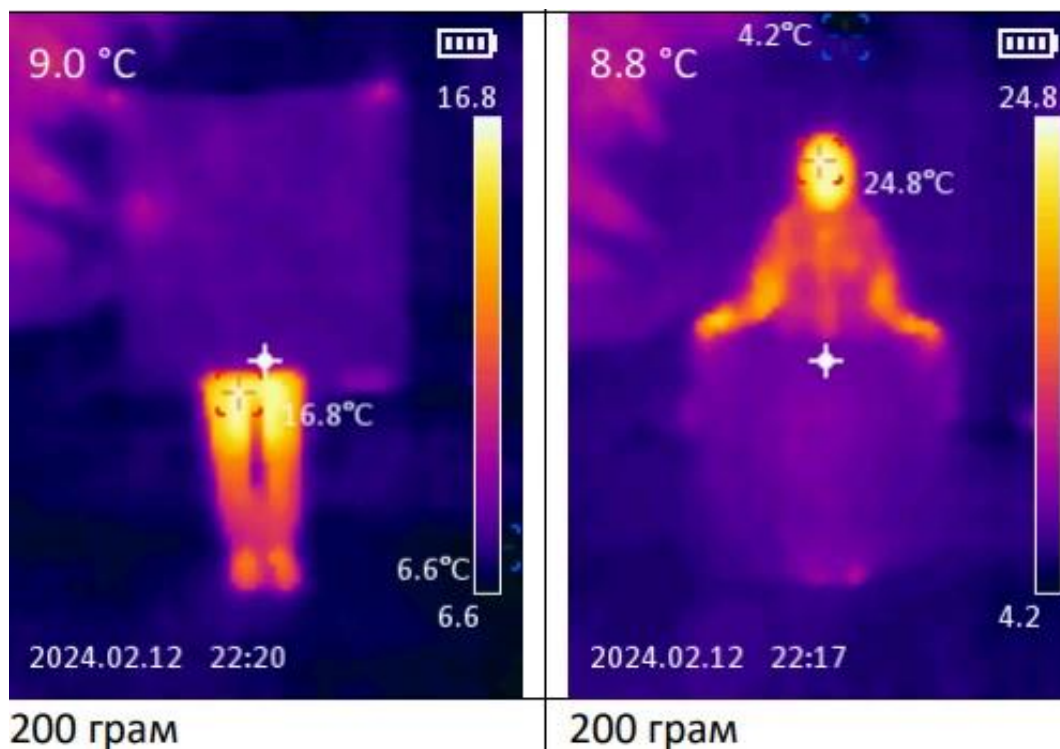


Рис. 3.12. Зображення людини у інфрачервоному діапазоні, захищеної матеріалом з поверхневою густиною 200 г/м^2

Отриманий результат свідчить, що зниження рівня інфрачервоного випромінювання матеріалом з поверхневою густиною 200 г/м^2 прийнятне.

Повне блокування інфрачервоного випромінювання недоцільне. Це пояснюється тим, що у цьому випадку захищений об'єкт буде мати сильний контраст з оточуючими предметами різної природи й температури. А головною задачею інфрачервоного камуфляжу є значне розмиття теплової сигнатури на тлі оточуючих предметів і ландшафту.

Зниження рівня інфрачервоного випромінювання можливе як за рахунок розсіювання у матеріалі, так і за рахунок термоізоляції. Тому було проведене

порівняння отриманих результатів з ефективністю термоізоляційного матеріалу. Для цього було використано стандартну термоковдру (рис. 3.13).

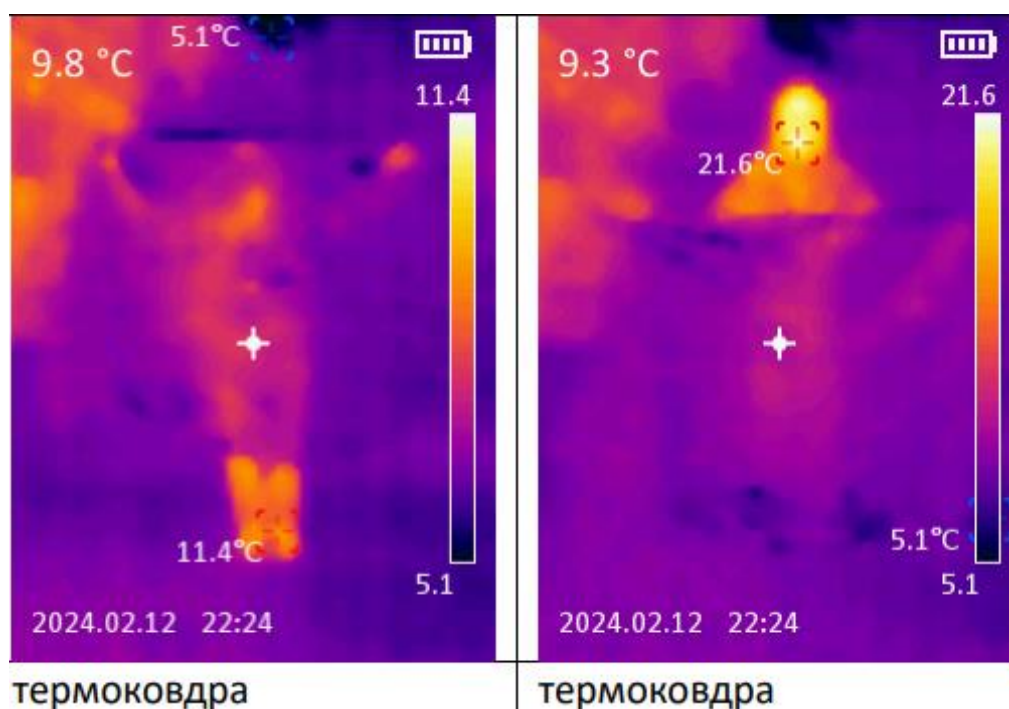


Рис. 3.13. Зображення людини, захищеної стандартною термоковдрою

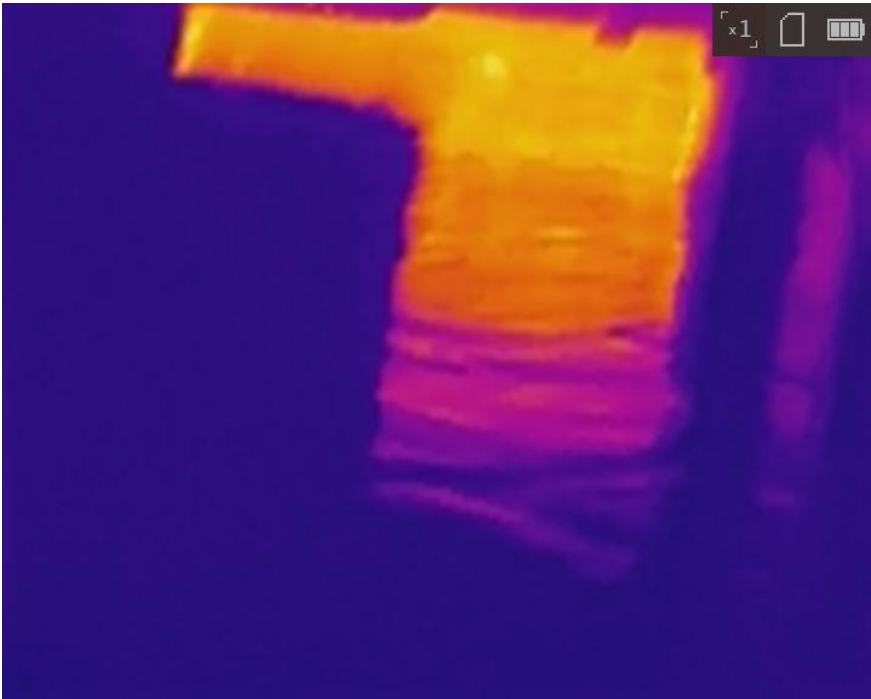
Як видно з рис. 3.13, не дивлячись на велику товщину термоковдри (більше 10 мкм), ефективність блокування інфрачервоного випромінювання розробленим матеріалом завтовшки близько 1 мм суттєво вища. Можна дійти висновку, що потрібний ефект досягається саме за рахунок розсіювання інфрачервоного випромінювання скловолокном).

Слід зауважити, що за певних умов інфрачервоний камуфляж може бути надлишковий (рис. 3.9). Зокрема, для деяких випадків, наприклад для застосування тепловізора з інфрачервоною підсвіткою інфрачервону сигнатуру краще розмити. Це дає змогу зробити контур об'єктом незрозумілим для ідентифікації. Було досліджено можливість розмиття інфрачервоної сигнатури базальтовими волокнами. На рис. 3.14 наведено зображення захисного матеріалу для розмиття сигнатури у макетному вигляді.



Рис. 3.14. Зображення макетного зразка із базальтовим розмиттям інфрачервоної сигнатури

На рис. 3.15 наведено зображення реального нагрітого об'єкту і об'єкту перекритого зразком з базальтового матеріалу для спотворення інфрачервоної сигнатури.



a)



б)



в)

Рис. 3.15. Розмиття теплової сигнатури об'єкта:

- а) об'єкт без розмиття теплової сигнатури;
- б, в) об'єкт з частковим розмиттям теплової сигнатури

Як видно з рис. 3.15 можливо досягти невизначеності контурів об'єкту візуальним спостереженням. Це особливо важливо в умовах великого контрасту температур, оточуючих об'єктів і навколишнього середовища. Як видно з напівтіней для спеціального застосування матеріал для розмиття теплової сигнатури можна зробити напівпрозорим.

Було досліджено можливість застосування базальтової тканини як для повного екранування інфрачервоного випромінювання, так і розмиття теплової сигнатури. На рис. 3. 16 наведено вхідне зображення нагрітого об'єкта.

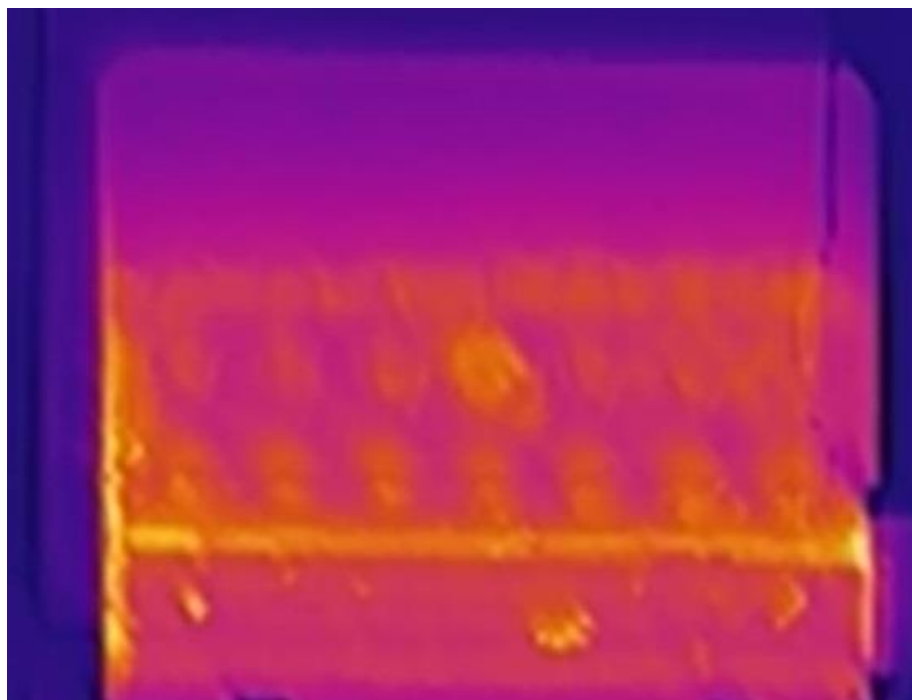


Рис. 3.16. Зображення об'єкта, нагрітого до температури 50 –52°C

На рис. 3.17 зображено нагрітий об'єкт, частково екранований базальтовою тканиною, поверхневою густиною 100г/м².

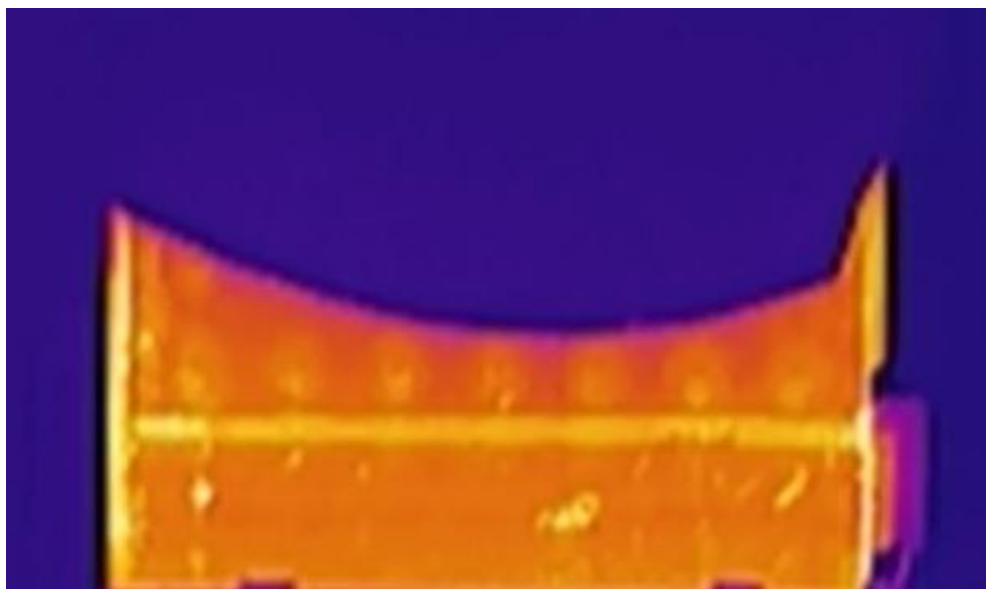


Рис. 3.17. Зображення нагрітого об'єкта, частково екранованого базальтовою тканиною, поверхневою густиною 100г/м²

У цьому випадку були мінімальні кондуктивний та конвективний теплоперенос. Нагрівання здійснювалося тільки за рахунок індуктивного (променевого) теплообміну. Було проведено випробування матеріалу за наявності безпосереднього контакту захисного матеріалу з нагрітим тілом.

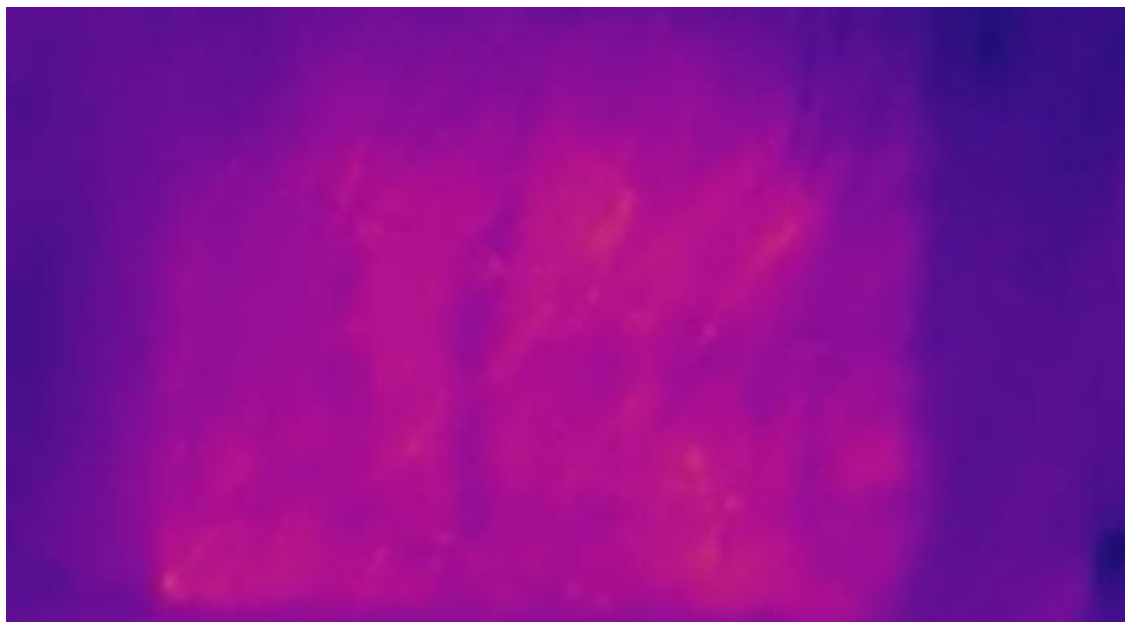
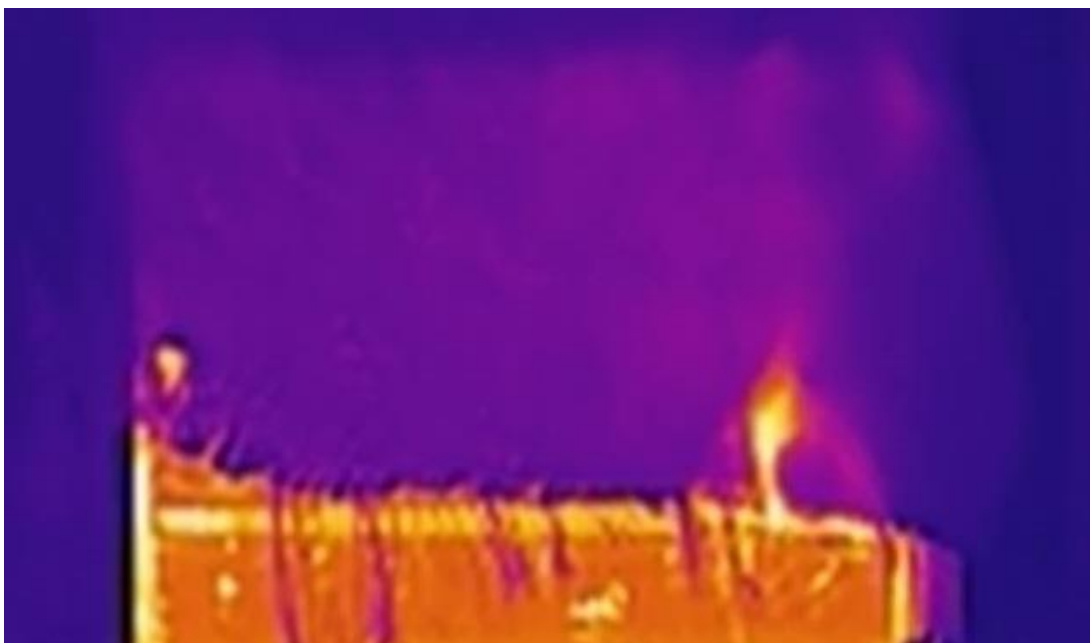


Рис. 3.18. Зображення нагрітого об'єкта, закритого захисним матеріалом за безпосереднього контакту

Як видно з рисунку, навіть за кондуктивного нагріву матеріалу має місце розмиття теплової сигнатури. У даному випадку температура оточуючого середовища не перевищувала 14–15 °С (темно-синій колір). Навіть за таких умов спостерігається розмиття теплової сигнатури. Це ускладнює ідентифікацію об'єкта і достатньо сильно блокує інфрачервоне випромінювання сильно нагрітого об'єкта. Розмиття теплової сигнатури можливо досягти у випадку, коли краї захисного матеріалу мають неправильну форму, яка формується випадковим чином. На рис. 3.19 зображено такий матеріал, виготовлений з базальтового волокна, та його зображення в інфрачервоних променях.



а)



б)

Рис. 3.19. Зображення матеріалу:

а) для розмиття теплової сигнатури: б) захищеного об'єкта

Такий матеріал доцільно застосовувати в умовах достатньо високих температур зовнішнього середовища і наявності температурних контрастів. Наприклад, у теплу сонячну погоду різні об'єкти (рослини, ґрунт, будівлі) нагріваються різним чином. Тому розмиття теплової сигнатури захищеного об'єкта буде найбільш ефективним.

На сьогодні існує проблема захисту засобів зв'язку від їх виявлення інфрачервоними детекторами. При цьому головною задачею є забезпечення повної радіопрозорості матеріалу для безперебійного функціонування антени, наприклад Starlink. На рис. 3.20 наведено зразок матеріалу з радіопрозорим напиленням на основі скловолокна, який повністю блокує інфрачервоне випромінювання, запобігає накопиченню вологи та забезпечує радіопрозорість захисту.



Рис. 3.20. Радіопрозорий матеріал для блокування інфрачервоного випромінювання антен радіозв'язку

У процесі досліджень виникає суміжна задача.

Відомо, що засоби радіоелектронної боротьби перебувають поблизу людей і мають великі щільності потоків енергії дуже високих і ультрависоких частот. Тому було розроблено матеріал, який блокує інфрачервоне випромінювання людини і при цьому захищати людину від шкідливого високочастотного випромінювання (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Матеріал для одночасного блокування інфрачервоного випромінювання та випромінювання радіочастот

Виготовлення матеріалу здійснювалося напиленням дрібнодисперсного алюмінію на склотканину із застосуванням в'язучого на основі нітроцелюлози. Вимірювання коефіцієнта поглинання електромагнітного випромінювання ультрависоких частот здійснювалося каліброваним вимірювачем ПЗ-31. Вимірювання показали, що зниження рівня електромагнітного випромінювання за потужністю складає 17–20 дБ. Це цілком задовільно для матеріалу малої товщини. Високі коефіцієнти екранування забезпечуються досягання перколяційного

ефекту – різкого підвищення електропровідності, через утворення кіл провідності частинками алюмінію.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено математичний апарат для оцінювання ефективності блокування інфрачервоних випромінювань матеріалами з різними теплофізичними характеристиками. Встановлено, що перспективним матеріалом для блокування інфрачервоних випромінювань є скловолокно. Це пояснюється його низькою теплопровідністю та значним поглинанням інфрачервоного випромінювання в області спектра 8–14 мкм, яка є робочим діапазоном більшості тепловізорів.

2. Обґрунтовано застосування нітриду бору, оксиду хрому та магнетиту для блокування інфрачервоних випромінювань. Встановлено, що можливе зниження інтенсивності випромінювання на 75–80 % та 80–90 % за різних пропорцій компонентів. При цьому матеріали мають коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависокої частоти на рівні 6,0–6,5, що прийнятно для вирішення задач електромагнітної сумісності електронного обладнання – захист обладнання від несанкціонованих електромагнітних впливів.

3. Проведено моделювання термічного опору шаруватих структур з використанням засобів COMSOL. Показано, що даний інструментарій придатний для проєктування термозахисту будь-якого призначення. Для коректного моделювання необхідні дані щодо теплофізичних характеристик матеріалів кожного шару шаруватої структури. Отримані результати дозволяють визначити динаміку процесів теплопередачі у просторі і часі. Проведено верифікацію результатів моделювання з використанням тришарової структури на основі склотканини. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів свідчить про їх прийнятну збіжність. Визначено, що переважним механізмом блокування інфрачервоного випромінювання у скловолокні є розсіювання випромінювання

навіть тонким шаром 1–2 мм матеріалу. Це відкриває можливість застосування матеріалів на основі скловолокна у якості інфрачервоного камуфляжу.

4. Розроблено промислову технологію і виготовлено зразок матеріалу придатного для використання у польових умовах. Проведено випробування матеріалу у реальних умовах експлуатації. Встановлено, що за різниць температур 15–30°C між об'єктом і оточуючим середовищем, температура зовнішнього шару покриття не перевищує температуру оточуючого середовища, тобто забезпечує інфрачервоний камуфляж об'єкта.

5. Було досліджено залежність ефективності інфрачервоного камуфляжу від поверхневих густин скловолокна густинами 100 – 200 г/м². Встановлено, що для визначених цілей доцільно використовувати склотканину поверхневою густиною 200 г/м². Експериментально показано, що ефективність термозахисту розробленого матеріалу товщиною 1 мм вища за ефективність термоковдри європейського зразка завтовшки 10 мм.

6. Доведено, що у реальних умовах експлуатації проблемою застосування інфрачервоного камуфляжу може бути його надлишковість, тобто помітність контура об'єкта на тлі більш нагрітого середовища. Розроблено і випробувано засіб розмиття інфрачервоної сигнатури з використанням базальтових волокон завтовшки 0,1–0,3 мм. Це надає змогу зробити об'єкт складним для ідентифікації через розмитість контурів випадковим чином.

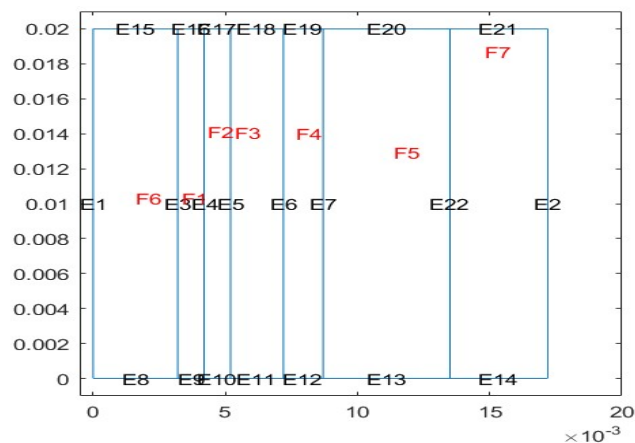
7. Розроблено і випробувано матеріал для блокування інфрачервоного випромінювання антен радіозв'язку. Напилення радіопрозорої субстанції на склотканину забезпечує захист випромінювача від атмосферних впливів, зокрема від накопичення вологи. Розроблено і випробувано захисний матеріал, який одночасно блокує інфрачервоне випромінювання людини і захищає її від електромагнітного випромінювання засобів радіоелектронної боротьби. Встановлено, що коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань дуже високих та ультрависоких частот складають 17–20 дБ за потужністю.

РОЗДІЛ 4. ЗАСАДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

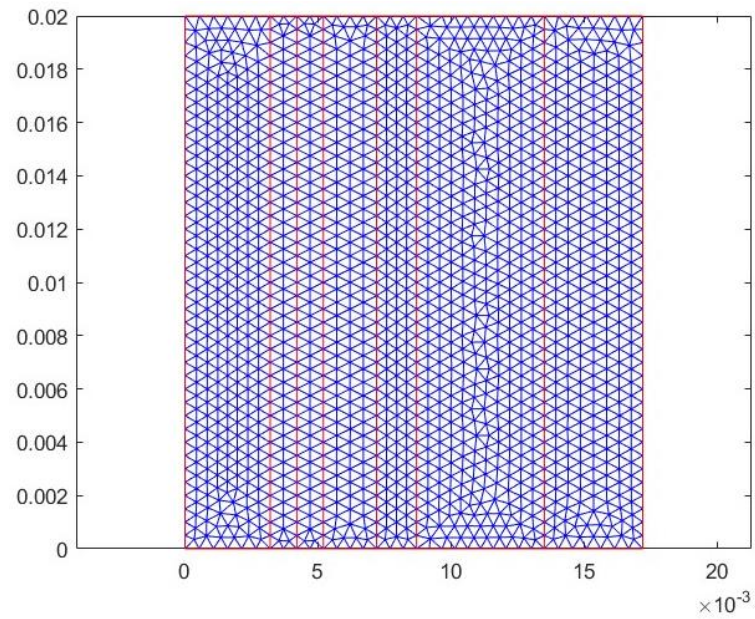
4.1. Базові засади виготовлення шаруватих матеріалів для термоізоляції об'єктів

Результати експериментальних досліджень свідчать, що для термоізоляції об'єктів будь якого походження, у тому числі й створення інфрачервоного камуфляжу потрібна певна раціоналізація ефективності захисту. Це обумовлено тим, що у багатьох випадках ефективність захисту може бути або недостатньою, або надлишковою. У процес створення інфрачервоного камуфляжу надлишковість може призвести до виявлення об'єкту на тлі оточуючого середовища й предметів. Тому було розроблено загальні засади проєктування шаруватих структур для блокування інфрачервоного випромінювання будь-якого походження й призначення. Моделювання здійснювалося у середовищі MATLAB (додаток PDE Tools). Геометрія плоска, поверхня прямокутник – висота умовно прийнята 20 мм, загальна ширина рівна сумі товщин усіх шарів.

Умовні розміри умовних шарів та розрахункова область надані на рис. 4.1. Моделювання здійснювалося з урахуванням наявності можливих прошарків повітря.



а)

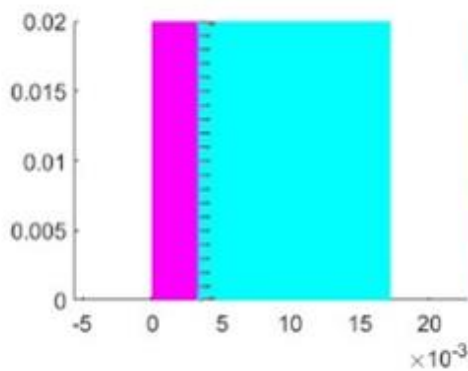


б)

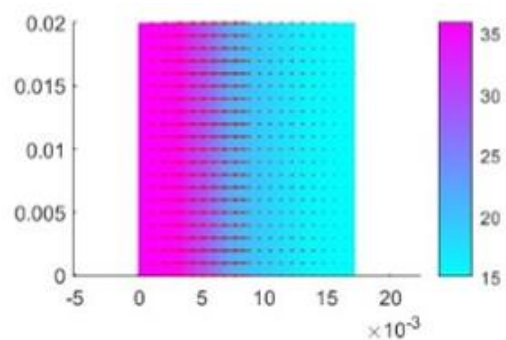
Рис. 4.1. Розрахункова область для проектування шаруватої структури:

- а) розрахункові області – область F6 – шкіра, F1, F3, F5 – прошарки повітря,
F2 –другий шар, F4 – третій шар, F7 – зовнішній шар;
б) розбивка геометрії кінцевоеlementною сіткою

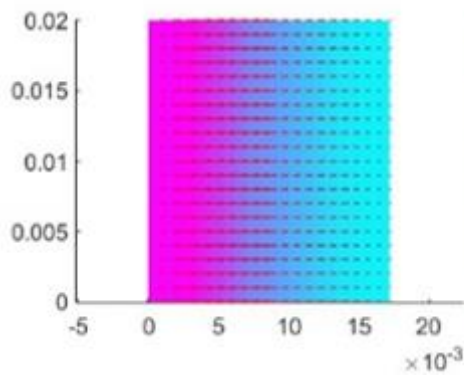
Було розраховано динаміку проходження тепла крізь шарувату структуру (рис. 4.2).



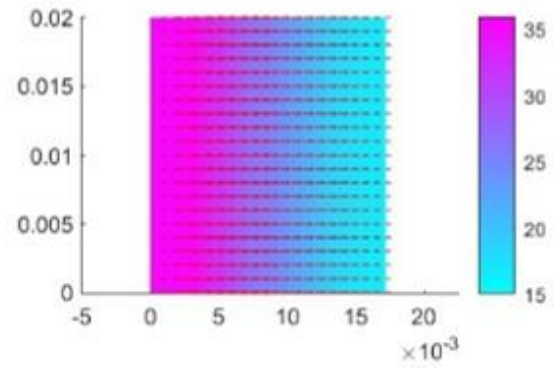
а)



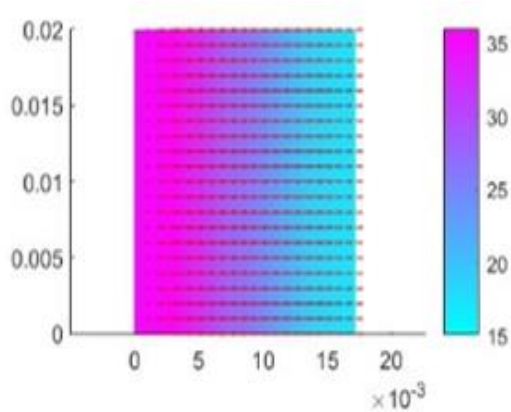
б)



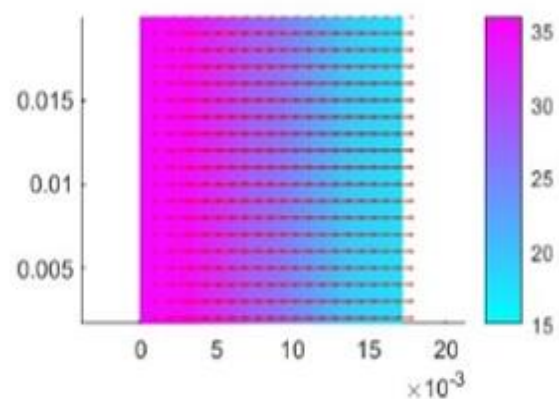
в)



г)



д)

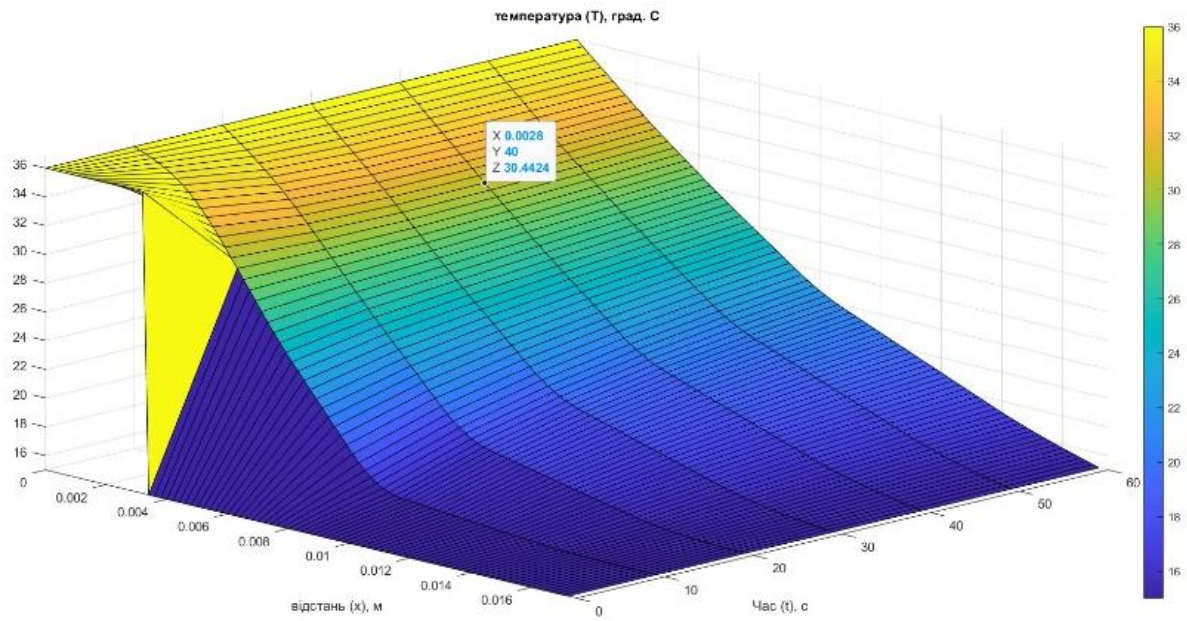


е)

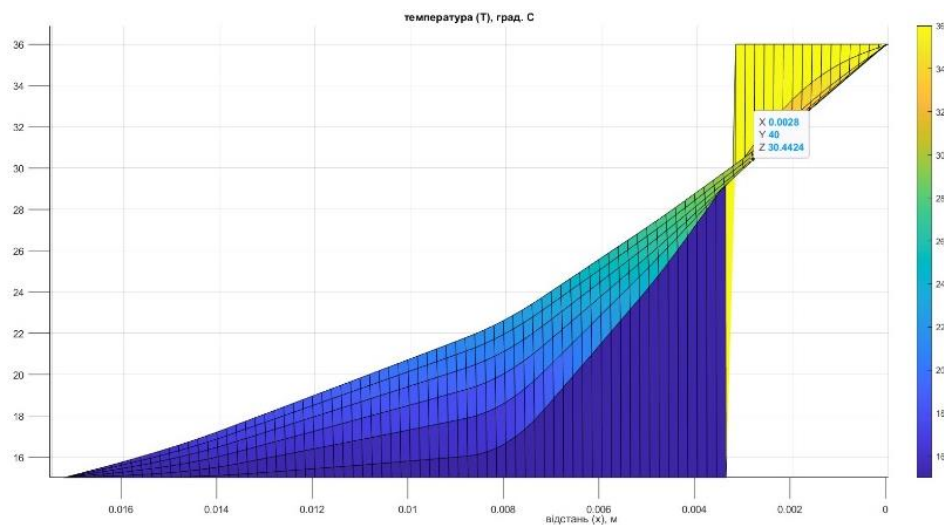
Рис. 4.2. Поля розподілу температур та теплового потоку по геометрії при певних значеннях часу, хв:

а) 0 хв; б) 12 хв; в) 24 хв; г) 36 хв; д) 48 хв; е) 60 хв.

Наведений підхід дозволяє оцінити процеси передачі тепла у просторі і часі для будь-якої структури. Узагальнені графічні залежності наведені на рис. 4.3.



а)



б)

Рис. 4.3. Розподіл температур в залежності від координати (x) та часу (t):

а) тривимірне зображення;

б) бокова проекція

Тривимірне зображення та його проекція спрощує процеси проєктування захисних структур у залежності від потреб градієнтів температур, часу застосування тощо. Доцільно розробити й оцінити ефективність шаруватої

структури виготовленої з реальних матеріалів на прикладі захисного одягу людини.

4.2. Базові засади конструювання захисного одягу для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону

Доцільно розглянути повний цикл проєктування шаруватої структури з підходами до обчислення ефективності кожного шару щодо блокування інфрачервоного випромінювання.

У загальному випадку для розроблення засобів термоізоляції за умови захисту людини від зовнішніх термічних впливів та захист від втрат тепла використовуються однакові підходи. Ці задачі є прямою та зворотною, а кінцевий результат обумовлений виключно спрямованістю градієнту температури.

Для дослідження процесу теплопередачі (теплого потоку) від тіла людини до зовнішньої поверхні матеріалу спецодягу використовується наступне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (4.1)$$

де T – температура,

λ – коефіцієнт теплопровідності,

t – час.

В моделі приймається, що область дослідження складається з різних шарів, а саме: тіло людини, білизна, спецодяг (комплект одягу), куртка, що відрізняються теплофізичними властивостями.

Розрахункова схема показана на рис. 4.4.

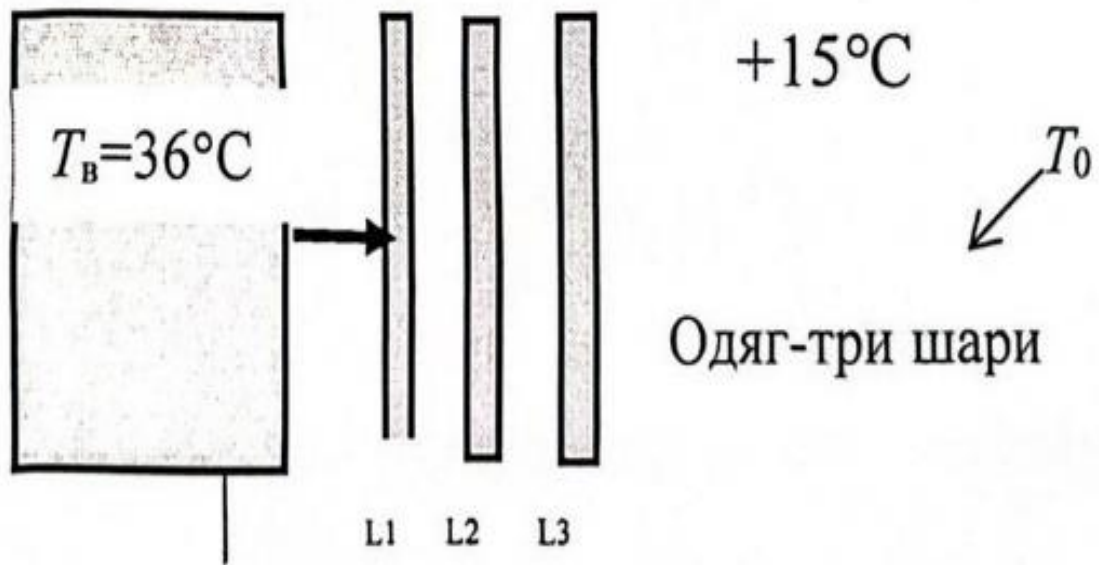


Рис. 4.4. Розрахункова схема шарів моделі

Таким чином, фізична модель складається з трьох шарів одягу та трьох шарів повітря:

— джерело теплогенерації – тіло людини має такі фізичні параметри:

товщина шару шкіри тіла $l = 3,2$ мм;

теплоємність $C_T = 3350$ Дж/(кг*К);

щільність $\rho = 1056$ кг/м³;

коефіцієнт теплопровідності $\lambda_T = 0,48$ Вт/(м*К).

Між тілом людини та трьома шарами одягу враховуємо параметри повітря:

коефіцієнт теплопередачі $\lambda_p = 0,02$ Вт/м*К;

теплоємність $C_p = 1000$ Дж/(кг*К);

щільність $\rho_p = 1,226$ кг/м³.

$L_1 = 1$ мм – відстань між тілом людини та першим шаром одягу (натільна білизна);

$d_1 = 1,0$ мм – товщина матеріалу білизни;

$\lambda_1 = 0,03$ Вт/м*К – коефіцієнт теплопередачі;

$C_1 = 1$ кДж/кг*К – теплоємність тканини білизни;

$\rho_1 = 100 \text{ г/м}^2$ – щільність;

$L_2 = 2 \text{ мм}$ – відстань першим та другим шаром одягу (камуфляж);

$d_2 = 1,5 \text{ мм}$ – товщина матеріалу спецодягу;

$\lambda_2 = 0,04 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ – коефіцієнт теплопередачі;

$C_2 = 1,9 \text{ кДж/кг}^{\circ}\text{К}$ – теплоємність тканини камуфляжу;

$\rho_2 = 220 \text{ г/м}^2$ – щільність;

$L_3 = 5 \text{ мм}$ – відстань між другим шаром (камуфляж) та підкладкою куртки;

$d_3 = 3,5 \text{ мм}$ – товщина матеріалу спецодягу;

$\lambda_3 = 0,05 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ – коефіцієнт теплопередачі;

$C_2 = 2,1 \text{ кДж/кг}^{\circ}\text{К}$ – теплоємність тканини верху куртки;

$\rho_3 = 350 \text{ г/м}^2$ – щільність;

Температура зовнішнього середовища $+15^{\circ}\text{C}$. Тобто, постає задача визначення:

- часу досягнення температури на поверхні матеріалу верху куртки $\geq +15,1^{\circ}\text{C}$ при навантаженні 120 Вт;
- параметрів температурного режиму в підкостюмному просторі;
- часу досягнення температури на поверхні матеріалу верху куртки $\geq +15,1^{\circ}\text{C}$ при навантаженні 400 Вт.

Коефіцієнт теплопровідності для кожного шару визначається як:

$$a_n = \frac{\lambda_n}{\rho_n C_n}, \quad (4.2)$$

Для моделюючого рівняння теплопровідності (4.1) ставляться такі граничні умови (рис.4.4):

- на лівій межі (зі сторони навколишнього середовища) задається значення температури $T = 36^{\circ}\text{C}$.

– на правій межі (на поверхні матеріалу верху верхнього одягу) задається значення температури $T_0 = 15^\circ\text{C}$. При проведенні розрахунків гранична умова з часом має вигляд:

$$T_{n-1} = T_n, \quad (4.3)$$

де T_n – температура в останній розрахунковій комірці,

T_{n-1} – температура в попередній розрахунковій комірці.

Початкова умова при $t = 0$ в усій розрахунковій області приймається $T = 36^\circ\text{C}$.

Для проведення розрахунків використовується прямокутна різницева сітка. Значення температури визначається в центрах різницевих комірок. Для чисельного розв'язання моделюючого рівняння (4.1) використовується явна різницева схема:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x^2}, \quad (4.4)$$

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}, \quad (4.5)$$

$$a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i}. \quad (4.6)$$

Залежності (4.4) та (4.5) використовуються для розрахунку значення коефіцієнта температуропровідності на границі шарів з різними теплофізичними параметрами. Усього 50 розрахункових вузлів по осі Ox , крок сітки $7.7/50$ мм.

Було розраховано температури кожного шару захисного одягу та температуру зовнішньої поверхні одягу за різні проміжки часу (рис. 4.5).

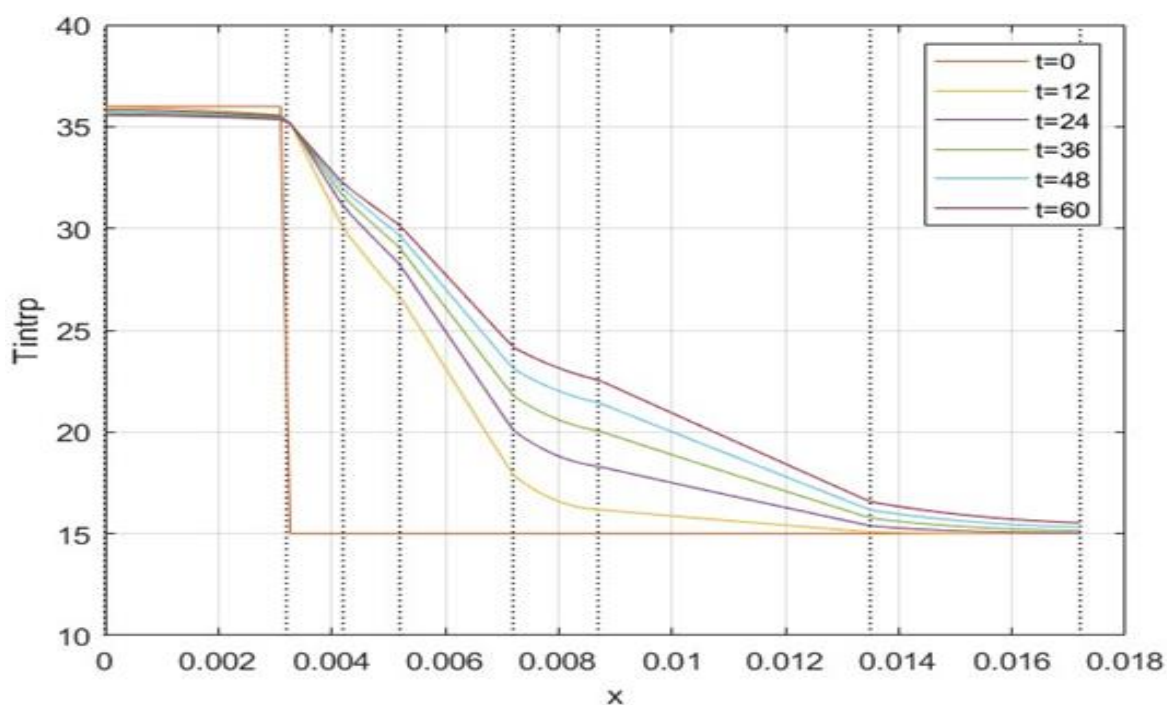
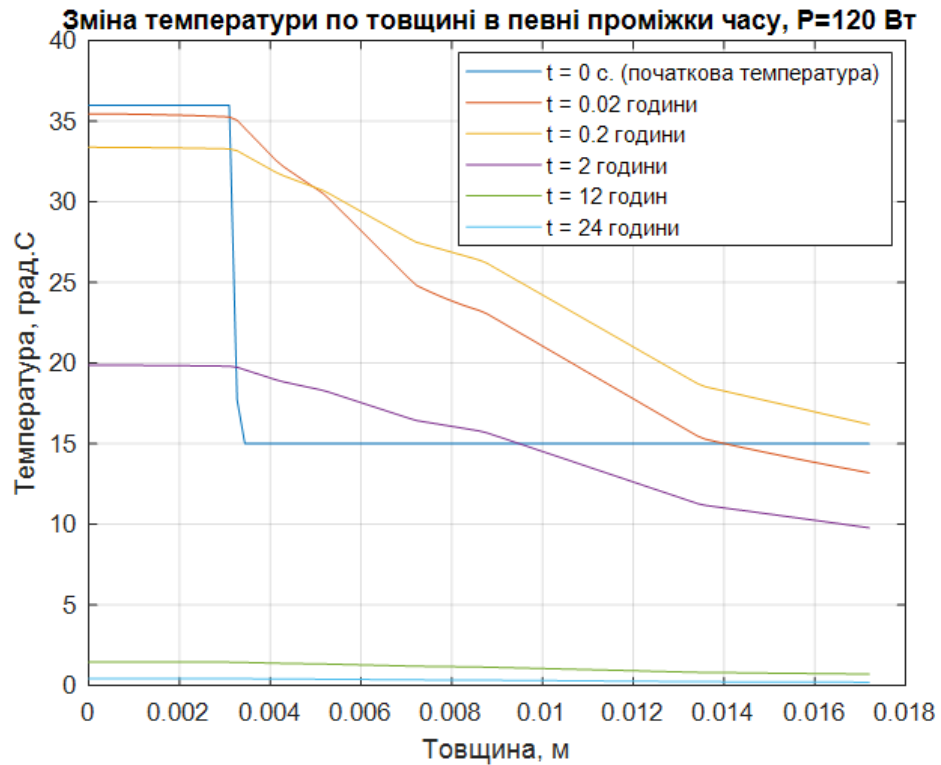


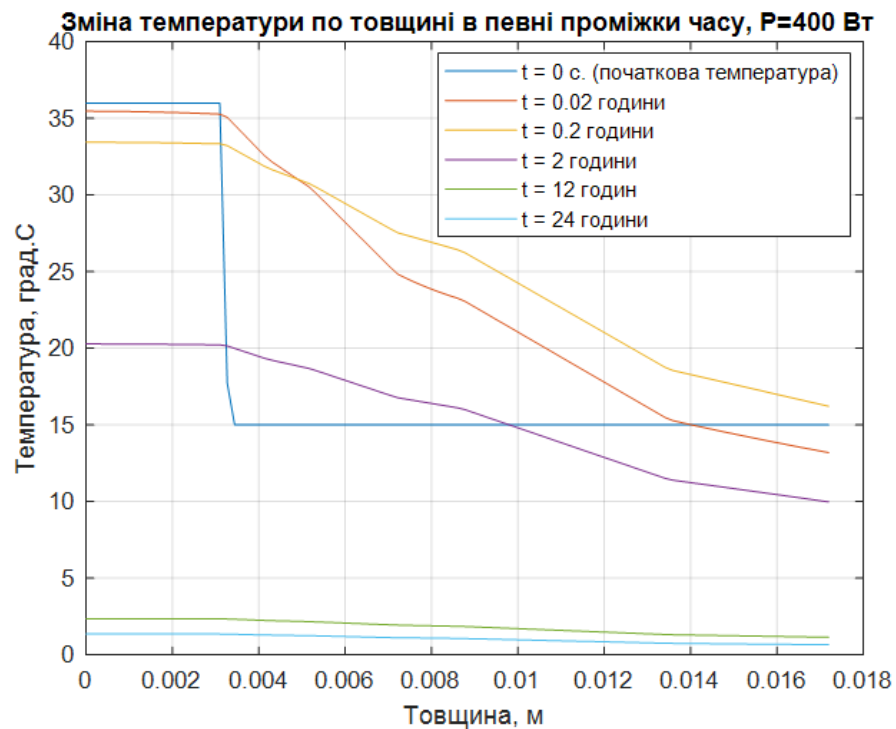
Рис. 4.5. Температури окремих шарів та зовнішньої поверхні захисного одягу у залежності від часу передачі тепла

Розрахунки виконані за умови наявності прошарків повітря завтовшки 1–2 мм між усіма шарами одягу. Встановлено, що принаймні за обраних умов зміна фізичного навантаження людини суттєво не впливає на параметри теплоізоляції.

Було проведено моделювання зміни температури по товщині матеріалу за різні проміжки часу.



а)



б)

Рис. 4.6. Зміна температури у шарах матеріалу за різні проміжки часу: а) фізичне навантаження 120 Вт, б) фізичне навантаження 400 Вт

Обрані фізичне навантаження відповідають вимогам міжнародного стандарту [7] для випробування захисного одягу. Навантаження 120 Вт вважається мінімальним, а 400 Вт максимально допустиме.

Як видно з рис. 4.6 навіть упродовж довгого часу температура зовнішнього шару захисної конструкції практично не відрізняється для обох навантажень Це свідчить про надійну термоізоляцію об'єкта.

Було проведено верифікацію результатів розрахунків з використанням матеріалу, який у межах похибки товщин окремих шарів відповідає параметрам модельного захисного матеріалу.

Вимірювання здійснювалися з використанням тепловізора OTS-XLT 160 2-8X. Результати вимірювань наведено на рис. 4.7.



а)



б)

Рис. 4.7. Перевірка ефективності захисного одягу у реальних умовах експлуатації:

а) зображення об'єкта без захисту;

б) об'єкт захищений теплоізоляційним матеріалом.

Синій колір відповідає температурі 16°C

Отриманий результат свідчить, що скловолокно є достатньо ефективним матеріалом для виготовлення захисного одягу. Слід враховувати, що у процесі його виготовлення у повітря потрапляють частинки скловолокна. Тому навіть у процесі експлуатації скловолокно необхідно покривати захисним шаром.

4.3. Впровадження результатів дослідження та їх ефективності

Результати досліджень впроваджено у практичну діяльність компанії ТОВ НВП «Талан-Пожтех» (додаток Б), під час проєктування та виготовлення сучасних групових та індивідуальних засобів захисту з обґрунтованими технічними характеристиками, які виготовляються для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України та інших об'єктів критичної інфраструктури.

Таблиця 4.1

Результати тестування захисного матеріалу

Температура об'єкта, °C	Температура оточуючого повітря, °C	Температура поверхні захисного матеріалу, °C
35–36	15–16	15–16
35–36	2–3	2,5–3,0
40–41	10–11	10–11
30–31	5–6	5,2–6,0
52–53	21–22	21,2–21,8

Результати випробувань свідчать, що температура захисного шару відповідає температурі оточуючого середовища у межах похибки вимірювань.

Матеріал, який проходив випробування, в умовах експерименту повністю блокує електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону.

Результати дослідження впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальностей Екологія, Технології захисту навколишнього середовища та докторів філософії зі спеціальності Цивільна безпека (додаток В).

Висновки до розділу 4

1. Розроблені загальні засади моделювання поширення теплового потоку крізь шарувату структуру дозволяє автоматизувати процес проєктування шаруватих структур для вирішення задач термоізоляції об'єктів будь-якого призначення за різних спрямованостей (напрямків розповсюдження-поширення) теплових потоків, у тому числі й створення інфрачервоного камуфляжу. Тривимірні моделі дозволяють попередньо оцінити теплофізичні характеристики матеріалів для отримання матеріалу необхідної ефективності.

2. Виконані розрахунки щодо проєктування захисного термоізоляційного одягу. Обґрунтовано, що наведений підхід придатний для визначення ефективності захисту від зовнішніх термічних впливів та підтримання теплового режиму людини. Отримані зміни температури у окремих шарах одягу з урахуванням наявності повітряних зазорів між окремими шарами. Це дозволяє обрати найбільш придатні матеріали для забезпечення необхідних параметрів теплоізоляції у залежності від умови експлуатації.

3. Проведено натурні випробування матеріалу на основі скловолокна. Встановлено, що принаймні за градієнту температури у 20 К розроблений матеріал надійно теплоізолює людину. Враховуючи малу товщину матеріалу, він може бути використаний для забезпечення інфрачервоного камуфляжу. Зазначено, що у процесі вироблення і експлуатації матеріалу на основі скловолокна його частинки можуть негативно впливати на людей, скловолокно повинне бути ізольованим від людей захисним декоративним шаром.

4. Незалежне тестування розроблених матеріалів на основі скловолокна свідчить, що принаймні до різниці температур об'єкту і оточуючого середовища у 30 К дозволяє отримати температуру зовнішнього шару захисного матеріалу, яка дорівнює температурі оточуючого середовища у межах похибки вимірювань.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу результатів доступних досліджень і прикладних розробок визначено невирішені задачі у галузі термоізоляції людей та інших нагрітих об'єктів. Зокрема відсутні дешеві і прості у виготовленні матеріали для блокування інфрачервоного випромінювання за його променевого розповсюдження. Значною мірою це обумовлене недостатністю розроблення математичного апарату для обирання матеріалів з потрібними захисними властивостями.

2. Визначено основні співвідношення для розрахункового прогнозування ефективності захисних матеріалів шаруватої структури з різними теплофізичними властивостями кожного шару. Сформульовані граничні умови для розрахунку теплопередачі у залежності від типу теплообміну та їх комбінацій (теплопровідність, променевий та конвективний теплообмін). Розроблено методику вимірювань ефективності захисних матеріалів. Визначено, що найбільш доцільно визначити ступінь блокування інфрачервоного випромінювання за різниць температур 15–30 К, що відповідає більшості реальних умов, у тому числі й застосуванню інфрачервоного камуфляжу.

3. Розроблено математичний апарат для обрання найбільш прийняттого матеріалу для створення захисних конструкцій, які блокують інфрачервоні випромінювання. Обґрунтовано застосування скловолокна у якості основного захисного шару, що обумовлене його низькою теплопровідністю ($\sim 10^{-2}$ В/м·К) та значним поглинанням електромагнітних випромінювань довжин хвиль 8–14 мкм, що відповідає інфрачервоні електромагнітного спектра.

4. Доведено ефективність застосування нітриду бору, оксиду хрому та магнетиту для екранування інфрачервоних випромінювань. Встановлено, що можливе зниження інтенсивності інфрачервоних випромінювань на 75–80 % та 80–90 % за різних пропорцій компонентів. При цьому матеріали мають коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких частот

порядка 6,0–6,5. Це дозволяє використовувати матеріали для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання захисту людей від електромагнітних впливів, у тому числі й від впливу засобів радіоелектронної боротьби.

5. Проведено моделювання термічного опору шаруватих структур з різними термофізичними властивостями кожного шару у середовищі COMSOL. Показано, що інструментарій придатний для проєктування термозахист у будь-якого призначення. Врахування наявності повітряних прошарків дозволяє проєктувати одяг для термозахисту людей. Проведено верифікацію результатів моделювання з використанням тришарової структури на основі склотканини. Порівняння теоретичних та експериментальних даних свідчить про їх прийнятну збіжність.

6. Розроблено промислову технологію і виготовлення зразки матеріалів придатних для застосування у польових умовах. Встановлено, що за різниць температур 15–30 К між об'єктом та оточуючим середовищем температур зовнішнього шару не перевищує температуру оточуючого повітря об'єктів. Показано, що склотканина поверхневою густиною 200 г/м² повністю блокує інфрачервоне випромінювання.

7. Обґрунтовано та випробувано матеріал для розмиття інфрачервоної сигнатури об'єктів. Застосування базальтового волокон завтовшки 0,1–0,3 мм ускладнює ідентифікацію нагрітих об'єктів на тлі оточуючого середовища. Випробувано матеріал для захисту засобів радіозв'язку. Напилення радіопрозорої субстанції на поверхню забезпечує зв'язок та захищає об'єкт від атмосферних впливів. Додаткове застосування радіопоглинального матеріалу дозволяє знизити рівні електромагнітних випромінювань радіотехнічних засобів на 17–20 дБ за потужністю.

8. Розроблено загальні засади моделювання поширення теплового потоку крізь шарувату структуру, призначену для виготовлення захисного одягу. Тривимірна модель дозволяє попередньо оцінити теплофізичні характеристики

кожного матеріалу для оптимізації параметрів конструкції та ефективності термоізоляції. Наведена модель придатна для проектування захисту людей від термічних впливів та підтримання їх теплового режиму. Отриманий графічний матеріал щодо зміни температури за окремими шарами захисного матеріалу з довільними значеннями тепло фізичних властивостей. Це дозволяє раціоналізувати процес проектування захисних матеріалів з потрібними захисними властивостями.

9. Результати досліджень впроваджено у практичну діяльність компанії ТОВ НВП «Талан-Пожтех» під час проектування та виготовлення сучасних групових та індивідуальних засобів захисту з обґрунтованими технічними характеристиками, які виготовляються для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України та інших об'єктів критичної інфраструктури, та у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальностей Екологія, Технології захисту навколишнього середовища та докторів філософії зі спеціальності Цивільна безпека.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ebi, Kristie L et al. Hot weather and heat extremes: health risks. 2021. *The Lancet*, Volume 398, Issue 10301, 698 – 708.
2. Torkjel Tveita, Gary C. Sieck. Physiological Impact of Hypothermia: The Good, the Bad, and the Ugly. *Physiology*. Volume 37 Issue 2, March 2022, P. 69-87.
<https://doi.org/10.1152/physiol.00025.2021>
3. McIntosh S.E., Freer L., Grissom C.K. et al. (2019) Wilderness Medical Society Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Treatment of Frostbite: 2019 Update. *Wilderness & Environmental Medicine*, 30(4S): S19eS32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wem.2019.05.002>.
4. Jussila K. (2016) Clothing Physiological Properties of Cold Protective Clothing and Their Effects on Human Experience. Doctoral thesis. Tampere University of Technology, Publication 1371, 1–89
5. ДСТУ EN 342:2017 (EN 342:2004; АС:2008, IDT). Одяг захисний. Комплекти та предмети одягу для захисту від холоду. (прийнятий методом перекладу, ідентичний до EN 342:2004 (версія en) «Protective clothing – Ensembles and garments for protection against cold» зі зміною АС:2008 (версія en).
6. ДСТУ EN 14058:2019 (EN 14058:2017. Одяг захисний. Предмети одягу для захисту від холодного навколишнього середовища. [Чинний від 2019-11-19] Вид. офіц. Київ, 2019.
7. ДСТУ EN ISO 15831:2007 Одяг захисний. Фізіологічне оцінювання вимірюванням теплоізоляції на тепловому манекені (EN ISO 15831:2004), IDT; 111. EN 343:2019 – Protective clothing – Protection against rain (Стандарт для класифікації одягу, що забезпечує захист від дощу). SLOVENSKI STANDARD SIST EN 343:2019. 01-05-2019.
8. EN ISO 11092 :2014. Textiles - Physiological effects - Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test) SLOVENSKI STANDARD SIST EN ISO 11092:2014. 01.10.2014.

9. Директива 89/686 / ЄС REGULATION (EU) 2016/425 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 9 March 2016 on personal protective equipment and repealing Council Directive 89/686/EEC.

10. ДСТУ OHSAS 18002:2015 Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT).

11. Методичні рекомендації щодо режимів роботи у засобах індивідуального захисту особового складу ОПС ЦЗ, затвердженого наказом МНС від 07.08.2009 р. №551

12. ISO-15743 ISIS Ergonomics of the thermal environment. Cold workplaces – Risk assessment and management. 2008.

13. BS EN ISO 11079:2007. Ergonomics of the thermal environment – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects. 2007-12. 34 p.

14. ДСТУ EN ISO 13732-3:2016 Ергономіка теплового середовища. Методи оцінювання реакції людини на контакт з поверхнями. Частина 3. Холодні поверхні (EN ISO 13732-3:2008, IDT; ISO 13732-3:2005, IDT)

15. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT). Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. 74 с.

16. EN ISO 22097:2023 Thermal insulation for buildings - Reflective insulation products - Determination of thermal performance (ISO 22097:2023)

17. ISO/TC 163/SC 3. Thermal insulation products, components and systems.

18. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.

19. ДБН В2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» затверджений наказом Міністерства розвитку громади, територій та інфраструктури України від 10.08.2023 № 702;

20. ДБН В.2.2-4:2018 «Будинки і споруди. Заклади дошкільної освіти. Зі зміною №1» затверджений наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 25.04.2018 № 107;

21. ДБН В.2.2-40 «Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. Із Зміною №1» затверджений наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 30.11.2018 № 327;

22. ДБН В.2.2-9:2018 «Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення. Зміна № 1» затверджений наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 28.09.2018 № 260.

23. Постанова Кабінету Міністрів України «Про внесення змін до Порядку створення, утримання фонду захисних споруд цивільного захисту, виключення таких споруд із фонду та ведення його обліку» від 19 серпня 2023 р. № 883

24. ДБН А.2.2-3 «Склад та зміст проектної документації на будівництво. Зі змінами № 1 та № 2» затверджений наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 04.06.2014 № 163;

25. ДБН В.1.2-4 «Інженерно-технічні заходи цивільного захисту (ДСК)» затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 26.03.2019 № 82

26. ДСТУ-Н Б В.1.1-20:2013 «Настанова з виконання розділу інженерно-технічних заходів цивільного захисту (цивільної оборони) у містобудівній документації на особливий період» затверджений наказом Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 15.05.2018 № 140.

27. ДБН В.1.2-14 « Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1» затверджений наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 02.08.2018 № 198

28. Ho Kun Woo, Kai Zhou, Su-Kyung Kim, Adrian Manjarrez, Muhammad Jahidul Hoque, Tae-Yeon Seong, Lili Cai (2022). Visibly Transparent and Infrared

Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*, Volume 32, Issue 38. <https://doi.org/10.1002/adfm.202201432>

29. Peng, L., Jiang, S., Guo, R. et al. IR protection property and color performance of TiO₂/Cu/TiO₂ coated polyester fabrics. *J Mater Sci: Mater Electron* 29, 16188–16198 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9708-6>

30. Jiang, S., Miao, D., Xu, J. et al. Preparation and characterization of shielding textiles to prevent infrared penetration with Ag thin films. *J Mater Sci: Mater Electron* 28, 3542–3547 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10854-016-5955-6>

31. Bu, X., Bai, H. Recent Progress of Bio-inspired Camouflage Materials: From Visible to Infrared Range. *Chem. Res. Chin. Univ.* 39, 19–29 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40242-022-2170-2>

32. Su Y, Yu B, Zhao X. Research status and development of infrared camouflage textile materials. *Textile Research Journal*. 2023;93(21-22):5047-5082. doi:10.1177/00405175231170323

33. Yang Y, Xia QJ, Qian K, et al. Research progress on single soldier camouflage and its camouflage. *China Text Lead* 2019; 8: 1–4

34. Hans Kariis and Christina Åkerlind "Overview of the adaptive camouflage for the soldier II (ACAMSII)", *Proc. SPIE* 11865, Target and Background Signatures VII, 118650F (12 September 2021); <https://doi.org/10.1117/12.2599763>

35. Seyedeh Ameneh Siadat, Javad Mokhtari. (2020). Diffuse reflectance behavior of the printed cotton/nylon blend fabrics treated with zirconium and cerium dioxide and citric acid in near- and short-wave IR radiation spectral ranges. *Color Research & Application*. Volume 45, Issue 1, P. 55-64. <https://doi.org/10.1002/col.22446>

36. Degenstein LM, Sameoto D, Hogan JD, Asad A, Dolez PI. Smart Textiles for Visible and IR Camouflage Application: State-of-the-Art and Microfabrication Path Forward. *Micromachines*. 2021; 12(7):773. <https://doi.org/10.3390/mi12070773>

37. Jieyu Wang, Aijun Han, Mingquan Ye, Chenlu Chen, Xin Chen, and Xufei Zhu. Thermal Insulation Performance of Novel Coated Fabrics Based on Fe-Doped

BaSnO₃ Near-Infrared Reflectance Pigments. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2021 9 (48), 16328-16337 DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05798

38. Ying Gao et al 2021. A camouflage coating with similar solar spectrum reflectance to leaves based on polymeric inorganic composite. Mater. Res. Express 8 066404. DOI 10.1088/2053-1591/ac04e7

39. Xiaodi Shi, Jialei He, Xihua Lu. Functional structural color dye with excellent UV protection property. Dyes and Pigments. V. 175, 2020, 108142, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108142>.

40. Liang J, Li W, Xu G, et al. Preparation and characterization of the colored coating with low infrared emissivity based on nanometer pigment. Prog Org Coat 2018; 115: 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.09.002>

41. Dang SC, Ye H. A visible-infrared-compatible camouflage photonic crystal with heat dissipation by radiation in 5-8 μm . Cell Rep Phys Sci 2022; 2: 100617.

42. Kim T, Bae JY, Lee N, et al. Hierarchical metamaterials for multispectral camouflage of infrared and microwaves. Adv Funct Mater 2019; 29: 1807319. <https://doi.org/10.1002/adfm.201807319>

43. Viková M, Pechová M. Study of adaptive thermochromic camouflage for combat uniform. Textile Research Journal. 2020;90(17-18):2070-2084. doi:10.1177/0040517520910217

44. Cui G, Peng Z, Chen XY, et al. Freestanding graphene fabric film for flexible infrared camouflage. Adv Sci 2022; 9: 1–7. <https://doi.org/10.1002/advs.202105004>

45. Zhu, H., Li, Q., Zheng, C. et al. High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management. Light Sci Appl 9, 60 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0300-5>

46. Tikuisis P., Ducharme M.B., Brajkovic D. Prediction of facial cooling while walking in cold wind. Computers in Biology and Medicine. 2007. №37(9). P. 1225–1231.

47. Castellani J. W., Young A. J., Ducharme M. B., Giesbrecht G. G., Glickman E., Sallis R. E. Prevention of cold injuries during exercise. Medicine & Science in Sports & Exercise. 2006. № 38. P. 2012–2029.

48. Tikuisis P., Osczevski R.J. Dynamic model of facial cooling. *Journal of Applied Meteorology*. 2002 № 41(12). P. 1241–1246.
49. Munir A, Takada S, Matsushita T. Re-evaluation of Stolwijk's 25-node human thermal model under thermal-transient conditions: Prediction of skin temperature in low-activity conditions. *Building and Environment*. 2009. 44(9). P. 1777–1787.
50. Kingma B. R, Frijns A. J, Saris W. H, van Steenhoven A. A, van Marken Lichtenbelt W. D. Mathematical modeling of human thermoregulation: A neurophysiological approach to vasoconstriction. In: *Computational Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2012. P. 307–316.
51. Davoodi F, Hasanzadeh H, Zolfaghari S. A, Maerefat M. Developing a new individualized 3-node model for evaluating the effects of personal factors on thermal sensation. *Journal of Thermal Biology*. 2017. № 69. P. 1–2.
52. Stolwijk J. A. J, Hardy J. D. “Control of Body Temperature”. *Comprehensive Physiology* 2011, Supplement 26: *Handbook of Physiology, Reactions to Environmental Agents*. First Published in Print 1977. John Wiley & Sons, Inc. 2010. P. 45–68. DOI: 10.1002/cphy.cp090104.
53. Potter A. W, Blanchard L. A, Friedl K. E, Cadarette B. S, Hoyt R. W. Mathematical prediction of core body temperature from environment, activity, and clothing: The heat strain decision aid (HSDA). *Journal of Thermal Biology*. 2017. № 64. P. 78–85.
54. Токарський О., Болібрух Б. Методичні основи дослідження оптимального часу роботи рятувальників гірських у гірських умовах за різних навантажень і температур впливу. Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі : матеріали I Міжнародної наук.-практ. конф., м. Херсон, 8–11 верес. 2021 р. Херсон, 2021. С. 320–324.
55. Токарський О., Болібрух Б. Розробка інноваційного методу визначення оптимального часу роботи рятувальника гірського. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : матеріали XII

Міжнародної науково-технічної конференції, м. Харків, 27–28 квіт. 2022 р. Харків, 2022. С. 175–176.

56. Токарський О. Методичні засади визначення оптимального часу роботи рятувальника. ВІСТІ Донецького гірничого інституту. Донецький національний технічний університет, м. Покровськ., 2022. Т. 1, № 50. С. 14–20

57. Heil K., Thomas R., Robertson G., Porter A., Milner R., Wood A. Freezing and non-freezing cold weather injuries: a systematic review. *British medical bulletin*. 2016 № 117(1). P. 79–93.

58. Xu H, Gonzalez JA, Karis AJ, Riou TP, Potter AV. Use of thermal dummies to assess thermal stress imposed by means of personal protection. In: Shiels B, Lehtonen K, eds. *Performance of Protective Clothing and Equipment: Volume 10, Risk Reduction through Research and Testing*, ASTM STP1593. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. P. 286–296.

59. Андрусак З. В. Удосконалення методу і засобів визначення ефективності газохімічного одягу рятувальників. : дис.... канд. техн. наук : / ДонНТУ. Покровськ, 2016. 273 с.

60. Jeong, SM., Ahn, J., Choi, Y.K. et al. Development of a wearable infrared shield based on a polyurethane–antimony tin oxide composite fiber. *NPG Asia Mater* 12, 32 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41427-020-0213-z>

61. Qu, Y., Li, Q., Cai, L. et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST. *Light Sci Appl* 7, 26 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5>

62. Weihua Gu, Samuel Jun Hoong Ong, Yuhong Shen, Wenyi Guo, Yiting Fang, Guangbin Ji, Zhichuan J. Xu. A Lightweight, Elastic, and Thermally Insulating Stealth Foam With High Infrared-Radar Compatibility. *Advanced Science* Volume 9, Issue 35. <https://doi.org/10.1002/advs.202204165>

63. Hao Luo, Qiang Li, Kaikai Du, Ziquan Xu, Huanzheng Zhu, Dongli Liu, Lu Cai, Pintu Ghosh, Min Qiu. An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and

passive heating abilities, *Nano Energy*, Volume 65, 2019, 103998, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103998>.

64. Hui Huang, Minghong Ng, Yongling Wu, Lingbing Kong. Solvothermal synthesis of Sb:SnO₂ nanoparticles and IR shielding coating for smart window, *Materials & Design*, Volume 88, 2015, 384-389, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.013>

65. Lucas V. Besteiro, Xiang-Tian Kong, Zhiming Wang, Federico Rosei, and Alexander O. Govorov. Plasmonic Glasses and Films Based on Alternative Inexpensive Materials for Blocking Infrared Radiation. *Nano Letters* 2018 18 (5), 3147-3156, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b00764>

66. Ali, Zainab Hasan; Hasan, Ali S.; Braihi, Auda Jabbar. Synthesis, Characterization, and Infrared Blocking Efficiency of Polyvinyl Alcohol Composites Filled with Cadmium Sulfide and Zinc Sulfide NPs. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2024, Vol 48, Issue 1, p73, 10.18280/acsm.480109

67. Janusz Adamczyk, Robert Dylewski, Piotr Sobierajewicz. (2023). Economic and ecological benefits of thermal insulation of external partitions depending on the temperature in residential premises. *Journal of Cleaner Production*. Volume 384, 15 January 2023, 135622, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135622>

68. E. Zilberberg, P. Trapper, I.A. Meir, S. Isaac. The impact of thermal mass and insulation of building structure on energy efficiency. *Energy and Buildings*. V. 241, 2021, 110954, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110954>

69. Yaping Zhou, Abdelkrim Trabelsi, Mohamed El Mankibi. A review on the properties of straw insulation for buildings. *Construction and Building Materials*. Volume 330, 2022, 127215, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127215>

70. Nermin M. Aly, H.S. Seddeq, Kh. Elnagar, Tamer Hamouda. Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings. *Journal of Building Engineering*. Volume 40, 2021, 102747, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102747>

71. Dileep Kumar, Morshed Alam, Patrick X.W. Zou, Jay G. Sanjayan, Rizwan Ahmed Memon. Comparative analysis of building insulation material properties and

performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 131. 2020, 110038, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>

72. Stefan Füchsl, Felix Rheude, Hubert Röder. Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*. Volume 5, 2022, 100119, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>

73. Marco Caniato, Arianna Marzi, Sandra Monteiro da Silva, Andrea Gasparella. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *Journal of Building Engineering*. Volume 43, 2021, 103066, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103066>.

74. Azim Rasulovich Abdullaev, ., Xayotbek Mansurjon O'g'li Rafiqov, ., & Isroiljonova Nizomjon Qizi Zulxumor, . (2021). A Review On: Analysis Of The Properties Of Thermal Insulation Materials. *The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research*, 3(05), 27–38. <https://doi.org/10.37547/tajir/Volume03Issue05-06>

75. Le Duong Hung Anh, Zoltán Páztory. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*. Volume 44, 2021, 102604, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>.

76. A. T-ZK, D. ZA, Yu. BE, V. BI, A. ME. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021; 13(21):3698. <https://doi.org/10.3390/polym13213698>

77. Francke B, Zamorowska R. Resistance of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering (ETICS) to Hail. *Materials*. 2020; 13(11):2452. <https://doi.org/10.3390/ma13112452>

78. ETSI EN 301 489-1 V2.2.1 (2019-03). ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility. Directive. European Telecommunications Standards Institute, 2019. 36 p. URL: http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/en_30148901v020201a.pdf

79. ДСанПІН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]: Київ: Міністерство охорони здоров'я України, 1998. 19 с. (Державні санітарні норми України).

80. Viacheslav Barsukov, Ilona Senyk, Olena Kryukova, Oksana Butenko. Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*, 2018, V. 5, No 8, Part 1, pp. 15909-15914.

81. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). Pp. 771–778.

82. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 6, pp. 270–278.

83. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, № 12 (87). P. 50–56.

84. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.

85. Багрій М.М., Левченко Л.О., Тихенко О.М., Колумбет В.П., Рєзнік Д.В. Розроблення та дослідження властивостей текстильного матеріалу від впливу електромагнітних полів. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування*. 2019. Вип. 1(85). С. 237-244.

86. Тихенко О.М., Багрій М.М., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Рєзнік Д.В. Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ. 2019. Вип. № 1(44). С. 100–106.

87. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. Энергия, 1972 г. 560 с.
88. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. Вінниця: "Поділля-2000". - 2004. - 352 с.
89. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., Наука, 5-е издание, 1977г., 736с.
90. E.M. Sparrow, R.D. Cess. Radiation Heat Transfer. Augmented Edition. Routledge, 2017, 361 p. <https://doi.org/10.1201/9780203741382>
91. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(6 (111), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
92. Levchenko, L., Ausheva, N., Burdeina, N., Aznaurian, I., Biruk, Y., Kasatkina, N., Matvieieva, I., Nazarenko, V., Nikolaiev, K., & Tykhenko, O. (2022). Development of models of the electromagnetic environment in buildings and urbanized areas. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10 (120), 35–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268439>
93. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. 2024. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. INTERNATIONAL JOURNAL OF CONSERVATION SCIENCE. Volume 15, Special Issue 1, 2024: 53-62. DOI: 10.36868/IJCS.2024.SI.05/
94. M. A. Koroli, A. R. Ivanisova. (2022). Thermal insulation of engineering structures with mineral wool based on basalt fiber. Journal of Physics: Conference Series. 2388(1):012061, DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012061

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskyi, M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131)), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
2. V. Glyva, N. Burdeina, L. Levchenko, G. Krasnianskyi, Y. Biruk, M. Dovhanovsky. (2024). Modelling the thermal resistance of layered structures for blocking infrared radiation. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (113), pp. 329–336, DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.329-336>
3. Glyva, V., Krasnianskyi, G., Dovhanovskyi, M., & Krasnianskyi, T. (2024). Розроблення і дослідження захисних властивостей матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*, 3(77), 203-205. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.203>
4. В. А. Глива, М. О. Довгановський (2025). Проектування одягу для захисту від термічних впливів та збереження тепла. Системи управління, навігації та зв'язку, 1 (79), с. 169-171, <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.169-171>
5. Глива В. А., Довгановський М.О. Композиційні матеріали для відновлення термоізоляції ушкоджених будівель і споруд. Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика»: НАУ, Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 - 24 травня 2024 року – С.30
6. G. Krasnianskyi, I. Aznauryan, M. Dovhanovskyi, O. Besarab, V. Okhrysko. Evaluation of the effectiveness of infrared radiation shielding with glass fiber. *REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY*, November 27-29, 2024, KYIV, p. 102

7. Grygorii Krasnianskyi, Iryna Aznauryan, Maksym Dovhanovskyi, Denys Kurylo. Calculation of thermal insulation efficiency of a building wall. REPORTS of the 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 84-85.

8. Патент України на корисну модель МПК G02B5/20, C03C27/12. № 158878. Екран для інфрачервоного випромінювання / Винахідники: Глива В.А., Краснянський Г.Ю., Довгановський М.О., Олексин А.В. — заявл: 21.02.2024, опубл. 02.04.2025, Бюл. № 14/2025.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ НВП «Талан-Пожтех»
Гречаний В.В

« 25 » листопада 2024 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Довгановського Максима Олександровича за темою:

«ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ
ОБ'ЄКТІВ», (науковий керівник д.т.н., професор Глива В.А., завідувач кафедри
фізики КНУБА)

Комісія у складі: голови комісії – Гречаного Вадима Вікторовича та членів
комісії – Чабанової Ольги Олексіївни та Герасименко Олени Вікторівни склала цей
акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою: «ЕКРАНУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ
ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ ОБ'ЄКТІВ» впроваджено у практичну
діяльність компанії НВП «----» під час проектування та виготовлення сучасних
групових та індивідуальних засобів захисту з обґрунтованими технічними
характеристиками, які виготовляються для пожежно-рятувальних підрозділів
ДСНС України та інших об'єктів критичної інфраструктури.

Голова комісії:

Гречаний В.В

Члени комісії:

Чабанова О.О

Герасименко О.В





МОН
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

просп. Повітряних Сил, 31,
м. Київ, 03037
тел.: +38 (044) 248-32-65,
e-mail: knuba@knuba.edu.ua,
web: knuba.edu.ua
ЄДРПОУ 02070909

ДОВІДКА

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Довгановського Максима Олександровича

Цією довідкою посвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження **Довгановського Максима Олександровича** та тему «Екранування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону для забезпечення термоізоляції об'єктів», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 Цивільна безпека, впроваджено у навчальний процес кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці і кафедри фізики факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес при викладанні курсу «Фізика. Фізика навколишнього середовища» спеціальностей G2 Технології захисту навколишнього середовища, E2 Екологія, та при викладанні курсу «Фізика» для здобувачів освіти спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються при підготовці докторів філософії за спеціальністю K10 Цивільна безпека при викладанні курсу «Цивільна безпека. Наукові та практичні аспекти реалізації».

На основі дисертаційного оновлено тематику лекційних і практичних занять.

Результати дослідження мають практичне значення для професійної підготовки фахівців у сфері цивільної безпеки будівництва і цивільної інженерії.

Проректор з НМР



Андрій ШПАКОВ