

УДК 615.849.19

В. Б. МАКСИМЕНКО, В. В. ШЛЫКОВ, В. А. ДАНИЛОВА**ОБНАРУЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВИДЕО ТЕРМОГРАММ**

Представлен метод обнаружения тепловых неоднородностей на видео термограммах сердца, который включает в себя несколько инновационных механизмов. Предлагаемая методика сохраняет набор значений для каждого пикселя термографического изображения, которые определяются из предыдущего кадра видеоизображения. Затем этот набор значений сравнивается с текущим значением пикселя, чтобы определить, относится ли этот пиксель к фону. Поэтому для каждого последующего фрейма термографического изображения периодически происходит обновление фонового изображения, что позволяет системе обнаруживать изменение градиента температур и выделять тепловые неоднородности на поверхности сердца.

Ключевые слова: модель, тепловой поток, распределение температуры, MSC Sinda.

Представлений метод виявлення теплових неоднорідностей на відео термограмах серця, який включає в себе кілька інноваційних механізмів. Запропонована методика зберігає набір значень для кожного пікселя термографічного зображення, які визначаються з попереднього кадру відеозображення. Потім цей набір значень порівнюється з поточним значенням пікселя, щоб визначити, чи відноситься цей піксель до фону. Тому для кожного наступного фрейму термографічного зображення періодично відбувається оновлення фонового зображення, що дозволяє системі виявляти зміну градієнта температур і виділяти теплові неоднорідності на поверхні серця.

Ключові слова: модель, тепловий потік, розподіл температури, MSC Sinda.

The method for detecting thermal inhomogeneities in video of a cardiac thermograms is presented, which includes several innovative mechanisms. The proposed technique stores a set of values for each pixel of the thermal image, which is determined from the previous frame of the video image. This set of values is then compared with the current pixel value to determine if the pixel belongs to the background. Therefore, for each subsequent frame of the thermal image, the background image is periodically updated, which allows the system to detect a change in the temperature gradient and to determine thermal inhomogeneities on the heart surface.

Keywords: model, heat flow, temperature distribution, MSC Sinda.

Введение. Известно, что воспалительные, сосудистые, онкологические и дегенеративные патологические процессы меняют локальное распределение температуры на поверхности тела. Эти изменения тем более выражены, чем ближе к поверхности расположен патологический очаг. Причем, в разных участках тела температура неодинакова и меняется в зависимости от физиологического состояния организма. Обычно локальные изменения температуры опережают визуальные клинические проявления, что очень важно для ранней диагностики и своевременного лечения. При воспалительных процессах определяется зона гипертермии, что соответствует области инфильтрации, которая имеет неоднородную структуру, при этом отмечается разница температур с окружающими тканями 0,7–1 °C при хроническом воспалении, 1–1,5 °C при остром, и более 1,5–2 °C при деструктивном процессе [1, 2].

В экспериментальных и хирургических ситуациях в кардиологии термография позволяет хирургу контролировать температуру в нужной точке эпикарда желудочков и визуализировать, насколько хорошо функционируют трансплантаты. Данные термографии могут помочь определить степень ишемического повреждения миокарда, сердца и кровеносных сосудов во время операции [3]. В условиях искусственного кровообращения на термограммах проявляются эффекты неравномерного распределения температуры в тканях организма человека во время управляемого охлаждения и согревания [4]. Исследование биофизических основ инфракрасной термографии сердца позволяет принять эффективные меры по совершенствованию интраоперационной защиты жизненно важных органов. В этой связи обнаружение и исследование тепловых неоднородностей на термограммах открытого сердца позволит повысить эффективность при-

менения инструментов контроля температуры в условиях искусственного кровообращения.

Модель обнаружения тепловых неоднородностей на видео термограмм. В работе описывается программная модель обнаружения тепловых неоднородностей на видео термограммах сердца, которая содержит схему вычитания исходного фона и удаления статических объектов, температура которых не изменяется. Как правило, общий подход для выделения движущегося объекта из фоновой сцены – вычитание фона изображения. Идея состоит в том, чтобы вычесть текущее изображение, которое содержит объект, из эталонного изображения в течение определенного периода времени. Вычитание фона оставляет только нестационарные или новые объекты в видео-ряде, которые включают всю область теней объектов. Этот метод используется во многих системах предварительной обработки потока видео для обнаружения и отслеживания объектов [5, 6]. Однако многие из этих алгоритмов чувствительны к локальным изменениям освещения и не позволяют использовать их для обнаружения тепловых неоднородностей объектов в инфракрасной области спектра [7, 8]. Для обнаружения тепловых неоднородностей необходимо разработать алгоритм вычитания фона, который позволит справиться с проблемами локального освещения, такими как тени, и глобальными изменениями освещения, а также обнаруживать изменение градиента температур на поверхности сердца. Метод также должен учитывать требования к чувствительности, надежности и скорости обнаружения тепловых неоднородностей, которые важны в условиях искусственного кровообращения в кардиохирургии.

Общий подход для выделения тепловых неоднородностей на термограмме из фоновых кадров инфракрасного изображения – это вычитание фона.

© В. Б. Максименко, В. В. Шлыков, В. А. Данилова. 2017

Идея состоит в том, чтобы вычестить текущее изображение из эталонного изображения, которое получается на статическом фоне теплового изображения в течение заданного периода времени.

Для удаления объектов переднего плана применяется модель гауссовой смеси (GMM). При сохранении набора значений для каждого пикселя термографического изображения, которые определяются из предыдущего кадра видеоизображения, применяется метод цветового вероятностного фона (СВМ), который содержит программный алгоритм на основе кратковременной цветовой фоновой модели (STСВМ) и долгосрочной цветовой фоновой модели (LTCВМ). В методе СВМ динамическая граница в цветовом пространстве RGB позволяет различать значения пикселей, которые соответствуют исходному цвету фона и нескольким его оттенкам – подсветка и передний план на изображении. Кроме того, метод СВМ может использоваться для определения пороговых значений пикселей термографического изображения. Сущность метода обнаружения тепловых неоднородностей заключается в комбинировании методов СВМ и GBM, а также применении модели GMM при определении исходного фона в видео термограмм. Возможность определения тепловых неоднородностей для биологических объектов из видеопоследовательности является фундаментальной и решающей проблемой во многих системах тепловидения, которые включают инфракрасное видеонаблюдение [9,10].

Основная схема вычитания фона заключается в вычитании кадров изображения из эталонного изображения, которое моделирует фон теплового изображения. Основные шаги алгоритма заключаются в следующем [11]:

1. Фоновое моделирование создает опорный образ;
2. Представление фона инфракрасного изображения;
3. Определение пороговых значений пикселей, которые используются в операции вычитания кадров, чтобы получить фон теплового изображения.
4. Операция классификации пикселей как частей фона, включая опорный фон и фон теплового изображения, который содержит неоднородности.

При вычитании фонового изображения из текущего кадра видео термограммы выполняется по пиксельное вычитание интенсивностей кадра видео и фонового изображения [12]:

$$D_k(x, y) = |I_k(x, y) - F_k(x, y)|, \quad k = \overline{1, N},$$

где $I_k(x, y)$ – вектор размерности формата RGB, который представляет интенсивность пикселя (x, y) , $F_k(x, y)$ – модель фона, которая строится для усредненного количества предшествующих кадров, k – последовательность кадров видео термограмм.

Для одноканального изображения в оттенках серого $I_k(x, y), F(x, y) \in \{0, \dots, 255\}$.

Тогда кратковременная цветочная фоновая модель

(STСВМ) для кадра $I_k(x, y)$ позволяет определить модель фона $F_k(x, y)$ в соответствии с формулой [13]:

$$F_k(x, y) = \frac{1}{s} \sum_{j=0}^{s-1} I_{k-j}(x, y),$$

s – количество кадров видео, по которым выполняется построение модели фона.

При обновлении модели фона используют информацию об интенсивностях пикселей текущего кадра на основе модели гауссовой смеси (GMM). При построении фона с использованием данного метода считается, что для любого пикселя (x_0, y_0) для кадра $I_k(x, y)$ известна его интенсивность для всех предыдущих кадров видео:

$$\{F_1, F_2, \dots, F_k\} = \{I_j(x_0, y_0), j = \overline{1, k}\}.$$

Вероятность того, модель фона F_k может быть представлена смесью из s распределений Гаусса, определяется в соответствии с формулой [14]:

$$P(F_k) = \sum_{j=0}^s \omega_j^k N(F_k | \mu_j^k, \sigma_j^k),$$

где ω_j^k – вес j -ого распределения Гаусса для кадра с номер k , $N(F_k | \mu_j^k, \sigma_j^k)$ – функция плотности нормального распределения, μ_j^k – математическое ожидание распределения Гаусса для N – кадров, σ_j^k – среднее квадратическое отклонение.

Предполагая, что компоненты цвета в кадре термограммы независимы и имеют одинаковое среднее квадратическое отклонение в распределении Гаусса, функция плотности нормального распределения имеет вид [13, 14]:

$$N(F_k | \mu_j^k, \sigma_j^k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D_k}{2}} |\sigma_j^k|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2} (F_k - \mu_j^k)^T (\mu_j^k)^{-1} (F_k - \mu_j^k)},$$

где T – пороговое значение цвета пикселя, которое определяется методом СВМ.

Данное предположение позволяет снизить вычислительную трудоемкость метода GMM и определить распределение наблюдаемых значений цвета для каждого пикселя термографического изображения. При анализе очередного кадра $I_k(x, y)$ возможны две ситуации классификации текущего пикселя:

1. Если для текущего пикселя (x_0, y_0) выполняется распределение Гаусса, то пиксель классифицируется как принадлежащий фону;

2. Если для текущего пикселя (x_0, y_0) распределение Гаусса не обнаружилось, то пиксель классифицируется как принадлежащий объекту – тепловой неоднородности.

В долгосрочной цветовой фоновой модели (LTCBM) при обработке каждого последующего кадра необходимо обновить параметры распределений: математическое ожидание μ_j^k и среднеквадратическое отклонение σ_j^k . Начальная инициализация параметров распределений может выполняться с использованием метода СВМ и средних значений k – последовательность кадров.

Применение модели обнаружения тепловых неоднородностей. Обнаружение тепловых неоднородностей для последовательности изображений на видео термограмм можно выполнить на модели миокарда, построенной в системе MSC Sinda [15]. Модель теплового обмена для локального участка миокарда построена для двух условий теплопередачи: теплопроводность и свободная конвекция для участка миокарда, которая обеднена коронарными сосудами и участка миокарда с удвоенной плотностью распределения коронарных сосудов в миокарде.

Процесс согревания сердца в условиях искусственного кровообращения с использованием аппарата искусственного кровообращения происходит за счет возврата венозной крови, которая согревается в теплообменнике, в контур искусственного кровообращения. Термограммы для охлажденного сердца до температуры 19,6 °С и согретого сердца до температуры 29,6 °С представлено на рис. 1, соответственно.

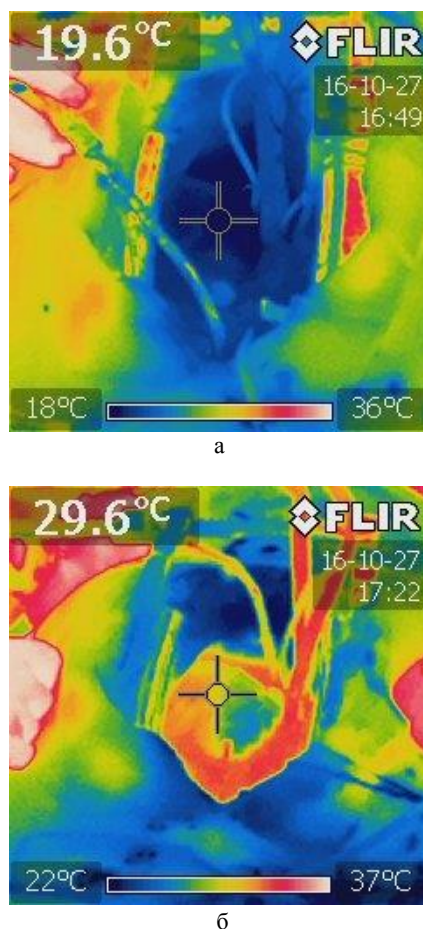


Рис. 1 – Термограммы для охлажденного и согретого сердца: а – при температуре гипотермии 19,6 °С; б – при температуре гипертермии 29,6 °С

В свою очередь, решение уравнения теплопроводности и свободной конвекции [16] для участка миокарда, которая обеднена коронарными сосудами, дает разницу температур в миокарде, которая может достигать значения $\Delta T_1 \approx 10$ °С, что видно по распределению температур на рис. 2.

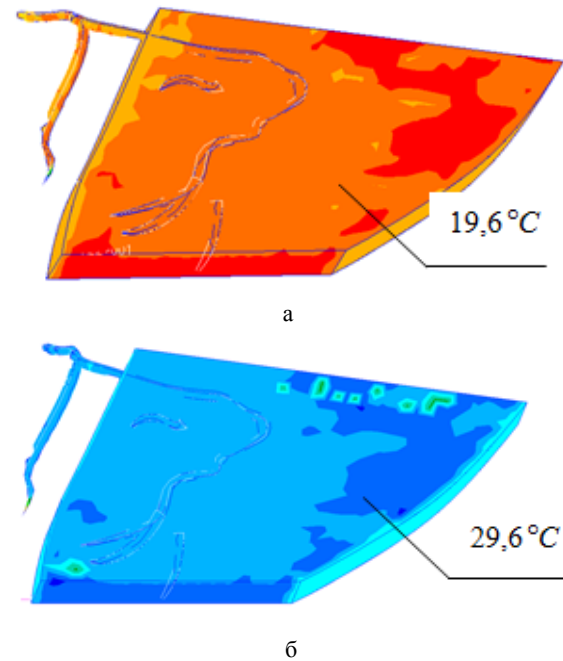


Рис. 2 – Распределение температур на поверхности миокарда, обедненного коронарными сосудами: а – при охлаждении сердца в условиях искусственного кровообращения; б – при нагревании сердца в условиях искусственного кровообращения

При решении задачи теплопроводности и свободной конвекции для участка миокарда с удвоенной плотностью расположения коронарных сосудов в теле миокарда вычисленная разность температур в миокарде составляет величину $\Delta T_2 \approx 3$ °С, что видно из распределения температур на рис. 3.

Реализация модели теплообмена в системе MSC Sinda для процесса охлаждения миокарда дает на завершающей стадии процесса, при установлении теплового баланса, разницу температур на границе, разделяющей миокард и коронарные сосуды не более 0,5 °С, а на участках миокарда, которые имеют изъяты коронарные сосуды, разница температур превышает величину в 1,0 °С.

Приведенные температурные неоднородности, которые получены для модели теплового обмена в системе MSC Sinda, можно визуализировать с использованием предложенной модели обнаружения тепловых неоднородностей на видео термограмм. Метод обнаружения температурных неоднородностей позволяет визуализировать контуры сосудов на поверхности миокарда на основе анализа видеопоследовательности для изображений термограмм. Суть метода заключается в определении градиентов температуры между кровью в сосудах и миокардом в последовательные моменты времени при нагревании (рис. 4) или охлаждении сердца (рис. 5).

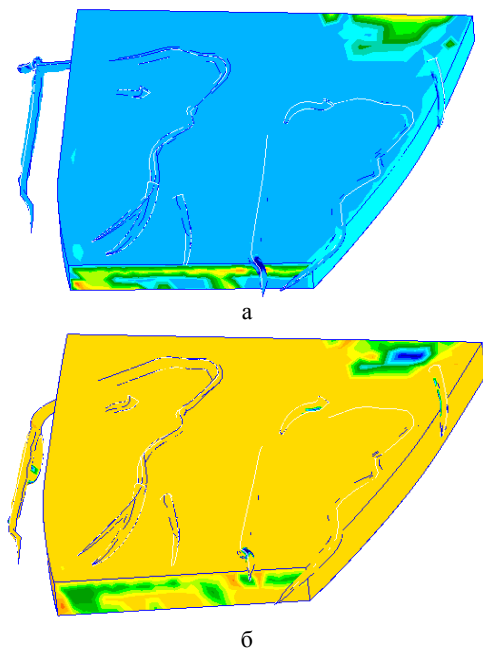


Рис. 3 – Распределение температур на поверхности миокарда с удвоенной плотностью распределения коронарных сосудов: а – при охлаждении сердца в условиях искусственного кровообращения; б – при согревании сердца в условиях искусственного кровообращения

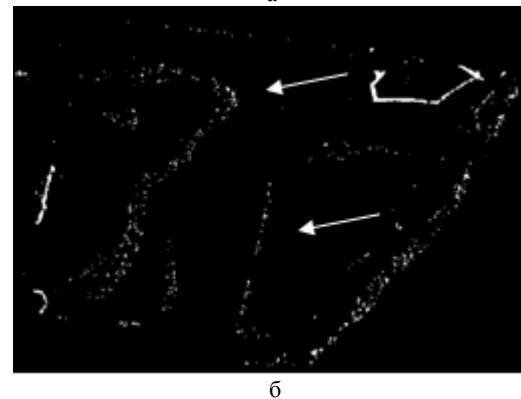
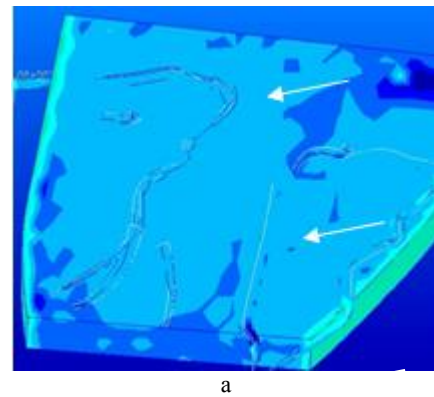


Рис. 5. Визуализация контуров сосудов на модели при охлаждении сердца: а – в системе MSC Sinda; б – методом обнаружения температурных неоднородностей

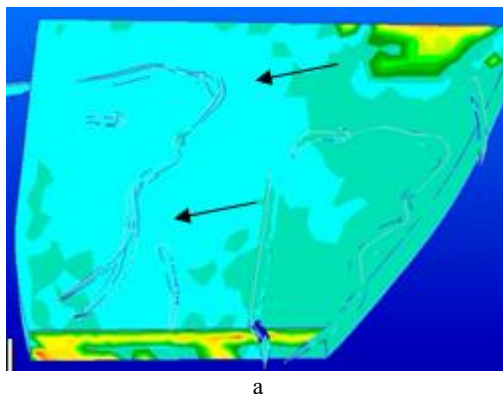


Рис. 4 – Визуализация контуров сосудов на модели при согревании сердца: а – в системе MSC Sinda; б – методом обнаружения температурных неоднородностей

Важными физическими свойствами теплового изображения при «цветовом зрении» являются отражательные свойства объекта в инфракрасном диапазоне, которые инвариантны к изменениям освещенности, структуре кадра или геометрии биологического объекта. Обновленный подход при анализе термограмм с использованием модели гауссовой смеси (GMM) для кадров тепловых изображений показал, что его применение позволяет улучшить сегментацию части тепловых видео изображений относительно анализа статических изображений, особенно в неблагоприятных условиях формирования термограмм.

Клиническая апробация модели обнаружения тепловых неоднородностей. Сравнительная оценка результатов применения метода для обнаружения тепловых неоднородностей в различных тепловизионных изображениях сердца в настоящее время проходит клиническую апробацию. При этом полученные результаты позволяют сделать вывод, что этот метод может предоставить дополнительную важную информацию о температуре и однородности сосудов во время охлаждения и нагрева миокарда.

Анализ градиентов температуры во времени для последовательных кадров термограмм позволяет выделить контуры областей на миокарде, в которых изменение температуры значительно отстает от средней температуры при согревании сердца (рис. 6).

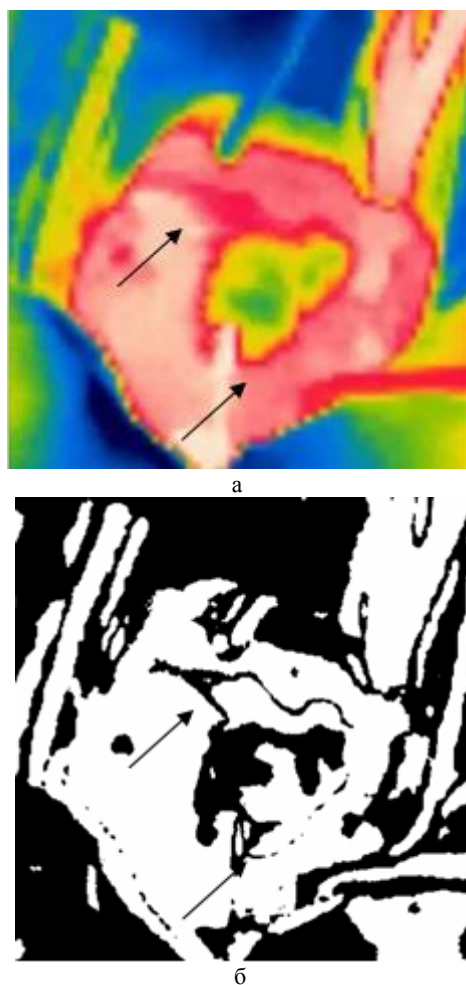


Рис. 6. Визуалізація контурів судов міокарда in situ: а – на термограмме; б – методом обнаружения температурных неоднородностей

Обработка видео изображений термограмм и моделирование зарегистрированных термограмм для гипо- и гипертермии показали распространение температурных профилей, что позволяет диагностировать ишемические очаги в миокарде за счет визуализации температурных градиентов и идентификации контуров артерий.

Выводы. Представленный метод обнаружения тепловых неоднородностей на видео термограммах сердца, позволяет обнаруживать изменение градиента температур и выделять тепловые неоднородности на поверхности миокарда. Дискретные модели теплообмена для стационарного конвекционного ламинарного потока через пограничную поверхность крови и миокарда дают количественное описание процессов теплопереноса на границе между миокардом и коронарными сосудами.

Рассмотренные методы анализа термограмм позволяют изучать неоднородность температурного поля в миокарде и тем самым выявлять области ишемии в сердце.

Список литературы:

1. Nicholas, A. Medical Infrared imaging [Text] / A. Nicholas, B. Diakides, D. Joseph, A. Bronzino. – CRC Press Taylor Group

LLC, London, 2008. – 451 p.
 2. Ткаченко, Ю. А. Клиническая термография (обзор основных возможностей) [Текст] / Ю. А. Ткаченко, М. В. Голованова, А. М. Овечкин. – Ростов на Дону, 1999. – 274 с.
 3. Данилова, В. А. Тепловізійне дослідження розподілу температури міокарда [Текст] / В. А. Данилова, В. В. Шликів // Наукові Вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 106–111.
 4. Khudetsky, I. U. Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac [Text] / I. U. Khudetsky, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // The Polish Journal of Applied Sciences. – 2015. – P. 93–96.
 5. Van Droogenbroeck, M. Visual Background Extractor [Text] / M. Van Droogenbroeck, O. Barnich. – World Intellectual Property Organization, 2009. – No. WO 2009/007198.
 6. McIvor, A. Background subtraction techniques [Text] / A. McIvor // Proc. Image Vis. Comput., Auckland. – New Zealand, 2000.
 7. Radke, R. J. Image change detection algorithms: a systematic survey [Text] / R. J. Radke, S. Andra, O. Al-Kofahi, B. Roysam // IEEE Transactions on Image Processing. – 2005. – Vol. 14, Issue 3. – P. 194–307. doi: 10.1109/tip.2004.838698
 8. Barnich, O. OViBE: A powerful random technique to estimate the background in video sequences [Text] / O. Barnich, M. Van Droogenbroeck // 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2009. doi: 10.1109/icassp.2009.4959741
 9. Котовський, В. Й. Обґрунтування вимог до умов проведення термографічних досліджень біологічних об'єктів [Текст] / В. Й. Котовський // Вісті академії інж. наук України. – 2009. – № 2 (39). – С. 6–11.
 10. Данилова, В. А. Метод безконтактного контролю температури [Текст] / В. А. Данилова, В. В. Шликів // Наукові Вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – Вип. 49 (1). – С. 88–94.
 11. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Изд. д. Вильямс, 2004. – 465 с.
 12. Bradski, G. Learning OpenCV. Computer Vision with OpenCV Library [Text] / G. Bradski, A. Kaehler. – O'Reilly Media Publishers, 2008. – 571 p.
 13. Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications [Text] / R. Szeliski. – Springer, 2010. – 979 p.
 14. Sonka, M. Image Processing. Analysis and Machine Vision [Text] / M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle. – Thomson, 2008. – 866 p.
 15. Astrium, SINDA user manual, ver. 3.2, 2003.
 16. Moin, P. Fundamentals of Engineering Numerical Analysis [Text] / P. Moin. – 2nd ed. – Cambridge University Press, New York, 2010. doi: 10.1017/cbo9780511781438

Bibliography (transliterated):

1. Nicholas, A., Diakides, B., Joseph, D., Bronzino, A. (2008). Medical Infrared imaging. CRC Press Taylor Group LLC, London, 451.
 2. Tkachenko, Yu. A., Golovanova, M. V., Ovechkin, A. M. (1999). Klinicheskaya termografiya (obzor osnovnykh vozmozhnostey). Rostov na Donu, 274.
 3. Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2014). Teploviziyne doslidzhennya rozpodilu temperatury miokarda. Naukovi Visti NTUU «KPI», 106–111.
 4. Khudetsky, I. U., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2015). Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac. The Polish Journal of Applied Sciences, 93–96.
 5. Van Droogenbroeck, M., Barnich, O. (2009). Visual Background Extractor. World Intellectual Property Organization, No. WO 2009/007198.
 6. McIvor, A. (2000). Background subtraction techniques. Proc. Image Vis. Comput., Auckland. New Zealand.
 7. Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., Roysam, B. (2005). Image change detection algorithms: a systematic survey. IEEE Transactions on Image Processing, 14 (3), 294–307. doi: 10.1109/tip.2004.838698
 8. Barnich, O., Van Droogenbroeck, M. (2009). ViBE: A powerful random technique to estimate the background in video sequences. 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. doi: 10.1109/icassp.2009.4959741
 9. Kotov's'ky, V. Y. (2009). Obgruntuvannya vymoh do umov provedennya termohrafichnykh doslidzhen' biolohichnykh ob'ektiv. Visti akademiyi inzh. nauk Ukrayiny, 2 (39), 6–11.
 10. Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2015). Metod bezkontaktnoho

- kontrolyu temperatury. Naukovi Visti NTUU «KPI», 49 (1), 88–94.
11. Forsayt, D., Pons, Zh. (2004). Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podhod. Moscow: Izd. d. Vilyams, 465.
 12. Bradski, G., Kaehler, A. (2008). Learning OpenCV. Computer Vision with OpenCV Library. O'Reilly Media Publishers, 571.
 13. Szeliski, R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 979.
 14. Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. (2008). Image Processing. Analysis and Machine Vision. Thomson, 866.
 15. Astrium, SINDA user manual, ver. 3.2, 2003.
 16. Moin, P. (2010). Fundamentals of Engineering Numerical Analysis. Cambridge University Press, New York. doi: 10.1017/cbo9780511781438

Поступила (received) 05.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виявлення теплових неоднорідностей для послідовності зображень у відео термограм/ Максименко В. Б., Шликів В. В., Данилова В. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.42–47. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Обнаружение тепловых неоднородностей для последовательности изображений в видео термограмм/ Максименко В. Б., Шлык В. В., Данилова В. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 19(1241). – С.42–47. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Detection of thermal inhomogeneities for a sequence of images in video thermograms/ Maksymenko V., Shlykov V., Danilova V. // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 19 (1241). – P.42–47. – Bibliogr.:16. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Максименко Віталій Борисович – доктор медичних наук, декан факультету біомедичної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail : maksymenko.vitaliy@gmail.com.

Шликів Владислав Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данилова Валентина Анатоліївна – асистент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: valnaa@ukr.net.

Максименко Віталій Борисович – доктор медицинских наук, декан факультета биомедицинской инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: maksymenko.vitaliy@gmail.com.

Шлык Вадислав Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Данилова Валентина Анатольевна – ассистент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, тел.: +380(44) 204-96-83, e-mail: valnaa@ukr.net.

Maksymenko Vitaliy – Doctor of medical sciences, dean of the Department of Biomedical engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: maksymenko.vitaliy@gmail.com.

Shlykov Vladyslav – PhD, associate Professor of Biomedical Engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Danilova Valentyna – assistant of Biomedical engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: valnaa@ukr.net.