

УДК 621.039:637

**Світлана ШАПОВАЛ,  
Роман ШЕВЧЕНКО****РЕМ-ФОТОГРАММЕТРІЯ  
В ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИЦІ  
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОВАРІВ**

*Вивчено аспекти використання методики стереофотограмметричної цифрової теплофізичної зйомки поверхні продукту за допомогою растрового електронного мікроскопу, визначено технологічні прийоми температурного градієнта та алгоритму програмування відповідних процесів. Створено структурно-графічну та математичну модель експрес-діагностичного знімання теплофізичних властивостей поверхні продукту. Обґрунтовано аналітичні прийоми інтерпретації центрів максимальних і мінімальних температур та градієнтних шкал. Представлено технологічний ланцюг трьохмірної моделі теплофізичного градієнта та особливості її інсталяції в системі автоматичного визначення теплофізичних характеристик харчового продукту.*

*Ключові слова:* РЕМ<sup>1</sup>-фотограмметрія<sup>2</sup>, електронні знімки, градієнти температур на знімках, геометричні властивості цифрового дистанційного знімання поверхонь, теплофізична модель.

*Шаповал С., Шевченко Р. РЭМ-фотограмметрия в экспресс-диагностике теплофизических свойств товаров. Изучены аспекты применения методики стереофотограмметрической цифровой теплофизической съемки поверхности продукта с помощью растрового электронного микроскопа, определены технологические приемы температурного градиента и алгоритма программирования соответствующих процессов. Образована структурно-графическая и математическая модель экспресс-диагностической съемки теплофизических свойств поверхности продукта. Обоснованы аналитические приемы интерпретации центров максимальных и минимальных температур и градиентных шкал. Представлена технологическая схема трехмерной модели теплофизического градиента и особенности ее инсталляции в системе автоматического определения теплофизических характеристик пищевого продукта.*

*Ключевые слова:* РЭМ-фотограмметрия, электронные снимки, градиенты температур на снимках, геометрические свойства цифрового дистанционного съема поверхностей, теплофизическая модель.

<sup>1</sup> РЕМ – растровый электронный микроскоп.

<sup>2</sup> Фотограмметрія (від грец. "фото" – світло, "грам" – запис, "метрію" – вимірювання) – інженерно-технічна наука, головним завданням якої є розробка методів визначення метричних, фізико-хімічних і просторових характеристик об'єктів і їхніх поверхонь за даними їх дистанційного зондування (знімання).

**Постановка проблеми.** Наукові засади експрес-діагностики теплофізичних властивостей об'єктів ґрунтуються на теорії теплопровідності матеріалів і методології теплопровідного опору та концепції інтенсивності передачі теплової енергії в середовищі харчових продуктів у контексті визначення періоду часу транспортування та зберігання. У зв'язку з комерціалізацією експертних оцінювань якості вітчизняних і закордонних харчових продуктів та запровадження європейських стандартів експрес-діагностика набуває пріоритетності, а для підтвердження сертифікатів і достовірності досліджень пропонується запровадження методик суміжних інженерно-технічних дисциплін, таких як прикладна РЕМ-фотограмметрія.

Сучасна експрес-діагностика теплофізичних властивостей об'єктів може проводитися із залученням технології цифрової фотограмметрії – визначення геометричних, просторових, фізико-хімічних, мікробіологічних, теплофізичних та інших характеристик об'єктів, явищ, предметів побуту, продуктів харчування за допомогою їхніх цифрових фотографічних та інших зображень різного спектру (тепловізійного, тепловізорного – інфрачервоного, ультрафіолетового тощо). Однією із найсучасніших методик визначення теплофізичних характеристик на молекулярному рівні є метод РЕМ-фотограмметрії або метод вимірювання зображень і аналіз мікротопографії тіла за даними растрового електронного мікроскопу.

Аналіз і реконструкція деяких мікротопологічних характеристик при вивченні їх теплофізичних властивостей або реконструкції поверхонь є одним із найважливіших аспектів використання можливостей сучасної растрової електронної мікроскопії. Ідея застосування цифрових РЕМ-стереофотограмметричних методів при оцінці електронно-мікроскопічних зображень структур виникла ще в 1940-х рр. і апробована професором Д. Готтхардтом у 1942 р. в Університеті штату Мічіган (США) [1, с. 108]. Проте до теперішнього часу, не зважаючи на значні практичні й теоретичні досягнення в цій області прикладної фізики, залишаються не вирішеними певні завдання, яким і присвячені відповідні наукові дослідження.

Одним із першочергових завдань при обробці електронно-мікроскопічних знімків, на думку спеціалістів [1–3], є визначення виду проєкції або апріорний математичний опис процесу утворення зображення за допомогою РЕМ. Як правило, при збільшенні до 300 крат виходить зображення, яке має вигляд і розглядається як центральна проєкція, при збільшенні до 500 крат – як паралельна. На наш погляд, використання центральної проєкції для моделюванні трьохмірних моделей і побудова мікроізотерм теплофізичної диференціації на неї при збільшенні до 500 крат є виправданим, що підтверджено експериментально [1, с. 107].

*Мета роботи* – теоретичне узагальнення наукових підходів щодо вивчення основних фізичних характеристик градієнта температур на поверхнях харчових продуктів для їх тривалого зберігання та транспортування. Об'єктом дослідження є теплофізичні властивості харчових продуктів, детермінація температурного градієнта, визначення топології розташування максимальних і мінімальних температур на поверхні, а також апробація оптимального методу цифрової фотограмметрії (РЕМ-технології) для високоточного моделювання теплофізичних властивостей у форматах 3D та 4D.

**Матеріали та методи.** Апробаційним матеріалом є методики та підходи, які пропонуються залучити в експрес-діагностиці теплофізичних властивостей продуктів харчування, які швидко псуються. Планується проаналізувати спеціальну методику РЕМ-фотограмметрії з відповідним технічним інструментарієм і графіко-аналітичною системою з нанесеною сіткою псевдопаралелей і псевдомеридіанів із ціною поділки 0.25 мм, які входять до комплекту зразків РЕМ-фотограмметричного обладнання теплофізичної макрозйомки. Для забезпечення відповідного дослідження необхідне отримання стереопари цифрових електронних знімків, з яких буде обрана ділянка поверхні.

**Результати дослідження.** Визначення теплофізичної структури поверхні об'єктів необхідно для розв'язання низки науково-практичних завдань. Методика підрахування віку поверхні визначається на основі ідентифікації концентричних температурних стрибків подовжнього зрізу предмету. Отримання відповідного зрізу без спотворень задача надзвичайно наукоємна та технологічна. Як розв'язання проблеми пропонується дистанційне реконструювання теплофізичних градієнтів у часі за допомогою модельної поверхні мікрооб'єкта [2, с. 83].

Методика отримання стереопар у РЕМ-фотограмметрії полягає в повторній зйомці одного й того ж зразка, який нахилений під різними кутами по відношенню до електронного зонду. Стереозображення отримуються на електронному мікроскопі *Philips SEM 505*, який здійснює сканування (рис. 1). Мікроскоп поєднаний з комп'ютером через спеціальний блок, у якому вихідний сигнал трансформується в цифрове теплофізичне зображення на екрані комп'ютера. Пряме з'єднання скорочує кількість помилок при переносі зображення з мікроскопа, а також дає можливість оператору обрати оптимальну експериментальну область для встановлення типових теплофізичних градієнтів поверхні (рис. 2) [4, с. 28–33].

Для побудови цифрової моделі теплофізичних градієнтів необхідно користуватися фотограмметричною системою *Z-Space 1.2*, а також спеціально розробленим програмним комплексом *Program of Analysis 3D Model (PA-3DM)*, який складається з двох функціональних блоків, об'єднаних спільним інтерфейсом [3, с. 218–267]. Технологічний ланцюг побудови трьохмірної теплофізичної моделі представлено на рис. 3.

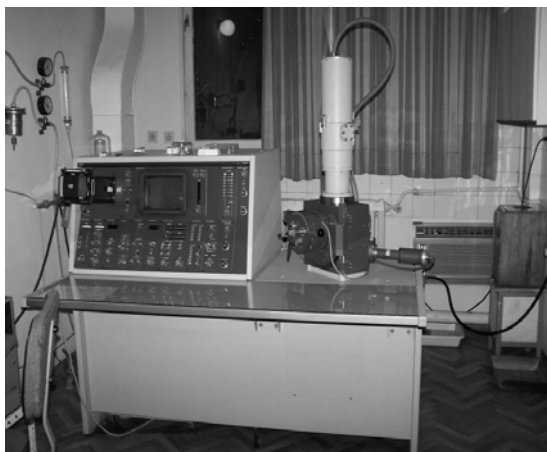


Рис. 1.  
Електронний мікроскоп  
*Philips SEM 505*,  
який здійснює  
сканування

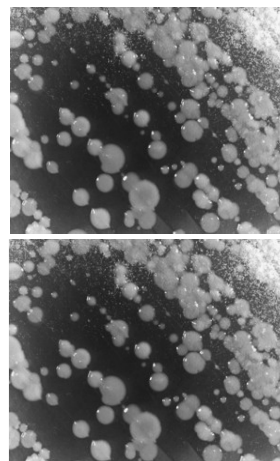


Рис. 2.  
Стереопара поверхні сиру  
на цифровому зображенні  
растрового електронного  
мікроскопа  
(збільшення 1.26 на 102 мкм)

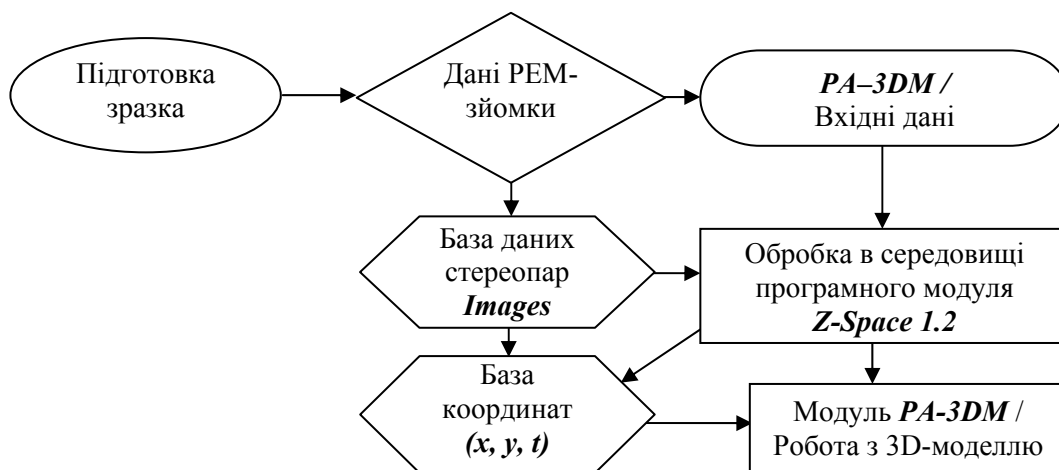


Рис. 3. Технологічний ланцюг отримання тримірної теплофізичної моделі

Підсистема підготовки *PA-3DM / Вхідні дані*<sup>3</sup> реалізує такі функції:

- встановлення параметрів розмітки (внутрішнє орієнтування): фокусна відстань фотокамери  $f$ , координати  $x_0, y_0$  головної точки та шість елементів зовнішнього орієнтування – координати центру проєкції  $S - (X_S, Y_S, Z_S)^2$ ;
- подовжній і поперечний кути нахилу знімка  $\alpha, w$  і кут поворота  $c$ ;
- визначення опорних точок на стереознімку зі збереженням їх у вигляді текстового файлу (зовнішнє орієнтування) та визначення параметрів фотографування для неметричних знімків.

<sup>3</sup> *PA-3DM / Вхідні дані* – програмний модуль (опція), який представляє комплекс зібраної статистичної інформації у вигляді 3D-поля даних (поверхні температурних градієнтів).

Оброблена стереопара, а також вхідні параметри подаються як вихідні дані на вхід до цифрової фотограмметричної системи *Z-Space 1.2*. (рис. 4).

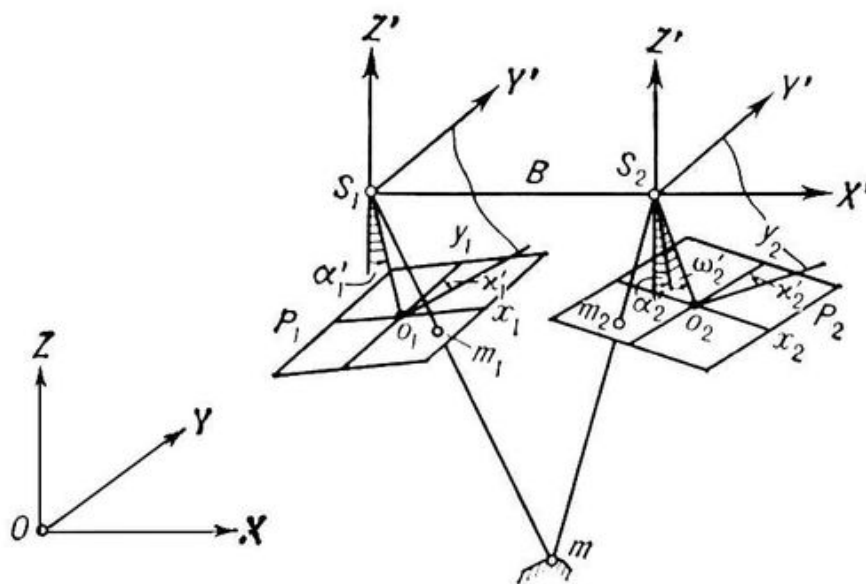


Рис. 4. Елементи зовнішнього та внутрішнього орієнтування цифрової стереофотограмметричної пари електронних знімків

Між координатами точки об'єкта та її температурою існує зв'язок, де  $X, Y, Z$  і  $X_S, Y_S, Z_S$  – координати точок *M*-коду і точки *S* в системі координат  $OXYZ$ ;  $X', Y', Z'$  – координати точки *m* в системі  $SXYZ$ , яка є паралельною до системи  $OXYZ$ , що обчислюються за плоскими координатами  $x$  і  $y$ . Саме тому взаємовідношення елементів матиме вигляд:

$$\begin{aligned} Ta_1 &= \cos \alpha \cos c - \sin \alpha \sin w \sin c; \\ Ta_2 &= -\cos \alpha \sin c - \sin \alpha \sin w \cos c; \\ Ta_3 &= -\sin \alpha \cos w; \\ Tb_1 &= \cos w \sin c; \\ Tb_2 &= \cos w \cos c; \\ Tb_3 &= -\sin w, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } c_1 &= \sin \alpha \cos c + \cos \alpha \sin w \sin c, \\ c_2 &= -\sin \alpha \cos c + \cos \alpha \sin w \cos c, \\ c_3 &= \cos \alpha \cos w, \end{aligned}$$

де  $c$  – направляючі косинуси температурних градієнтів на поверхні харчового продукту.

Формули зв'язку між координатами точки *M*-коду об'єкта й координатами екстремальних значень температур  $m_1$  і  $m_2$  на стереопарі  $P_1-P_2$  мають інтерпретацію, де  $B_X, B_Y$  і  $B_Z$  – проекції базису  $B$  на вісі координат. Якщо елементи зовнішнього орієнтування стереопари

відомі, то координати температури максимальної та мінімальної точки об'єкта можна визначити методом прямої засічки. Положення точки поверхні можна знайти по одиночному знімку в окремому випадку, коли об'єкт плоский ( $Z=const$ ). Координати мінімальних значень температур  $x$  і  $y$  точок знімків вимірюються на монокомпараторі або стереокомпараторі [5, с. 22].

Елементи внутрішнього орієнтування відомі з результатів калібрування цифрового мікроскопа, а елементи зовнішнього орієнтування можна визначити при фотографуванні об'єкта методом фототріангуляції. Якщо елементи зовнішнього орієнтування знімків невідомі, то координати максимальних і мінімальних значень температур точок поверхні об'єкта знаходять із використанням опорних точок (метод зворотної засічки). Опорна точка – визначена на знімку контурна точка об'єкта з координатами температур, які отримано в результаті теплофізичних вимірів або з фототеплотріангуляції<sup>4</sup>. Застосовуючи зворотню засічку, спочатку знаходять елементи взаємного орієнтування градієнтів температур на знімках  $P_1-P_2$ , де –  $a'_1, a'_2, w'_2, c'_2$  в координатній системі  $S_1X'Y'Z'$ ; вісь  $X$  збігається з базисом, а вісь  $Z$  лежить у головній базисній площині  $S_1 S_2$  знімка  $P_1$ . Потім обчислюють координати точок температур моделі в тій же системі. Далі, використовуючи опорні точки, переходять від координат точок моделі до координат температур точок об'єкта [6, с. 30].

Елементи взаємного орієнтування уможливають встановлення перехідних температур на знімку в ті значення відносно один одного, якими вони були при фотографуванні об'єкта (початкові градієнти температур). У цьому випадку кожна пара відповідних променів, наприклад  $S_{1m1}$  і  $S_{2m2}$ , перетинається і утворює точку ( $m$ ) моделі. Сукупність променів, що належать знімку, називається термов'язкою, а центр проекції –  $S_1$  або  $S_2$  – вершиною термов'язки. Масштаб моделі залишається невідомим, тому що відстань  $S_1$  та  $S_2$  між вершинами в'язок вибирається довільно. Відповідні точки стереопари  $m_1$  і  $m_2$  містяться в одній площині, яка проходить через базис  $S_1 S_2$ , тому вважається, що наближені значення елементів взаємного орієнтування відомі, і їх можна представити рівнянням (1) в лінійному вигляді:

$$ada_1' + bda_2' + cdw_2' + ddc_1' + edc_2' + l = V, \quad (2)$$

де  $da_1', \dots, edc_2'$  – поправки до наближених термічних значень невідомих;

$a, \dots, e$  – часткові похідні від функції по змінних  $a_1' \dots a_2'$ ;

$l$  – значення функції, обчислене за наближеними значеннями невідомих.

<sup>4</sup> Фототеплотріангуляція (англ. *photoheattriangulation*) – метод визначення координат точок із максимальним і мінімальним градієнтом, визначений прийомами дистанційного зондування. При цьому аналізують геометричні властивості фотознімків одного або декількох трикутників із променів (тріангуляція). Використовується для створення теплофізичного ряду інженерних задач.

Для визначення елементів взаємного орієнтування вимірюють координати центрів максимальних температур не менше п'яти точок стереопари і розв'язують способом послідовних наближень. Координати точок моделі з мінімальними температурами обчислюють, вибравши довільно довжину базису  $B$ , і вважаючи  $X_{s_1} = Y_{s_1} = Z_{s_1} = 0$ ;  $B_X = Y$ ;  $B_Y = B_Z = 0$ . При цьому просторові координати точок  $m_1$  і  $m_2$  знаходять, а направляючі косинуси для знімка  $P_1$  за елементами  $\alpha_1'$ ,  $w_1' = 0$ ,  $c_1'$ , а для знімка  $P_2$  за елементами  $\alpha_2'$ ,  $w_2'$ ,  $c_2'$ .

За координатами  $X' Y' Z'$  точки моделі визначають координати максимальної температури поверхні, де  $t$  – знаменник масштабу моделі. Направляючі косинуси отримують, підставляючи замість кутів  $\alpha$ ,  $w$  і  $\alpha_2'$  подовжній кут нахилу моделі  $x$ , поперечний кут нахилу моделі  $h$  і кут повороту моделі  $q$ .

Для визначення семи елементів зовнішнього орієнтування моделі –  $\varphi$ ,  $\zeta$ ,  $\omega$ ,  $x$ ,  $h$ ,  $q$ ,  $t$  – складають рівняння для трьох або більше опорних точок і розв'язують їх (інтерполяція температурного градієнту поля значень). Координати опорних точок знаходять фотометричним способом або методом фототріангуляції. Сукупність точок об'єкта, координати екстремальних температур яких відомі, утворюють цифрову теплофізичну модель об'єкта для складання теплофізичної карти градієнта температур.

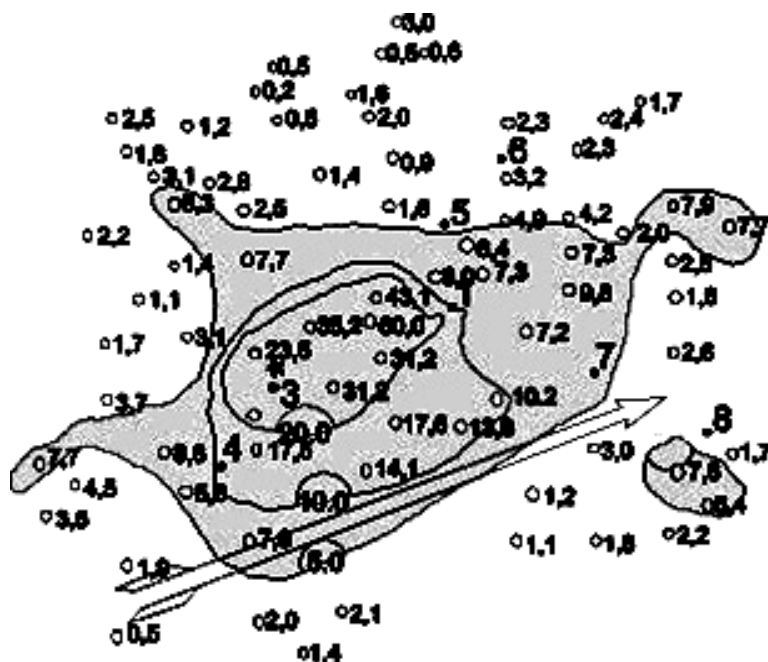
Окрім аналітичних методів обробки знімків, застосовуються аналогові, засновані на використанні фотограмметричних приладів фототрансформатора, стереографа, стереопроектора та ін.

При роботі зі стереопарою зразка в програмі *Z-Space* оператор вручну здійснює прив'язку відповідних опорних точок на лівому й правому зображеннях. Після такого вибору програма оцінює рівень температури та кореляцію точок. При високому коефіцієнті кореляції здійснюється перехід до створення цифрової теплофізичної матриці поверхні харчового продукту [7, с. 110–123].

Для моделювання і візуального відображення моделі температурного градієнта або визначення часу зберігання продукту розроблено другий програмний модуль системи *PA-3DM / Робота з 3D-моделлю*. Використання інструментальних засобів забезпечує додаткові можливості для теплофізичного експрес-аналізу, наприклад, теплофізичне картування поверхні через рівно проміжні та стохастичні часові інтервали (функція – "Палітра"), теплофізичне профілювання (опція – "Зріз"), вимірювання градієнта температур (опція – "Лінійка") тощо.

Таким чином, за допомогою системи *PA-3DM* може бути розв'язана задача визначення експрес-діагностики теплофізичних властивостей за їх 3D-моделюванням [8, с. 213]. Можна отримати профілі цифрового терморельєфу уздовж будь-якого напрямку поверхні з відображенням так званого графіка температури. За допомогою даних відповідних графіків можуть бути виокремлені концентричні термічні

градієнти, які називатимуться екзотермічними зонами поверхні продукту. Отримані графіки у вигляді псевдоізотерм можуть бути збережені у вигляді файлу графічного формату. На *рис. 5* представлено результат експрес-діагностики теплофізичного поля поверхні сиру плавленого.



*Рис. 5.* Визначення теплофізичного поля поверхні сиру плавленого

**Висновки.** Технології моделювання теплофізичних властивостей з використанням цифрових РЕМ-фотограмметричних методів дають змогу вирішувати нові наукові задачі експрес-діагностики теплофізичних властивостей об'єктів, а саме:

- моделювання середовища за їх трьохмірними моделями мікроповерхонь;
- застосування системи, яка інтегрує спеціально розроблене програмне забезпечення *PA-3DM* і ліцензовану цифрову фотограмметричну систему *Z-Space 1.2*. та уможливорює проводити високоточне вимірювання градієнта температур у середовищі;
- використання РЕМ-фотограмметрії в наукових дослідженнях щодо прогнозування терміну зберігання харчових продуктів, що може стати технологічною основою створення комплексної наукової колекції (атласу) теплофізичних властивостей харчових продуктів за їх чотирьохмірними координатами.

Окреслено прикладні аспекти РЕМ-фотограмметричних методик з експрес-діагностики теплофізичних властивостей: велика продуктивність (вимірюються не об'єкти, а їх зображення); висока точність (використання точних апаратів, інструментів для утворення та виміру знімків і способів обробки результатів); можливість вивчення як неру-



хомих, так і рухомих об'єктів; повна об'єктивність результатів вимірів, які виконуються дистанційно.

Також визначено, що щілинні, панорамні фотознімки та отримані із застосуванням мікрорадіолокацій, мікротелевізійних, інфрачервоно-теплових та інших знімальних систем, істотно розширюють можливості будь-яких експрес-методів визначення теплофізичних властивостей об'єкта. Проте вони не мають єдиного центру проекції та елементів зовнішнього орієнтування, оскільки безперервно змінюються в процесі побудови зображення, що може ускладнювати використання таких знімків для вимірювальних цілей.

Перспективи подальших досліджень потребуватимуть удосконалення підходів щодо підвищення точності РЕМ-фотограмметричних зондувань, а саме – розробки методів дистанційного експрес-контролю тепловізійної зйомки поверхні харчових продуктів для контролю температурних градієнтів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Goldstein J. I.* Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin ; пер. с англ. — М. : Мир, 1984. — 352 с.
2. *Ходжер Т. А.* Использование методов цифровой фотограмметрии для воссоздания рельефа чешуи байкальского омуля / Т. А. Ходжер, М. Л. Тягун // Вычислительные технологии : науч.-техн. журн. — М. : Инженерия, 2005. — № 4. — Т. 10. — С. 107—110.
3. *Калантаров Е. И.* Фотограмметрическая обработка электронно-микроскопических снимков / Е. И. Калантаров, М. Ж. Сагындыкова // Изв. вузов. — М. : Наука, 1983. — № 2. — С. 82—85. — (Серия "Геодезия и аэрофотосъемка").
4. *Лобанов А. Н.* Фотограмметрия : учебн. для вузов ; 2-е изд., перераб. и доп. / А. Н. Лобанов. — М. : Недра, 1984 — 552 с.
5. *Hemmler M.* Photogrammetrische Auswertung Elektronenmikroskopischer Bilddaten / M. Hemmler // Dissertation, eingereicht in der Fakultät 6 der Technische Universität. — Berlin, 2002. — P. 142.
6. *Соколов В. Н.* Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям / В. Н. Соколов, А. А. Лебедев, Д. И. Юрковец // Изв. РАН. — М. : Наука, 1995. — № 2. — Т. 59. — С. 28—35. — (Серия "Физика").
7. *Мина М. В.* Использование регистрирующих структур при исследовании сезонных ритмов роста животных. Рост животных / М. В. Мина, Г. А. Клевезаль. — М. : Наука, 1976. — 232 с.
8. *Sinram O.* Calibration of an SEM, using a nano positioning tilting table and a microscopic calibration pyramid / O. Sinram, M. Ritter, S. Kleindiek // ISPRS Commission V Symp. Close-Range Vision Techniques. — Corfu, Greece, 2002. — P. 210—215.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2014.

**Shapoval S., Shevchenko R. REM-Photogrammetry in rapid diagnosis of the thermo physical properties of the products.**

**Background.** To attract new methods of the rapid diagnosis of thermo physical properties of food products it was offered to apply the methods of digital stereo photogrammetry, which results of functioning can be determined to the remote method by using a scanning electron microscope.

**Material and methods.** The basis of scientific researches was the creation of modern structural graphic model of the stereophotoimage of the micro surface with defining the gradient and the determination of its minimum and maximum temperatures. The mathematical apparatus for the analysis of the stereo pair in researching of some physical features and their approbation in the food industry was worked out.

**Results.** Certain aspects of techniques of the stereo photogrammetric thermo physical shooting surfaces were offered. Argumentation of methods of the graphical and mathematical model for rapid diagnostic of the surfaces with the analytical techniques by defining the centers of maximum and minimum temperature gradient scale etc. were provided. Technological chain of the three-dimensional model of the thermo physical and gradient features in the modules and programmes of the automatic determination of the surface thermo physical properties were analyzed.

**Conclusion.** The technology of modeling thermal properties of the food sample was analyzed using digital photogrammetric methods that solves scientific research problems in rapid diagnosis of thermal properties for their micro surfaces by creating their three-dimensional models. Software system, that integrates a specially designed software *PA-3DM* of the licensed digital photogrammetric system *Z-Space 1.2* was analyzed. At present we are working actively on the creation of the complex scientific collections (atlases) of the thermal properties in *4D* coordinates.

**Keywords:** REM-photogrammetry, digital images, temperature gradients in the pictures, geometric properties of digital remote capture surfaces, thermal model.

#### REFERENCES

1. Goldstein J. I. Rastrovaja jelektronnaja mikroskopija i rentgenovskij mikroanaliz / J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin ; per. s angl. — M. : Mir, 1984. — 352 s.
2. Hodzher T. A. Ispol'zovanie metodov cifrovoj fotogrammetrii dlja vossozdanija rel'efa cheshui bajkal'skogo omulja / T. A. Hodzher, M. L. Tjagun // Vychislitel'nye tehnologii : nauch.-tehn. zhurn. — M. : Inzhenerija, 2005. — № 4. — T. 10. — S. 107—110.
3. Kalantarov E. I. Fotogrammetricheskaja obrabotka jelektronno-mikroskopicheskikh snimkov / E. I. Kalantarov, M. Zh. Sagyndykova // Izv. vuzov. — M. : Nauka, 1983. — № 2. — S. 82—85. — (Serija "Geodezija i ajerofotosemka").
4. Lobanov A. N. Fotogrammetrija : uchebn. dlja vuzov ; 2-e izd., pererab. i dop. / A. N. Lobanov. — M. : Nedra, 1984 — 552 s.
5. Hemmleb M. Photogrammetrische Auswertung Elektronenmikroskopischer Bilddaten / M. Hemmleb // Dissertation, eingereicht in der Fakultat 6 der Technische Universitat. — Berlin, 2002. — P. 142.
6. Sokolov V. N. Metod trehmernoj rekonstrukcii mikrorel'efa poverhnosti tverdyh tel po ih RJeM-stereoizobrazhenijam / V. N. Sokolov, A. A. Lebedev, D. I. Jurkovec // Izv. RAN. — M. : Nauka, 1995. — № 2. — T. 59. — S. 28—35. — (Serija "Fizika").
7. Mina M. V. Ispol'zovanie registrirujushhih struktur pri issledovanii sezonnyh ritmov rosta zhivotnyh. Rost zhivotnyh / M. V. Mina, G. A. Klevezal'. — M. : Nauka, 1976. — 232 s.
8. Sinram O. Calibration of an SEM, using a nano positioning tilting table and a microscopic calibration pyramid / O. Sinram, M. Ritter, S. Kleindiek // ISPRS Commission V Symp. Close-Range Vision Techniques. — Corfu, Greece, 2002. — P. 210—215.