МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр

«Розробка фотоприймального пристрою для тепловізора»

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-43
Бондар П.С.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем
Керівник д.ф.-м.н., Фертман О.Л.

Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"_____"_____2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Бондар Павло Сергійович

1.Тема роботи «Розробка фотоприймального пристрою для тепловізора» керівник роботи: Фертман Олена Леонідівна, доктор фізико-математичних наук, затверджені наказом по університету від 5 грудня 2019 року №0210–05/2249.

2. Строк подання студентом роботи 06.06.2020

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

Ознайомитися з існуючими методиками використання теплові зорів в сучасних енергоефективних технологіях, та задачах енергетичного менеджменту й енергетичного аудиту. Вивчити основні технології розробки та виготовлення фотоприймальних пристроїв для тепловізійних приладів. Розробити оригінальні методики розробки фото приймального пристрою високої ефективності, та отримати результати, які можна буде використати в реальних застосуваннях.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання

Студент _____ Павло БОНДАР

підпис

Керівник роботи _____ Олена ФЕРТМАН

підпис

РЕФЕРАТ

Павло Бондар «Розробка фотоприймального пристрою для тепловізора» Кваліфікаційна робота бакалавра з прикладної фізики. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. – 40 с.

Розроблено фотоприймальний пристрій для оригінальної тепловізійної системи, призначеної для вирішування різноманітних задач наукових досліджень. Особливістю фотоприймального пристрою є можливість використання різноманітних інфрачервоних детекторів азотного рівня охолодження, що потребує спеціальної (розбірної) конструкції кріостату. В процесі розробки було визначено вимоги до розбірного кріостату та проведено його тепловий розрахунок. В результаті було визначено мінімальну кількість шарів екранно-вакуумної теплової ізоляції (n=32) в умовах безперервної роботи тепловізора протягом заданого у вимогах терміна (4 години) з максимальною потужністю. Таким чином, при розробленій оптимальній конструкції розбірного кріостату мінімальний час роботи без додаткової заливки азоту складає необхідні 4 години при максимальній потужності 1,2 Вт, яка розсіюється у разі використання у фотоприймальному пристрої смужки з 8-ми чутливих елементів з високотемпературних надпровідників (болометрів).

Дипломний проект містить: 40 сторінок, 10 рисунків, 2 таблиці, 1 додаток, 10 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФОТОПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, РОЗБІРНИЙ КРІОСТАТ, ІНФРАЧЕРВОНИЙ ДЕТЕКТОР, ТЕПЛОВІЗОР, НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ.

РЕФЕРАТ

Павел Бондарь «Разработка фотоприемного устройства тепловизора» Квалификационная работа бакалавра прикладной физики. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2020. – 40 с.

Разработано фотоприемное устройство для оригинальной тепловизионной системы, предназначенной для решения различных задач научных исследований. Особенностью фотоприемного устройства является возможность использования различных инфракрасных детекторов азотного уровня охлаждения, что требует специальной (разборной) конструкции криостата. В процессе разработки были определены требования к разборному криостату и проведения его тепловой расчет. В результате было определено минимальное количество слоев экранно-вакуумной тепловой изоляции (n = 32) в условиях непрерывной работы тепловизора в течение заданного в требованиях термина (4часа) с максимальной мощностью. Таким образом, при разработанной оптимальной конструкции разборного криостата минимальное время работы без дополнительной заливки азота составляет необходимые 4 часа при максимальной мощности 1,2 Вт, которая рассеивается при использовании в фотоприемном устройстве линейки 8-ми чувствительных элементов из высокотемпературных сверхпроводников (болометров).

Дипломный проект содержит 40 страниц, 10 рисунков, 2 таблицы, 1 приложение, 10 источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО, РАЗБОРНЫЙ КРИОСТАТ, ИНФРАКРАСНЫЙ ДЕТЕКТОР, ТЕПЛОВИЗОР, НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

ABSTRACT

Pavlo Bondar “Development of the photoreceiver device for the thermal imaging system”

Qualification work of the bachelor of applied physics. – Kharkiv. – V.N. Karazin KhNU, 2020. – 40 p.

The photoreceiver device for the original thermal imaging system used to solve the various research tasks has been developed. A specific feature of the photodetector device is the using of various infrared detectors cooled by liquid nitrogen. So a special (collapsible) design of the cryostat is required. According to specific requirements for a collapsible cryostat, heat loss calculation has been carried out. As a result, the minimum number of layers of screen-vacuum thermal insulation (n = 32) was determined for case of uninterrupted device operation during the term specified in the requirements (4 hours) with maximum power dissipation. Thus, with the developed optimal design of a collapsible cryostat, the minimum operating time without additional nitrogen filling is the necessary 4 hours at the maximum power of 1.2 W, which is dissipated in the cryostat with the array of 8 high-temperature superconductor bolometers.

The graduation project contains 40 pages, 10 drawings, 2 tables, 1 appendix, 10 sources.

KEYWORDS: PHOTORECEIVER DEVICE, COLLAPSIBLE CRYOSTAT, INFRARED DETECTOR, THERMAL IMAGER, SCIENTIFIC RESEARCH

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА АБРЕВІАТУР 8
ВСТУП 9
1. ДЕТЕКТОРИ ІЧ ДІАПАЗОНУ 12
2. СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ (КРІОСТАТ) 17
2.1. Конструкції кріостатів 17
2.2. Вимоги до кріостату 18
2.3. Тепловий розрахунок кріостату 19
2.4. Виготовлення розбірного кріостату 29
2.5. Виготовлення нерозбірного кріостату. 32
3. ПОПЕРЕДНІЙ ПІДСИЛЮВАЧ 34
ВИСНОВКИ 37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 38
ДОДАТОК А 39

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА АБРЕВІАТУР

ІЧ - інфрачервоний

ФПП - фотоприймальний пристрій

КРТ детектор – Кадмій/Ртуть /Теллур детектор

ВТНП - високотемпературний надпровідник

ЕВТІ - екранно-вакуумна теплоізоляція

СНТ-10 (синтетичний низькотемпературний папір)

ВСТУП

Принцип дії тепловізійних приладів заснований на перетворенні природного теплового випромінювання від об'єктів в видиме зображення [1]. Використання тепловізійного метода при рішенні різноманітних науково-дослідних задач є інформативним та перспективним, тому що будь-який фізичний, хімічний, механічний або біологічний процес супроводжується виділенням або поглинанням тепла, а спектральний та просторовий розподіл інтенсивності такого теплового випромінювання містить багато важливої інформації про цей процес. Це дає нам впевненість стверджувати, що наукові дослідження, доповнені цим унікальним методом, зможуть дати якісно новий рівень розуміння процесів, що досліджуються [2].

В останнє десятиліття спостерігається значний підйом у використанні тепловізійних методів у різних галузях людської діяльності. Він обумовлений вдосконаленням технології виробництва інфрачервоних (ІЧ) приймачів і розвитком комп'ютерних технологій. З'явилися тепловізори нових поколінь - легкі, компактні, с високими параметрами і сучасним програмним забезпеченням. Вони створені на основі приймачів, що не охолоджуються, - широкоформатних (сотні тисяч чутливих елементів) мікроболометричних матриць [1]. Лідируючі позиції у світі з розробки та продажу таких комерційних тепловізійних систем займають декілька закордонних фірм, наприклад FLIR (США) [3]. Але завдяки відносній дешевизні і сьогодні користуються попитом «класичні» тепловізори з оптико-механічним скануванням і одним (або смужкою) чутливим елементом, що охолоджується. Прикладом можуть служити комерційні російські тепловізори «ІРТІС» [4]. Ці системи широко використовуються для стандартних та регулярних тепловізійних обстежень (наприклад, у енергозбереженні або виявленні дефектів розповсюджуваних видів обладнання), але найбільшим попитом вони користуються у медицині і наукових дослідженнях.

Для вирішення деяких нетипових задач, які, як правило, виникають при наукових лабораторних дослідженнях, характеристик серійних тепловізорів буває недостатньо. Може виникнути потреба зміни параметрів приладу: розширення спектрального діапазону, збільшення чутливості, зміни діапазону вимірюваних температур, тощо, або потреба зміни чи введення додаткових функцій в програмне забезпечення. Це неможливо при використанні серійних тепловізорів, у яких апаратна і програмна частини недоступні для змін та модернізації. Крім того, різноманітність і «одноразовість» наукових задач роблять закупівлю дорогої закордонної системи з високими, але стандартними, параметрами та стандартним програмним забезпеченням економічно неефективною. Оптимальним варіантом для використання у різноманітних наукових експериментах являються тепловізійні системи з «відкритою архітектурою», в яких параметри пристрою, функції програмного забезпечення і навіть конструкцію можна адаптувати під конкретну задачу, інтегрувати в єдину систему з іншим експериментальним або медичним обладнанням зі створенням спільного інтерфейсу тощо.

Метою даної дипломної роботи є розробка фотоприймального пристрою (ФПП) для тепловізійної системи зі скануванням та ІЧ приймачем, що охолоджується. Тепловізійна система, де має використовуватися фотоприймальний пристрій має відкриту архітектуру і призначена для вирішування різноманітних задач наукових досліджень. Особливістю ФПП, що розробляється, є можливість використання різноманітних детекторів азотного рівня охолодження, які відрізняються спектральними, часовими, та енергетичними характеристиками і можуть бути використані у різних випадках. Тому завданнями даної роботи є: (і) розробити та виготовити розбірний кріостат, (іі) виготовити нерозбірний кріостат, (ііі) розробити та виготовити попередній підсилювач до одного з ІЧ приймачів.

Розробка фотоприймального пристрою, як головного блоку тепловізійної системи для наукових досліджень, є актуальною і має практичну значимість. Тепловізійна система з розробленим ФПП може бути використана для

вирішування як будь-яких стандартних, так і спеціальних задачі тепловізійного аналізу.

Таким чином, предметом досліджень у дипломній роботі є оригінальний фотоприймальний пристрій, який складається з взаємозамінного інфрачервоного детектора, системи його охолодження (розбірного кріостату) та первинної електронної обв'язки (попереднього підсилювача). Об'єктом досліджень, на наш погляд, є оригінальна спеціальна тепловізійна система, в якої ФПП має бути використаний як основний блок.

Диплом складається з наступних розділів: (i) вступ, де обґрунтовується необхідність розробки спеціальних тепловізійниїх систем для використання тепловізійного методу у наукових дослідженнях, (ii) основна частина, де описано процес розробки та виготовлення спеціального фотоприймального пристрою, (iii) висновки, де перелічені отримані в процесі роботи результати, а також вклад у ці результати автора диплома і практичний і науковий досвід, який він отримав в процесі роботи, (iv) список використаних джерел та (v) додаток, де приведені приклади використання тепловізійної системи з виготовленим ФПП в наукових дослідженнях.

1. ДЕТЕКТОРИ ІЧ ДІАПАЗОНУ

Основним блоком в будь-якій тепловізійній системі є фотоприймальний пристрій. Він складається з детектора ІЧ випромінювання и первинної електронної обв'язки (наприклад, попереднього підсилювача). У разі необхідності охолоджування детектора, одноелементного або матричного, до складу ФПП також входить система охолоджування (кріостат або охолоджувачі на ефекті Пельтьє, на ефекті Джоуля-Томсона тощо).

На рисунку 1. приведено блок-схему тепловізійної системи, до складу якої входить ФПП, що розробляється. Основні блоки системи: ФПП, сканер, модулятор, об'єктив та електронний блок, указані на рисунку.

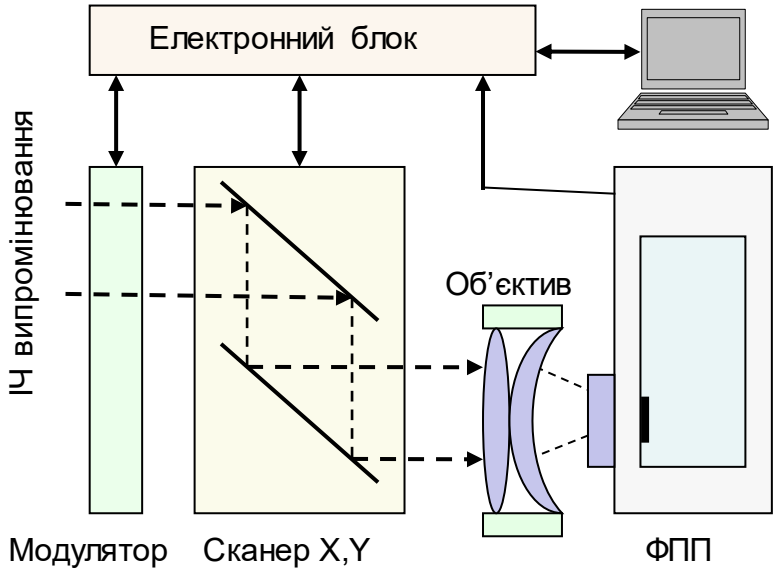


Рис.1.1 – Блок-схема тепловізора зі сканування и ІЧ приймачем, що охолоджується.

Система має «відкриту архітектуру». Це означає, що відповідно до задачі тепловізійного аналізу, що вирішується на даний момент, завдяки конструкції приладу блоки можуть замінюватися (наприклад, лінзовий об'єктив, що використовується при роботі у обмеженому спектральному діапазоні при роботі з фотонним приймачем, замінюється на такого ж розміру дзеркальний об'єктив Кассегрена для роботи у широкому діапазоні довжин хвиль і використанні

неселективного болометричного детектора). Таким чином можна замінювати більшість параметрів і функцій тепловізора.

Основними елементами тепловізійних систем є ІЧ детектори, які мають забезпечувати високу ефективність перетворення випромінювання. Вимоги до цих детекторів, як правило, значно відрізняються в залежності від конкретного використання. Це, насамперед, пов'язано зі спектральним складом випромінювання, яке реєструється, фоновою обстановкою в реальних умовах застосування тепловізійної апаратури та необхідною швидкодією. Створення універсального детектора з оптимальними для різного призначення характеристиками дотепер не здійснено.

В умовах земного фону з температурою 300 К віддається перевага ІЧ-детекторам з азотним рівнем охолодження.

Найбільш поширені фотонні детектори випромінювання мають значну селективність чутливості за спектральним діапазоном, що залежить від ширини забороненої зони напівпровідника, або глибини розташування енергетичних рівнів активних домішок. У довгохвильовій ІЧ області зараз переважно використовують фоторезистори та фотодіоди на основі CdHgTe (КРТ – детектори) для довжини хвиль реєстрованого випромінювання менше 20 мкм [5, С.103]. Застосування детекторів на основі домішкових германію та кремнію з граничною довжиною хвилі 200 мкм значно ускладнюється потребою їх охолодження до 4,2 К.

Другим, принципово іншим типом ІЧ детекторів, є теплові болометри. Їх чутливість не залежить від довжини хвилі сприйнятого випромінювання. Особливим класом теплових приймачів випромінювання є надпровідникові болометри, дія яких заснована на різкій зміні електричного опору при переході надпровідникових матеріалів з нормального стану в надпровідний. З точки зору азотного рівня охолодження чутливих елементів приймальних систем, найбільш привабливими є високотемпературні надпровідникові (ВТНП) болометри [5, С.197].

Так як тепловізійна система, для якою розробляється ФПП, призначена для рішення різнопланових наукових задач, при розробці було закладено можливість використання різноманітних, охолоджуваних до азотної температури детекторів. Це являється привабливою особливістю цієї моделі тепловізора.

Конструкція і розміри механічного кріплення для кріостатів у тепловізорі дозволяє використовувати два види комерційних фотоприймальних пристроїв - азотного і гелієвого рівня охолодження [6, 7]. Основною задачею є розробка такого ж розміру (діаметром 50 мм і висотою 130 мм) розбірного оптичного кріостату азотного рівня охолодження, в якому можуть бути розміщені різноманітні детектори (від 1 до 8-ми чутливих елементів), у тому числі фоторезистри, що мають область чутливості у вікні прозорості атмосфери 3-5 мкм (наприклад, на основі InSb), фоторезистори на вікно прозорості атмосфери 7-14 мкм (CdHgTe вузькозонні напівпровідники – КРТ детектори [5]), неселективні болометричні приймачі, у тому числі ВТНП (наприклад, плівкові YBaCuO елементи), а також малоформатні смужки (до 8-ми елементів) перелічених чутливих елементів. Слід відмітити, що завдяки відкритій архітектурі та блочній конструкції тепловізору при заміні ІЧ детектора відповідно може бути замінений об’єктив, закон сканування, будь які параметри та функції.

Основні характеристики ІЧ детекторів, призначених для використання в ФПП, що розроблюється, були попередньо виміряні на вимірювальному стенді Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України. До складу стенду входить модель абсолютно-чорного тіла з набором каліброваних бленд та модуляторів (для вимірювання енергетичних і часових параметрів ІЧ приймачів) і набір дисперсійних ІЧ фільтрів (для вимірювання спектральних характеристик). На рис.1.2 приведено блок-схему для вимірювання спектральних характеристик, на рис. 1.3 – спектральна чутливість КРТ детектора. Основні параметри детекторів приведено у таблиці 1.

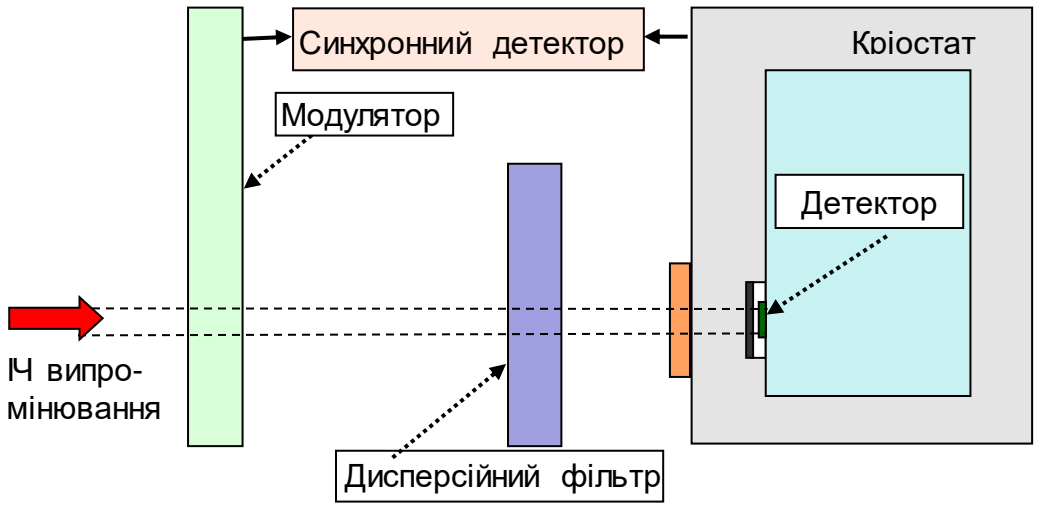


Рис. 1.2 – Блок схема вимірювання спектральних параметрів детекторів

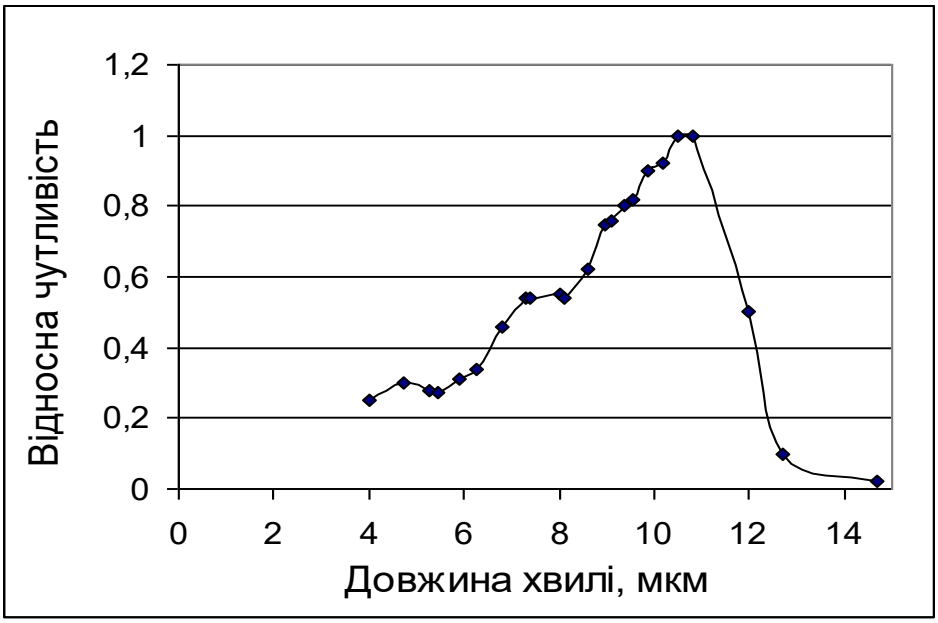


Рис. 1.3 – Спектральна чутливість КРТ- детектора

Таблиця 1

Параметри детекторів, що використовуються у ФПП

Детектор / Параметр	Одноелементний КРТ детектор	Смужка 8-ми КРТ детекторів	ВТНП болометр
Розмір чутливого элемента, мкм	40 х 40	(50 х 50) х 8	50 х 50
Робоча температура, К	80	80	89,0
Спектральный диапазон, мкм	8 -1 3	8 - 12	1 - 30
Вольт - ватна чутливість, В/Вт	$4*10^4$	$1.2*10^4$	20
Виявляльна здатність, см*$Вт^{-1}Гц^{1/2}$	$1.2*10^{10}$	$8*10^9$	$5.5*10^8$

2. СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ (КРІОСТАТ)

2.1. Конструкції кріостатів.

Заливні кріостати, незважаючи на розробку багатьох видів кріогенних установок на різноманітних фізичних принципах, на сьогоднішній день являються основним засобом охолодження елементів мікроелектроніки. Вони прості в конструкції, надійні та зручні в експлуатації, споживають мінімум енергії і в багатьох випадках перевищують інші типи систем охолодження по технічним показникам: масі, габаритним розмірам, часу виходу у режим, стабільності температури охолодження та ін. У теперішній час існує декілька типів конструкцій оптичних кріостатів азотного рівня охолодження [8, С. 344 - 350]:

- металеві конструкції,
- металево-скляні конструкції,
- скляні конструкції.

Усі вони мають прозорі для інфрачервоного випромінювання вікна з сапфіру, германію, ZnS та ін. При сучасній технології найбільш надійною конструкцією є повністю скляна. Дійсно, металева пайка або зварювання є пористими, що з часом стає причиною погіршення вакууму, ізоляція холодагенту стає недостатньою і вікно починає обмерзати. Тому кріостати цього типу періодично треба відкачувати. Цього недоліку повністю позбавлені цілком скляні кріостати. Все це відноситься до повністю заварених кріостатів. Але, враховуючи необхідність періодичної заміни фоточутливих елементів, при розробці був обраний варіант малогабаритного розбірного металевого оптичного кріостату.

2.2. Вимоги до кріостату

Для охолодження чутливих елементів до азотного рівня було розроблено спеціальний розбірний оптичний кріостат заливного типу. Перед розробкою конструкції кріостата було визначено наступні технічні вимоги до нього:

а) Кріостат має бути призначений для кріплення ІЧ приймача з кількістю чутливих елементів від 1-го до 8-ми, забезпечення робочої температури (80 ± 2) К та формування необхідного кута зору детектора.

б) Кріостат повинний легко багаторазово розбиратися для встановлення фотоприймального чіпу з подальшою збіркою та відкачуванням до необхідного рівня вакууму ($<10^{-3}$ мм. рт. ст.).

в) Кріостат повинний бути малогабаритним, з розмірами, необхідними для розміщення у механічному кріпленні екрана даної моделі тепловізора.

г) Кріостат повинний мати можливість вертикальної, горизонтальної та кутової юстировки.

д) Посадочне місце під фотоприймальний чіп – (15 × 15) мм; матеріал – мідь. Вздовж посадочного місця мають бути розміщені контактні площадки з фольгованого стеклотекстоліту для розпайки виводів чутливих елементів (електричні теплові «перехвати»).

е) Повинна бути передбачена можливість кріплення додаткового посадочного місця з нагрівачем для виводу ВТНП чутливих елементів.

ж) Кріостат повинен мати можливість заміни вхідних вікон. Відстань від вікна до посадочного місця для фотоприймального чіпу – 14 мм (для ВТНП – 12 мм). При цьому діаметр вікна повинен бути не менш 20 мм.

к) Максимальна кількість електричних виводів з холодної зони - 27 шт. (випадок використання смужки з 8-ми ВТНП елементів, включених по 4-х провідній схемі, плюс 2 проводи від нагрівача).

л) Мінімальний час роботи без додаткової заливки азоту - 4 години (при максимальній потужності, що розсіюється при роботі нагрівача ВТНП чутливих елементів на (5-10) К, 100 мВт).

2.3. Тепловий розрахунок кріостату

Теплова ефективність кріостатів визначається параметрами дренажної горловини, пакета ЕВТІ (взаємним розміщенням екранів та теплообміном між ними), а також інтенсивністю променистого, кондуктивного та конвективного теплообміну у горловині та сосуді кріостату [8].

Перед розробкою кріостату було проведено його тепловий розрахунок [9, 10] відповідно до вище перелічених вимог до його характеристик. Так як більшість параметрів кріостату вже було задано у вимогах (його розміри, максимальна кількість електричних виводів, мінімальний час роботи без додаткової заливки азоту тощо), у результаті теплового розрахунку треба було отримати необхідну кількість шарів екранно-вакуумної теплоізоляції (ЕВТІ).

При розрахунках припускалося оптимальне розподілення холоду парів між ЕВТІ та горловиною. Як екрани, було обрано алюмінізовані полімерні плівки (майлар) зі ступенем чорноти 0,018. Як прокладки між плівками, передбачалося використання композитного матеріалу СНТ-10 (синтетичний низькотемпературний папір) товщиною 10 мкм.

У розрахунку допускалося одномірне температурне поле у горловині та двомірне – у теплоізоляції. Вихідні данні для розрахунку:

- геометричний розміри внутрішнього стакану, мм .....∅ 38 х 100;
- геометричний розміри зовнішнього стакану, мм .....∅ 50 х 130;
- діаметр заливної горловини, мм .....∅ 10;
- довжина заливної горловини, мм.....30
- кількість шарів ЕВТІ 32*
- кількість шарів майлару 5*
- кількість електричних проводів.....27
- довжина електричного проводу, см 6
- кількість точок торкання центрівки.....8
- мінімальний час роботи без додавання холодоагенту, год. … 4
- Максимальне тепловиділення на нагрівачі, Вт 0,1

**Значення кількості шарів було отримано в результаті теплового розрахунку кріостату*

Згідно вимогам, мінімальний час охолодження фотоприймального чіпу повинний складати t = 4 години. Розрахуємо теплову потужність, потрібну для випарування усього азоту.

$$W = rpV/t, \tag{2.1}$$

де W (Вт) – теплова потужність, $r = 200$ Дж/г - питома теплота випарювання рідкого азоту при температурі $T = 78$ К, $\rho = 0{,}8043$ г/ см3 - щільність рідкого азоту при $T = 78$ К [8], $V \approx 110$ см3 ($Ø = 38$ мм, $L = 100$ мм) - об'єм внутрішньої склянки кріостату, $t = 4$ години – час випаровування всього об'єму рідкого азоту.

$$W = 200 * 0{,}8043 * 110 / 14400 \approx 1{,}23 \text{ (Вт)}$$

Ми отримали, що для виконання умови 4-х годинної роботи кріостату на максимальної потужності без додавання рідкого азоту, сумарний теплоприток до внутрішньої склянки кріостату не повинен перевищувати 1,23 Вт. Цей теплоприток складається зі складових:

- тепловиділення на чутливому елементі $W_{че}$
- теплоприток по опорах $W_{оп}$;
- теплоприток по електричним проводам $W_{пр}$;
- теплоприток випромінюванням $W_{вип}$;
- теплоприток по залишковим газам $W_{газ}$;
- теплоприток крізь ЕВТІ - $W_{євті}$.

Таким чином:

$$W = W_{че} + W_{оп} + W_{пр} + W_{вип} + W_{газ} + W_{евті} \leq 1{,}23 \text{Вт} \tag{2.2}$$

Розрахуємо значення кожної складової теплопритоку.

2.3.1.Тепловиділення на чутливому елементі ($W_{чe}$)

Найбільш поширений для використання в фотоприймальних пристроях тепловізоров чутливий елемент, що охолоджується, - вузькозонний напівпровідниковий фотоприймач (КРТ). Тепловиділення на ньому у робочому режимі малі і складають: $W_{чe} = I * U = 3 * 10^{-3} * 0{,}2 = 6 * 10^{-4}$(Вт), де I – струм крізь елемент в амперах, U – напруга на елементі в вольтах.

Але труднощі розробки даного кріостату обумовлені можливістю використання різноманітних приймачів. У разі використання чутливого елементу з ВТНП має місце значне тепловиділення (до 100 мВт) для виведення ВТНП у робочу точку. Це обумовлено різницею між температурою посадочного місця чутливого елементу (78 К) та температурою робочої точки ВТНП болометричного приймача, яка дорівнює його критичній температурі (≈ 90 К). Це потребує нагрівання посадочного місця майже на 10 К спеціальним нагрівачем. Таким чином, максимально можливе тепловиділення на чутливому елементі $W_{чe} \approx 0{,}1$ Вт.

2.3.2.Теплоприток по опорах $W_{оп}$

Теплоприток по опорі розраховується за формулою:

$$W_{оп} = \lambda * F * n\,(T_{зов} - T_{вн})/\delta, \qquad (2.3)$$

де $W_{оп}$ - теплоприток по опорі (Вт), λ - питома теплопровідність матеріалу опори при даній температурі (Вт/м*К), δ – довжина опори (м), F – площа торкання опори ($м^2$), n – кількість опор (або кількість торкань опори), $T_{зов} = 20\ 0C \approx 293\,K$, - температура теплого кінця опори (температура зовнішньої склянки кріостату), $T_{вн} = 78\,K$, - температура холодного кінця опори (температура внутрішньої склянки кріостату).

Кріостат, що розробляється, матиме дві опори. Розрахуємо тепло притоки по кожній з них.

а) Теплоприток по нижній опорі $W_{оп.н}$.

Нижня опора (розпірка) - зірка з 8-ма променями, матеріал – скловолокно з $\lambda = 0{,}036$ Вт/м * К, діаметр торкання $D_{\text{оп.н}} = 1$ мм, кількість торкань – 8, діаметр зовнішньої склянки – 5 см, отже, довжина кожного променю – 2, 5 см),

$$T_{\text{зов}} = 293\,K,$$

$$T_{\text{вн}} = 78\,K$$

$$F_{\text{оп.н}} = \pi\,(D_{\text{оп.н}})^2/4 = 0{,}785 * 10^{-6}\text{м}^2$$

$$Q_{\text{оп.н}} = 0{,}036 * 0{,}785 * 10^{-6} * 8 * (293 - 78)/2{,}5 * 10^{-2} = 1{,}9 * 10^{-3}\,(\text{Вт}).$$

б) Теплоприток по верхній опорі $W_{\text{оп.в}}$:

Верхня опора - трубка для заливки рідкого азоту. Своїми кінцями трубка вварюється у зовнішню та внутрішню склянки кріостату. Матеріал трубки: сталь Х18Н9Т, діаметр 10 мм, довжина 30 мм, товщина стінки трубки – 0,1 мм, теплопровідність $\lambda_{\text{сталь}} \approx 15$ Вт/м * К при $T = 300$ К. Так як трубка охолоджується парами рідкого азоту, а теплопровідність стали зменшується з температурою [8, С.133], беремо значення теплопровідності $\lambda_{\text{сталь}} \approx 9$ Вт/мК при середній температурі $T \approx (293 - 78)/2$ (К).

Площа теплопритоку по трубці:

$$F_{\text{оп.в}} = \pi/4[(D_{\text{оп.в.2}})^2 - (D_{\text{оп.в.1}})^2] = 0{,}785 * 4 * 10^{-6} = 3{,}14 * 10^{-6}\text{м}^2,$$

де $D_{\text{оп.в.2}}$ і $D_{\text{оп.в.1}}$– відповідно зовнішній і внутрішній діаметри трубки.
Тоді:

$$Q_{\text{оп.в}} = 9 * 3{,}14 * 10^{-6} * 1 * 215/0{,}03 = 0{,}18 * 10^{-6} \approx 0{,}2025(\text{Вт}).$$

Сумарний теплоприток по обом опорам:

$$Q_{\text{оп.}} = Q_{\text{оп.н}} + Q_{\text{оп.в}} = 1{,}9 * 10^{-3} + 0{,}2025 \approx 0{,}204(\text{Вт}).$$

2.3.3. Теплоприток по електричним проводам $W_{\text{пр}}$

Розрахунок проводимо відповідно формулі (2.3). Кількість електричних проводів – 27, матеріал – манганін, діаметр проводу 0,15 мм, питома

теплопровідність $\lambda_{манг} = 22\,Вт/м*К$ при $Т = 293\,К$, але для розрахунку беремо $\lambda_{манг} \approx 15\,Вт/м*К$ (так як теплопровідність манганіну зменшується при зменшенні температури, беремо значення при середніх температурах [8, С.133]). Довжина електричного проводу на якому температурний градієнт складає (78...293) К, обирається рівною 6 см (при повній довжині проводів 10 см) при припущенні, що частина проводу довжиною 4 см, знаходиться у холодній зоні при температурі Т ≈ 78 К (приклеєна спеціальнім клеєм до внутрішньої склянки).

Площа теплопритоку по одному проводу:

$$F_{пр} = \pi/4\,(D_{пр})^2 = 0{,}785 * 10^{-6} * 0{,}0225 \approx 1{,}8 * 10^{-8}(м).$$

$$W_{пр.} = 15 * 1{,}8 * 10^{-8} * 27 * 215/0{,}06 \approx 0{,}026(Вт).$$

2.3.4. Теплоприток випромінюванням $W_{вип}$

Променевий теплоприток до внутрішньої склянки розрахуємо згідно з формулою:

$$W_{вип} = \sigma * \varepsilon_{еф}[(T_{зов})^4 - (T_{вн})^4] * F_{вн}, \quad (2.4)$$

де $\sigma = 5{,}67 * 10^{-8} Вт \cdot м^{-2} \cdot K^{-4}$ - постійна Стефана-Больцмана, $\varepsilon_{еф}$ - ефективний (приведений) коефіцієнт випромінювання (ступінь чорноти), $F_{вн}$ – повна площа поверхні внутрішньої склянки.

Приведений коефіцієнт випромінювання розраховується як:

$$\varepsilon_{еф} = [(1/\varepsilon_{м}) + (F_{вн}/F_{зов}) * (\varepsilon_{ст}^{-1} - 1)]^{-1} \quad (2.5)$$

де $\varepsilon_{м} = 0{,}018$ - коефіцієнт випромінювання майлара (лавсанова плівка на нанесеним с обох сторін алюмінієвим покриттям), $\varepsilon_{ст} = 0{,}075$ - коефіцієнт випромінювання зовнішньої склянки зі нержавіючої сталі.

Площа внутрішньої склянки:

$$F_{\text{вн}} = 2\pi R_{\text{вн}} L_{\text{вн}} + 2 * \pi (R_{\text{вн}})^2 = 2 * 3{,}14 * 38 * 10^{-3} * 100 * 10^{-3} + 2 * 3{,}14 \times 10^{-6} * 1444 = 2 * 3{,}14 * 10^{-6}(3800 + 1444) = 32932{,}32 * 10^{-6} \approx 0{,}033(\text{м}^2).$$

Площа зовнішньої склянки:

$$F_{\text{зов}} = 2\pi R_{\text{зов}} L_{\text{зов}} + 2 * \pi (R_{\text{зов}})^2 = 2 * 3{,}14 * 50 * 10^{-3} * 130 * 10^{-3} + 2 * 3{,}14 * 10^{-6} * 2500 = 2 * 3{,}14 * 10^{-6}(6500 + 2500)^6 \approx 0{,}057(\text{м}^2).$$

Приведений коефіцієнт випромінювання:

$$\varepsilon_{\text{еф}} = 1/[1/0{,}018 + 0{,}58 * (1/0{,}075 - 1)] = 1/[55{,}6 + 0{,}58 * (13{,}3 - 1)] = 1/[55{,}6 + 7{,}134] = 0{,}016$$

Тоді:

$$W_{\text{вип}} = 5{,}67 * 10^{-8} 0{,}016(293^4 - 78^4) * 0{,}033 = 0{,}2195 \approx 0{,}220(\text{Вт}).$$

Теплоприток через випромінювання зменшується при збільшенні кількості шарів майлара (які не стикаються один з одним). $W_{\text{вип}} \sim 1/n$ при кількості шарів $n \leq 5$. Тоді при використанні 5-ти шарів майлару:

$$W_{\text{вип}} = 0{,}220/5 = 0{,}044(\text{Вт}).$$

2.3.5. Теплоприток по залишковим газам $W_{\text{газ}}$

Теплоприток до внутрішньої склянки через залишкові гази розрахуємо згідно з формулою:

$$W_{\text{газ}} = 2435\, A_{\text{пр}} * \rho * F_{\text{зов}} * (k + 1) * (T_{\text{зов}} - T_{\text{зов}}/(k - 1) * (M \times T_{\text{зов}})^{1/2}, \quad (2.6)$$

де $A_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт акомодації, $k = 1{,}67$ – показник адіабати молекул повітря у вакуумному просторі, $M = 29$ г/моль – молекулярна маса молекули повітря у вакуумному просторі, $\rho = 10^{-5}$мм.рт.ст. – тиск у вакуумному просторі.

Щоб забезпечити такий високий вакуум (10^{-5} мм рт. ст.), кріостат після виготовлення відкачується декілька днів форвакуумним та паромасляним

насосами з азотною пасткою, при цьому у внутрішню склянку налита гаряча вода (≈ 80 ^{0}C) для підвищення дегазації всіх елементів, що знаходяться в вакуумному просторі. Збільшення температури води вище 80 ^{0}C не рекомендується для безпеки приймального елементу. Для тривалої підтримки такого високого вакууму на верхнє і нижнє дно внутрішньої склянки наклеєні «мішочки» з мідної сітки, заповнені спеціальними адсорбентами:

Приведений коефіцієнт акомодації розрахуємо за формулою:

$$A_{\text{пр}} = \{(1/\text{a}_2) + [(F_{\text{вн}}/F_{\text{зов}})(1/\text{a}_1) - 1]\}^{-1}, \quad (2.7)$$

де $\text{a}_1 = 0{,}8$ – коефіцієнт акомодації повітря при температурі стінки зовнішньої склянки (293 К), де $\text{a}_2 = 1$ – коефіцієнт акомодації повітря при температурі стінки внутрішньої склянки (78 К).

$$A_{\text{пр}} = 1/(1/\,1 + 0{,}033/0{,}057(1/0{,}8 - 1)) = 1/(1 + 0{,}58 * 0{,}25)$$
$$= 1/(1 + 0{,}145) = 0{,}87$$

Тоді:

$$W_{\text{газ}} = 2435 * 0{,}87 * 3{,}99 * 10^{-5} * 215 * 0{,}033/(29 * 293)^{1/2} = 651{,}9 * 10^{-5}$$
$$\approx 0{,}065(\text{Вт})$$

2.3.6. Теплоприток крізь ЕВТІ ($Q_{ЕВТІ}$)

Для того, щоб розрахувати кількість шарів ЕВТІ, оцінимо допустимий теплоприток через ЕВТІ відповідно виразу (2.2):

$$W_{\text{евті}} = 1{,}23 - \left(W_{\text{че}} + W_{\text{оп}} + W_{\text{пр}} + W_{\text{вип}} + W_{\text{газ}}\right)$$
$$= 1{,}23 - (0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}026 + 0{,}044 + 0{,}07) = 0{,}79(\text{Вт})$$

Таким чином кількість шарів ЕВТІ повинне бути таким, щоб теплоприток через ЕВТІ не перевищував 0,79 Вт.

Теплоприток крізь багатошарову ЕВТІ від зовнішньої до внутрішньої склянки складається з теплопритоку до бокової стінки та теплопритоку до 2-х її днищ.

а) Теплоприток до бокової стінки склянки.

Теплоприток через багатошарову ізоляцію в разі плоскої стінки при сталому режимі:

$$Q_{\text{евті}} = F * (T_1 - T_n) / \sum_{1-n}(\delta_i/\lambda_i), \quad (2.8)$$

де: F – площа стінки, T_1 – температура зовнішнього шару, T_n – температура останього шару, n – кількість шарів ізоляції, δ_i – товщина і-го шару, λ_I - теплопровідність і-го шару.

Теплоприток через багатошарову ізоляцію між двома циліндричними стінками розраховується за формулою для плоскої стінки, якщо співвідношення діаметрів $D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} < 2$. При цьому площа розраховується як:

$$F_{\text{еф}} = (F_{\text{зов}} + F_{\text{вн}})/2$$

У нашому разі:

$D_{\text{зов}} = 20$ мм (діаметр зовнішньої склянки), $D_{\text{вн}} = 38$ мм (діаметр внутрішньої склянки).

$$D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} = 50/38 \leq 2.$$

Тоді:

$$Q_{\text{евті}} = F_{\text{єф}} * (T_{\text{н}} - T_{\text{вн}})/n\delta_{\text{і}}/\lambda_{\text{І}}$$

де:

$F_{\text{еф}} = (2\pi R_{\text{зов}} L_{\text{зов}} + 2\pi R_{\text{вн}} L_{\text{вн}})/2 = (2 * 3{,}14 * 50 * 10^{-3} * 130 * 10^{-3} + 2 * 3{,}14 * 38 * 10^{-3} * 100 * 10^{-3})/2 = 3{,}14 * 10^{-6} * (6500 + 3800) \approx 0{,}03(\text{м}^2)$.

Для ізоляції використаємо синтетичний низькотемпературний папір СНТ-10 товщиною $\delta = 10$ мкм $= 10^{-5}$м і теплопровідністю $\lambda = 3{,}7 * 10^{-5}$ Вт/м * К
Тоді:

$$(Q_{\text{евті}})_{\text{бок}} = F_{\text{еф}} * (T_{\text{н}} - T_{\text{вн}})/n\delta_{\text{і}}/\lambda_{\text{І}} = 0{,}03 * 215/(n * 10^{-5}/3{,}7 * 10^{-5}) = 23{,}865/n$$

б) Теплоприток до нижньої і верхньої частин внутрішньої склянки.
Дно і верхня кришка внутрішньої склянки екрануються такою ж кількістю шарів ЕВТІ, як і бокова стінка. Площа днищ $F_{\text{дно}} = 2 * \pi D_{\text{вн}}^2/4 = 0{,}002\text{м}^2$.
Тоді:

$$(Q_{\text{евті}})_{\text{дно}} = 2F_{\text{дно}} * (T_{\text{н}} - T_{\text{вн}})/n\delta_{\text{і}}/\lambda_{\text{І}} = 0{,}002 * 215/(n * 10^{-5}/3{,}7 * 10^{-5}) = 1{,}591/n$$

Загальний теплоприток через ЕВТІ не повинен перевищувати 0,79 Вт.

$$Q_{\text{евті}} = (Q_{\text{евті}})_{\text{бок}} + (Q_{\text{евті}})_{\text{дно}} \leq 0{,}79\ \text{Вт}$$

$$0{,}79 * n = 23{,}865 + 1{,}591$$

Тоді кількість шарів ізоляції: $n \geq 32$

Отримані в результаті теплового розрахунку складові максимальних теплопритоків, при яких забезпечується мінімальний час роботи без додаткової

заливки азоту 4 години (час випаровування всього об’єму рідкого азоту) приведено у таблиці.

Таблиця 2.

Потужність складових теплопритоку до внутрішньої склянки кріостату

Вид притоку тепла	$W_{че}$	$W_{оп}$	$W_{пр}$	$W_{вип}$	$W_{газ}$	$W_{євті}$	Сумарний приток тепла	Допустимий приток тепла
Потужність, Вт	0,10	0,20	0,03	0,07	0,04	0.77	1,21	1,23

Згідно вимогам та проведеним розрахункам теплових витрат кріостату було розроблено його конструкцію та виготовлено дослідний зразок. Ескіз розробленого малогабаритного розбірного оптичного кріостату приведено на рисунку 2.1.

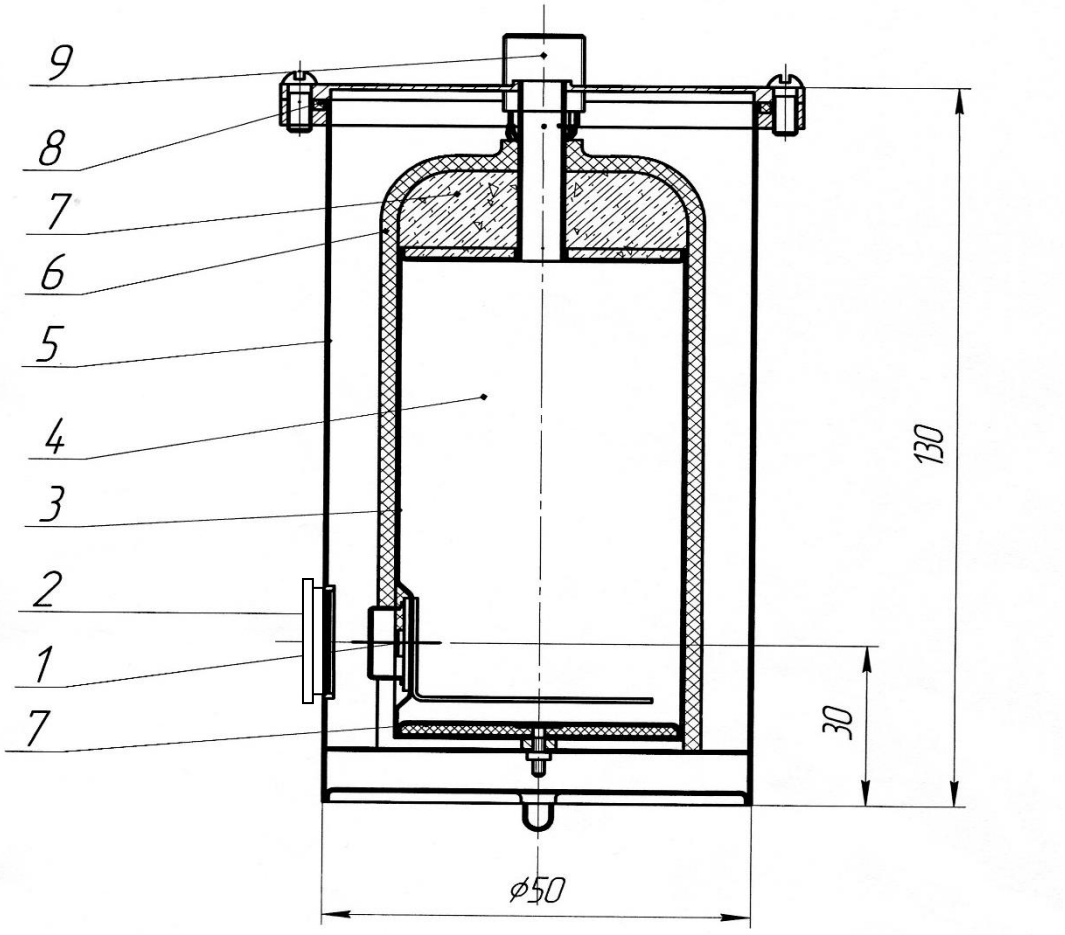


Рис. 2.1 - Ескіз розробленого розбірного оптичного кріостата:

1 – чутливий елемент, 2 – змінне вхідне вікно. 3 – внутрішня склянка. 4 – рідкий азот. 5 – зовнішня склянка. 6 – екранно-вакуумна теплова ізоляція. 7 – адсорбент. 8 – кріплення внутрішнього та зовнішнього стаканів. 9 – електричний роз'їм.

2.4. Виготовлення розбірного кріостату

Згідно теплового розрахунку та розробленій конструкції розбірний кріостат було виготовлено.

Внутрішня склянка, що представляє собою циліндр діаметром 38 мм виготовлено з нержавіючої сталі 2Х13. У торець верхнього днища вварюється трубка довжиною 30 мм для заливання рідкого азоту. До неї приварюється верхня кришка зовнішньої склянки, до якої припаювався вакуумний електричний роз'їм СНЦ 42-30. Зовні на внутрішню склянку на оптичній осі

системи припаюється виконане з міді підстава спеціальної форми («посадочне місце»), на яку потім спеціальним теплопровідним клеєм приклеюється підкладка з чутливим елементом (або смужкою чутливих елементів). Вздовж посадочного місця розміщені контактні площадки з фольгованого стеклотекстоліту для розпайки виводів чутливих елементів («теплові перехвати»). У випадку використання ВТНП болометрів передбачена можливість консольного закріплення додаткової підстави з розташованим всередині нагрівачем. Фотоприймальний чіп закривається каліброваною холодною діафрагмою (або блендою) для завдання куту зору приймача і екранування його від фонового випромінювання.

У верхній і нижньої торцевих частинах розташована порожнина з мідної сітки, заповнена спеціальним адсорбентом: паладієвий силікагель, який попередньо збезводнюється в муфельній печі протягом 1 години при температурі 100^0C, активованим вугіллям, який попереднє запікається протягом 4 годин при температурі 100 ^{0}C, та адсорбентом СКМ-4.

Після розміщення фотоприймального чіпу внутрішня склянка обертається тридцять двома шарами ЕВТІ, виготовленої з спеціального синтетичного низькотемпературного паперу товщиною 10 мкм (СНТ-10). Після кожних 5-ти шарів ЕВТІ накладається 1 шар перфорованого майлара ПЭТФ30 (спеціальна лавсанова плівка, покрита Al зі ступеню чорноти 0,018), всього п’ять шарів, - для зменшення теплопритоку до внутрішньої склянки через випромінювання. До внутрішньої склянки прикріплюється спеціальна розпірка (центрівка) для запобігання доторкування внутрішньої та зовнішньої склянок в процесі роботи. Усе міститися в зовнішню склянку з нержавіючої сталі 2Х13. Вакуумні з'єднання здійснюються зварюванням або через кільця, вирізані з спеціальної вакуумної гуми.

На зовнішній склянці напроти приймача приварене спеціальне посадочне місце з різьбою для змінного вхідного вікна. Передбачається використання декількох вхідних вікон товщиною не більше 1 мм для різного спектрального діапазону, у тому числі вікна з просвітленого двома видами покриттів

монокристалічного германію (Ge) – для використання напівпровідникових приймачів (спектральний діапазон (3÷5) мкм та (7÷14) мкм) та вікно з KRS-5 (синтетичний монокристал бромистий талій – йодистий талій TlBr-TlI) що забезпечить широке пропускання у спектральному діапазоні (0,5÷40) мкм [1] при використанні неселективних ВТНП приймачів. Вхідне вікно кріпиться кришкою з різьбою через кільце, вирізане з спеціальної вакуумної гуми товщиною 2 мм та висотою – 1 мм. 27 електричних виводів підведене манганіновими провідниками (ПЕШОММ діаметром 0,15 мм з емаллю та у шовковій ізоляції з удільним опором 35,6 Ом/м від спеціального вакуумного роз'їм СНЦ 42-30 до місця прикріплення фотоприймального чіпу (до електричних теплових «перехватів»).

До нижнього торця зовнішньої склянки впаяна трубка ∅3 мм, крізь яку здійснюватися відкачка вакуумної частини.

При збірці внутрішня та зовнішня склянки з'єднуються за допомогою 6 стандартних болтів через кільце, вирізане з спеціальної вакуумної гуми товщиною 2 мм та висотою – 2,5 мм. Після необхідної відкачки з використанням форвакуумного і паромасляного насосів до вакууму 10^{-5} – 10^{-6} мм рт. ст. кріостат з чутливим елементом та з закріпленим на ньому попереднім підсилювачем (весь ФПП) за допомогою спеціальних юстировочних скоб закріпляється у спеціальний захисний металевий екран, зовні якого буде закріплене шасі інфрачервоного об'єктиву. Для можливості додаткової кутової юстировки фланець кріостату матиме спеціальну форму, що дозволятиме кріостату обертатися навколо осі на ±3 градуса.

На рис. 3 приведено зовнішній вигляд розбірного кріостату та його внутрішньої склянки перед намотуванням ЕВТІ. На внутрішній склянці можна бачити 2 сітки з адсорбентом (зверху та знизу), покриті бяззю та щільно прикручені до склянки нитками, внутрішню частину електричного роз'єму з припаяними проводами, нижню розпірку «зірочку» та мідну калібровану холодну діафрагму для завдання куту зору приймача і екранування його від фонового випромінювання.




Рис. 2.2 – Зовнішній вигляд розбірного кріостату та його внутрішньої склянки

2.5. Виготовлення нерозбірного кріостату.

Привабливістю розбірної моделі кріостату є можливість заміни чутливих елементів. Це може знадобитися для використання ФПП в тепловізійній системі, призначеної для наукових цілей. Але якщо тепловізор вирішує стандартні задачі неруйнуючого контролю, енергозбереження, медицини тощо, є потреба довготривалого використання ФПП з найбільш підходящим для цих задач детектором і без додаткового відкачування вакуумного простору протягом декількох років. Тому додатково було виготовлено нерозбірний оптичний кріостат, усі з'єднання якого здійснено сваркою. Кріостат має ті ж самі габаритні розміри (діаметр 50 мм, довжина 130 мм), що й розбірний кріостат. В результаті вимірювання основних характеристик чутливих елементів (таблиця 1) було виявлено, що найкращим детектором для вирішування стандартних задач тепловізійного аналізу є КРТ детектор (одноелементний або смужка). Він має високу температурну чутливість і швидкодію. Тому у нерозбірний кріостат встановлено одноелементний КРТ детектор. Матеріали та процес виготовлення обох склянок цього кріостату аналогічні описаним вище. Використовується електричний вакуумний роз'їм з 4-ма штирями. Після розміщення детектора внутрішня склянка обертається

тридцятьма шарами такої же екранно-вакуумної ізоляції, після чого приварюється до зовнішньої склянки. Вікно з германію вклеюється. Так як тепловиділення на чутливому елементі малі $W_{\text{че}} = I * U = 3 * 10^{-3} * 0{,}2 = 6 * 10^{-4}$(Вт)), час безперервної дії приладу без додавання рідкого азоту дорівнює не менше 5 годин. На рисунку 4 приведено зовнішній вигляд виготовленого нерозбірного кріостату для охолодження КРТ одиночного приймача.



Рис. 2.3 – Нерозбірний оптичний кріостат.

3. ПОПЕРЕДНІЙ ПІДСИЛЮВАЧ

Для посилення сигналу фотовідгуку від кожного чутливого елементу, а також для здійснення узгодження електричного опору фотоприймача з подальшою електронікою і формування необхідної амплітудно-частотної характеристики всього сигнального тракту (0 ÷ 100 кГц) для кожного з детекторів було розроблено та виготовлено відповідні малошумливі попередні підсилювачі.

Для ВТНП детектора було виготовлено плату попереднього підсилювача на основі інтегрального операційного підсилювача AD797 з коефіцієнтом підсилення $К_у = 250$ у смузі частот 200 Гц ÷ 100 кГц з приведеною до входу шумовою напругою 1 $нВ/Гц^{1/2}$.

Для одного КРТ чутливого елемента був розроблений мало шумливий попередній підсилювач (коефіцієнт посилення $К = 200$, шумова напруга $U_m \leq 2нВ/Гц^{1/2}$.). Для випадку використання смужки приймачів розроблено та виготовлено 8 попередніх підсилювачів, розташованих на одній платі. Це дозволило досягти обмеження порогової чутливості фотодетекторів тільки природними флуктуаціями навколишнього фону (BLIP (Background Limited Infrared Photodetection) – режим) [5]. Попередній підсилювач також буде здійснювати узгодження електричного опору фотоприймача з подальшою електронікою і формування необхідної амплітудно-частотної характеристики всього сигнального тракту (0 ÷ 100 кГц). Електрична схема, рисунок друкованої плати та монтажна схема попереднього підсилювача для одного КРТ детектора приведено відповідно на рисунках 3,1, 3.2, та 3.3.

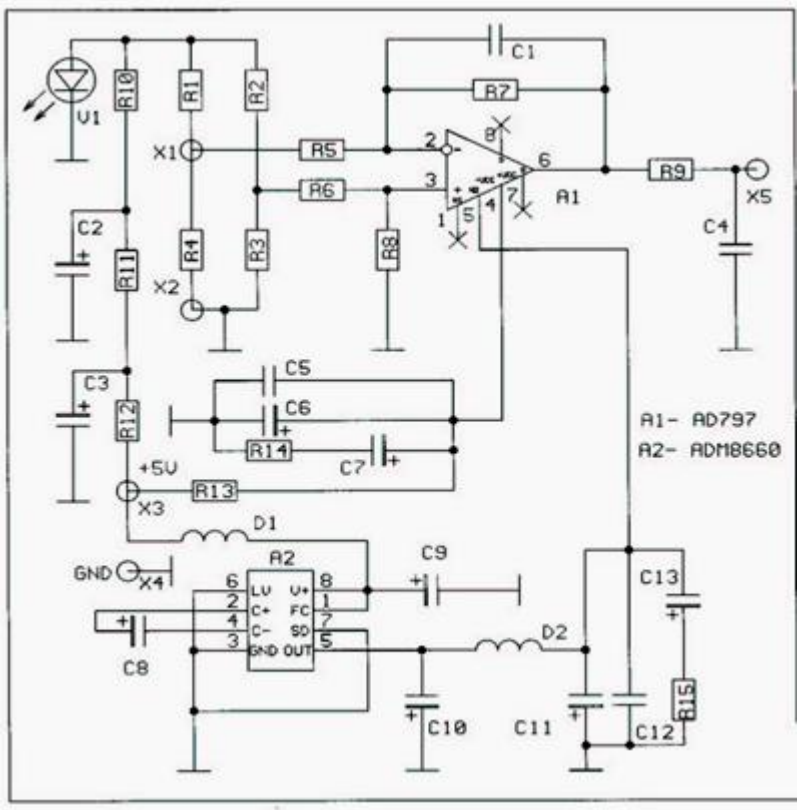


Рис. 3.1 – Принципова електрична схема попереднього підсилювача для одного КРТ детектора

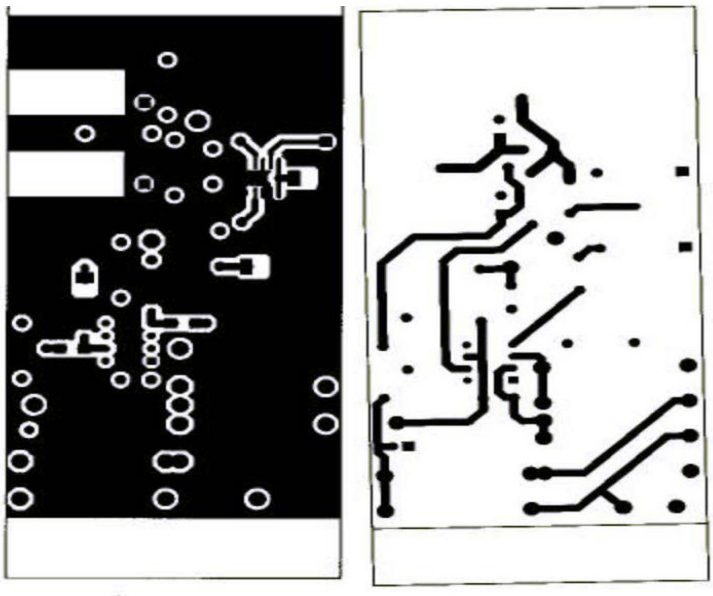


Рис. 3.2 – Друкована плата попереднього підсилювача для одного КРТ детектора

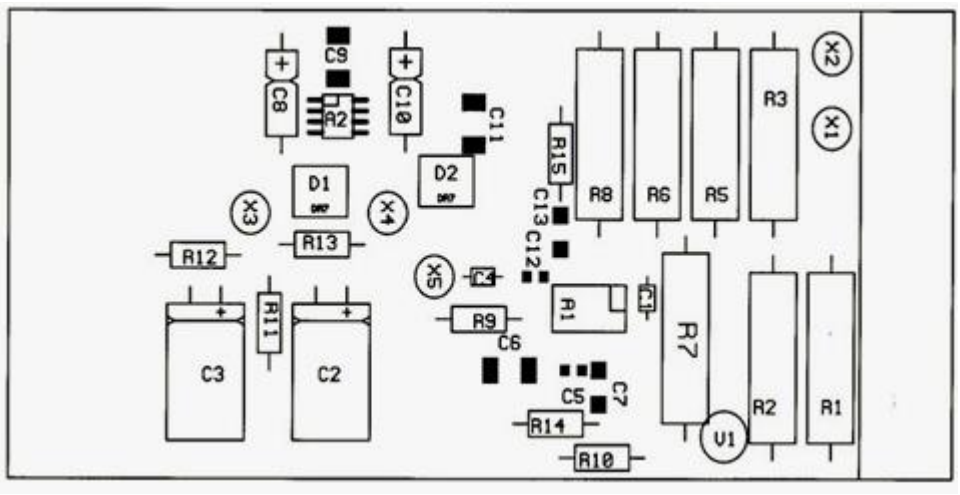


Рис. 3.3 – Монтажна схема попереднього підсилювача для одного КРТ

На рис. 3.4 приведено зовнішній вигляд виготовленого ФПП (нерозбірний кріостат з КРТ приймачем та закріплена на ньому плата попереднього підсилювача) і зовнішній вигляд захисного екрану для ФПП з вже закріпленому на ньому інфрачервоним лінзовим об’єктивом.

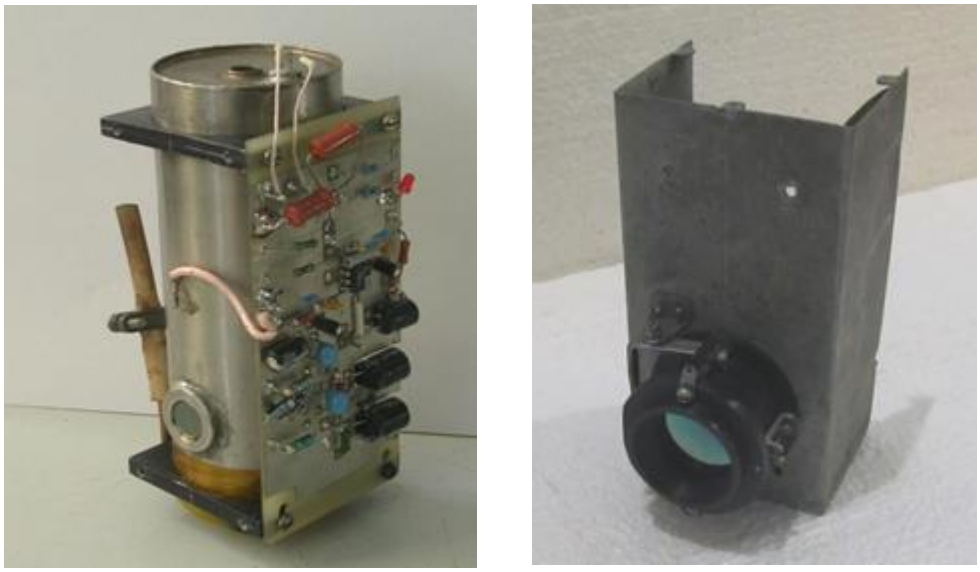


Рис. 3.4 – Зовнішній вигляд виготовленого ФПП та зовнішній вигляд захисного металевого екрану для розміщення ФПП (з ІЧ об’єктивом).

ВИСНОВКИ

В процесі дипломної практики було розроблено и виготовлено фотоприймальний пристрій для використання в тепловізорі з відкритою архітектурою, у тому числі:

- Вивчені літературні джерела за тематикою диплому.
- Виміряні параметри ІЧ детекторів.
- Проведено тепловий розрахунок розбірного кріостату.
- Розроблено конструкцію розбірного кріостату.
- Виготовлено розбірний та нерозбірний кріостати.
- Розроблено та виготовлено плату попереднього підсилювача.

В результаті дипломної практики Бондарем П.С. було отримано наукові знання в області інфрачервоних приладів і технологій та кріогенної техніки, а також практичні навики, у тому числі: користування кріогенною рідиною, форвакуумним насосом, пайка (в тому числі за допомогою паяльної станції), вимірювання на стенді параметрів ІЧ детекторів, а також – додатковий досвід роботи з 2-ма різними моделями тепловізорів, обробки отриманих термограм тощо.

Розроблений ФПП використано у тепловізорі (Додаток А) .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Госсорг Ж. / Инфракрасная термография (Основы, техника, применение) / - М: Мир. – 1988. – 400 с.
2. Н.И.Глущук / Применение тепловизионных методов в научных исследованиях / Э.Ю.Гордиенко, Ю.В.Фоменко, Г.В.Шустакова // Наука и инновации. – 2013. - т.9, №2. – С.41- 46.
3. Сайт компанії “FLIR Systems” [Інтернет ресурс]: http://www.flir.com/
4. Сайт компанії “Иртис” [Інтернет ресурс]: http://www.irtis.ru/
5. Сизов Ф.Ф. / Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых участках спектра / – Киев: Академпериодика. - 2008. - 460 с.
6. Сайт компанії “Judson Technologies”, #J15D12. [Інтернет ресурс]: http://judsontechnologies.com/
7. Сайт компанії «Oxford Instrument», Optistat CV, [Інтернет ресурс]: http://www.oxford-instruments.com/
8. Малков М.П. / Справочник по физико-техническим основам криогеники / - М: Энергия. – 1973. - 392 с.
9. Тепловой расчёт криохранилища / Учебные материалы для студентов [Інтернет ресурс]: https://vunivere.ru/work40115
10. Теплопроводность через плоские и цилиндрические стенки. Излучение. Расчет толщины тепловой изоляции / Лекция [Інтернет ресурс]: https://muctr.ru/upload/iblock/faf/Lektsiya11.pdf

Додаток А

Використання розробленого ФПП у тепловізорі



Рис. А1 - Зовнішній вигляд тепловізора з розробленим ФПП у стаціонарному варіанті і з вбудованим екраном

Тепловізор з відкритою архітектурою на базі розробленого ФПП адаптовано під специфічну наукову задачу «Дослідження теплових полів при кріовпливі», а саме: діапазон вимірювальних температур розширено до -200 ^{0}C, розроблено новий інтерфейс споживача, реалізовано автоматичний запис термографічного фільму у цифровому форматі протягом 30 хвилин, автоматичне вимірювання різноманітних характеристик теплового поля, додано десяток нових палітр і функцій тощо.

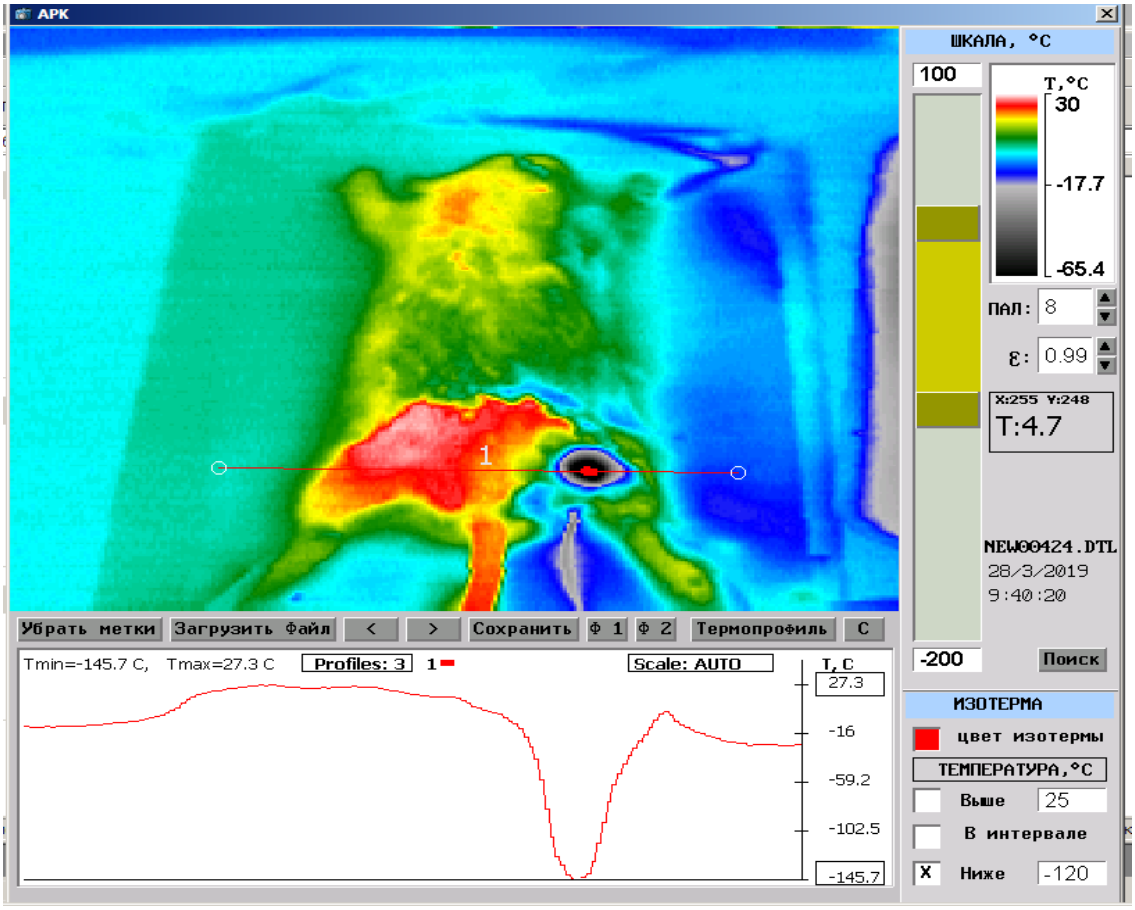


Рис. А2 - Приклад використання тепловізора з ФПП для наукових досліджень.