

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла

«На правах
рукопису»

УДК 772.96(043.3)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій КОТОВСЬКИЙ

“12” 05 _____ 2021р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

Освітньо – наукова програма «Комп’ютерне моделювання фізичних процесів»
на тему: Моделювання об’ємних тривимірних термограм на основі плоских
термографічних знімків.

Виконав : студент другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи ОФ-91мн
(шифр групи)

Вовк Ян Станіславович
(ПІБ)

_____ (підпис)

Науковий керівник Зав. кафедри ЗФ та ФТТ, д. т. н., проф.,
В. Й.Котовський

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

_____ (підпис)

Рецензент К.т.н. доцент Цибульський Л. Ю.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

_____ (підпис)

З перевіркою магістерської дисертації
Вовка Я. ознайомлений. Виявлену
схожість в даній роботі вважаю
доцільною.

Науковий керівник

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України

**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Віталій КОТОВСЬКИЙ
(підпис) (ін[^]я, прізвище)

«12» 05 _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Вовк Ян Станіславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Моделювання об'ємних тривимірних термограм на основі плоских термографічних знімків.»

Науковий керівник дисертації Котовський Віталій Йосипович, д.т.н., проф., зав. кафедри ЗФ та ФТТ

затверджені наказом по університету від «26» 03 2021р. № 901С

2. Строк подання студентом дисертації 14.05.2021.

3. Об'єкт дослідження Методи моделювання тривимірних об'єктів.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Алгоритм моделювання об'єктів оснований на термографічних зображеннях.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Ознайомитись з фізичними основами термографії. Ознайомитись з принципом отримання термографічних зображень. Ознайомитись з можливостями сучасних інфрачервоних термографів.

Провести аналіз методів моделювання тривимірних моделей. Розробити програмне забезпечення для моделювання тривимірних об'єктів на основі термографічних знімків. Провести аналіз отриманих результатів.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 18 слайдів презентації, що включають загальну характеристику дисертації; в тексті дисертаційної роботи міститься 38 рисунків.

7. Орієнтовний перелік публікацій Вовк, Я., & Штофель, О. (2020). РОЛЬ 3D МОДЕЛЮВАННЯ У ПИТАННЯХ ТЕРМОГРАФІЇ . Наука. Інновації. Якість, 1(1), 322–325. вилучено із <https://siqbspu.online/index.php/siqbspu/article/view/16>

8. Дата видачі завдання 01.09.2020 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	25.11.2019	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи	25.11.2019	Виконано
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	25.11.2019 – 15.03.2020	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	28.11.2019 – 15.02.2021	Виконано
5	Наукові дослідження за темою МД	03.12.2019 – 06.12.2019	Виконано
6	Аналіз отриманих результатів	07.12.2019 – 09.09.2020	Виконано
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД	10.09.2020 – 08.03.2021	Виконано
8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	15.03.2021 – 28.04.2021	Виконано
9	Надання роботи на перевірку керівнику МД	29.04.2021	Виконано
10	Отримання відгуку від керівника МД	30.04.2021	Виконано
11	Перевірка МД на плагіат	05.05.2021	Виконано
12	Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)	06.05.2021	Виконано
13	Подання МД на рецензію	08.05.2021	Виконано

14	Попередній захист МД	12.05.2021	Виконано
15	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	14.05.2021	Виконано
16	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	12.05.2021 – 14.05.2021	Виконано
17	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та ФТТ	17.05.2021	Виконано
18	Відправка анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	14.05.2021	Виконано
19	Остаточний захист МД	20.05.2021	Виконано
20	Відправка матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	14.05.2021	Виконано

Студент

(підпис)

Я. С. Вовк

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В. Й. Котовський

(ініціали, прізвище)

* * Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

УДК 772.96(043.3)

Магістерська дисертація «Моделювання об'ємних тривимірних термограм на основі плоских термографічних знімків.» / Я. С. Вовк. КПІ ім. Ігоря Сікорського; науковий керівник В.Й. Котовський. Робота містить: 101 с., 38 рис., 34 посилань.

Актуальність: Дана робота дає можливість подивитися на інноваційний метод аналізу термографічних знімків, а саме: відкриває широкі можливості в використанні тривимірних моделей на основі отриманих термограм методом інфрачервоної термографії. Так, як просторове моделювання є мало дослідженою областю термографії, але має велику перспективу для використання у багатьох галузях діяльності людини (медицина, ботаніка, металургія, ракетне будівництво, військова галузь тощо), тема даної роботи є перспективною та актуальною. Такий підхід допоможе у майбутньому значно полегшити методики виконання ряду задач та допоможе подивитися на деякі проблеми з іншого боку, що дасть можливість вирішити їх з меншими затратами по часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри:

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до планів міжфакультетської навчально-наукової лабораторії неінвазивних методів досліджень спільно з Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, з яким багато років діє договір про співпрацю в області термографічних досліджень. Результати даної магістерської дисертації також можуть бути використані безпосередньо у навчальному процесі кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла, при викладанні курсу «Інфрачервона термографія як інструмент наукових досліджень», та «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів», а

також при подальшому вдосконаленні алгоритмів тривимірного моделювання термограм шляхом виконання магістерських робіт кафедри.

Задача дослідження: Провести аналіз існуючих методів створення тривимірних зображень; розробити алгоритм та програмне забезпечення, для створення тривимірних термографічних моделей на основі двомірних термограм, отриманих методом інфрачервоної термографії.

Об'єкт дослідження: Методи моделювання тривимірних об'єктів.

Предмет дослідження: Алгоритм моделювання об'єктів оснований на зображеннях дійсних об'єктів.

Мета роботи Розробити алгоритм та програмне забезпечення для моделювання тривимірних об'єктів на основі зображень об'єктів, отриманих за допомогою інфрачервоного термографу, з метою спрощення інтерпретації та аналізу термографічних зображень.

Методи дослідження: Інфрачервона термографія, програмне середовище C#, комп'ютерне моделювання, комп'ютерна 3D-графіка.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено алгоритм та програмне забезпечення для спрощення аналізу термографічних зображень, що представляє собою інноваційний інструмент аналізу термограм для відносно невеликих об'єктів досліджень. Це програмне забезпечення дозволяє отримати тривимірну термограму, яка створюється на основі термографічних знімків досліджуваного об'єкту.

2. Визначено, що на теперішній час не існує схожих методів створення об'ємних зображень, тому запропонований метод відкриває нові можливості для подальшого розвитку технології тривимірного моделювання теплових зображень.

Практичне значення одержаних результатів:

1. З метою практичної реалізації, проаналізовано та визначено три основні методики моделювання просторових моделей та обрано як базовий - метод полігональної сітки для моделювання тривимірних зображень.

2. Визначено, що сучасні інфрачервоні термографи дають можливість проводити аналіз температурних полів об'єктів досліджень з високою точністю, а також з великої відстані, що у свою чергу надає можливість здійснювати аналіз отриманих даних навіть в небезпечних для життя людини умовах.

3. Проведене тестування розробленого програмного забезпечення показало, що отримані в ході роботи програми тривимірні об'єкти дають можливість швидко проаналізувати термографічні знімки, та є основою для подальших досліджень щодо удосконалення програмного забезпечення

Мета індивідуального завдання:

- ознайомитись з фізичними основами термографії;
- ознайомитись з принципом отримання термографічних зображень;
- ознайомитись з можливостями сучасних інфрачервоних термографів;
- провести аналіз методів моделювання тривимірних моделей;
- розробити програмне забезпечення для моделювання тривимірних об'єктів на основі термографічних знімків;
- протестувати алгоритм на реальних термографічних зображеннях;
- провести аналіз отриманих результатів та виявити недоліки алгоритму.

Публікації Вовк, Я., & Штофель, О. (2020). РОЛЬ 3D МОДЕЛЮВАННЯ У ПИТАННЯХ ТЕРМОГРАФІЇ . Наука. Інновації. Якість, 1(1), 322–325. вилучено із <https://siqbspu.online/index.php/siqbspu/article/view/16>

Ключові слова: інфрачервона термографія, моделювання, 3d модель, програмування, комп'ютерна графіка, алгоритми, теплові зображення.

В роботі наведено: 100 сторінок звіту, 38 ілюстрацій, 11 сторінок додатків, 48 літературних найменувань.

ABSTRACT

UDC 772.96 (043.3)

Master's thesis "Modeling of three-dimensional thermograms based on flat thermographic images." / Ya. S. Vovk. KPI them. Igor Sikorsky; scientific adviser V.Y. Kotovsky. The work contains: 101 pp., 38 figs., 34 references.

Topicality: This work provides an opportunity to look at an innovative method of analysis of thermographic images, namely, opens wide opportunities in the use of three-dimensional models based on thermograms obtained by infrared thermography. Since spatial modeling is a little-studied field of thermography, but has great potential for use in many fields of human activity (medicine, botany, metallurgy, missile construction, military industry, etc.), the topic of this work is promising and relevant. This approach will help in the future to greatly facilitate the methods of performing a number of tasks, and will help to look at some problems from the other side, which will allow to solve them with less time.

Connection of work with scientific programs, plans, themes of the department:

The dissertation was performed in accordance with the plans of the interdepartmental educational and scientific laboratory of non-invasive research methods together with the Institute of Semiconductor Physics. V.Ye. Lashkareva of the National Academy of Sciences of Ukraine, with which a cooperation agreement in the field of thermographic research has been in force for many years. The results of this master's dissertation can also be used directly in the educational process of the Department of General Physics and Solid State Physics in teaching the course "Infrared thermography as a tool for research" and "Computer modeling of physical processes", as well as further improvement of three-dimensional thermogram modeling algorithms. by performing master's theses of the department.

The task of the study: To analyze the existing methods of creating three-dimensional images; develop an algorithm and software for creating three-dimensional thermographic models based on two-dimensional thermograms obtained by infrared

thermography.

Object of research: Methods of modeling three-dimensional objects.

Subject of research: Algorithm for modeling objects based on images of real objects.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time an algorithm and software for simplification of analysis of thermographic images was developed, which is an innovative tool for analysis of thermograms for relatively small objects of research. This software allows you to obtain a three-dimensional thermogram, which is created on the basis of thermographic images of the object under study.

2. It is determined that at present there are no similar methods of creating three-dimensional images, so the proposed method opens new opportunities for further development of technology for three-dimensional modeling of thermal images.

Practical significance of the obtained results:

1. For the purpose of practical realization, three main methods of modeling of spatial models are analyzed and defined and the method of a polygonal grid for modeling of three-dimensional images is chosen as basic.

2. It is determined that modern infrared thermographs make it possible to analyze the temperature fields of research objects with high accuracy, as well as from a great distance, which in turn makes it possible to analyze the data even in life-threatening conditions.

3. Testing of the developed software showed that the three-dimensional objects obtained during the operation of the program allow to quickly analyze thermographic images, and are the basis for further research to improve the software.

The purpose of the individual task:

- get acquainted with the physical basics of thermography;
- to get acquainted with the principle of obtaining thermographic images;
- to get acquainted with the possibilities of modern infrared thermographs;
- to analyze the methods of modeling three-dimensional models;
- develop software for modeling three-dimensional objects based on

thermographic images.

- test the algorithm on real thermographic images;
- analyze the results and identify the shortcomings of the algorithm.

Publications: Vovk, J., & Stofel, O. (2020). THE ROLE OF 3D MODELING IN THERMOGRAPHY ISSUES. Science. Innovations. Quality, 1 (1), 322–325. removed from <https://siqbspu.online/index.php/siqbspu/article/view/16>

Keywords: infrared thermography, modeling, 3d model, programming, computer graphics, algorithms, thermal images.

The paper contains: 100 pages of the report, 38 illustrations, 11 pages of appendices, 48 literary titles.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОГРАФІЇ	18
1.1 Основні характеристики теплового випромінювання	18
1.2 Закон Кірхгофа.....	22
1.3. Закон Стефана - Больцмана. Закон Віна. Формула Релея –Джинса.....	24
1.4 Формула Планка.....	28
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	31
РОЗДІЛ 2 СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 32	
2.1 Фізична модель отримання тепловізійної інформації.	32
2.2 Цифровий контактний термограф.....	34
2.2 Будова тепловізора	37
2.3 Фоточутливі приймачі, які застосовуються в термографах	38
2.3.1 Болومتر.....	38
2.3.2 Приймачі ІЧ-зображення на основі термомеханічних нанорозмірних мембран	39
ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	42
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФРАЧЕРВОНИХ ТЕРМОГРАМ	43
3.1 Методи отримання зображень	43
3.1.1 Математичні моделі зображень	43
3.1.2 Дискретизація зображень	49
3.2 Методи обробки термограм.....	52
3.3 Моделювання тривимірних графічних моделей	56
3.3.1 Технологія Ray Marching	56
3.3.2 Метод вокселів	57
3.3.3 Метод полігональної сітки	59
3.4 Моделювання 3D об'єктів на основі Зображень.....	59
3.4 Моделювання тривимірних термограм.....	60
3.5.1 Пошук координат полігонів тривимірної моделі	60
3.5.2 Колористика 3D моделі	65
3.5.3 Текстурування тривимірної термограми.....	67

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	69
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОБОТА ПРОГРАМИ.....	70
4.1 Моделювання простого зображення кулі	70
4.2 Результат моделювання руки людини	75
4.3. Сучасний підхід до підвищення ефективності термографії.....	79
ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	84
ДОДАТОК А	90
ЛІСТІНІНГ ТЕКСТУ ПРОГРАМИ МОВОЮ C#.....	90

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

3D – тривимірний модель

ІЧ – інфрачервоне випромінювання.

ІЧТ – інфрачервона термографія.

АЧТ – абсолютно чорне тіло.

ГСН – головка самонаведення ракет.

ПЗ – програмне забезпечення.

ПП – пасивний піксель.

УФ – ультрафіолетове випромінювання.

ФРА – матричний фотоприймач.

ВСТУП

Застосування тепловізійних приладів у теперішній час є дуже перспективним напрямком. Особливо це стосується медичної галузі. Метод інфрачервоної термографії дозволяє безконтактно отримати теплове зображення тіла людини або досліджуваної ділянки. Термодіагностика вийшла на новий рівень за рахунок розвитку та нових розробок тепловізійних приладів, тому вона може використовуватись як метод діагностування, виявлення новоутворень, профілактичного огляду або моніторингу. Важливим моментом такого діагностування є вірна інтерпретація отриманих зображень – термограм. Саме тому дослідження в даній сфері спрямовані на розробку нових методів отримання та аналізу термографічних зображень.

На даний момент велику складність викликає аналітика нерівних поверхонь складних об'єктів. Найбільшу складність вносять впадини поверхні, які взагалі неможливо виявити на термографічному знімку. Для усунення даного дефекту використовується накладання результатів отриманих з ІЧ детектора та детектора видимого світла [16]. Проте дану проблему можна виправити змодельовавши об'єкт дослідження аналітичними методами. Даний варіант розв'язання недоліку одразу підвищує простоту сприйняття результатів людиною та дозволяє ввести додатковий функціонал, різко розширюючи інструментальну базу використання термографів.

Завдання роботи полягає у спрощенні аналітики термографічних зображень, отриманих за допомогою інфрачервоної термографії з метою більш точної їх інтерпретації. Для цього необхідно розглянути існуючі методики, направлені на спрощення аналітики термограм, провести порівнювальний аналіз та запропонувати власний метод аналітики термограм та виділити плюси і мінуси запропонованого методу. Результатом виконання роботи має бути розроблене програмне забезпечення для спрощення аналізу термографічних зображень.

Таким чином, головною метою даної магістерської дисертації є створення програмного забезпечення для візуалізації тривимірних моделей на основі термографічних знімків. Програма має створювати об'ємну модель об'єкта та текстуру на основі термограми для накладення на створену модель.

На даний момент термографія використовується у великій кількості областей життєдіяльності людини.

У медицині метод термографії застосовується в діагностиці за допомогою мініатюрних ІЧ камерах нового покоління. Виявлено, що термочутливість і просторова нерівномірність ІЧ камер не перевищує 0.1°C , що достатньо для медичної діагностики, а цей метод набагато дешевший за дорогі томографи. Він надає можливість термовізуалізації вазомоторної активності периферичних судин та розподілу теплової хвилі в моделях біологічних тканин для ранньої діагностики глаукоми, онкологічних пухлин і функціонального стану внутрішніх органів та для складання термокарт шкіри і тіла, тобто виявлення патологій на ранніх стадіях їх виникнення [25,15,24,17,27,31].

У матеріалознавстві методом ІЧТ візуалізації можна провести термічний аналіз напруги в матеріалах, що дозволяє знизити затрати для визначення компонента тензора напруг. Це дозволяє застосувати дану методику для аналізу широкого класу інженерних конструкцій в режимі реального часу, оцінити стійкість матеріалів, виявити вплив дефектів на міцність композитних панелей та інших конструкцій методом кореляції цифрових зображень та ІЧТ, локалізації пластичної деформації в матеріалах при динамічному навантаженні [1,34].

У ботаніці використовують метод термографічної реєстрації теплових ефектів у рослин. При заморозках визначається діапазон температур, які приводять до їх загибелі. Вивчати адаптивні можливості рослин та їх стійкість до несприятливих умов оточуючого середовища допомагають розв'язання фізіологічних та біохімічних проблем рослин. Для таких завдань використовують тепловізійну камеру з матрицею (128x128 елементів з кроком 50 мкм) встановленою у фокальній площині об'єктива [15].

ІЧТ у виробництві сталі допомагає ранньому, надійному та, найголовніше, неруйнівному виявленню пошкоджень за допомогою тепловізійних камер, а це знижує затрати при виробництві сталі. Нагрівання сталевого виробу на 20°C, дозволяє миттєво виявити дефекти на поверхні, тому що вони мають вищу температуру. Висока геометрична роздільна здатність $1,1 \cdot 10^9$ і термічна чутливість 0,05 °C в поєднанні з потужним сенсором зображення ІС 125 LV від Trotec 110.519 дозволяють помітити найменші відмінності у сирих сталях або надзвичайно гарячих виробках. Термограф ІС 125 LV може проводити довготривалі вимірювання, простий у використанні, забезпечує легку безконтактну перевірку з усіх сторін, надає можливість докладної документації [19,16,33,18].

У переносних зенітно-ракетних комплексах (ПЗРК) для ураження цілей на зустрічних курсах, стійкості до перешкод та запобіганню враження хибних цілей встановлюють вдосконалені ІЧ головки самонаведення, які працюють в діапазоні 4-4,8 мкм, застосовуються системи глибокого самонаведення. При сприйнятті цілі головкою самонаведення в ЗРК спрацьовують візуальний і звуковий індуктор, фіксуючи захоплення цілі ІЧ ГСН. Оператор продовжує стежити за ціллю, визначає момент її входу в зону дії, ураження відбувається автоматично. На теперішній час використовують ПЗРК «Стріла», «FIM-92», «Stinger», SATCP «Mistral». Разом з тим існують і напівавтоматичні ПЗРК «Javelin», «Starstrive», «RBS-70» оператори таких комплексів супроводжують повітряну ціль за допомогою оптичних прицілів, простежуючи відхилення, корегуючи їх та концентруючи на одній цілі. Робота оператора зводиться до захоплення цілей ГСН. Це дозволяє швидше здійснити обстріл, змінювати позиції та істотно полегшує підготовку, багатократно збільшуючи їх чутливість до цілі. Безспектральні ІЧ та УФ ГСН не реагують на сторонні більш інтенсивні джерела тепла особливо ефективні проти моно-спектральних ГСН працюють в діапазоні 1-2 мкм.

На теперішній час в Україні працюють над створенням активних ГСН, де використовують радіолокаційний та тепловий тип самонаведення.

У хімії термографія займається вивченням процесів по супроводжуючому їх тепловому ефекту, за якими можна судити про фазові перетворення, температурні умови та інтенсивність хімічних реакцій зневоднення, дисоціації, плавлення, кристалізації і т.п. Цим методом можна визначати теплопровідність, теплоємність та інше. З цією метою частіше всього застосовується автоматичний самореєструючий пірометр Курнакова з диференціальною термопарою. Один гарячий спай такої термопари розміщують у досліджуваній об'єкт, наприклад, у реакційну суміш, другий - у речовину еталон (звичайно це окис алюмінію або окис магнію, прожарені при температурі більше 1000 °С), що не підлягають суттєвим перетворенням у вибраному діапазоні температур. Різниця в температурі нагрітих з однаковою швидкістю об'єкта й еталона, яка виникає за рахунок теплового ефекту перетворень об'єкта, викликає різницю в електрорушійних силах, порушуваних на кінцях двох термопар. Метод диференціального запису температури дозволяє фіксувати процеси, що супроводжуються дуже малим тепловим ефектом. Автоматичний запис дає при цьому можливість отримувати результати досліджень у вигляді наочних об'єктивних фотодокументів [13].

У біології використовуються, наприклад термографи DS-1921L-F5 для оцінки умов зимування тварин в штольнях копалин на території Якутії [5].

У будівництві термографія застосовується при енергетично-тепловому дослідженні будівель і споруд за допомогою тепловізорів. Для зменшення тепловтрат, оцінюючи ІЧ випромінювання, можна визначити коефіцієнт випромінювання матеріалів та запобігти тепловтрат, використавши діапазон випромінювання від 1.5 мкм до 20 мкм [8,6].

Таким чином, метод сучасної інфрачервоної термографії заходить все більше використання у різних сферах людської діяльності.

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОГРАФІЇ

1.1 Основні характеристики теплового випромінювання

Теплове випромінювання різних тіл має неперервний спектр, максимум якого залежить від температури самого тіла. Із збільшенням температури загальна енергія теплового випромінювання зростає, а максимум зсувається в бік менших довжин хвиль. Таке випромінювання відбувається внаслідок переходів атомів, молекул та інших атомних систем зі станів з більшою енергією в стани з меншою енергією. Це випромінювання відрізняється від інших (люмінесценції) тільки способом переходу випромінювальних систем у збуджений стан. Такий перехід здійснюється завдяки тепловому рухові атомів і молекул.

Особливо важливе значення в явищі теплового випромінювання має поняття так званого рівноважного випромінювання. Для визначення цього поняття розглянемо порожнину з нерухомими та непрозорими стінками, температура яких підтримується сталою. Атоми та молекули стінок переходять у збуджений стан завдяки енергії теплового руху і при зворотних переходах у незбуджений стан випромінюють енергію. Енергія променя, падаючи на стінки порожнини, частково поглинається та частково відбивається. Внаслідок цього відбувається зміна напрямку поширення, спектрального складу, поляризації та інтенсивності випромінювання. Величина енергії, що випромінюється стінками порожнини за одиницю часу, дорівнюватиме енергії, що поглинається цими ж стінками за той самий час у порожнині встановиться рівноважний стан. Через це стан випромінювання в порожнині залишається макроскопічно незмінним у часі. Таке випромінювання називають рівноважним.

Властивості рівноважного випромінювання не залежать від форми та речовини стінок порожнини, а саме: густина променевої енергії, її розподіл у

спектрі за довжинами хвиль (за частотами), напрям поширення, а також поляризація випромінювання. Ці властивості, подібно до стану газу в посудині, зумовлюються тільки температурою стінок порожнини. Рівноважне випромінювання однорідне: його густина однакова у всіх точках порожнини. Воно ізотропне і неполяризоване, тобто всі напрями поширення випромінювання в порожнині рівноймовірні, а напрями векторів напруженості електричного поля \vec{E} та індукція магнітного поля \vec{B} у кожній точці порожнини змінюються з часом хаотично.

Оскільки випромінювання знаходиться в тепловій рівновазі зі стінками порожнини, то можна говорити не тільки про температуру стінок, а й про температуру самого випромінювання вважаючи ці температури однаковими.

Ці фактори можуть бути використані для наукових досліджень, зокрема в медичній діагностиці. Тобто реєстрація випромінювання різних ділянок поверхні тіла людини і визначення їх температури може служити діагностичним методом, теоретичну основу якого становлять закони теплового випромінювання. Введемо деякі величини теплового (або інфрачервоного) випромінювання, які характеризують стан випромінювання у просторі й застосовні не тільки для рівноважного, але і для довільного випромінювання.

Однією з таких величин є густина енергії випромінювання u , тобто кількість енергії випромінювання в одиниці об'єму. Густина енергії випромінювання можна виразити так:

$$u = \int_0^{\infty} u_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} u_{\lambda} d\lambda \quad (1.1)$$

де величини $u_{\nu} d\nu$ і $u_{\lambda} d\lambda$ мають зміст об'ємної густини променевої енергії, що припадає на інтервал частот $\nu, \nu + d\nu$ або інтервал довжин хвиль $\lambda, \lambda + d\lambda$. Коефіцієнт u_{ν} і u_{λ} називаються спектральними густинами променевої енергії. Для випадку рівноважного випромінювання функції u_{ν} і u_{λ} залежать тільки від частоти ν (або довжини хвилі λ) та від температури випромінювання T і не залежать від форми та матеріалу стінок порожнини. Для випадку, коли у

порожнині вакуум, u_ν буде універсальною функцією тільки ν і T , а u – універсальною функцією тільки T . Встановлення функціональної залежності $u_\nu = f(\nu, T)$ в явній формі є основним завданням теорії теплового випромінювання.

Перед тим, як аналізувати закони теплового випромінювання і поглинання тіл, введемо ще ряд необхідних понять.

Випромінювальна здатність $E(T)$ чисельно дорівнює енергії, яку випромінює тіло при даній температурі з одиниці поверхні за одиницю часу в усьому інтервалі частот.

Спектральна випромінювальна здатність тіла $E(\nu, T)$ чисельно дорівнює енергії, що випромінюється при заданій температурі одиницею поверхні за одиницю часу в інтервалі частот $\nu, \nu + d\nu$ або інтервалі довжин хвиль $\lambda, \lambda + d\lambda$.

Повна (сумарна, інтегральна) випромінювальна здатність тіла визначається за наступною формулою:

$$E(T) = \int_0^\infty E(\nu, T) d\nu = \int_0^\infty E(\lambda, T) d\lambda \quad (1.2)$$

Якщо інтервали $d\nu$ і $d\lambda$ стосуються однієї й тієї самої частини спектра, то

$$E(\nu, T) d\nu = E(\lambda, T) d\lambda \quad (1.3)$$

Оскільки $\nu\lambda = c$, то $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ і вираз (1.3) набуває вигляду

$$E(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^2} E(\nu, T) \quad (1.4)$$

Із збільшенням частоти довжина хвилі зменшується, а нас цікавить абсолютне значення величини, тому знак мінус опустимо.

Поглинальна здатність тіла $A(T)$ показує, яку частину падаючого випромінювання поглинає тіло при заданій температурі.

Спектральна поглинальна здатність тіла $A(\nu, T)$ або $A(\lambda, T)$ показує, яку частину падаючого випромінювання в інтервалі частот $\nu, \nu + d\nu$ ($\lambda, \lambda + d\lambda$) тіло поглинає при заданій температурі. В 1859р. Г. Кірхгофом було введено поняття абсолютно чорного тіла. Це тіла, які здатні повністю поглинати

падаюче на них випромінювання всіх довжин хвиль при будь-яких температурах.

Поглиналина здатність таких тіл

$$A(T) = A(\nu, T) = A(\lambda, T) = 1 \quad (1.5)$$

За аналогією поглинальної здатності вводять поняття відбивної здатності $R(T)$ і спектральної відбивної здатності тіла $r(\nu, T)$ або $r(\lambda, T)$. Між спектральною об'ємною густиною енергії рівноважного випромінювання і спектральною випромінювальною здатністю абсолютно чорного тіла існує такий зв'язок:

$$u(\nu, T) = \frac{4}{c} E(\nu, T) \quad (1.6)$$

У природі абсолютно чорних тіл не існує. Наближенням до абсолютно чорного тіла є замкнута порожнина, у стінці якої зроблено малий отвір (рис. 1). Якщо стінки порожнини непрозорі, то за досить малих розмірів отвору в порожнині встановиться випромінювання, яке майже не відрізняється від рівноважного. Через отвір стінки порожнини виходитиме практично таке ж випромінювання, яке б випромінювалось при тій же температурі абсолютно чорною поверхнею, форма і розміри якої однакові з отвором порожнини. Основною властивістю абсолютно чорного тіла є незалежність характеру випромінювання і поглинання від природи та стану поверхні тіла.

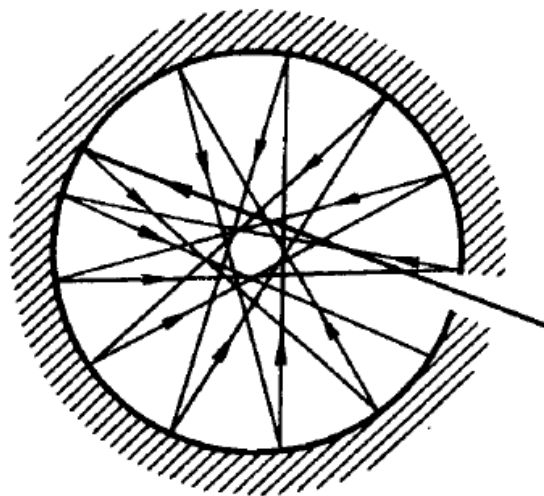


Рисунок 1.1 — Модель абсолютно чорного тіла

Випромінювальна здатність і розподіл енергії випромінювання за довжинами хвиль реальних тіл залежать від температури, хімічного складу і фізичною стану тіла та його поверхні. Незважаючи на прояв індивідуальних особливостей різних тіл, їх випромінювання має підлягати певним загальним законам. Розглянемо їх.

1.2 Закон Кірхгофа

Одним із таких фундаментальних законів теорії тепловою випромінювання є закон Кірхгофа, він являє собою кількісне узагальнення встановленого емпірично правила П. Прево (1751-1839) у 1809р., яке формулюється так: якщо поглинальні здатності тіл різні, то будуть різними і їх випромінювальні здатності.

Закон Кірхгофа ґрунтується на другому законі термодинаміки і встановлює залежність між випромінювальною і поглинальною здатностями тіл, а саме: відношення випромінювальної здатності тіла при деякій частоті і температурі до поглинальної здатності цього тіла при тій же частоті і температурі не залежить від природи тіла і являє собою універсальну функцію частоти і температури, яка дорівнює випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла при тій же частоті і температурі, тобто

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T) \quad (1.7)$$

де $f(\nu, T)$ - функція Кірхгофа.

Якщо позначити спектральну випромінювальну здатність абсолютно чорною тіла через $e(\nu, T)$, то через неї закон Кірхгофа запишеться так:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = \frac{e(\nu, T)}{1} = f(\nu, T) \quad (1.8)$$

звідки випливає, що функція Кірхгофа є функцією розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорною тіла.

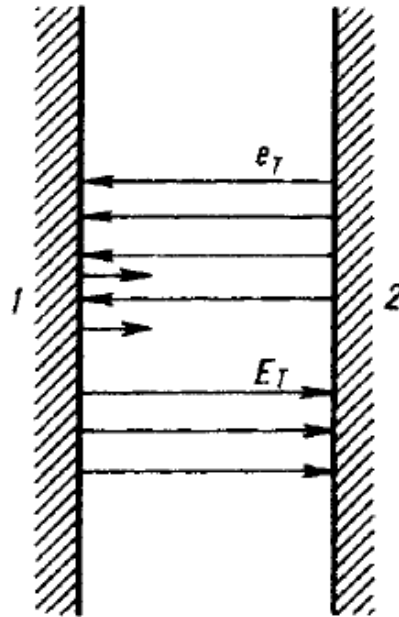


Рисунок 1.2 — Доведення закону Кірхгофа

Закон Кірхгофа для інтегральних значень випромінювальної і поглинальної здатностей тіла записується так:

$$\frac{E(T)}{A(T)} = \frac{e(T)}{1} = e(T) \quad (1.9)$$

Для доведення закону Кірхгофа уявімо довільне тіло у вигляді нескінченної однорідної пластини 1 (Рисунок 1.2). Паралельно до неї розміщено пластину 2, яка являє собою абсолютно чорне тіло. Позначимо випромінювальні і поглинальні здатності тіл 1 і 2 для заданої температури T відповідно $E_T = E(T), A(T)$; $e_T = e(T), a(T) = 1$. Створивши вакуум між пластинами, теплообмін здійснюватиметься тільки за допомогою випромінювання. Між тілами і випромінюванням, що заповнює простір між ними, через певний проміжок часу настане термодинамічна рівновага і тіла матимуть температуру T . При цьому одиниця поверхні кожного тіла за одиницю часу поглинатиме стільки енергії, скільки втрачає на випромінювання. Запишемо рівняння балансу для тіл 1 і 2 відповідно

$$E(T) = A(T)e(T); e(T) = E(T) + [1 - A(T)]e(T) \quad (1.10)$$

звідки одержуємо формулу (1.3).

Оскільки для реальних тіл $A(T) < 1$, то при одній і тій самій температурі абсолютно чорне тіло має найбільшу випромінювальну здатність. Будь-яке тіло при заданій температурі випромінює хвилі переважно тих довжин, які воно при тій самій температурі поглинає, це твердження випливає із закону Кірхгофа.

1.3. Закон Стефана - Больцмана. Закон Віна. Формула Релея – Джинса

У 1879 р. Й. Стефаном (1835-1893) була експериментально одержана залежність випромінювальної здатності абсолютно чорною тіла від температури. Ця залежність в 1884 р. за допомогою методів термодинаміки теоретично виведена Л. Больцманом. Тому закон має назву Стефана – Больцмана. Аналогія між термодинамічними властивостями рівноважного випромінювання й ідеального газу, покладена в основу доведення цієї теорії. Суть цієї аналогії полягає в тому, що як енергія ідеального газу, так і енергія рівноважного випромінювання, залежать тільки від температури; як газ, так і випромінювання здатні створювати тиск при взаємодії з поверхнею тіла. З'ясовано, що випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню температури.

$$e(T) = \sigma T^4 \quad (1.11)$$

Формула (1.11) виражає закон Стефана – Больцмана: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ називається сталою Стефана - Больцмана. Її величина визначається за даними досліду.

На основі закону Кірхгофа може бути визначена випромінювальна здатність реальних тіл.

$$E(T) = A(T)\sigma T^4 \quad (1.12)$$

Залежність інтегральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від температури встановлює закон Стефана - Больцмана, але він

не розкриває характеру розподілу енергії випромінювання за довжинами хвиль або частотами, тобто конкретний вигляд функції Кірхгофа $f(\nu, T)$ залишається невідомим.

У 1866 р. В. Ленглей за допомогою болометра експериментально одержав криві розподілу енергії в спектрі випромінювання чорної сажі для різних температур. Досліди показали, що для валових температур максимуми енергії випромінювання припадають на певні довжини хвиль, причому величина максимуму збільшується з підвищенням температури і зміщується у бік коротких довжин хвиль.

У 1893 р. В. Він встановив характер залежності спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла $e(\nu, T)$ від частоти і температури, користуючись законами електродинаміки та термодинаміки. Було встановлено, що величина $e(\nu, T)$ прямо пропорційна кубу частоти і є функцією відношення ν/T , тобто

$$e(\nu, T) = \nu^3 F(\nu/T) \quad (1.13)$$

де $F(\nu/T)$ - функція, конкретний вигляд якої В. Віну був невідомий. Одержана В. Віном залежність (1.11) не була встановлена в конкретному вигляді, але з неї виведено ряд важливих висновків. Використовуючи вираз (1.13) легко одержати підтвердження закону Стефана - Больцмана. У разі переходу від частоти ν до λ вираз (12) набуває вигляду

$$e(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^2} e(\nu, T) = \frac{c^4}{\lambda^5} F\left(\frac{c}{\lambda T}\right) \quad (1.14)$$

Якщо величина $e(\lambda), T$ досягає максимуму то довжину хвилі λ , можна визначити за формулою (1.14). При ньому було встановлено *закон зміщення Віна*

$$\lambda_{max} T = b \quad (1.15)$$

де $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - стала Віна.

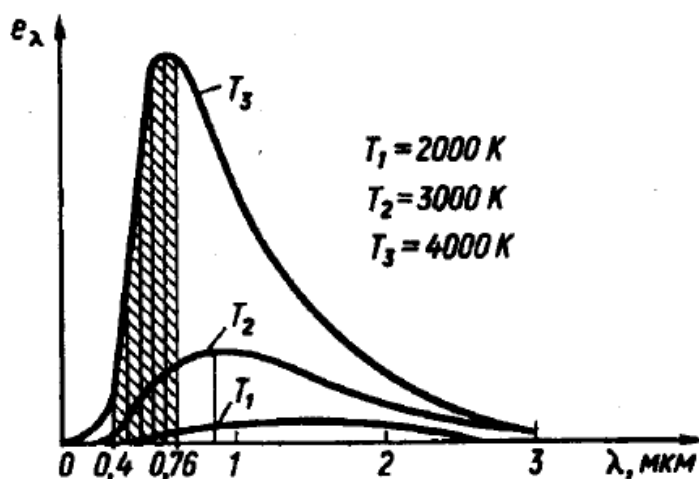


Рисунок 1.3 — Розподіл енергії у спектрі випромінювання чорного тіла для різних температур

Довжина хвилі λ_{max} , на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності, при підвищенні температури зміщується в бік коротких хвиль та визначається за законом Віна (1.14).

Графік розподілу енергії у спектрі випромінювання чорного тіла для різних температур (Рисунок 1.3) показує, що для наведених температур максимумами кривих припадають на ІЧ частину спектра. Заштриховані площі під кривими розподілу для інтервалу довжин хвиль 0,4 до 0,76 мкм показують, яка саме частина енергії випромінювання припадає на видиму частину спектра при заданих температурах.

Користуючись формулами (1.14) і (1.15), знаходимо, що спектральна випромінювальна здатність для довжини хвилі, на яку припадає максимум випромінювання, пропорційна п'ятому степеню температури, тобто

$$e(\lambda_{max}, T) = \frac{c^4}{b^5} T^5 f\left(\frac{c}{b}\right) = aT^5 \quad (1.16)$$

де $a = \frac{c^4}{b^5} T^5 f\left(\frac{c}{b}\right)$ - стала величина.

Конкретний вигляд функції розподілу енергії випромінювання абсолютно чорного тіла одержати неможливо, тому що встановлення

закономірностей теплового випромінювання відбувалося на основі законів термодинаміки.

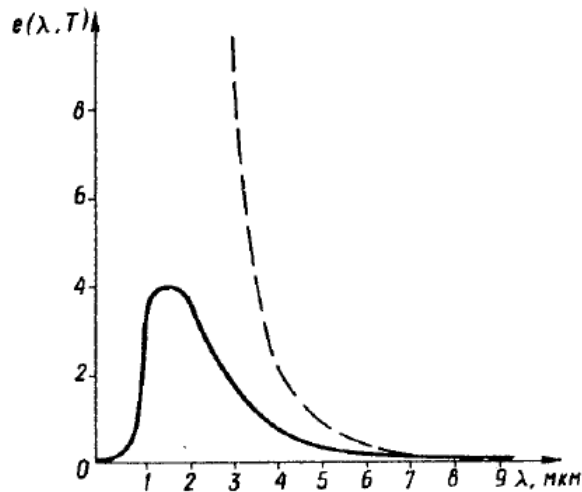


Рисунок 1.4 — Розбіжність експерименту з теорією у формулі Релея-Джинса

На відміну від своїх попередників, Дж. Релей і Дж. Джинс (1877-1946), щоб одержати закони теплового випромінювання, застосували методи статистичної фізики, розглядаючи рівноважне випромінювання в порожнині як сукупність стоячих хвиль різних частот і довільних орієнтацій площин поляризації. За законом рівномірного розподілу енергії рівноважної системи за ступенями вільності, було встановлене співвідношення

$$e(\nu, T) = \left(\frac{2\pi\nu^2}{c^2} \right) kT \quad (1.17)$$

яке називається формулою Релея - Джинса. Для великих частот формула непридатна. Вона описує розподіл енергії для малих частот в довгохвильовій частині спектра випромінювання. Розбіжність між експериментальною кривою (суцільна лінія) і кривою, одержаною за допомогою формули Релея - Джинса (штрихова крива), видно з рис. 4. Крім того, спроба вивести закон Стефана - Больцмана за допомогою формули Релея - Джинса призвела до абсурдного результату, а саме:

$$e(T) = \int_0^\infty \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT d\nu = \infty \quad (1.18)$$

Ситуація, що створилась у теорії теплового випромінювання, образно була названа П. Еренфестом “ультрафіолетовою катастрофою”.

1.4 Формула Планка

Для одержання функції розподілу енергії в спектрі випромінювання треба враховувати додаткові дані, що стосуються механізму випромінювання.

У 1900 р. М. Планк спочатку за результатами дослідних даних одержав емпіричний вираз функції $e(\nu, T)$, а потім теоретично і формулу на основі таких припущень: випромінювання є результатом коливання атомних лінійних вібраторів, які збуджують електромагнітні хвилі будь-яких частот подібно до вібраторів Герца; вібратор випромінює енергію не безперервно, а певними порціями - квантами; енергія кванта, яка випромінюється вібратором, залежить від частоти випромінювання.

Формула Планка в змінних ν і T має вигляд

$$e(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.19)$$

а в змінних λ і T на основі формули (1.9) відповідно

$$e(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \quad (1.20)$$

де $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с - стала Планка.

Формула Планка справедлива для будь-яких частот і температур, з неї випливають всі відомі закони випромінювання абсолютно чорною тіла (закон Стефана - Больцмана, закон зміщення Віна та ін.). Виведемо ці закони на основі формули Планка. Сумарна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла

$$e(T) = \int_0^\infty e(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^\infty \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.21)$$

Ввівши безрозмірну змінну інтегрування $x = \frac{h\nu}{kT}$, надамо виразу (1.21)

такого вигляду

$$e(T) = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4 \quad (1.22)$$

де $\sigma = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$. Оскільки $\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$, то

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \quad (1.22)$$

Отже, формула Планка дає змогу не тільки встановити закон Стефана-Больцмана, але й знайти величину сталої σ .

Розв'язавши рівняння знайдемо довжину хвилі, на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності при заданій температурі

$$\frac{de(\lambda, T)}{d\lambda} = 0 \quad (1.23)$$

З формули (1.21) маємо

$$\frac{\frac{hc}{kT\lambda^2} e^{hc/kT\lambda}}{e^{hc/kT\lambda} - 1} - \frac{5}{\lambda} = 0 \quad (1.24)$$

Ця умова виконується, коли

$$\frac{hc}{kT\lambda} e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 5e^{\frac{hc}{kT\lambda}} + 5 = 0 \quad (1.25)$$

Ввівши змінну $x = \frac{hc}{kT\lambda}$, одержуємо трансцендентне рівняння

$$xe^x - 5e^x + 5 = 0 \quad (1.26)$$

розв'язком якого є $x = 4,965$. Тоді

$$T\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965k} = b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad (1.27)$$

Отже, з формули Планка одержуємо закон зміщення Віна і величину сталої Віна b .

Випромінювання всіх твердих тіл, рідин і газів характеризується нерівномірним розподілом енергії у спектрі випромінювання, а їхні інтегральні і спектральні поглинальні здатності завжди менші, ніж в абсолютно чорного тіла.

Якщо спектр випромінювання тіла суцільний, а розподіл енергії за довжинами хвиль подібний до розподілу енергії у спектрі абсолютно чорного тіла, то такі тіла називаються сірими. Для сірих тіл при заданій температурі

$$\frac{E(\lambda, T)}{e(\lambda, T)} = \text{const} = A(T) \quad (1.28)$$

Тіла, для яких умова (1.10) не виконується, називаються селективними. Випромінювання реальних тіл у деякій мірі має селективний характер. Оскільки гази випромінюють хвилі у певних, порівняно вузьких ділянках спектра, для них характерна найбільша селективність випромінювання.

Сірих тіл, так само, як і абсолютно чорних, у природі не існує. В інтервалі довжин хвиль від фіолетової до далекої ІЧ частини спектра для жодного тіла умова (1.28) не виконується. Однак для різних тіл у деяких частинах спектра умова (1.28) справджується з певною точністю[10].

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

1. Розглянуто закони теплового випромінення, як фізичні основи інфрачервоної термографії. Визначено, що теплове випромінювання відбувається за рахунок теплового руху атомів і молекул та розглянуто його основні властивості.

2. Визначено, що випромінювання твердих тіл, рідин і газів характеризується нерівномірним розподілом енергії у спектрі випромінювання, а їхні інтегральні і спектральні поглинальні здатності завжди менші, ніж у абсолютно чорного тіла.

3. Визначено, що наявність безпосереднього зв'язку інтенсивності теплового випромінювання тіла з його температурою, надає можливість здійснювати дистанційне вимірювання температури шляхом реєстрації теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні спектру.

РОЗДІЛ 2 СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ТЕРМОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

2.1 Фізична модель отримання тепловізійної інформації.

Той факт, що ІЧ випромінювання є функцією температури поверхні об'єкта, надає можливість за допомогою термографа розраховувати і відображати цю температуру.

Теплова енергія, що надходить від об'єкту досліджень $W_{об}$, як джерела інфрачервоного випромінювання, з температурою $T_{об}$, створює на виході термографа сигнал $U_{вих}$ пропорційний тепловому випромінюванню об'єкта досліджень на вході термографа (Рисунок 2.1).

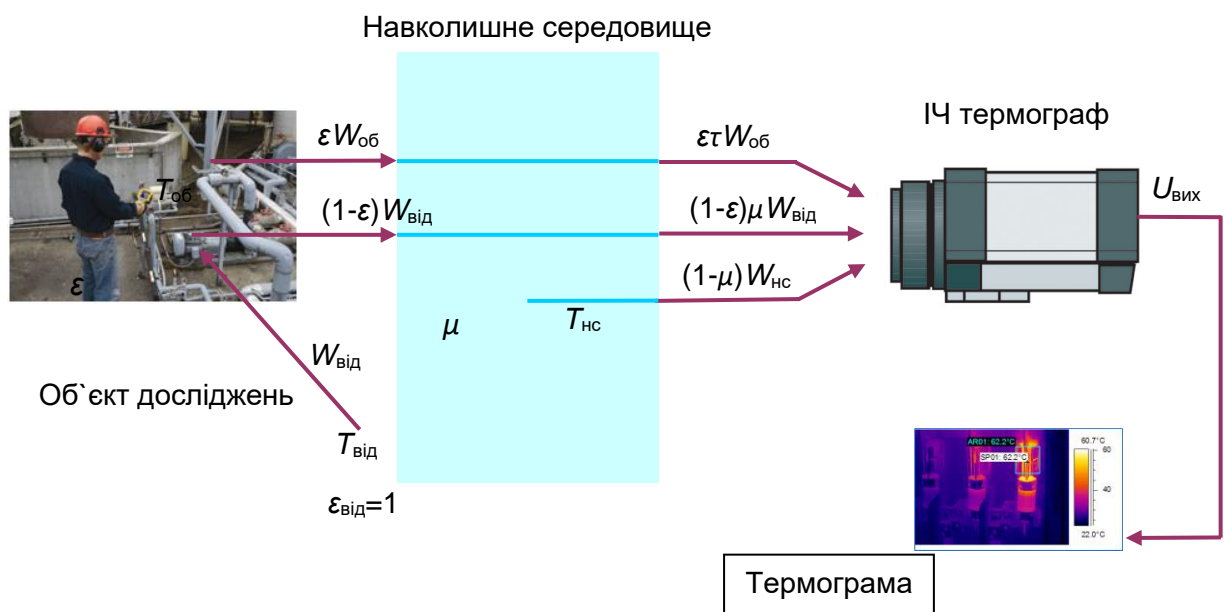


Рисунок 2.1— Функціональна схема отримання термограми об'єкта досліджень:

ϵ – коефіцієнт випромінювання об'єкта досліджень (випромінювальна здатність); μ – коефіцієнт пропускання атмосфери; $T_{від}$ – відбита температура;

$T_{нс}$ – температура навколишнього середовища

Тоді можна записати: $U_{\text{бо}} = cW_{\text{бо}}$, де $c = \text{const}$ (2.1)

Якщо об'єкт досліджень має випромінювальну здатність ε , то $U_{\text{бо}} = \varepsilon W_{\text{бо}}$.

Але при проведенні інфрачервоних досліджень об'єкта, термограф фіксує випромінювання не тільки від об'єкту досліджень, а і від навколишнього середовища яке відбивається поверхнею об'єкта досліджень. Обидві ці складові, в певній мірі, послаблюються при проходженні скрізь атмосферу на шляху до термографа, що є третьою складовою.

З урахуванням цього можна записати три складові температури, що фіксуються термографом.

1. Температура об'єкту досліджень:

$$T_{\text{бо}} = \varepsilon \mu W_{\text{бо}}. \quad (2.2)$$

2. Відбита температура:

$$T_{\text{від}} = (1 - \varepsilon) \mu W_{\text{від}}. \quad (2.3)$$

3. Температура навколишнього середовища:

$$T_{\text{нс}} = (1 - \mu) \mu W_{\text{нс}}. \quad (2.4)$$

Загальна теплова енергія дорівнює:

$$W = \varepsilon \mu W_{\text{бо}} + (1 - \varepsilon) \mu W_{\text{від}} + (1 - \mu) W_{\text{нс}}. \quad (2.5)$$

Далі, з урахуванням рівняння (2.1), отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = \varepsilon \mu U_{\text{бо}} + (1 - \varepsilon) \mu U_{\text{від}} + (1 - \mu) U_{\text{нс}}. \quad (2.6)$$

Тоді загальний вигляд сигналу на вході термографа можна представити рівнянням:

$$U_{\text{бо}} = \frac{1}{\varepsilon \mu} U_{\text{вих}} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} U_{\text{від}} - \frac{1 - \mu}{\varepsilon \mu} U_{\text{нс}}, \quad (2.7)$$

де $U_{об}$ – напруга, яка може бути перетворена безпосередньо в дійсну температуру у вигляді термограми; $U_{вих}$ – вимірювана вихідна напруга термографа для даного випадку; $U_{від}$ – теоретична вихідна напруга термографа для відбитої температури; $U_{нс}$ – теоретична вихідна напруга термографа для температури навколишнього середовища [28]

Компенсація згаданих вище ефектів здійснюється сучасними термографами автоматично в режимі реального часу, однак перед проведенням досліджень в термограф необхідно ввести наступні параметри:

- Коефіцієнт випромінювання (для людини $\varepsilon = 0,98$);
- Температура навколишнього середовища (використовується термографом для компенсації випромінювання, відбитого від об'єкта досліджень і атмосфери);
- Відстань між об'єкта досліджень і об'єктивом термографа (використовується для врахування поглинання випромінювання атмосферою, а також зменшення пропускання зі збільшенням відстані);
- Відносна вологість повітря (для відстаней від 0,1 м до 3 м та нормальній вологості, можна залишати цей параметр за умовчанням 50%).

Представлена на Рисунку 2.1. ситуаційна модель є досить близькою до реальних умов проведення термографічних досліджень з урахуванням певних обмежень, а саме: зважаючи на невелику відстань від об'єкту досліджень до об'єктиву термографа (від 0,1 до 3 м), впливом атмосфери можна знехтувати [26].

2.2 Цифровий контактний термограф

Цифровий контактний термограф (Рисунок. 2.2) складається зі сканера з 36 теплочутливих датчиків, що дозволяють вимірювати температуру з роздільною здатністю 0,06 °C і перетворювати її в цифровий код для

подальшої обробки про інформацію поверхонь молочних залоз. Принцип дії заснований на контактному вимірюванні температури поверхні шкіри одночасно великою кількістю датчиків. Датчики організовані у вигляді квадратної матриці (сканера) розміром 6 x 6 см. Моментальний замір температури 36 напівпровідниковими цифровими датчиками проводиться з ділянки молочної залоз та площею приблизно 40 см². Переміщуючи сенсор по поверхні шкіри можна було отримати повну термографічну картину молочних залоз. Отримана термомамограма з'являється на екрані комп'ютера в кольоровому або чорно-білому варіантах.



Рисунок 2.2 — Цифровий контактний термомамограф

Термомамограф дозволяє визначити температуру кожного датчика з отриманої термограми, тобто температуру ділянки шкіри площею 1 см².

У аналітичну комп'ютерну програму включено до 30 ознак для кількісної оцінки отриманих даних при термомамографії. Термомамограф дозволяє сформувати інтерпольовані термограми, вивести на принтер протокол, який містить відомості про пацієнтку, термограму, результати статистичної обробки термограми, а також висновок лікаря. Прилад має роздільну здатність 0,06 °C і дозволяє відобразити температуру в діапазоні від 20 ° до 38 °C.



Рисунок 2.3 — Блок-схема цифрового контактного термомамографа

Блок-схема приладу представлена на Рисунку 2.3 Датчики являють собою мікропроцесори, здатні вимірювати температуру з дискретністю $1/16$ °С, протягом секунди перетворювати температуру в цифровий код і пересилати цей код в комп'ютер для обробки і зберігання. Теплова інерційність датчиків 10-15 с, вони не вимагають калібрування. На термограмі можна відобразити температуру до 1152 точок. Ці властивості датчиків дозволяють проводити обробку отриманої інформації в реальному масштабі часу, формалізувати діагностичні параметри і автоматизувати первинну діагностику[37,13].

Одним з недоліків такого методу є нерівномірність контакту термочутливої пластинки з епітелієм, знижує точність методу.

2.2 Будова тепловізора

Принцип роботи всіх тепловізорів описується таким алгоритмом (Рисунок. 2.4):

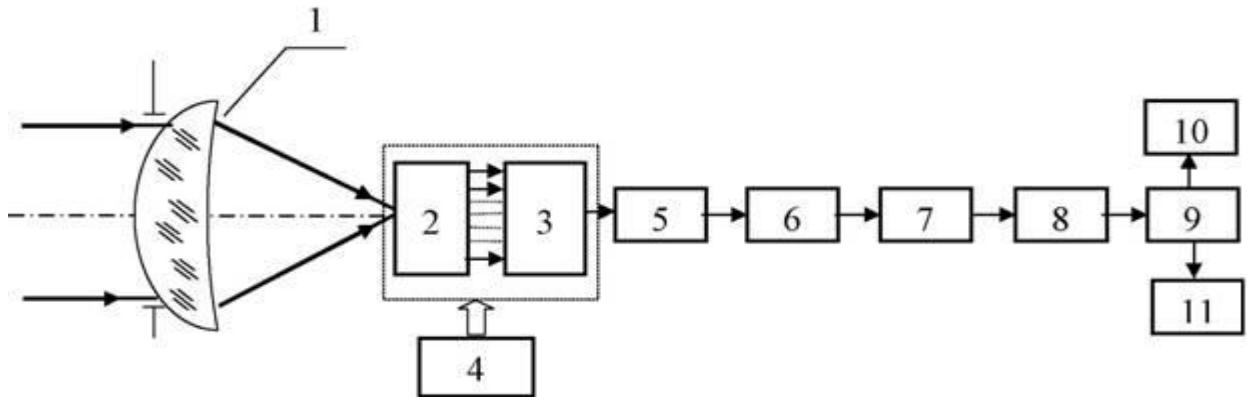


Рисунок 2.4 — Схема тепловізора:

1 - оптична система; 2 - фокальна матриця з підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор непрацюючих осередків; 9 - формувач зображення; 10 - монітор; 11 - цифровий вихід

- Об'єktiv тепловізора формує на сенсорі температурну картину всієї зони спостереження.
- Процесор і інші електронні компоненти конструкції зчитують дані з матриці, обробляють їх і формують на моніторі зображення, що є візуальною інтерпретацією даних теплової характеристики, яке можливо побачити безпосередньо або через окуляр .

2.3 Фоточутливі приймачі, які застосовуються в термографах

2.3.1 Болومتر

Болومتر – це приймач теплового випромінювання на основі сенсора, що змінює електричний опір в залежності від поглинутої температури ІЧ випромінювання.

Вловлюючи ці зміни, електронна схема формує вихідний сигнал, який являє собою діаграму розподілу температур по матриці. Для цього на матрицю періодично подається струм зміщення і вимірюється величина отриманої напруги. Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення болOMETричних детекторів в даний час є полікристалічний окис ванадію. Завдяки прогресу технологій виробництва напівпровідникових компонентів, виробники тепловізорів на мікроболометрах зуміли ефективно вирішити проблему розкиду параметрів окремих пікселів при мініатюризації приладів (це основне джерело власних шумів матриці). Сучасні неохолоджувані камери здатні вловити різницю температур в 0,07 К. Одна з технічних тонкощів у проектуванні подібних матриць відеокамери внутрішнього купольного типу - розрахунок розміру ніжок осередки: вони повинні бути досить малі, щоб забезпечити задані теплоізоляційні властивості, і досить великі для того, щоб встигати знизити температуру води протягом інтервалу сканування пікселів (в іншому випадку на наступне вимірювання опору буде впливати результат попереднього).

Ще однією суттєвою перевагою мікроболометрів перед фотоелектричними сенсорами, крім відсутності потреби в охолодженні, є те, що діаграма їх спектральної чутливості має практично пласку форму у всьому діапазоні частот ІЧ променів. Сучасні мікроболометричні матриці мають час реакції в декілька сотих часток секунди, що дозволяє їм забезпечувати формування стандартного телевізійного сигналу в реальному масштабі часу зі стандартною частотою кадрів. Це частково компенсує їх відставання від

охолоджуваних детекторів по чутливості. Багато різновидів мікроболометрів потребують температурної стабілізації, яка реалізується за допомогою термовентилятора. Як правило, сенсор і вентилятор укладені в герметичний корпус, термічно ізольований від решти компонентів камери. Це гарантує потрапляння на сенсор лише ІЧ-промені, що випускаються спостережуваними об'єктами. Ряд виробників користуються схемами електронної температурної компенсації, що дозволяють виключити застосування термовентиляторів. Порівняно недавно виник і абсолютно новий вид детекторів ІЧ випромінювання на базі мікро-кантильової технології. За чутливістю вони в десять разів перевершують мікроболометр, наближаючись до теоретичних меж чутливості матеріалів до ІЧ променів.

2.3.2 Приймачі ІЧ-зображення на основі термомеханічних нанорозмірних мембран

Останнім часом поряд з традиційними приймачами болометричного типу активно розробляються і досліджуються неохолоджувані ІЧ-фотоприймачі на основі МОЕМС і НОЕМС мікро-інано-опто-електромеханічних елементів і систем.

Великий інтерес представляють, зокрема, детектори на біматеріальних шарах. Оцінки граничної чутливості таких приймачів [41, 31], показали, що вона може досягати кількох мілікельвінів NETD (Noise equivalent temperature difference (різниця температур, еквівалентна шуму)), що можна порівняти з граничними характеристиками фотоприймачів з глибоким охолодженням.

Пристрої з параметрами, близькими до граничних, можуть бути реалізовані в даний час на базі високорозвиненої технології МОЕМС / НОЕМС [41,14].

Принцип функціонування таких приймачів ІЧ-зображення базується на реєстрації вигину тонких двошарових біморфних (або багатошарових -

мультиморфної) мембран під впливом нагріву ІЧ-випромінюванням на базі відмінності коефіцієнтів термічного розширення матеріалів шарів. У представлених в літературі розробках мембрани виконуються зазвичай у вигляді тонких (менше ніж 1 мкм) балок - мікрокантільверів. На Рисунок 2.5, а, б схематично представлені принцип дії та чутливий елемент біморфного МОЕМС-детектора [44].

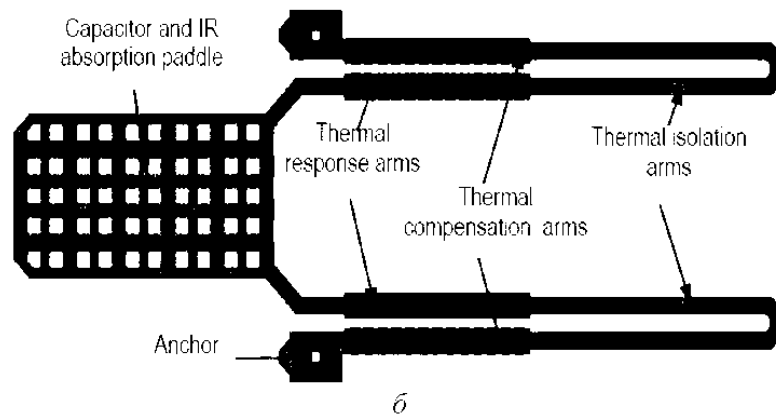
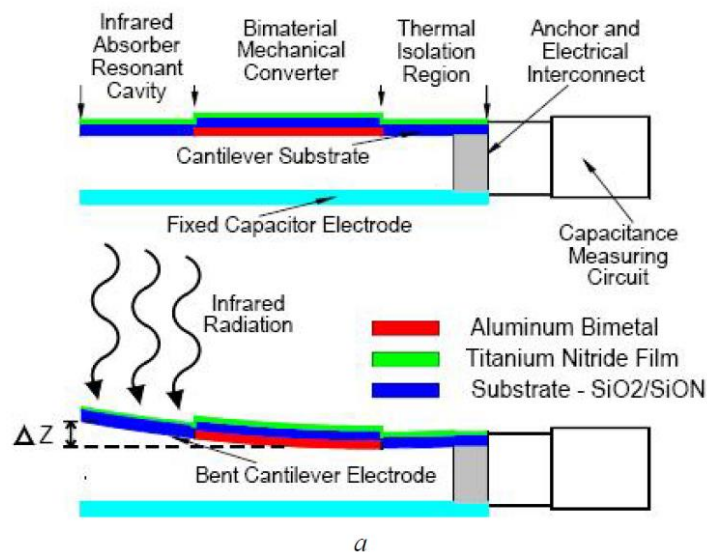


Рисунок 2.5 — Схема:

а) - функціонування детектора; б) – чутливого елемента

Відхилення кантільвера може реєструватися ємнісним методом. На рис. 8 представлена одна з можливих схем ємнісної реєстрації (мостова схема) [44].

Можливо також використання схем оптичного зчитування [43, 45].

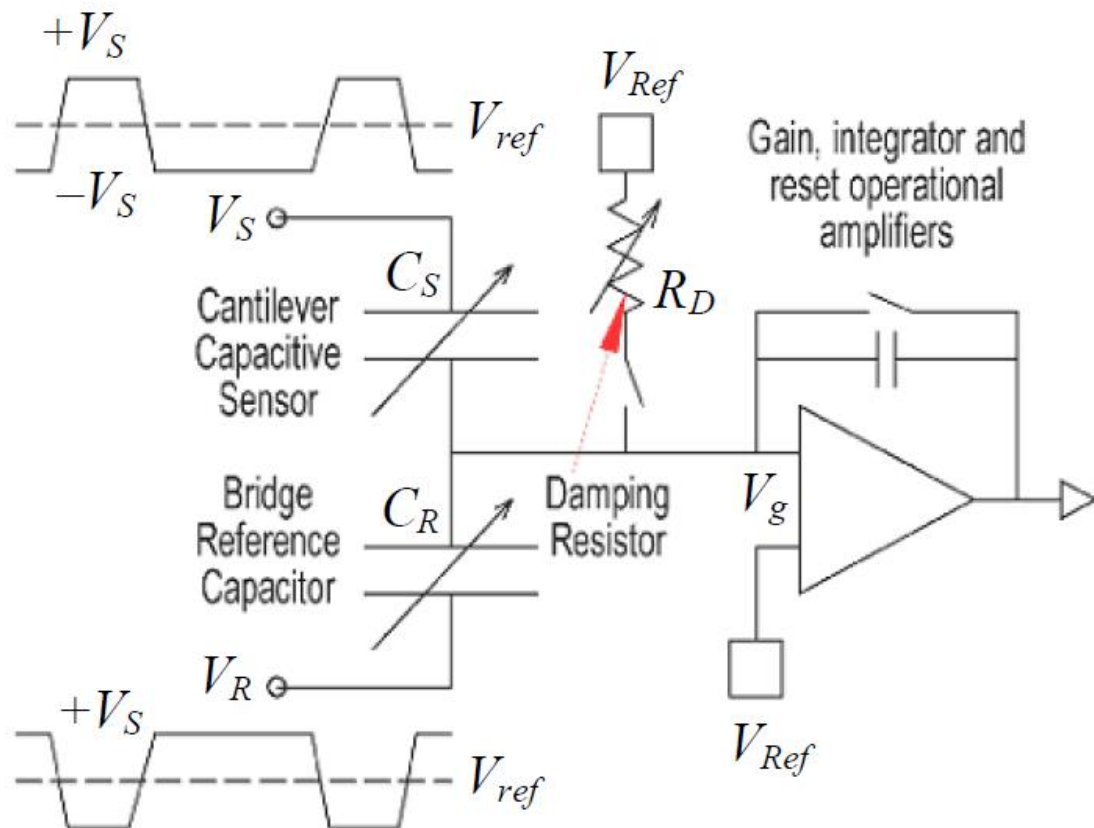


Рисунок 2.6 — Мостова схема реєстрації відхилення кантільовера

МОЕСМ-детектор розглянутого типу служить в якості елемента матричного ПЧ-приймача зображення. В роботі [44] повідомляється про створення і випробуванні приймача такого типу з числом елементів 160×120 і розміром пікселя 50 мкм з ємнісною системою зчитування на чіпі в вакуумованій мікросбірці.

Продемонстровані аналогічні пристрої з оптичною системою зчитування [43] - це гібридні пристрої. Як формувач відеосигналу в них використовуються кремнієві матриці ПЗС; система зчитування може включати фільтр просторових частот або будується по диференціальній схемі з поляризацією випромінювання.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

1. Визначено, що інфрачервона термографія як розділ фізики зародилася відносно недавно, але за невеликий проміжок часу змогла значно покращити методики збору температурних характеристик об'єктів.

2. Розглянуто способи отримання термографічних зображень. Показано, що на даному етапі термографи мало чим відрізняються від звичайних фотоапаратів, так, як використовують таку саму оптику, та матричні фотоприймачі, побудовані за аналогією матриць фотоапаратів.

3. Розглянута фізична модель отримання термографічних зображень, яка є близькою до реальних умов проведення досліджень з урахуванням певних обмежень.

4. Визначено, що наявність безпосереднього зв'язку інтенсивності теплового випромінювання тіла з його температурою, надає можливість здійснювати дистанційне вимірювання температури шляхом реєстрації теплового випромінювання об'єктів досліджень.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФРАЧЕРВОНИХ ТЕРМОГРАМ

3.1 Методи отримання зображень

3.1.1 Математичні моделі зображень

З курсу фізики добре відоме поняття оптичної системи, що здійснює перетворення зображень за певними правилами, що визначаються сукупністю використовуваних в ній оптичних елементів і їх взаємозв'язком.

З математичної точки зору під системою будемо розуміти правило L , що ставить у відповідність вхідній функції f вихідну функцію g . Розрізняють одномірні $1D$ і двовимірні $2D$ системи. Одномірні системи перетворюють функції однієї змінної:

$$g(x) = L[f(x)] \quad (3.1)$$

Відповідно двовимірні системи перетворюють функції двох змінних:

$$g(x, y) = L[f(x, y)] \quad (3.2)$$

Оптичні системи по суті своїй є двовимірними, але в деяких випадках можуть розглядатися як одномірні. Особливе місце серед всіляких систем займають лінійні системи. Система називається лінійною, якщо для неї справедливий принцип суперпозиції (накладення), який полягає в тому, що відгук системи на зважену суму двох вхідних впливів дорівнює зваженій сумі відгуків на кожне з впливів, тобто:

$$L[a_1 f_1(x, y) + a_2 f_2(x, y)] = a_1 L[f_1(x, y)] + a_2 L[f_2(x, y)] \quad (3.3)$$

Принцип суперпозиції можна виразити в більш загальному вигляді, розглядаючи довільне число M вхідних впливів:

$$L\left[\sum_{i=1}^M a_i f_i(x, y)\right] = \sum_{i=1}^M a_i L[f_i(x, y)] \quad (3.3)$$

У вивченні оптичних систем фундаментальну роль відіграє поняття точкового джерела світла. Точкове джерело світла описується дельта-функції Дірака:

$$\delta(x, y) = \begin{cases} \infty, & x = 0, y = 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (3.4)$$

Таким чином, точкове джерело володіє нескінченно великою щільністю яскравості в нескінченно малій просторовій області - в точці. Безумовно, це математична абстракція, проте виключно корисна у фізиці і допускає ясне фізичне трактування: дельта-функція може бути визначена як межа нормальної функції, наприклад:

$$\delta(x, y) = \lim_{a \rightarrow \infty} \{a^2 \exp[-a^2 \pi(x^2 + y^2)]\} \quad (3.5)$$

Згідно виразу (3.5) дельта-функція може розглядатися як нескінченно вузька функція розподілу (рис. 2).

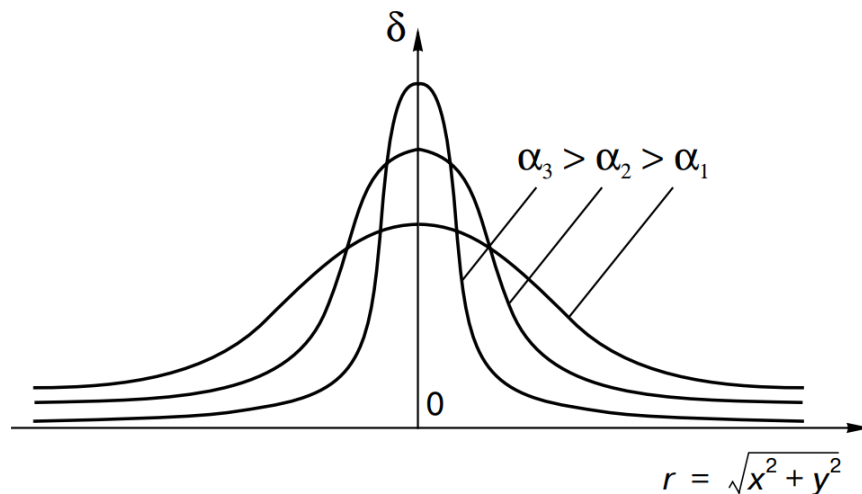


Рисунок 3.1 — Фізична трактовка дельта функції Дірака

Можна також ввести дельта-функцію, розташовану не над початком координат, а в довільній точці з координатами (u, v) , по формулі:

$$\delta(x, y) = \begin{cases} \infty, u = 0, v = 0 \\ 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Дельта-функція має такі важливі

властивості:

$$1. \text{ Властивість нормування: } \iint_D \delta(x, y) dx dy = 1 \quad (3.7)$$

Фізично це означає, що, хоча щільність яскравості точкового джерела нескінченна, енергія його обмежена і дорівнює одиниці.

$$2. \text{ Фільтруюча властивість: } \iint_D f(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) = f(x, y) \quad (3.8)$$

Де $f(x, y)$ - довільна функція двох змінних. Інтеграли в (3.7) і (3.8) беруться з нескінченно великої просторової області D . Докази властивостей 1) і 2) виконуються за допомогою підстановки в (3.7) і (3.8) виразу (3,3) і розкриття меж.

Розглянемо двовимірну лінійну систему, на вхід якої подано сигнал у вигляді дельта-функції. Реакція системи на дельта-функцію буде різною для різних систем, називається імпульсним відгуком і служить характеристикою 2D-системи. Систему називають просторово-інваріантною, якщо її імпульсний відгук залежить від різниці координат вхідний (x, y) і вихідний (ξ, η) площин. Для оптичної системи, показаної на рис. 3, це означає, що при переміщенні точкового джерела у вхідну область зображення цього предмету в площині спостереження буде також змінюватися положення, але зберігатися формі [26].

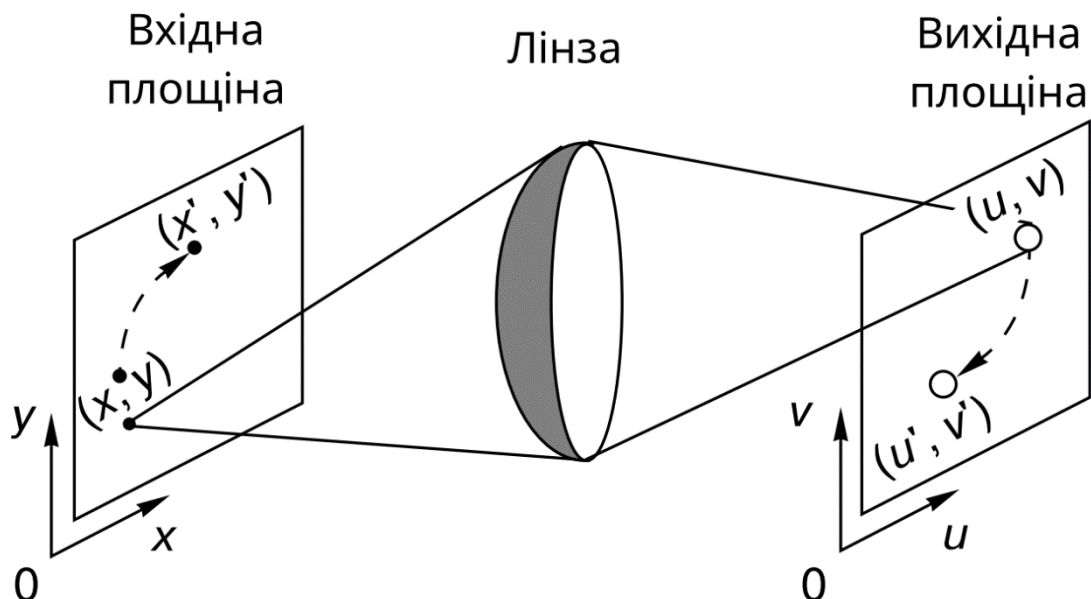


Рисунок 3.2 — Оптично просторово-інваріантна система

Для просторово-інваріантної системи імпульсний відгук описується функцією:

$$h(x-u, y-v) = h(\xi, \eta) \quad (3.9)$$

Де $\xi = x-u, \eta = y-v$.

Використовуючи функцію імпульсного відгуку, можна записати рівняння, що зв'язує зображення на вході і виході $2D$ -лінійної оптичної системи. Для цього представимо вхідний сигнал $f(x, y)$ у вигляді (3.8) і подамо його на вхід двовимірних системи з характеристиками $h(\xi, \eta)$. Вихідний сигнал запишемо у вигляді:

$$g(x, y) = L[f(x, y)] = L \left\{ \iint_a f(\xi, \eta) \delta(x-\xi, y-\eta) \right\} \quad (3.10)$$

Оскільки операція L лінійна і операція інтегрування в фігурних дужках (3.10) також лінійна, їх можна поміняти місцями і переписати у наступному вигляді:

$$g(x, y) = \iint_d f(\xi, \eta) L\{\delta(x - \xi, y - \eta)\} d\xi d\eta \quad (3.11)$$

Ураховуючи, що за визначенням

$$L\{\delta(x - \xi, y - \eta)\} = h(x - \xi, y - \eta) \quad (3.12)$$

остаточно отримуємо вираз, що зв'язує зображення у вхідній і вихідній площинах лінійної системи:

$$g(x, y) = \iint_d f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13) називається інтегралом згортки. З цього рівняння випливає, що, знаючи імпульсний відгук оптичної системи $h(\xi, \eta)$, можна розрахувати вихідне зображення по вхідному.

Процес згортки ілюструє Рисунок 3.3. На Рисунок 3.3 а) і 3.3 б) зображені функція $f(x, y)$ на вході і імпульсний відгук. На рис. 4а показаний імпульсний відгук при зверненні координат, а на Рисунок 3.3 г) - зі зрушенням на величину x, y . На Рисунок 3.3 д) заштрихована область, в якій $f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta)$, що входить в підінтегральний вираз (3.13), не дорівнює нулю. Інтегрування по цій області дає величину $g(x, y)$ для заданих значень координат x, y . Таким чином, функція $g(x, y)$ на виході може бути знайдена скануванням вхідної функції ковзаючим "вікном" - зверненим імпульсним відгуком, і інтеграцією по області, в якій ці функції перекриваються.

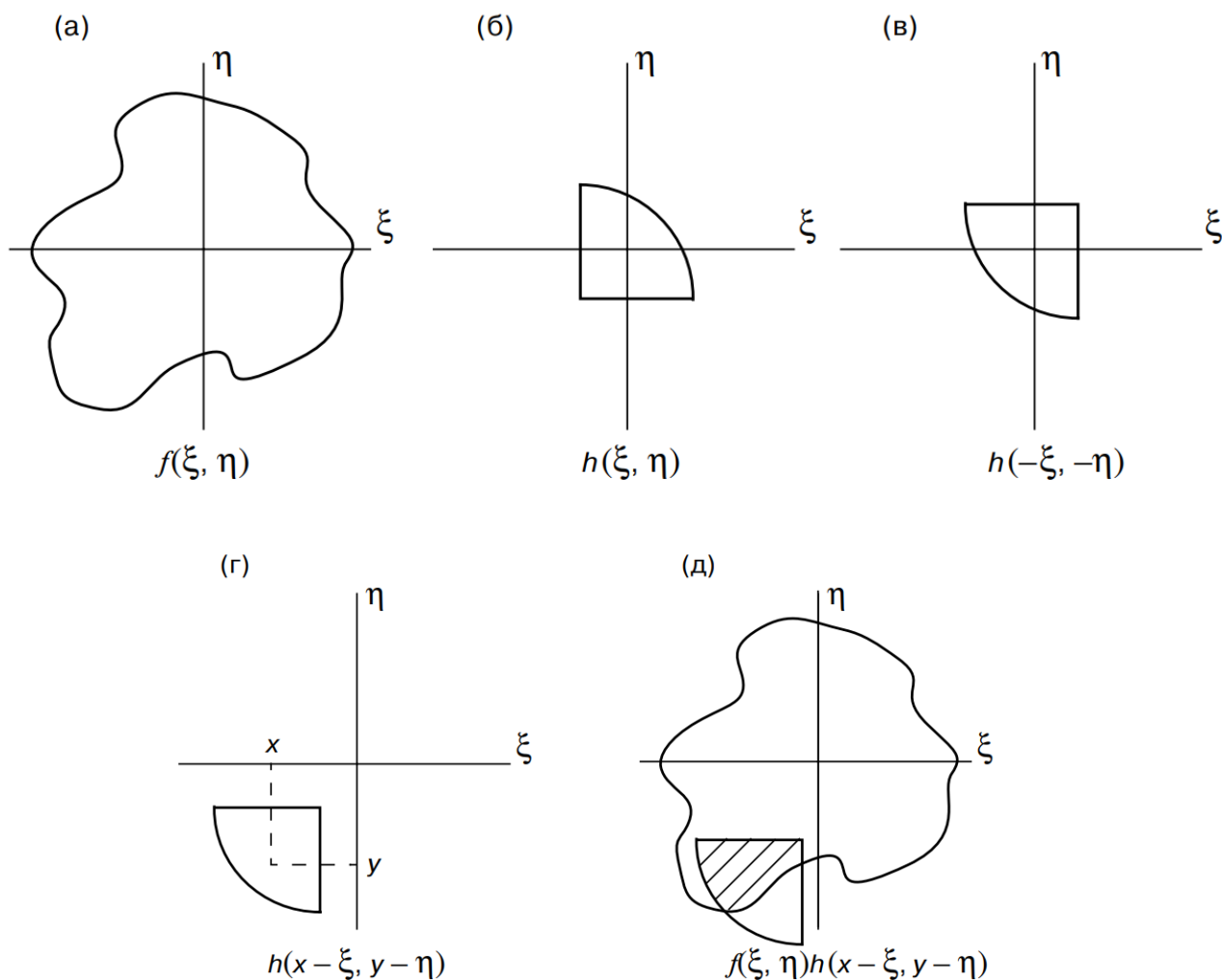


Рисунок 3.3 — Приклад двовимірної згортки

Технічне завдання, яке необхідно вирішити в комп'ютерній обробці зображень, - це введення оптичних зображень в пам'ять комп'ютера і висновок (візуалізація) зображень. На щастя, в сучасних комп'ютерах завдання візуалізації вирішена. Для цих цілей використовуються високо роздільні кольорові дисплеї і інша техніка відображення інформації. Введення зображень в пам'ять комп'ютера здійснюється за допомогою відеодатчиків. Вони переводять, оптично, розподіл яскравості зображення в електричні сигнали і далі в цифрові коди. Оскільки зображення є функцією двох просторових змінних, а електричний сигнал є функцією однієї змінної - часу, то для перетворення використовується розгортка. Наприклад, при

використанні телевізійної камери зображення зчитується по рядкам: рядок за рядком. При цьому в межах кожного рядка залежність яскравості від просторової координати x перетворюється в пропорційну залежність амплітуди електричного сигналу від часу t . Перехід від кінця попереднього рядка до початку наступного здійснюється практично миттєво. Широке застосування в якості відеодатчиків знаходять також матриці фотодіодів і матриці приладів із зарядним зв'язком. При використанні матричних відеодатчиків зображення як би спостерігається крізь екран з безліччю прозорих осередків. Число таких осередків для сучасних фотодатчиків дуже велике і складає величину 1024×1024 і більше (Рисунок 3.4).

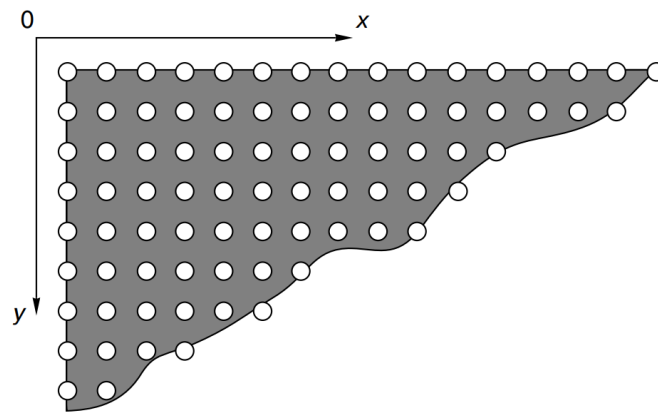


Рисунок 3.4 — Сегмент матричного фото датчика

Початкове зображення, як уже зазначалося, являє собою функцію двох безперервних аргументів. У той же час цифрова пам'ять комп'ютера здатна зберігати тільки масиви даних. Тому введення зображення в комп'ютер неминуче пов'язано з дискретизацією зображень по просторовим координатам і за яскравістю.

3.1.2 Дискретизація зображень

Розглянемо неперервну функцію зображення $f(x, y)$ – функцію двох просторових змінних x і y на обмежену прямокутну область:

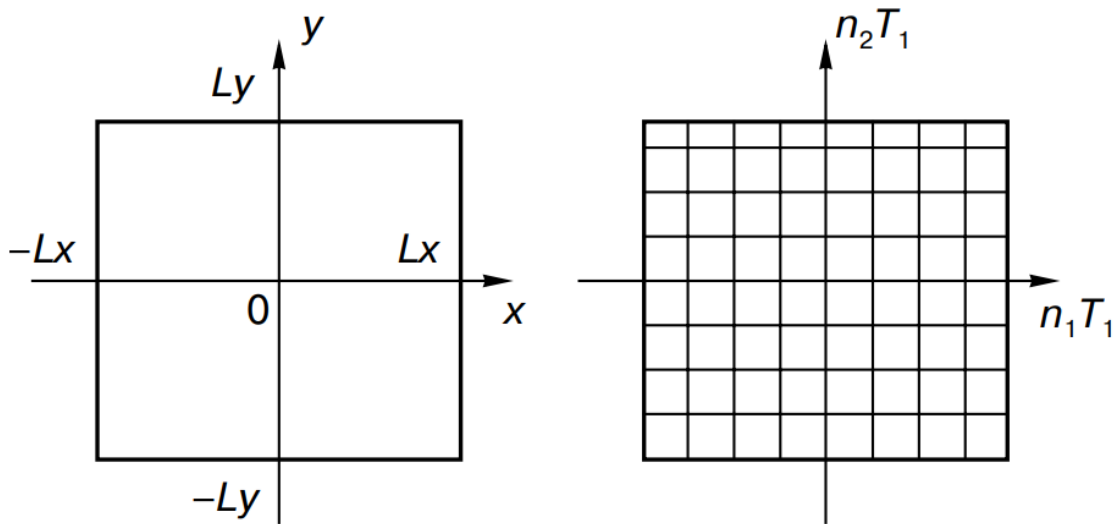


Рисунок 3.5 — Перехід від неперервного зображення до дискретного

Введемо поняття кроку дискретизації T_1 по просторовій змінній x і T_2 по змінній y . Наприклад, можна уявити, що в точках, віддалених одна від одної на відстань T_1 по осі x , розташовані точкові фотодатчики. Якщо такі фотодатчики встановити по всій прямокутній області, то зображення виявиться заданим на двовимірній решітці:

$$f(n_1T_1, n_2T_2) = f(x, y) \quad (3.14)$$

$$\text{Де } x = n_1T_1, y = n_2T_2$$

Для спрощення запису позначимо

$$f(n_1T_1, n_2T_2) = f(n_1, n_2) \quad (3.15)$$

Функція $f(n_1, n_2)$ є функцією двох дискретних змінних і називається двовимірною послідовністю. Тобто дискретизація зображення по просторовим змінним переводить його в таблицю вибірових значень. Розмірність таблиці

(число рядків і стовпців) визначається геометричними розмірами вихідної прямокутної області і вибором кроку дискретизації за формулою

$$M_x = \left[\frac{2L_x}{T_1} \right], M_y = \left[\frac{2L_y}{T_2} \right] \quad (3.16)$$

Якщо область визначення безперервного зображення - квадрат $L_x = L_y = L$ і кроки дискретизації обрані однаковим по осях x та y ($T_1 = T_2 = T$), то

$$M_x = M_y = M \quad (3.17)$$

тоді розмірність матриці складає M^2 .

Елемент таблиці, отриманої шляхом дискретизації зображення, називають піксель. Розглянемо піксель $f(n_1, n_2)$. Це число приймає безперервні значення.

Пам'ять комп'ютера здатна зберігати тільки дискретні числа. Тому для запису в пам'яті безперервна величина f повинна бути придана аналогово-цифровому перетворенню з кроком Δ

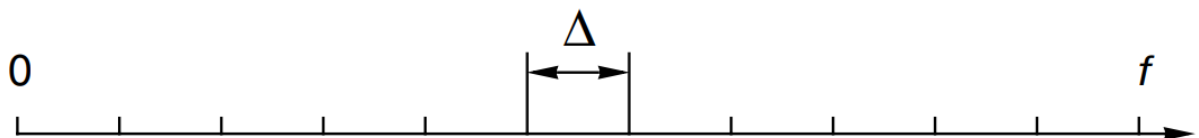


Рисунок 3.6 — Аналогово-цифрове перетворення неперервної величини f

Операцію дискретизації безперервної величини за рівнями часто називають квантуванням. Число рівнів квантування дорівнює:

$$K = \left[\frac{A}{\Delta} \right] \quad (3.18)$$

У практичних завданнях обробки зображень величина K варіюється в широких межах від $K = 2$ ("Бінарні" (чорно-білі) зображення) до $K = 2^{10}$ і більше (практично безперервні значення яскравості). Найбільш часто вибираються $K = 2^8$, при цьому піксель зображення кодується одним байтом інформації. З усього вищевказаного робимо висновок, пікселі, що зберігаються в пам'яті комп'ютера, являють собою результат дискретизації вихідного безперервного зображення по аргументам та за рівнями. Ясно, що кроки дискретизації T_1 , T_2 і Δ повинні вибиратися досить малими, для того щоб похибка дискретизації була незначна і цифрове представлення зберігало основну інформацію про зображення.

3.2 Методи обробки термограм

На даний момент знаходиться все більше сфер використання термографії в житті та діяльності людей. Тому для подальшого розповсюдження використання термограм та збільшення сфер використання термографії в діяльності людей необхідно вирішити питання складності аналізу результатів отриманих за допомогою дослідження термографом. Матриця термографу як прилад здатна реєструвати лише інтенсивність випромінювання, що падає на чутливі до випромінювання електронні компоненти. Це значить, що в початковому вигляді результатом роботи термографа є потік інформації в бінарній системі, тобто набір одиниць та нулів, який неможливо аналізувати без додаткового устаткування. Таким устаткуванням частіше за все виступає Комп'ютер з програмним забезпеченням відповідним до матриці термографу. Лише після обробки спеціалізованим програмним забезпеченням можливо отримати зображення в монохромній, чорно-білій, палітрі.

Так, як термограма подана в вигляді монохромного зображення, де яскравість пікселів несе інформацію про температуру. Значення мінімальної

температури позначене чорним (00000000 0), а значення максимальної білим (11111111 255), температура розподіляється рівномірним градієнтом. Це значить, що в точці, яка має сірий колір (10000000 128) середина сірого спектра температура дорівнює:

$$T_{gray} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (3.19)$$

Так, як коефіцієнт $\frac{1}{2}$ є представленням $color/255$, звідси впливає формула для будь-якої температури:

$$T_{color} = \frac{(T_{min} + T_{max}) \cdot color}{255} \quad (3.20)$$

Таким чином, формула 3.1 зв'язується значенням температурних характеристик та кольорів пікселів.

$$color = \frac{255 \cdot T_{color}}{T_{min} + T_{max}} \quad (3.21)$$



Рисунок 3.6 — Приклад монохромного зображення термографа, а) термограма в Ч/б палітри, б) приклад Ч/б палітри

Але така інтерпретація є не найкращим рішенням з можливих. Значно простішим в сприйнятті людським оком є варіант інтерпретації з кольоровими палітрами різних видів. Дана методика є достатньо простою у використанні [2]. Виконується простим алгоритмом, замість чорно-білої монохроматичної палітри використовують будь-яку іншу градієнтну палітру.

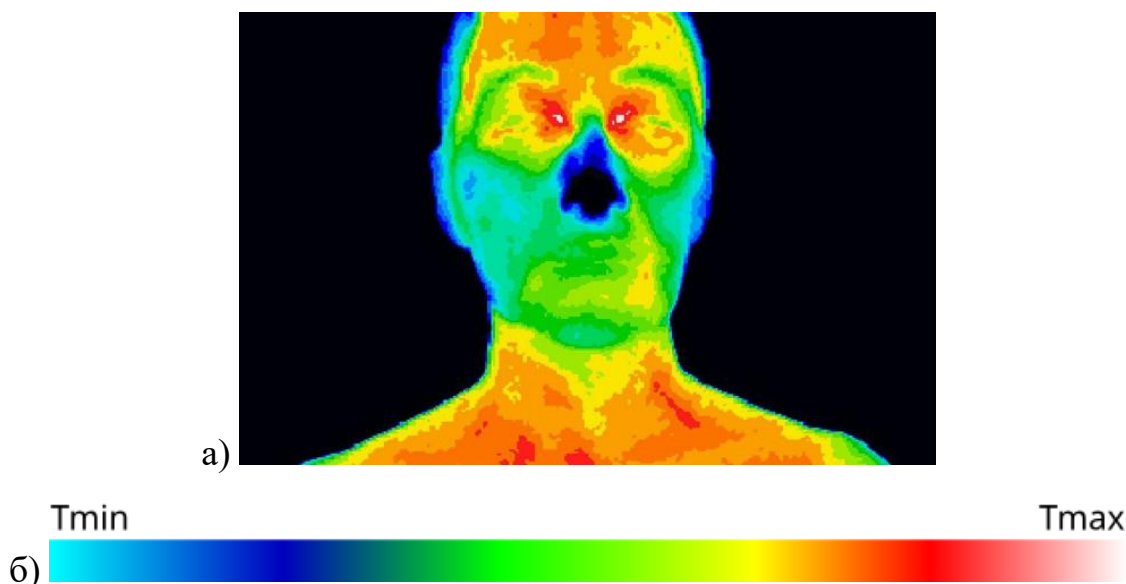


Рисунок 3.7 — а) Приклад кольорового зображення, отриманого за допомогою термографа. б) кольорова градієнтна палітра типу А

Кожна з представлених палітр має свою плюси та мінуси. Рисунок 3.7 в повній мірі відображає теплові характеристики досліджуваних поверхонь.



Рисунок 3.8— Кольорова градієнтна палітра типу Б

В свою чергу, існують інші види градієнтних палітр, наприклад, палітра типу Б (Рисунок 3.8). відображає термограму в достатньо реалістичному вигляді. Але, в свою чергу, ускладнює аналіз теплової характеристики зображення взагалом. Також достатньо наглядною та функціональною є палітра типу В (Рисунок 3.9) такий специфічний метод одразу демонструє точки максимальної та мінімальної температури.



Рисунок 3.9 — Кольорова градієнтна палітра типу В

За аналогією з цим можна створити палітри, що будуть виділяти області з конкретно заданими температурами. Термографічні камери з подібними палітрами використовуються в лікарнях для постійного контролю температури хворих в палаті.

Достатньо розповсюдженою технологією є використання тепловізора паралельно з звичайною фото або відео камерами. Такі пристрої дають можливість накладення термографічних знімків на дійсні зображення, що дозволяє швидко проаналізувати термограму та точно виявити місця теплових аномалій.

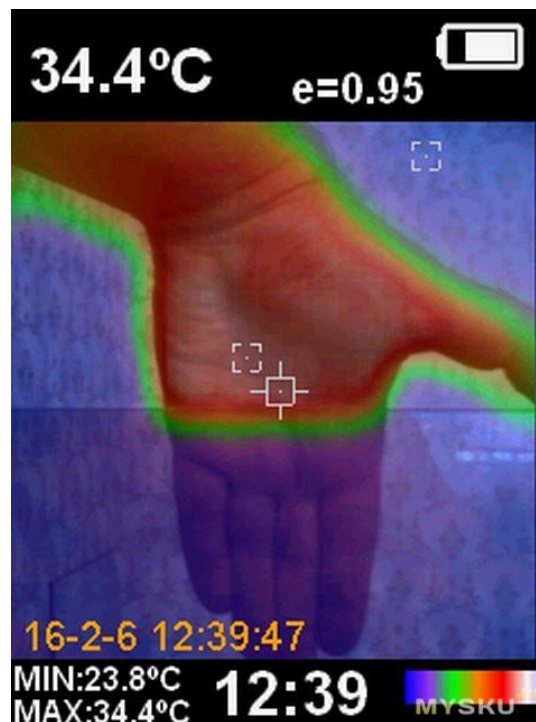


Рисунок 3.10 — Результат роботи термографу з фотокамерою

Для спрощення аналізу термограм пропонується змоделювати об'єкт дослідження в тривимірному просторі і відображувати температурні характеристики на поверхні отриманої моделі. На сучасному ринку лише одна компанія розробляє щось зі схожим функціоналом, а саме: термографічні окуляри доповненої реальності.

3.3 Моделювання тривимірних графічних моделей

3.3.1 Технологія Ray Marching

Існує декілька видів тривимірних моделей, які використовуються в комп'ютерній графіці на даний момент. Першим та самими найяскравішими є Ray Marching, цей принцип трьохвимірного моделювання можна порівняти з векторною графікою, так, як всі об'єкти повинні задаватися простими формулами, наприклад, формулою сфери:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (3.21)$$

Де x, y, z це координати точки поверхні сфери по відповідним осям, а r це радіус сфери.

Для моделювання технологією Ray Marching необхідно використовувати «камеру», в цьому випадку камерою називають точку у просторі від, якої йде підрахунок відстані до об'єктів сцени. З точки положення «камери» ми випускаємо промінь, відраховуючи відстань до найближчого об'єкту, після чого переміщуємося по променю на відстань рівну відстані до найближчого об'єкту, і знову перевіряємо відстань до об'єктів. Це продовжується завдяки фрактальній функції до тих пір, поки відстань до об'єкту не перевищить критичну або не виконається інша прописана умова виходу. Таким чином, ми отримуємо відстань до об'єктів і можемо обрахувати колір, в який необхідно пофарбувати піксель крану.

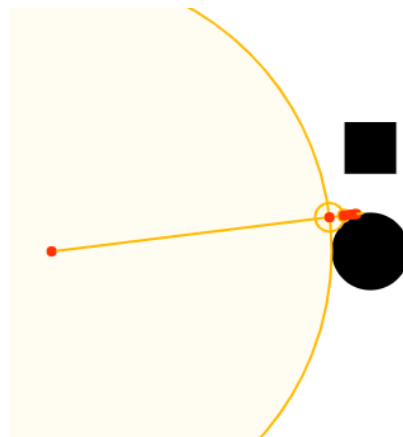


Рисунок 3.11 — приклад технології Ray Marching у двовимірному просторі

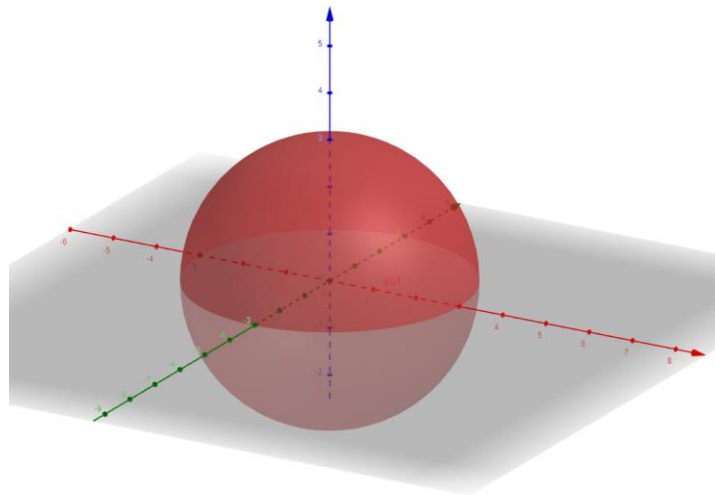


Рисунок 3.12 — сфера з радіусом 3 відмальована за допомогою технології Ray Marching

Але Ray Marching має одну глобальну проблему, для створення складного об'єкту необхідно створити формулу його поверхні або частин поверхні. На даний момент немає простого та швидко дійного алгоритму, який може створити формулу самостійно.

3.3.2 Метод вокселів

Іншими та найпростішими в реалізації є воксельні тривимірні моделі. Такі моделі складаються з тривимірних пікселів називаємих вокселями. Воксель-це елемент об'ємного зображення, що містить значення елемента растра в тривимірному просторі. Вокселі є аналогами двовимірних пікселів для тривимірного простору. Воксельні моделі часто використовуються для візуалізації та аналізу медичної та наукової інформації. Один воксель відповідає одному кубу (Рисунок 3.13)

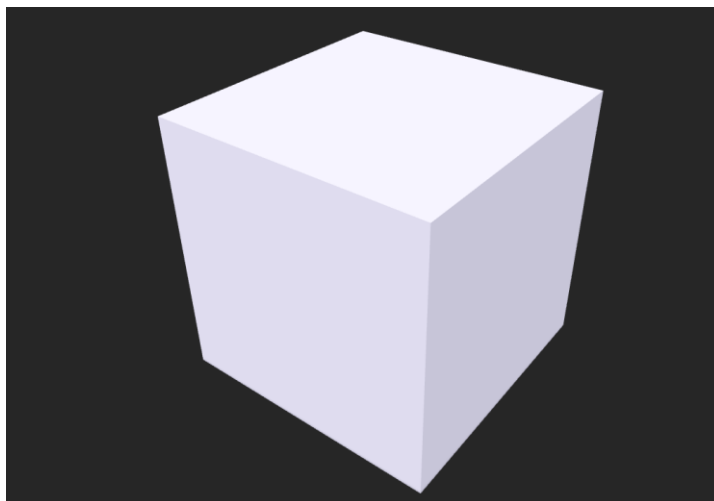


Рисунок 3.13 — Воксель сірого кольору

У комп'ютерній графіці вокселі використовуються як альтернатива полігонів. Під воксель зазвичай розуміється віртуальний елемент, відповідний набору з шести прямокутних полігонів. Все у віртуальному світі - віртуальні пікселі, полігони і вокселі - має бути спроектовано на пікселі фізичного екрану. Віртуальними пікселями «малюють» плоскі 2D моделі об'єктів в 3D світі. Полігонами або 2D площинами як би обволікають пухте 3D простір.

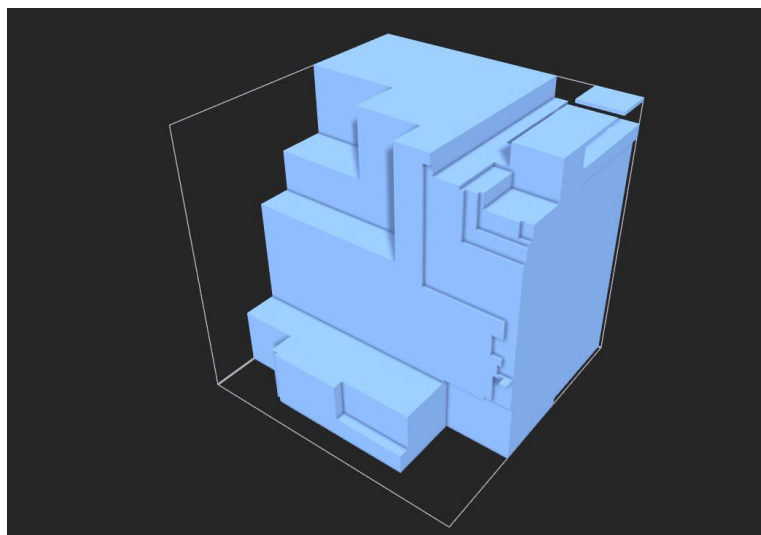


Рисунок 3.14 — Складний геометричний об'єкт намальований вокселями

На даний момент при моделюванні 3D об'єктів часто використовується в основному тільки два методи, метод: полігонів та метод вокселів. За

допомогою плоских полігонів - тим самим буде створена порожниста модель без внутрішнього наповнення. Для спостерігача достатньо лише добре зшитою з трикутних полігонів поверхні. Або за допомогою об'ємних кубиків – вокселей.

3.3.3 Метод полігональної сітки

Іншою методикою створення 3D моделей є моделювання за допомогою полігональної сітки. Полігональною сіткою називають сукупність вершин, ребер і граней, які визначають форму багатогранного об'єкта в тривимірній комп'ютерній графіці і об'ємному моделюванні. Зазвичай в якості граней використовують трикутники, але інколи вдаються і до інших простих опуклих багатокутників, полігонів, так, як це спрощує рендеринг.

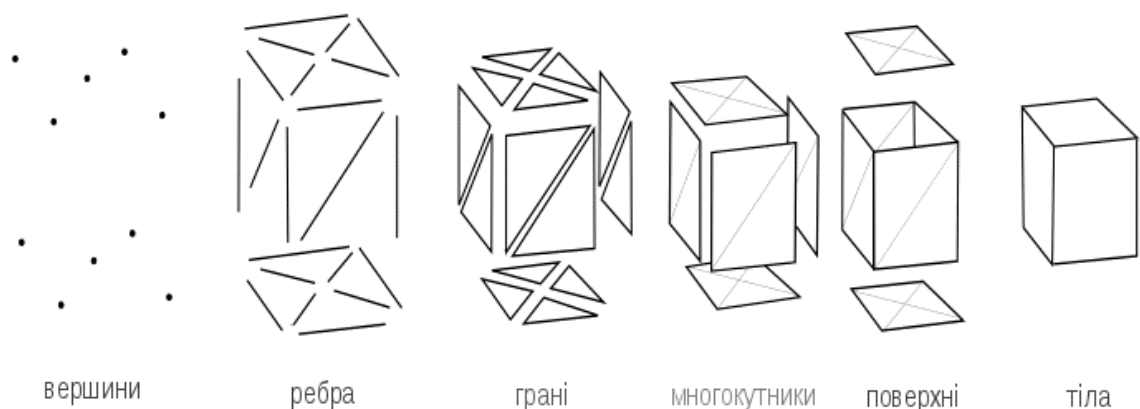


Рисунок 3.15 — Принцип складання полігональної сітки в тривимірне тіло

3.4 Моделювання 3D об'єктів на основі Зображень

Створення 3D моделі за зображеннями не може оброблювати модель з великою кількістю нерівностей. Щоб створити тривимірну модель високої якості, необхідно притримуватись деяких правил. Зручніше за все встановити модель на обертальну платформу, а камеру на нерухомий штатив з рівнем, це допоможе зробити групу знімків з мінімальним зміщенням за всіма вісями.

Сама методика моделювання тривимірних моделей, на основі групи зображень моделюємого об'єкта, заключає в собі обробку зображень спеціалізованим програмним забезпеченням. Алгоритм, за яким оброблюються зображення, полягає в пошуку спільних точок на зображеннях зроблених з різних ракурсів, прикладом є Рисунок 3.16.



Рисунок 3.16 — Приклад 3D моделювання за зображенням

3.4 Моделювання тривимірних термограм

3.5.1 Пошук координат полігонів тривимірної моделі

При створенні тривимірної моделі буде використовуватись програмне забезпечення у вигляді програми для відображення тривимірних об'єктів Sculptris, та самостійно розробленого на мові C# додатку 3DTermogramApp з повним текстом якого можна ознайомитись в додатку А.

Щоб алгоритм коректно працював з зображеннями, необхідно попередньо підготувати їх, а саме: необхідно заповнити задній фон чорним кольором зі значеннями FF000000. Таким чином, ми дамо алгоритму точки визначення границі об'єкту. Головною причиною попередньої обробки фотографій є підвищення швидкості роботи програми за рахунок зменшення загальної кількості точок.

У найпростішому представлені для використанні такої методики необхідно не менше ніж 3 зображення: вид спереду, вид з боку та вид зверху. Для коректного моделювання кожне зображення повинно супроводжуватися значенням кута, під яким зроблене зображення. Реалізувати це можливо за допомогою створення класу (CornerPhoto). Цей клас можна описати як контейнер для двох значень, **приклад такого класу написаного мовою C#:**

```
public class CornerPhoto
{
    public Bitmap bitmap { get; set; }
    public double [] engel { get; set; }
    public CornerPhoto(Bitmap image, double engelXY, double engelZ)
    {
        bitmap = image;
        this.engel = ToRadian(new double [] { engelXY, engelZ });
    }
    private double[] ToRadian(double[] engel)
    {
        engel[0] = engel[0] / 180 * Math.PI;
        engel[1] = engel[1] / 180 * Math.PI;
        return engel;
    }
}
```

Для пошуку координат точки у тривимірному просторі можна використати наступний алгоритм. Обираємо точку $point(\mathbf{z0};\mathbf{x0})$ на першому

зображенні з кутом нахилу α , проводимо пошук точок з аналогічним значенням кольору з координатами $(z_0; y_0)$, де z_0 загальна координата для всіх знайдених точок, а координата y_0 знаходиться методом перевірки всіх точок з координатами $(z_0; y_i)$ в усіх інших зображеннях нахилених під різними кутами. В результаті такого пошуку ми знаходимо велику кількість точок з координатами $(z_0; \sin(\alpha) \times x_0; \cos(\beta) \times y_i)$. Алгоритм для пошуку точок таким методом написаний мовою C# виглядає наступним чином:

```
private void FRONT (CornerPhoto[] image)
{
    for (int z = 0; z < image[0].bitmap.Height; z++)
        for (int x = 0; x < image[0].bitmap.Width; x++)
            for (int y = 0; y < image[3].bitmap.Width; y++)
                {
                    ok_1 = !Color.Equals(image[0].bitmap.GetPixel(z, x), Black);
                    ok = EqualsColor(image[0].bitmap.GetPixel(z, x),
image[3].bitmap.GetPixel(z, y));
                    if (ok&&ok_1)
                        {
                            if (!position.Contains(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x))))
                                position.Add(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x)));
                        }
                }
}
```

Даний метод працює з двома зображеннями кут між площинами яких дорівнює дев'яносто градусів. В результаті роботи такого коду в колекцію трьох вимірних точок `position` буде додано всі точки, що спільні для обох зображень. До кожної пари сусідніх зображень використати функцію, `FRONT` для переднього та правого зображення, то отримаємо повний набір точок поверхні тіла. Але кількість точок буде занадто великою, щоб побудувати полігональну модель, так, як кількість полігонів буде рівна кількості пікселів на зображенні в другій степені, тому при початковому зображенні розміром 100×100 пікселів в середньому буде знайдено 10^5 точок, що створить полігональну модель з 10^{15} полігонів. Таким чином, сильно навантажуючи

комп'ютер при обчисленні та вимальовуванні моделі. Цю проблему можна вирішити нормалізувавши точки, тобто звівши їх до однієї в радіусі сфери, використавши формулу для графіку кулі (3.21) можна отримати зону для знищення точок. **Функція нормалізації написана мовою С# виглядає наступним чином:**

```
public void Normalise()
{
    for (int i = 0; i < position.Count; i++)
        for (int j = i + 1; j < position.Count; j++)
            if (Math.Pow((position[j].X - position[i].X), 2) +
                Math.Pow((position[j].Y - position[i].Y), 2) + Math.Pow((position[j].Z -
                    position[i].Z), 2) < Sqwer(Radius))
                {
                    position.RemoveAt(j);
                    j--;
                }
}
```

У даній функції ми покроково перебираємо всі точки колекції position та видаляємо ті точки, що знаходяться на відстані менше 3 до обраної точки.

Після виконання функції Normalise() ми отримуємо масив точок, які необхідно об'єднати в трикутні полігони. Для створення полігону потрібно обрати стартову точку, від якої шукаємо найближчу точку поступово збільшуємо радіус сфери, після знаходження першої точки ми запам'ятовуємо її координати, та продовжуємо пошук наступної по відстані від центральної точки. Після знаходження двох точок, на основі цих точок та центральної точки, створюємо полігон та запам'ятовуємо другу знайдену точку в першу і продовжуємо пошук наступних точок. Зупинка пошуку встановлюється максимальним радіусом пошуку, за це відповідає змінна RadiusMax. При досягненні максимального радіусу центральна точка видаляється з основного масиву точок. Пройшовши цикл для всіх точок списку, отримуємо повноцінну полігональну модель.

```
void TNormalise()
{
```

```

List<Points> RadiusPoints = new List<Points>();
Points point2=new Points(0,0,0,Black);
bool FindPoint2;
double Radius;
for (int i = 0; i < position.Count; i++)
{
    FindPoint2 = false;
    for (int j = i + 1; j < position.Count; j++)
    {
        if (Sqwer(position[j].X - position[i].X) + Sqwer(position[j].Y -
position[i].Y) + Sqwer(position[j].Z - position[i].Z) < Sqwer(RadiusMax))
        {
            if (!RadiusPoints.Contains(position[j]))
                RadiusPoints.Add(position[j]);
        }
    }
}

Radius = this.Radius;
do
{
    for (int j = i + 1; j < RadiusPoints.Count; j++)
    {
        if (Sqwer(position[j].X - position[i].X) + Sqwer(position[j].Y
- position[i].Y) + Sqwer(position[j].Z - position[i].Z) < Sqwer(Radius))
        {
            if (FindPoint2)
            {
                Points[] poligonPosition = { position[i], point2,
RadiusPoints[j]};

```

```

        if (!PointsPoints.Contains(new Poligon(poligonPosition,
position[i].color.R, position[i].color.G, position[i].color.B)))
            PointsPoints.Add(new Poligon(poligonPosition));
    }
    point2 = RadiusPoints[j];
    FindPoint2 = true;
}
}
Radius += 0.1;
}
while (Radius <= RadiusMax);
RadiusPoints.Clear();
position.RemoveAt(i);
i--;
}
}
}

```

У результаті роботи програми ми отримуємо полігональну сітку, яка містить в собі, вершини, ребра та площини, необхідні для побудови тривимірної моделі. Далі ця інформація записується в бінарний файл для перенесення в програму по моделювання тривимірних об'єктів. Такими програмами можуть виступати: Autodesk 3ds Max, ZBrush, Sculpttris.

3.5.2 Колористика 3D моделі

Саме колористика тривимірної моделі перетворить отриману нами раніше полігональну модель у тривимірну термограму.

В більшості своїй всі 3D моделі після створення мають матову сіру поверхню. Для змінення кольору тривимірних моделей існує два глобальні підходи- це задання кольорів полігонами та використання текстурного

фарбування. При чому використання текстур є більш простим та функціональним підходом.

Для розфарбовування кожного окремого полігону необхідно виділити їх, як окремі елементи, бажано для цього використовувати окремий клас Poligon який буде містити в собі координати вершин трикутника та колір фарбування полігону, а також ж функції і методи для роботи з ними. З прикладом класу П можна ознайомитися далі:

```
class Poligon
{
    public Points [] points { get; set; }
    public byte PointsColorRed { get; set; }
    public byte PointsColorGreen { get; set; }
    public byte PointsColorBlue { get; set; }
    public Poligon(Points [] points, byte colorR, byte colorG, byte colorB)
    {
        this.points = points;
        PointsColorRed = colorR;
        PointsColorGreen = colorG;
        PointsColorBlue = colorB;
    }

    public Poligon(Points[] points)
    {
        this.points = points;
    }
}
```

В даній інтерпретації клас включає в себе масив координат точок у тривимірному просторі (points), колір, в який ми маємо офарбувати полігон, розбитий по системі ARGB на окремі кольори, за червону складову відповідає поле PointsColorRed, за зелений та сині кольори відповідно поля

PointsColorGreen та PointsColorBlue. В даному класі нема поля, що відповідає за альфа канал, тобто прозорість результуючого кольору, тому що на тривимірній моделі не повинно бути прозорих полігонів.

Мінусами такого підходу є обмеження на колір одного полігону, а також використання великої кількості оперативної пам'яті.

У свою чергу, для текстуровання необхідно лише правильно створити текстуру, яка рівномірно накладається на полігони моделі. Такі текстури можуть бути створені автоматично.

3.5.3 Текстуровання тривимірної термограми

Для того щоб текстура правильно накладалась на створений макет, необхідно створити розвертку у вигляді зображення, опираючись на інформацію отриману масивом полігонів в процесі роботи програми. А саме: фарбування полігональної текстури проводиться завдяки класу PoligonalTextur. Цей клас включає в себе закриті поля з зображенням, кольором фону та масив полігонів. Так, як масив полігонів включає в себе, крім координат вершин полігону, ще і колір цього полігону, можна написати нескладну **функцію MakePoligonColor для фарбування полігонів на текстурі написана мовою C#:**

```
private void MakePoligonColor()
{
    for (int x = 0; x < poligonalTextur.Width; x++)
        for (int y = 0; y < poligonalTextur.Height; y++)
            {
                if (!Color.Equals(poligonalTextur.GetPixel(x, y), backgroundColor))
                    {
                        for (int n = 0; n < PointsList.Length; n++)
                            {
```


ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

1. Розглянуто існуючі методи обробки зображень. Показано, що у теперішній час метод інфрачервоної термографії використовує в основному знімки для аналізу теплових характеристик об'єкту досліджень і часом такий підхід викликає ряд проблем, пов'язаних з вірною інтерпретацією отриманих термограм.

2. Показано, що підхід до аналізу термограм суттєво залежить від поставлених задач, але нажалі для проведення навіть однотипного аналізу термографічних зображень необхідно аналізувати параметри які змінюються, що пов'язано з деякою нестабільністю теплової картини оточуючого середовища та з достатньо високою швидкістю змін деяких теплових ефектів та явищ.

3. Визначено, що моделювання тривимірних об'єктів є досить складним комплексним завданням з великою кількістю підходів, кожен з яких має свої переваги та недоліки, що необхідно враховувати при розробці програмного забезпечення для отримання об'ємної візуалізації об'єктів досліджень.

4. Розроблено алгоритм створення тривимірних термограм, який є досить простим в реалізації, але має низку недоліків які можливо виправити в подальшому, оскільки об'єм даної роботи обмежений.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОБОТА ПРОГРАМИ

4.1 Моделювання простого зображення кулі

Для наглядної роботи алгоритму проведемо моделювання тривимірної кулі з раніше заготовлених зображень. Для отримання тривимірної в програмі необхідно вказати адреси зображень та додати їх в масив фотографій, указуючи кути, під якими були зроблені знімки. У прикладі використовується всього п'ять зображень: фронтальне зображення, зображення тилу, зображення зліва, зображення справа та зображення згори, це дозволить створити нам тривимірну модель по зображенням Рисунок 4.1.

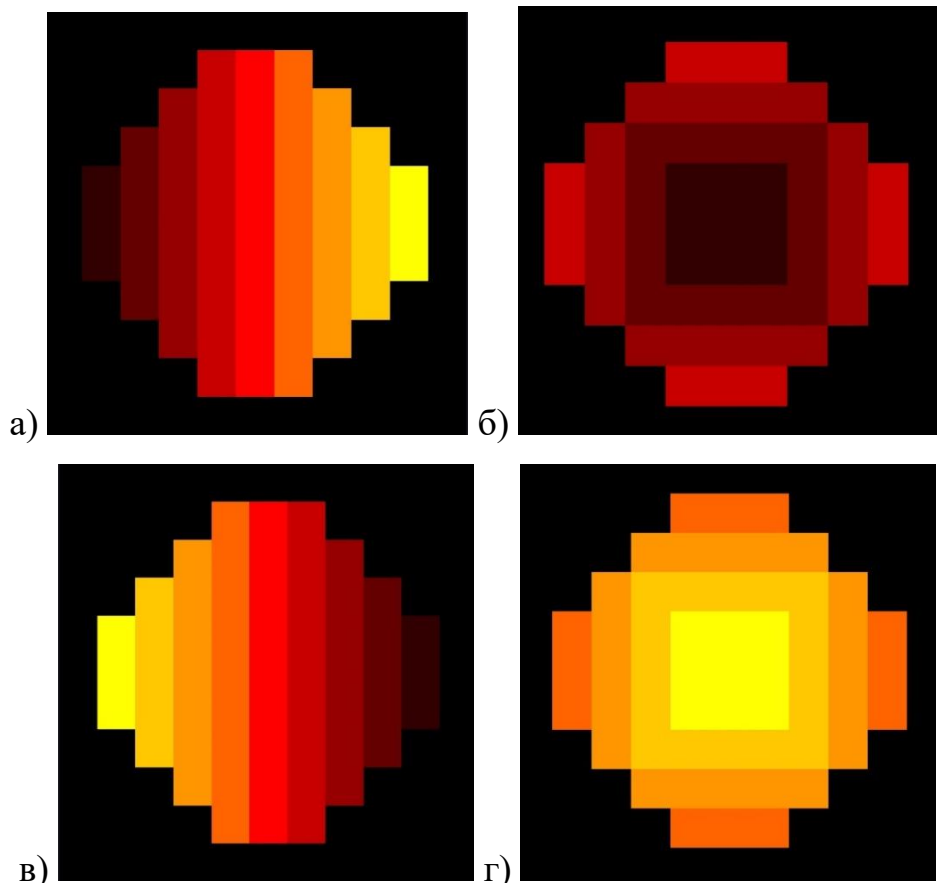
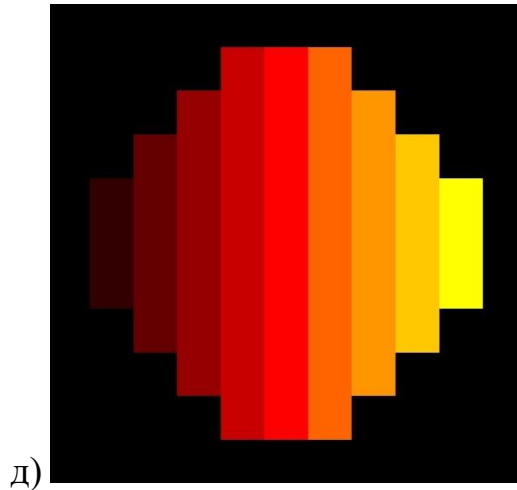


Рисунок 4.1 — Зображення кулі з різних боків:

- а) зображення спереду, б) зображення з лівого боку, в) зображення з заду,
г) зображення з правого боку,



Продовження рисунку 4.1 — Зображення кулі з різних боків:

д) зображення зверху

Запускаємо код програми через компілятор та очікуємо поки на консоль не виведеться наступне повідомлення.

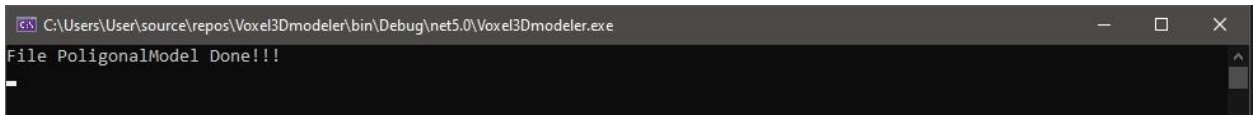


Рисунок 4.2 — Повідомлення в консолі програми

це дає нам знати, що в папці за адресою програми зберігся бінарний файл під назвою PoligonalModel, що містить інформацію про полігональну сітку. Цьому файлу необхідно призначити тип (*.SC1), це робиться для можливості завантаження в програму Sculptris для відображення тривимірних моделей. У результаті цих дій ми отримуємо тривимірну модель наступного вигляду:

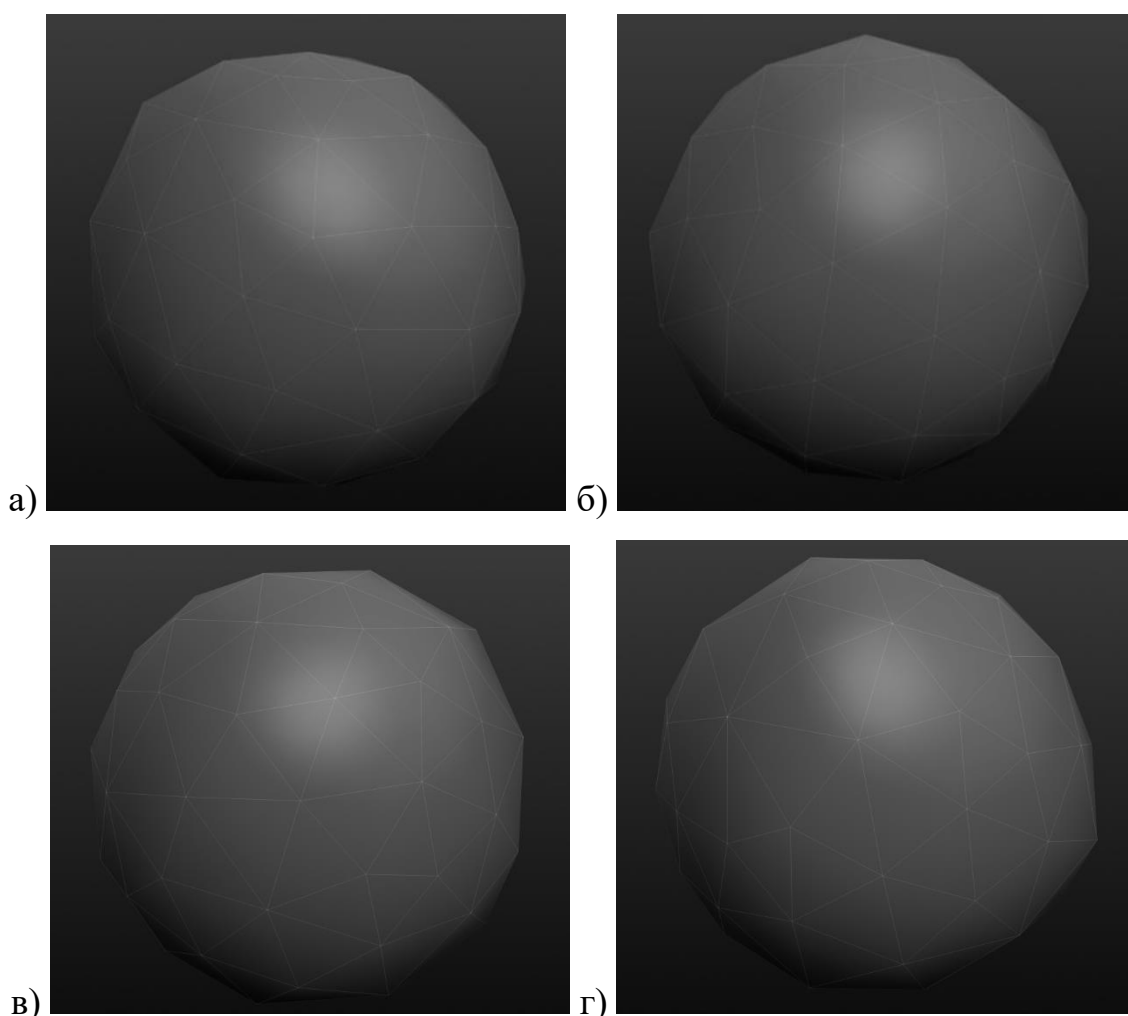


Рисунок 4.3 — Проекції отриманої тривимірної моделі а) проекція спереду, б) проекція сфери з лівого боку, в) проекція сфери з заду, г) проекція сфери з правого боку

На даному етапі модель має повністю сіру текстурну мапу, з якою можна ознайомитися на Рисунку 4.4. Як можна бачити в початковому представленні текстурна мапа складається з трикутників зафарбованих, одним кольором, і якщо змінити колір в будь-якому редакторі зображень, то всі зміни будуть відображені на тривимірній моделі. Таким чином ми можемо змінити кольори полігонів, опираючись на термографічні знімки та інформацію з полігональної сітки тривимірної моделі, за допомогою забезпечення описаного у 2 пункті даної магістерської дисертації. В результаті роботи алгоритму текстурна мапа буде змінена згідно з термографічними знімками. З результатом роботи алгоритму можна ознайомитися на Рисунку 4.5.



Рисунок 4.4 — Текстура мапа отриманої полігональної моделі

Тепер залишилось лише накласти отриману полігональну текстуру на тривимірну модель. Для цього у програмі Sculptris необхідно обрати функцію Open Texmap та обрати в якості текстури раніше створене зображення. Результатом стане тривимірна модель розфарбована згідно початкових термографічних зображень.

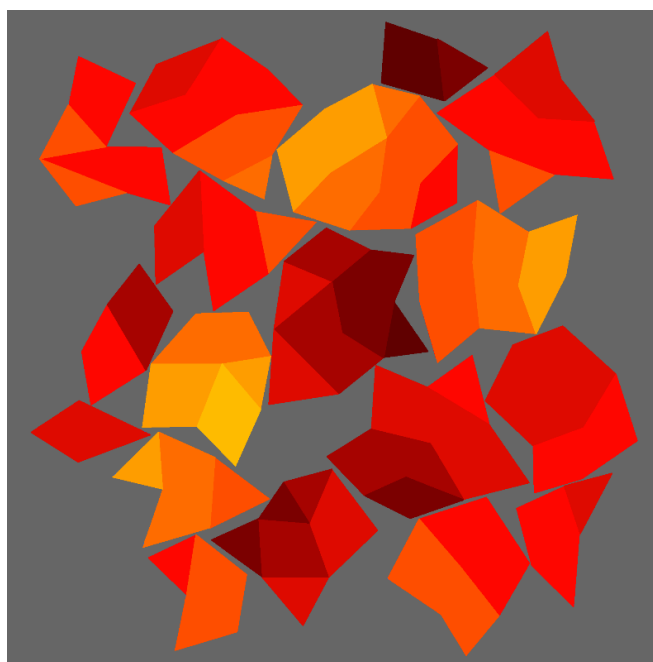


Рисунок 4.5 — Розфарбована полігональна текстура

Тепер ми маємо тривимірну термограму початкового об'єкту. З мінусів отриманої моделі можна виділити невисоку точність отриманої термографічної моделі, але з урахуванням інноваційного методу аналітики термографічних зображень, можна сказати, що технологія має перспективи для розвитку та вдосконалення.

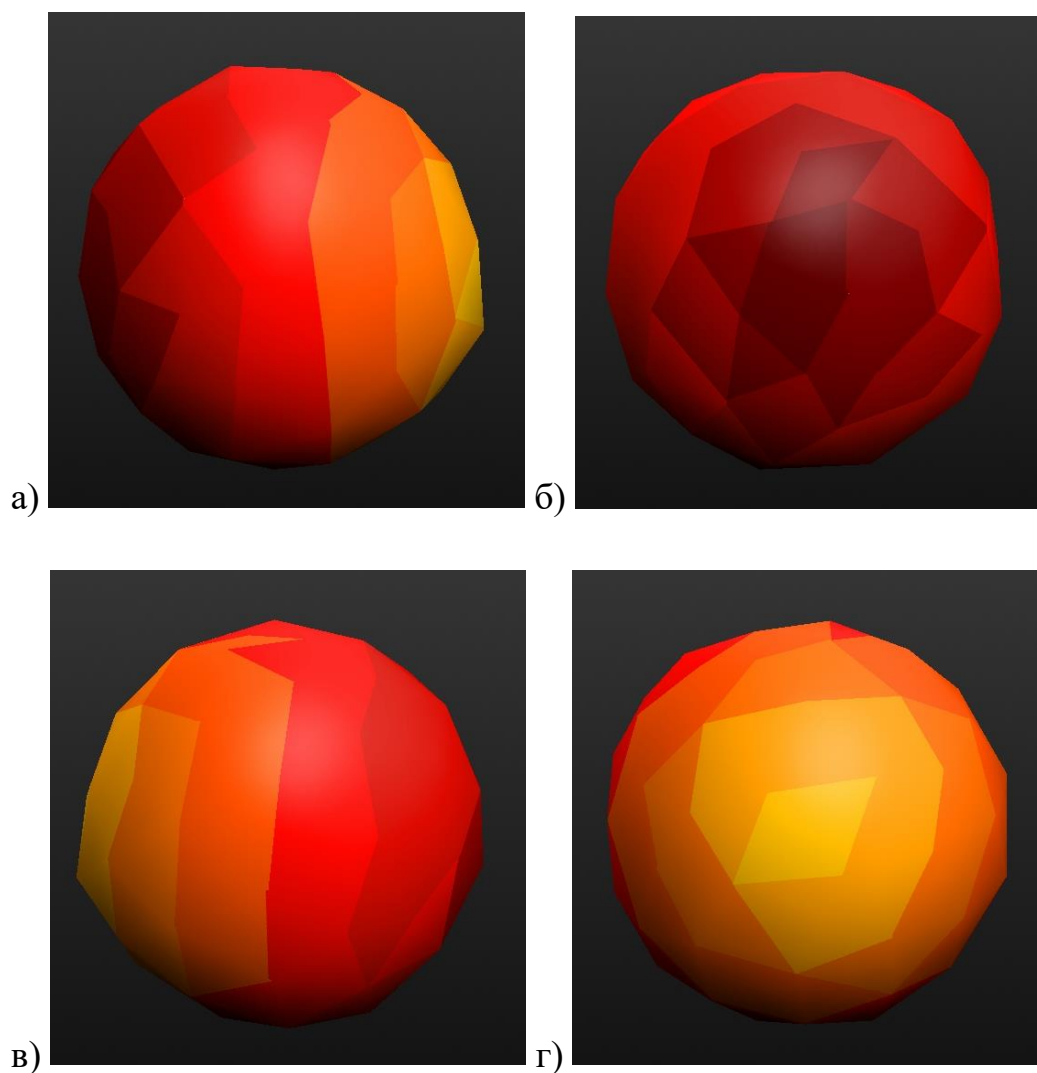


Рисунок 4.6 — Тривимірна термограма сфери отримана в результаті роботи алгоритму, а) проекція спереду, б) проекція сфери з лівого боку, в) проекція сфери з заду, г) проекція сфери з правого боку

4.2 Результат моделювання руки людини

Завантажимо в програму знімки руки Рисунок 4.7:

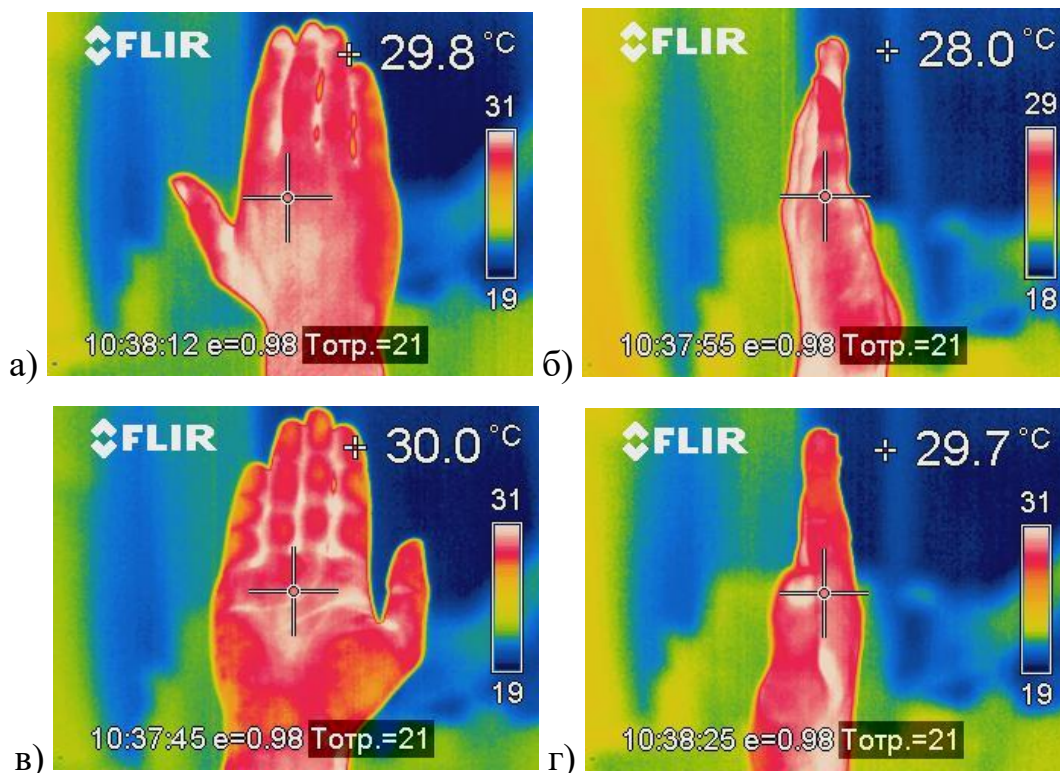


Рисунок 4.7 — Термограми руки людини а) вид спереду, б) вид з лівого боку, в) вид з заду, г) вид з правого боку

Тепер створимо тривимірну термограму, руки людини по раніше створеним термограмам. Отримуємо тривимірну полігональну модель:

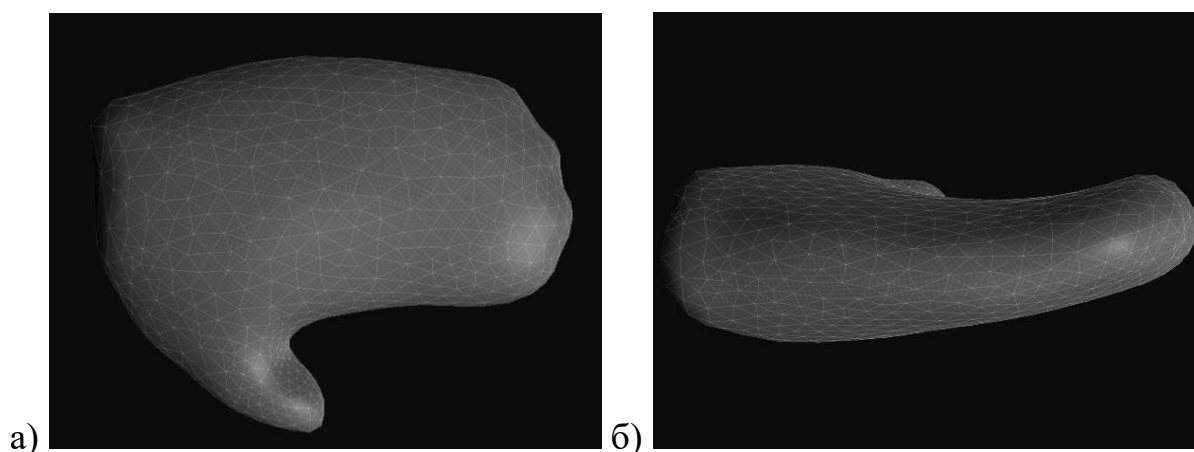
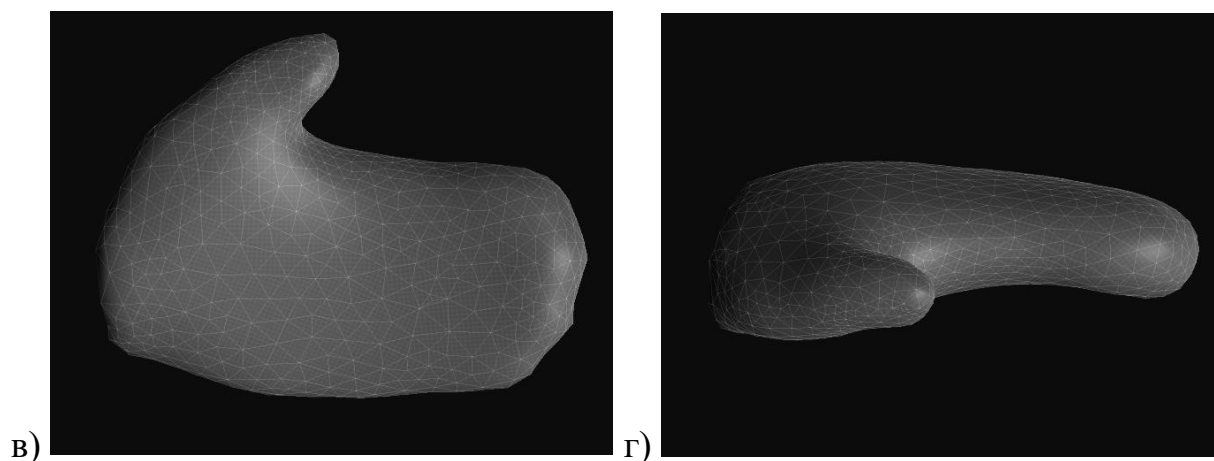


Рисунок 4.8 — Проекції отриманої тривимірної моделі руки людини а) проекція спереду, б) проекція сфери з лівого боку



Продовження рисунку 4.8 — Проекції отриманої тривимірної моделі руки людини в) проекція сфери з заду, г) проекція сфери з правого боку

З текстурною мапою наступного вигляду.



Рисунок 4.9 — Текстурна мапа отриманої полігональної моделі

Після обробки класом `MakePolygonColor` ми отримуємо текстурну мапу термограми:

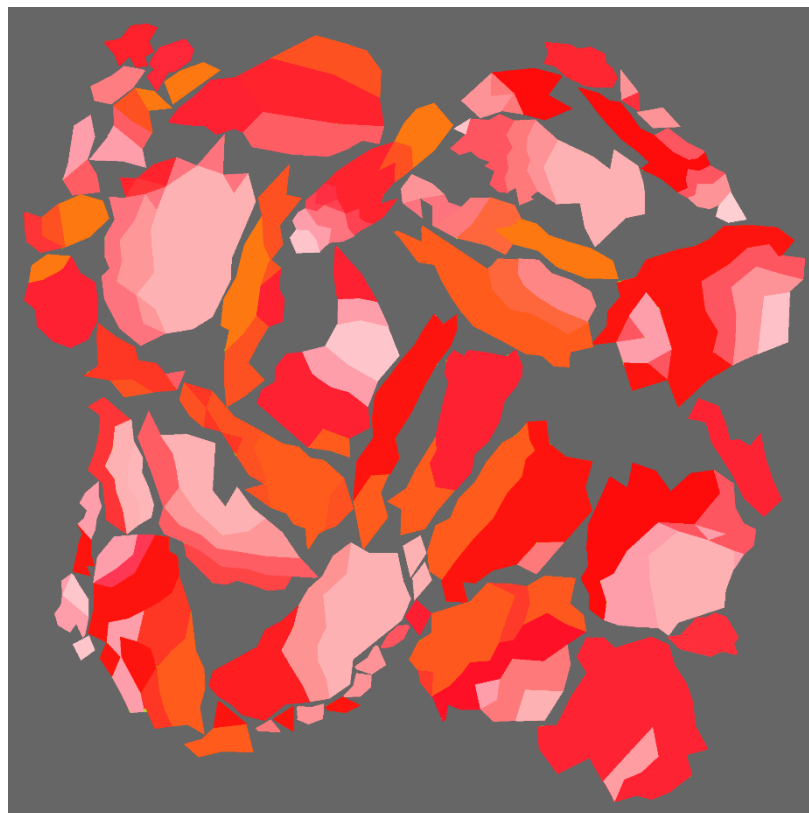


Рисунок 4.10 — текстурна мапа отриманої полігональної моделі

І кінцевим результатом є тривимірна термографічна модель придатна для аналізу теплових характеристик об'єкту, в даному випадку об'єктом є рука людини.

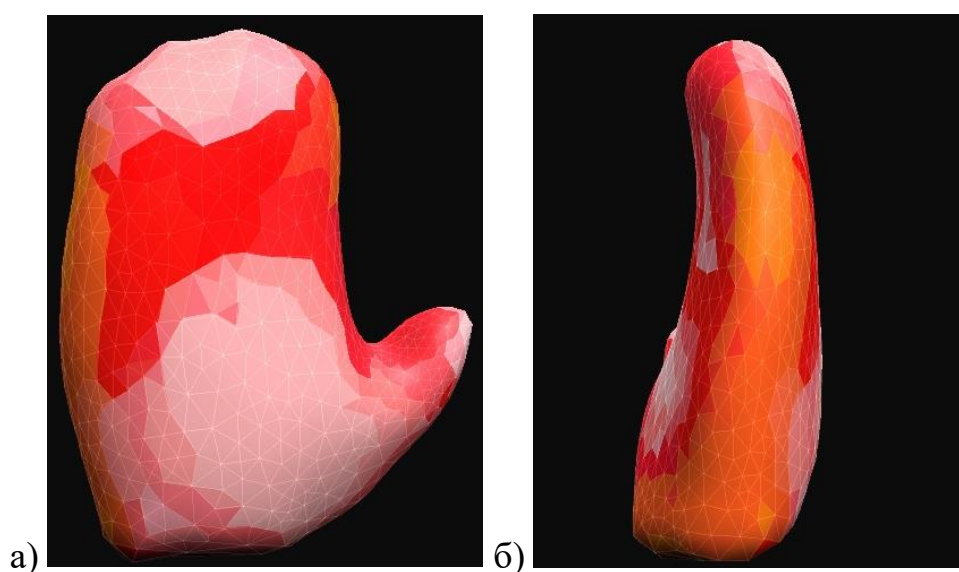


Рисунок 4.11 — Тривимірна термограма руки людини отримана в результаті роботи алгоритму, а) проекція спереду, б) проекція сфери з лівого боку



Продовження рисунку 4.11 — Тривимірні термограми руки людини отримана в результаті роботи алгоритму в) проекція сфери з заду, г) проекція сфери з правого боку

Таким чином треба зазначити, що отримані в результаті розробленого автором програмного забезпечення тривимірні термограми відкривають великий простір для аналізу теплових полів об'єктів досліджень. Запропонована технологія може знайти багато сфер використання: від науково-технічних, до біологічних об'єктів досліджень. Найочевиднішою та найбільш важливою на даний момент сферою використання запропонованої технології є медицина. Велика кількість медичних досліджень потребує теплових характеристик тіла людини і тривимірні термографічна модель надасть можливість лікарям більш якісно аналізувати запальні процеси, що супроводжуються значним підвищенням температури у місцях запалення. Термографічні моделі допоможуть краще виявити область ураження пацієнта.

Ще одним важливим використанням розробленої технології є виявлення тепловтрат в будівлях та спорудах, а також для виявлення зон напруженості у товщах виробів що створені методом лиття металу, пластмаси, силікону та

інших, матеріалів, процес створення яких супроводжується тепловими явищами нагрівання або охолодження.

4.3. Сучасний підхід до підвищення ефективності термографії

Розробниками фірми BALTECH вперше запропоновано найсучасніше інноваційне рішення – термографічний комплекс BALTECH TR-0180 Zorro (Рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 — Сучасний термографічний комплекс BALTECH TR-0180 Zorro з розширеними можливостями

В одній камері об'єднано теплове, візуальне і 3D інтерактивні зображення. Компанія BALTECH вперше на світовому ринку розробила концепцію для ефективної термографії, а саме три типи зображення в одному.

1. Якісну термограму за рахунок великої матриці 640x480 пікселів з будь-якої відстані без обмежень. Тобто з будь-якої відстані можна бачити навіть невелике теплове зображення з чіткими межами для точного визначення термоаномальної зони.

2. Повноформатне зображення з вмонтованої кольорової цифрової відеокамери 5.0 мегапікселів, що надає можливість зробити якісне зображення

об'єкта і за рахунок функції POP (Picture on the Picture – «Картинка в Картинці») накласти термограму на знімок або навпаки візуальне зображення накласти на термограму.

3. 3D-відео зображення, шляхом підключивши 3D-відео окулярів, що розширює можливості термографа. При підключенні 3D відеомодуля можна виконувати термографію по технології Without barriers «Без перешкод». У цьому випадку можна спостерігати навіть самі недоступні об'єкти, що дозволяє зробити термографію ще безпечніше для користувача.

Цей комплекс є найефективнішим інструментом для здійснення технічного огляду, вирішення завдань спостереження, енергоаудиту, наукових досліджень у різних галузях (енергетика, металургія, нафтохімія, паперова галузь, транспорт, машинобудування) тощо. Особливо незамінним буде даний тепловізійний комплекс в медицині та військово-промисловому комплексі.

ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

1. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для спрощення аналізу термографічних зображень, що представляє собою інноваційний інструмент аналізу термограм для відносно невеликих об'єктів досліджень.

2. Проведено тестування розробленого програмного забезпечення, яке показало, що отримані в ході роботи програми тривимірні об'єкти не є ідеальним відображенням об'єктів оригіналів, але дають можливість швидко проаналізувати термографічні знімки одного об'єкту, та є основою для подальших досліджень щодо удосконалення програмного забезпечення.

3. В ході виконання індивідуального завдання було виявлено ряд проблем у роботі алгоритму які можливо вирішити у подальших дослідженнях. Визначено, що до недоліків даної технології можна віднести високий час роботи алгоритму в сукупності з необхідністю використовувати велику кількість оперативної пам'яті, та невисоку точність моделювання нерівностей на поверхнях об'єкту досліджень.

4. Показано, що виконана робота по створенню програмного забезпечення для об'ємної візуалізації об'єктів досліджень, може створити абсолютно новий підхід до аналізу термографічних зображень та поширити використання методу інфрачервоної термографії у різних галузях: від контролю запікання побутової кераміки, до визначення зон ураження при запальних процесах біологічних об'єктів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті виконання роботи автор ознайомився з фізичними основами термографії та основними законами теплового випромінювання, що надало можливість здійснити мету роботи – розробити програмне забезпечення для створення тривимірних термографічних моделей на основі двомірних інфрачервоних зображень.

2. Розглянуто принципи отримання термографічних зображень та можливості обробки даних отриманих за допомогою теплових сенсорів інфрачервоного діапазону, на основі чого можна обирати псевдо кольори для пікселів зображення термограми.

3. Показано, що сучасні інфрачервоні термографи дають можливість проводити аналіз температурних полів об'єктів досліджень з високою точністю, а також дають здійснювати це з великої відстані, що у свою чергу надає можливість проводити аналіз отриманих даних навіть в небезпечних для життя людини умовах.

4. Проаналізовано та визначено три основні методики моделювання просторових моделей: метод Ray Marching, методика воксельних моделей та тривимірне моделювання об'єктів за допомогою полігональної сітки. Саме методика полігональної сітки обрана автором для моделювання тривимірних термограм.

5. Вперше розроблено алгоритм та програмне забезпечення для спрощення аналізу термографічних зображень, що представляє собою інноваційний інструмент аналізу термограм для відносно невеликих об'єктів досліджень. Це програмне забезпечення дозволяє отримати тривимірну термограму, яка створюється на основі термографічних знімків досліджуваного об'єкту.

6. Отримано зразки тривимірних термограм, які дають великий простір для аналізу теплових полів об'єктів. Ця технологія може знайти багато сфер

використання. Найбільш необхідною на даний момент сферою є медицина, де велика кількість досліджень потребує теплових характеристик тіла людини і тривимірна термографічна модель дасть можливість лікарям більш якісно аналізувати запальні процеси, що супроводжуються значним підвищенням температури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов: уч. пособие для вузов. М.: Наука, 1965. - С. 846
2. Ж.Госсорж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: МИР, 1988.- С. 416
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. Радио, 1978. - С. 400
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высшая школа, 2003. - 479 с.
5. Шилов И.А. Регуляция теплообмена у птиц. - М.: Изд-во. МГУ, 1968.- С. 2-51
6. Вавилов В.П. Тепловой контроль. Серия справочников. Т.5. Неразрушающий контроль / В.П. Вавилов. - М.: Машинстроение, 2004.- С. 370
7. Маценко В.Г. Обчислювальна техніка та програмування: Навчальний посібник. – Чернівці: ЧНУ, 2010 – 112 с.
8. Термография в строительстве / В.А. Дроздов, В.И. Сухарев. - М.: Стройиздат, 1987. - С.240
9. Гейн А. Г. Основи інформатики та обчислювальної техніки / В. Г. Житомирський та ін. — К.: Основа, 1991 р. – 156 с.
10. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П; за ред. Кучерука І.М. - К.: Техніка, 1999. Том 3: Оптика. Квантова фізика. – С.520
11. Основи інформатики та обчислювальної техніки : підручник / В. Г. Іванов, В. В. Карасюк, М. В. Гвозденко; за заг. ред. В. Г. Іванова. — Х.: Право, 2015. — 312 с.
12. Інфрачервоне випромінювання //Енциклопедія сучасної України : у 30 т / ред. кол. І. М. Дзюба [та ін.] ; НАН України, НТШ, Координаційне бюро енциклопедії сучасної України НАН України. — К., 2003–2019. — ISBN 944-02-3354-X.

13. Применение ИК-термографии высокого разрешения для исследования поверхности водных растворов. А.В. Уваров, Н.А. Винниченко, Ю.Ю. Плаксина, А.В. Пуштаев. Сборник трудов конференции «Физика водных растворов» 2019
14. Серебренников П.С.: XVI Междунар. нач.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. Ч. 5. Москва, 25—27 мая. 2000.
15. Медицинская термография: возможности и перспективы. Морозов А.М., Мохов Е.М., Кадиков В.А., Панова А.В. Тверской государственный медицинский университет г. Тверь, Россия 2018.
16. Применение метода инфракрасной термографии для определения параметров линейной механики трещин, А.Ю. Федорова, М.В. Банникова, О.А. Плехов. Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия 2012
17. Термография в исследованиях зависимости поверхностного кровотока от функционального состояния внутренних органов. Олефир Г. И., Куклицкая А. Г., Волчек Д. В. Минск, научно-технический журнал «Наука и техника» №3- 2006.
18. Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Ляпунова Е.А., Петрова О.М., Баяндин Ю.В., Най-марк О.Б., Бродова И. Г. Неустойчивость пластического сдвига и локализация пластической деформации при динамической нагрузке, как результат структурно-кинетических переходов в системе мезодефектов // Вестник ПНИП. Механика. - 2013. - № 2. - С. 154-175.
19. Оценка нормальных и касательных напряжений в деформируемых металлах по данным инфракрасной термографии, Терехина А.И., Костина А.А., Плехов О.А. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика 2016.

- 20.Ревин Ю. В. О нахождении зимовок летучих мышей (Mammalia, Chiroptera) в Якутии / Ю. В. Ревин, Г. Г. Боескоров // Зоол. журн. - 1989. - Т. 68, вып. 3. -С. 150-151.
- 21.Матвиенко О.В. Математическое моделирование теплообмена и условий воспламенения турбулентного потока реагирующего газа // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 1.- С. 203-211.
- 22.Маевский Е.И., Смуров С.В., Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П. Настоящее и будущее инфракрасной термографии // Известия института инженерной физики. 2015. №1. С. 2–12.
- 23.Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П., Иваницкий Г.Р. Диагностические возможности матричной инфракрасной термографии. Проблемы и перспективы // Вестник новых медицинских технологий. 2012. № 4. С. 170–176.
- 24.Определение патологии позвоночника с помощью термографи [Цисляк О.С., Верховина Т.К., Арсентьева Н. И.] БЮЛЛЕТЕНЬ ВСНЦ З РАМН, 2011, №4(80), Часть 1
- 25.Интегральное картирование активности потовых желез методом термографии Д.И.Майсков, И.С.Залетов, А.В.Фомин, А.В.Скрипаль, А.А.Сагайдачный. Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. ЧернышевскогоE-mail: dmayskov@gmail.com(научнаястатья « Медицинские технологии»)
- 26.Колобородов В.Г. Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико-електронних приладах / В.Г. Колобородов, К.В. Харитоненко // Вісник НТУУ “КПІ”. – К. : НТУУ “КПІ”, 2010. – № 40. – С. 23–31.
27. Дистанційна інфрачервона термографія як допоміжний метод у діагностиці та моніторингу поопераційних стенозів гортані В.О. Паламарчук, В.В. Войтенко, В.Й. Котовський*, В.І. Дунаєвський*
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ. 2013

28. Котовський В.Й. Обґрунтування вимог до умов проведення термографічних досліджень біологічних об'єктів / В.Й. Котовський // Вісті академії інженерних наук України. – 2009. – № 2 (39). – С. 6 – 11.
29. Розенфельд Л.Г. Тепловизионная диагностика в оценке состояния здоровья молодежи в возрасте от 16 до 25 лет / Л.Г. Розенфельд, Ю.П. Дегтярев, С.А. Мироненко, Е.Ф. Венгер, В.И. Дунаевский, В.И. Котовский, Е.И. Латенко, С.С. Назарчук, Е.А. Соловьев // Электроника и связь. Тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии". – 2011. – № 4. – С. 131–136.
30. Термографическая визуализация и анализ изображений динамических процессов в области лица / И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, А.В. Хахалин, В.В. Шишаков, С.А. Исайчев, А.М. Черноризов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2017 № 6, с. 89-94
31. Тітова А.Ю., Шушура О.М. Методи сегментації термограм під час діагностики онкологічних захворювань молочної залози. Наукові праці ДонНТУ. – Покровськ, 2015. № 1(28). – С. 89 – 96.
32. Стафеев В.И., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Акимов В.М., Кпиманов Е.А., Сагинов Л.Д., Соляков В.Н., Мансветов Н.Г., Пономаренко В.П., Тимофеев А.А., Филачев А.М. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Государственный научный центр «НПО „Орион“» 2005
33. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панін А.В., Чернявский А.Г. Пластическая дисторсия– фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // Физ. мезомех. - 2016. - Т. 19. - № 1. - С. 31-46.
34. Логинов Ю.Н., Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. // Цветные металлы. - 2010. - № 5. - С. 119-122

35. Рони Ягель. Кафедра информатики, Университет шт. Огайо, США.
Аппаратный рендеринг объема. Открытые системы (издательство) (16 мая 1996). Дата обращения: 11 февраля 2010.
36. Oran E.S., Boris J.P. Numerical Simulation of Reactive Flow // Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York. 1987. P. 14.
37. Krapez J.-C., Spagnolo L., Frie P.M. Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography // Intern. J. of Thermal Sciences. - 2004. - V. 43. - P. 967-977.
38. CMOS Passive Pixel Imager Design Techniques by Iliana L. Fujimori- 2002
39. Fh Khan, Mohammad Bolhassani, Antonios Koutsos, Ahmad Hamid, Ivan Bartoli, Modeling and Experimental Implementation of Infrared Thermography on Concrete Masonry Structures, Infrared Physics & Technology- February 2015
40. Сергей Книгин. Что мы увидим, когда мы это увидим. Really.ru hitan.
Воксели (Voxel) 3. CodeNet.ru (7 марта 2009)
41. Amatea R., Knoedler C. M., Pantuso F. P. et al. // Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXIII. 1997. V. 3061. P. 210—222
42. IR imager: one of the fastest growth applications in MEMS // MEMSentry, December 2007. No. 22. P. 9, 10.
43. Datskos P., Lavrik N. // SPIE Newsroom. 2006. DOI: 10.1117/2.1200608.0361.
44. Hunter S. R., Maurer G. S., Simelgor G., Radhakrishnam S., Gray J. // In Infrared Technology and Applications XXXIII/B. F. Andresen; G. F. Fulop, P. R. Norton, Editors, 65421F, 2007.
45. Lavrik N., Archibald R., Grbovic D., Rajic S., Datskos P.: Ibid.
46. Grbovic D., Lavrik N. V., Datskos P. G., Forrai D., Nelson E., Devitt J., McIntyre B. // Applied Physics Letters. 2006. V. 89. P. 073118-1
47. Шитиков В. К., Мастицкий С. Э. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R. - 2017 – режим доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>

48.Режим доступа: <https://jsfiddle.net/elco/wf5e7nj2/>

ЛІСТІНІНГ ТЕКСТУ ПРОГРАМИ МОВОЮ C#

```
using System.Drawing;
using System;
using System.IO;
using System.Collections.Generic;

namespace Points3Dmodeler
{
    public class CornerPhoto
    {
        public Bitmap bitmap { get; set; }
        public double [] engel { get; set; }
        public CornerPhoto(Bitmap image, double engelXY, double engelZ)
        {
            bitmap = image;
            this.engel = ToRadian(new double [] { engelXY, engelZ });
        }
        private double[] ToRadian(double[] engel)
        {
            engel[0] = engel[0] / 180 * Math.PI;
            engel[1] = engel[1] / 180 * Math.PI;
            return engel;
        }
    }
}
```

```

class Points
{
    public byte X { get; set; }
    public byte Y { get; set; }
    public byte Z { get; set; }
    public Color color { get; set; }
    public Points(byte x, byte y, byte z,Color color)
    {
        X = x;
        Y = y;
        Z = z;
        this.color = color;
    }
}

class Poligon
{
    public Points [] points { get; set; }
    public byte PointsColorRed { get; set; }
    public byte PointsColorGreen { get; set; }
    public byte PointsColorBlue { get; set; }
    public Poligon(Points [] points, byte colorR, byte colorG, byte colorB)
    {
        this.points = points;
        PointsColorRed = colorR;
        PointsColorGreen = colorG;
        PointsColorBlue = colorB;
    }
    public Poligon(Points[] points)

```

```

    {
        this.points = points;
    }
}
class GetPointsModel
{
    Color Black = new Color();
    public double RadiusMax = 6, Radius = 3;
    public List<Points> position = new List<Points>();
    public List<Poligon> PointsPoints = new List<Poligon>();
    public bool ok, ok_1;

    //функція знаходження координат точок в тривимірному просторі на
основі зображення
    public void setXYZ(CornerPhoto[] image)
    {
        Black = image[0].bitmap.GetPixel(0, 0);
        FRONT(image);
        LEFT(image);
        REGT(image);
        BECK(image);
        Normalise();
        TNormalise();
    }

    //спрощена функція знаходження квадрату
    double Sqwer(double x)
    {
        return Math.Pow(x, 2);
    }

    //сортировка

```

```

private void FRONT (CornerPhoto[] image)
{
    for (int z = 0; z < image[0].bitmap.Height; z++)
        for (int x = 0; x < image[0].bitmap.Width; x++)
            for (int y = 0; y < image[3].bitmap.Width; y++)
                {
                    ok_1 = !Color.Equals(image[0].bitmap.GetPixel(z, x), Black);
                    ok = EqualsColor(image[0].bitmap.GetPixel(z, x),
image[3].bitmap.GetPixel(z, y));
                    if (ok&&ok_1)
                        {
                            if (!position.Contains(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x))))
                                position.Add(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x)));
                        }
                }
}

```

```

private void LEFT(CornerPhoto[] image)
{
    for (int z = 0; z < image[0].bitmap.Height; z++)
        for (int x = 0; x < image[0].bitmap.Width; x++)
            for (int y = 0; y < image[1].bitmap.Width; y++)
                {
                    ok_1 = !Color.Equals(image[0].bitmap.GetPixel(z, x), Black);
                    ok = EqualsColor(image[0].bitmap.GetPixel(z, x),
image[1].bitmap.GetPixel(z, image[1].bitmap.Width-1-y));
                    if (ok && ok_1)
                        {

```

```

        if (!position.Contains(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x))))

            position.Add(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x)));
    }
}

private void BECK(CornerPhoto[] image)
{
    for (int z = 0; z < image[1].bitmap.Height; z++)
        for (int x = 0; x < image[1].bitmap.Width; x++)
            for (int y = 0; y < image[2].bitmap.Width; y++)
                {
                    ok_1 = !Color.Equals(image[2].bitmap.GetPixel(z,
image[2].bitmap.Width - 1 - y), Black);

                    ok = EqualsColor(image[1].bitmap.GetPixel(z,
image[1].bitmap.Width - 1 - x), image[1].bitmap.GetPixel(z,
image[2].bitmap.Width - 1 - y));

                    if (ok && ok_1)
                        {
                            if (!position.Contains(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x))))

                                position.Add(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x)));
                        }
                }
}

private void REGT(CornerPhoto[] image)
{
    for (int z = 0; z < image[2].bitmap.Height; z++)
        for (int x = 0; x < image[2].bitmap.Width; x++)

```

```

        for (int y = 0; y < image[3].bitmap.Width; y++)
        {
            ok_1 = !Color.Equals(image[3].bitmap.GetPixel(z, x), Black);
            ok = EqualsColor(image[2].bitmap.GetPixel(z,
image[1].bitmap.Width - 1 - x), image[3].bitmap.GetPixel(z, y));
            if (ok && ok_1)
            {
                if (!position.Contains(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x))))
                    position.Add(new Points((byte)x, (byte)y, (byte)z,
image[0].bitmap.GetPixel(z, x)));
            }
        }
    }

    bool EqualsColor(Color color1, Color color2)
    {
        if (((color1.R - color2.R) < 10) && ((color1.G - color2.G) < 10) &&
((color1.B - color2.B) < 10))
            return true;
        return false;
    }

    public void Normalise()
    {
        for (int i = 0; i < position.Count; i++)
            for (int j = i + 1; j < position.Count; j++)
                if (Math.Pow((position[j].X - position[i].X), 2) +
Math.Pow((position[j].Y - position[i].Y), 2) + Math.Pow((position[j].Z -
position[i].Z), 2) < Sqwer(Radius))
                {
                    position.RemoveAt(j);
                }
            }
    }

```

```

        j--;
    }
}
void TNormalise()
{
    List<Points> RadiusPoints = new List<Points>();
    Points point2=new Points(0,0,0,Black);
    bool FindPoint2;
    double Radius;
    for (int i = 0; i < position.Count; i++)
    {
        FindPoint2 = false;
        for (int j = i + 1; j < position.Count; j++)
        {
            if (Sqwer(position[j].X - position[i].X) + Sqwer(position[j].Y -
position[i].Y) + Sqwer(position[j].Z - position[i].Z) < Sqwer(RadiusMax))
            {
                if (!RadiusPoints.Contains(position[j]))
                    RadiusPoints.Add(position[j]);
            }
        }
        Radius = this.Radius;
        do
        {
            for (int j = i + 1; j < RadiusPoints.Count; j++)
            {
                if (Sqwer(position[j].X - position[i].X) + Sqwer(position[j].Y -
position[i].Y) + Sqwer(position[j].Z - position[i].Z) < Sqwer(Radius))
                {

```

```

        if (FindPoint2)
        {
            Points[] poligonPosition = { position[i], point2,
RadiusPoints[j]};
            if (!PointsPoints.Contains(new Poligon(poligonPosition,
position[i].color.R, position[i].color.G, position[i].color.B)))
                PointsPoints.Add(new Poligon(poligonPosition));
        }
        point2 = RadiusPoints[j];
        FindPoint2 = true;
    }
}
Radius += 0.1;
}
while (Radius <= RadiusMax);
RadiusPoints.Clear();
position.RemoveAt(i);
i--;
}
}
}
class PoligonalTextur
{
    private Bitmap poligonalTextur { get; set; }
    private Color backgroundColor { get; set; }
    private Poligon[] PointsList { get; set; }
    public PoligonalTextur(string adres, List<Poligon> PointsList)
    {
        poligonalTextur = new Bitmap("adres");
    }
}

```

```

    backgroundColor = poligonalTextur.GetPixel(0, 0);
    this.PointsList = PointsList.ToArray();
    MakePoligonColor();
}
private void MakePoligonColor()
{
    for (int x = 0; x < poligonalTextur.Width; x++)
        for (int y = 0; y < poligonalTextur.Height; y++)
            {
                if (!Color.Equals(poligonalTextur.GetPixel(x, y), backgroundColor))
                    {
                        for (int n = 0; n < PointsList.Length; n++)
                            {
                                if ((PointsList[n].points[1].X == x || PointsList[n].points[1].Y ==
x) && PointsList[n].points[1].Z == y)
                                    {
                                        poligonalTextur.SetPixel(x, y,
Color.FromArgb(PointsList[n].PointsColorRed, PointsList[n].PointsColorGreen,
PointsList[n].PointsColorBlue));
                                    }
                                }
                            }
            }
}
public void SaveNewPoligonalTextur(string adres)
{
    poligonalTextur.Save(adres);
    return;
}

```

```

}

class Program
{
    static int Main(string[] args)
    {
        CornerPhoto[] photo = new CornerPhoto[5];
        photo[0] = new CornerPhoto(new
Bitmap(@"C:\Users\User\source\repos\WpfApp1\Image1.bmp"), 0,0);
        photo[1] = new CornerPhoto(new
Bitmap(@"C:\Users\User\source\repos\WpfApp1\Image2.bmp"), 90,0);
        photo[2] = new CornerPhoto(new
Bitmap(@"C:\Users\User\source\repos\WpfApp1\Image3.bmp"), 180,0);
        photo[3] = new CornerPhoto(new
Bitmap(@"C:\Users\User\source\repos\WpfApp1\Image4.bmp"), 270,0);
        photo[4] = new CornerPhoto(new
Bitmap(@"C:\Users\User\source\repos\WpfApp1\Image4.bmp"), 0, 90);
        GetPointsModel Points = new GetPointsModel();
        Points.setXYZ(photo);
        List<Poligon> PointsList = Points.PointsPoints;
        byte[] byteArray = new byte[12];
        FileStream file=File.Open("PoligonalModel", FileMode.Create);
        for (int i = 0; i < PointsList.Count; i++)
        {
            byteArray[0] = PointsList[i].points[0].X;
            byteArray[1] = PointsList[i].points[0].Y;
            byteArray[2] = PointsList[i].points[0].Z;
            byteArray[3] = PointsList[i].points[0].X;
            byteArray[4] = PointsList[i].points[0].Y;
            byteArray[5] = PointsList[i].points[0].Z;

```

```
        byteArray[6] = PointsList[i].points[0].X;
        byteArray[7] = PointsList[i].points[0].Y;
        byteArray[8] = PointsList[i].points[0].Z;
        byteArray[9] = PointsList[i].PointsColorRed;
        byteArray[10] = PointsList[i].PointsColorGreen;
        byteArray[11] = PointsList[i].PointsColorBlue;
        file.Write(byteArray,0, byteArray.Length);
    }
    Console.WriteLine("File PoligonalModel Done!!!");
    //точка зупинки перед обробкою полігональної текстури.
    Console.ReadLine();
    PoligonalTextur image= new PoligonalTextur("PoligonalTexture",
PointsList);
    image.SaveNewPoligonalTextur("NewPoligonalTexture")
    Console.WriteLine("NewPoligonalTexture is Save!!!");
    return 0;
}
}
}
```