

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Шликова Владислава Валентиновича на тему «Інформаційна технологія неінвазивного контролю температури серця людини в умовах регульованого охолодження та зігрівання під час штучного кровообігу», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.09 – медична та біологічна інформатика і кібернетика

Актуальність теми дисертації. Впровадження у медичну практику сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій привело до створення широкого спектра медичних інформаційних систем, найбільшого поширення серед яких отримали біомедичні системи підтримки прийняття рішень (СППР), які використовуються при проведенні інструментальних обстежень різної складності, зокрема неінвазивний контроль та регулювання розподілу температурного поля серця при проведенні операційних втручань в умовах штучного кровообігу методом інфрачервоної термографії.

Особливість операцій на серці в умовах штучного кровообігу полягає в необхідності тимчасового виключення з кровообігу окремих ділянок організму, серед яких найчутливішими до ішемії є серце і мозок. Температура окремих ділянок міокарда є індикатором швидкості обміну речовин та пов'язана з температурою крові і рівнем кровопостачання. Контролюючи температурне поле міокарда, можна визначити безпечний час зупинки кровопостачання, рівномірність регульованого пригнічення обміну речовин в контрольованій зоні, функціональний стан регіонального кровопостачання, його порушення та відновлення на етапах операції.

Незважаючи на велику кількість робіт по використанню методів інфрачервоної термографії в біомедичних дослідженнях та методів аналізу біомедичних зображень, на теперішній час відсутні комплексні дослідження неінвазивного контролю температурного поля міокарда, обробки термограм, їх візуалізація та аналіз в режимі реального часу, та відсутні подібних технології в клінічній практиці.

Тому тема дисертаційної роботи Шликова В. В., яка присвячена створенню теоретичних засад, моделей, методів та інформаційної технології неінвазивного динамічного контролю та візуалізації температурного поля міокарда пацієнта в процесі регульованого охолодження та зігрівання контрольованої ділянки з метою зменшення ймовірності післяопераційних ускладнень шляхом повноцінного відтворення порушених функцій міокарду, є актуальною і відповідає потребам сьогодення.

Актуальність теми дисертації підтверджується також і тим, що вона виконувалась у рамках держбюджетної тематики КПП ім. Ігоря Сікорського, Національного інституту серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України, Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Національного інституту раку.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Удосконалено модель розподілу температури для ділянки міокарда на основі теплової RC-мережі та схеми Дюфорта-Френкеля для рівняння теплопровідності шляхом введення термоконтакту між міокардом і коронарними судинами.

2. Вперше розроблено моделі поширення тепла у поверхневих та внутрішніх шарах міокарда за умов штучного кровообігу, які ґрунтуються на тепловій RC-мережі та враховують вимірні характеристики розподілу температури на поверхні серця пацієнта в якості крайових умов моделей та змінний показник температурного опору міокарда.

3. Вперше із застосуванням методів термографії визначено закономірності змін температурного поля серця людини в умовах штучного кровообігу, а саме: перевищення градієнту температур на поверхні серця в режимі охолодження над градієнтом температур в режимі зігрівання, що дає змогу виявляти порушення кровоплину в коронарних судинах.

4. Вперше розроблено метод визначення циркуляторної дисфункції коронарного кровоплину, який на основі розподілу температур на поверхні серця за допомогою запропонованої моделі поширення тепла у поверхневих та внутрішніх шарах міокарда дає змогу визначити співвідношення площ з різною температурою під час штучного кровообігу, що уможливорює дослідження порушень рівномірності кровопостачання в поверхневому шарі міокарда та виділення контурів ділянок на поверхні міокарда з нерівномірним розподілом температури в умовах регульованого охолодження та зігрівання серця.

5. Вперше розроблено метод оцінювання рівномірності охолодження та зігрівання серця для біологічної системи "міокард-коронарні судини", який використовує запропоновану модель розподілу температури для процесів охолодження та зігрівання серця для розрахунку мінімальної та максимальної різниці температур у ділянці міокарда відносно середнього значення температури на поверхні серця під час гіпотермії та гіпертермії, що дає змогу визначити час зігрівання і запропоновані коефіцієнти охолодження та зігрівання серця для реалізації керування температурою в контурі штучного кровообігу.

6. Вперше розроблено метод виявлення малих температурних неоднорідностей, який поєднує методи цифрової обробки зображень і обробки відеопотоку та за рахунок вилучення візуального фону та рекурсивного оновлення його моделі забезпечує обробку в реальному часі відеопотоку термографічних даних, що дало змогу підсилити та візуалізувати малі зміни температури на різних стадіях проведення перфузії, гіпотермії та гіпертермії.

7. Вперше запропоновано критерій оцінювання нерівномірності розподілу температури в міокарді, який обчислюється за рівнянням температурного поля відносно залежності коефіцієнта температуропровідності від температури і відстані до області реєстрації та є об'єктивним маркером визначення циркуляторної дисфункції коронарного кровоплину у міокарді під час штучного кровообігу.

8. Запропоновано критерій ефективності захисту серця, який обчислюється як співвідношення геометричних площ охолоджених та прогрітих ділянок міокарда, що є об'єктивним маркером ефективного захисту серця в умовах штучного кровообігу та дає змогу здійснювати прогноз і виявлення зон ішемічного пошкодження в серці.

9. Вперше розроблено інформаційну технологію неінвазивного контролю температурного поля серця для дослідження змін кровоплину в коронарних судинах в умовах регульованого охолодження та зігрівання, яка використовує розроблені методи та критерії.

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується аргументованою постановкою мети й задач дослідження, повнотою формулювання умов, в яких вони розв'язуються та необхідними припущеннями і обмеженнями щодо застосування результатів, використанням сучасного математичного апарату та програмного забезпечення. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасних методів, а саме: методи теоретичної та математичної фізики (розв'язання рівняння теплопровідності в частинних похідних), методи обробки цифрових зображень, методи статистичного аналізу.

Клінічні дослідження – контроль розподілу теплових полів на поверхні відкритого серця методом інфрачервоної термографії проводилися в умовах операційної під керівництвом кардіохірургів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їх узгодженням із теоретичними висновками, експериментами та чисельними розрахунками, а також впровадженням розроблених теоретичних засад та методів неінвазивного контролю температурного поля серця у розробку відповідної інформаційної технології.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання. Цінність наукових результатів роботи полягає в тому, що в ній розроблено теоретичні засади, методи, засоби та інформаційна технологія неінвазивного контролю температурного поля серця людини в умовах регульованого охолодження та зігрівання для покращення персоніфікованої оцінки термодинамічних характеристик міокарда під час регульованого температурного захисту.

Практична корисність роботи обумовлена тим, що здобувачем розроблено програмно-алгоритмічні засоби для реалізації запропонованих методів, а також розроблено експериментальний зразок програмно-апаратної термографічної системи.

Окремі результати дисертаційної роботи впроваджені у такі установи: Національний інститут серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Національний інститут раку, а також в навчальний процес кафедри біомедичної

інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського у вигляді лекцій і практичних занять з дисциплін за спеціальністю 163 "Біомедична інженерія".

Повнота викладення в публікаціях та апробація роботи. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі, достатньо повно відображені в публікаціях здобувача і пройшли апробацію на міжнародних науково-технічних конференціях.

За темою дисертації опубліковано 46 наукових праць, у тому числі: 24 статті у наукових фахових виданнях (з них 7 статей у виданнях іноземних держав, 17 у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, EBSCO, Scopus, Index Copernicus), 7 статей в інших виданнях, 3 патенти на корисну модель, 12 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому, відповідність встановленим вимогам до оформлення дисертації.

Структура дисертації цілком відповідає логіці й послідовності рішення поставлених задач. Дисертація складається із анотацій, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4-х додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та задачі, об'єкт та предмет дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію роботи, впровадження результатів та публікації.

У першому розділі проведено порівняльний аналіз методів неінвазивного контролю і регулювання температурного поля серця, методів обробки та візуалізації зображень в термографічних дослідженнях, описана стратегія міокардіальної протекції в кардіохірургії. В результаті проведеного аналізу визначено науково-прикладну проблему, сформульована мета та визначені завдання, які мають бути вирішені.

Другий розділ присвячено дослідженню особливостей застосування термографічних методів у кардіохірургії. Розглянуті клінічні особливості біомедичних досліджень в кардіохірургії, фізична модель біомедичного дослідження засобами тепловізійної діагностики. Обґрунтовано застосування методів обробки цифрових зображень для підвищення якості термограмм. Проаналізовано методи визначення температурних аномалій в організмі.

Розроблено концепцію створення технології неінвазивного контролю температури в умовах штучного кровообігу та функціональну схему біомедичних досліджень серця засобами інфрачервоної тепловізійної діагностики. Обґрунтовані характеристики інформаційної технології неінвазивного контролю температури.

Третій розділ присвячено дослідженню та моделюванню процесів теплопереносу в серці пацієнта. Розроблено моделі поширення температури на поверхні міокарда в умовах штучного кровообігу, зокрема модель розподілу температури на поверхні міокарда для процесу охолодження серця та модель системи "міокард-коронарні судини". Вказані моделі дають змогу теоретично дослідити розподіл глибинних і поверхневих температур у тканинах, а також підвищити точність виділення градієнтів температур для розподілу температурного поля у серці.

Виконано моделювання температурного поля в шарі міокарда в умовах штучного кровообігу та аналіз локального порушення кровоплину в міокарді. Розроблено метод визначення швидкості поширення теплового потоку в міокарді у процесі гіпотермії і гіпертермії, на основі розв'язку рівнянь теплопровідності. Наведені результати клінічного підтвердження адекватності розроблених моделей процесів теплообміну в міокарді

У четвертому розділі розглянуті прикладні аспекти проведених досліджень з застосуванням методів і засобів неінвазивного контролю температури в умовах штучного кровообігу. Розроблені математичні методи визначення термічного опору міокарда та коефіцієнтів охолодження і зігрівання серця. Виконана оцінка неоднорідностей розподілу температури на основі коефіцієнтів охолодження та зігрівання міокарда.

Розроблено метод оцінки рівномірності охолодження та зігрівання серця та тривалості процесу гіпотермії в умовах штучного кровообігу шляхом розв'язку рівняння теплопровідності.

Розроблено метод визначення коефіцієнта температуропровідності міокарду та циркуляторної дисфункції коронарного кровоплину в міокарді, а також спосіб визначення швидкості охолодження і зігрівання серця в умовах штучного кровообігу.

Розроблено метод виявлення малих температурних неоднорідностей під час регульованого охолодження і зігрівання серця, особливістю якого є динамічне оновлення моделі фону. Виконано дослідження розподілу температурного поля і візуалізація коронарних судин на поверхні міокарда.

Розроблено спосіб підвищення якості візуалізації термограм засобами корекції ефекту терморозфокусування. Виконана статистична обробка температурних даних, яка підтвердила статистичну значимість виявлених відмінностей температурного поля для здорового міокарда та уражених ішемією ділянок міокарда.

П'ятий розділ присвячено розробці структури інформаційної технології неінвазивного контролю температурного поля в умовах штучного кровообігу та експериментального зразка програмно-апаратної термографічної системи.

Проаналізовані інструментальна та інформаційна складові інформаційної технології. Формалізовано етапи перетворення інформації, та на їх основі розроблено структуру системи підтримки прийняття рішень для регулювання температури в контурі штучного кровообігу.

Розроблено інформаційну технологію неінвазивного контролю температурного поля міокарду, яка складається з 3-х етапів: 1 – виявлення термоаномальних зон на поверхні міокарду; 2 – визначення температурних характеристик міокарду; 3 – визначення та аналіз функціонального стану коронарних судин.

Розроблено функціональну схему експериментального зразка програмно-апаратної термографічної системи, розглянуто особливості системи неінвазивного контролю температурного поля та розрахована вірогідність розроблених методів.

У **шостому розділі** наведено результати клінічного застосування інформаційної технології, здійснено перевірку роздільної здатності розробленої неінвазивної технології та інвазивного методу контролю температури за допомогою двох голчастих термодавачів. Верифікація розглянутих моделей показала їх адекватність та ефективність розробленої інформаційної технології.

У **додатках** представлені акти впровадження результатів розробки та список опублікованих праць за темою дисертації.

Автореферат дисертації ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні наукові положення, практичну значимість і висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з встановленими вимогами.

Недоліки та зауваження щодо змісту дисертації та автореферату:

1. В назві роботи та по тексту дисертації мова йде про контроль температури серця, хоча в дійсності виконується вимірювання та обробка температурного поля – термограмм.

2. Обсяг основної частини дисертації (384 стор.) значно перевищує рекомендований обсяг (11-13 авторських аркушів що відповідає 265-310 стор.). Частину тексту варто було перенести в Додатки.

3. Назва підрозділу 1.2 «Огляд методів неінвазивного контролю і регулювання температури тіла» не відповідає його змісту: в ньому наведено опис всіх можливих методів досліджень структурних і морфологічних особливостей мікроциркуляторного русла тканин (ангіографія, інтракоронарна доплерографія та ін.), хоча здобувач проводить дослідження методу інфрачервоної термографії, для якого відсутній порівняльний аналіз відомих методів, невирішені питання, своє місце у розв'язанні проблеми.

4. Значна частина розділу 2 є оглядовою і її варто було перенести в розділ 1, елементи огляду зустрічаються також в розділі 3.

5. Наведена математична модель охолодження серця і крові в вигляді системи звичайних диференційних рівнянь – вираз (5) автореферату, та відповідний йому (3.11) дисертації некоректно названа «модель розподілу температури на поверхні міокарда», яка може бути описана системою рівнянь в

частинних похідних.

6. Наведена 3D модель теплопровідності – вираз (7) автореферату, та відповідний йому (3.24) дисертації некоректно названа «Дискретна теплова модель...» лише тому, що для розв'язання диференціального рівняння теплопровідності використовується метод, у якому система рівнянь подається у вигляді сотово-центрованих вузлів і опорів між цими вузлами з використанням методу кінцевих різниць.

7. В розробленому здобувачем методі виявлення малих температурних неоднорідностей у міокарді, варто було вказати області застосування методу (які неоднорідності слід вважати «малими», і чи можна застосувати метод для виявлення «великих» неоднорідностей). Крім того, стверджується, що в методі виконується «поєднання інфрачервоного термографічного методу та методу Ейлера для оброблення відеопотоку», хоча поєднуються методи цифрової обробки зображень та обробки відеопотоку.

8. В запропонованій здобувачем структурній схемі системи підтримки прийняття рішень для регулювання температури в контурі штучного кровообігу – вираз (27) та Рис. 15 автореферату та відповідні йому (5.2) та Рис. 5.12 дисертації відсутні дані попередніх досліджень здобувача. Навіть для вхідних даних перетворення $F1$ – вектора вхідних термографічних ознак X_i не показана методика його формування по результатам термографічного обстеження. Не розкриті механізми реалізації наступних етапів: постановка діагнозу пацієнта щодо ступеня ураження коронарних судин на підставі аналізу вектора вхідних термографічних ознак; верифікація раніше встановленого діагнозу на підставі термографічної візуалізації коронарних судин у міокарді, застосування методу аналізу ієрархій Т.Саати та ін. Крім того, в структурній схемі є технічні помилки, зокрема: введення вектору термографічних ознак через інтерфейс користувача, що суперечить функціональній схемі програмно-апаратного комплексу, в якій введення термограм виконується безпосередньо в комп'ютер, де і розраховуються термографічні ознаки; відсутній вихід з блоку «множина X_i ».

9. В табл. 2 автореферату, та відповідній їй табл. 5.9 дисертації наведені одержані здобувачем однофакторні регресії виду $y_t = a \cdot x_t + b$, де x_t – значення температури, виміряної за допомогою голчастого термодавача (одна точка в момент t), а y_t – значення температури отриманої з термографу (температурне поле в вигляді матриці $N \times N$ значень в момент t). Зазначено, що одержані залежності дають змогу перерахувати показання температури x_t в y_t . Але побудувати регресію та в подальшому виконувати перерахунок можливо тільки тоді, коли y_t – одна точка в момент t . Не розкрито механізм її вибору в температурному полі.

10. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату виконано акуратно, послідовно, логічно, але текст дисертації перевантажений медичними термінами, у тексті дисертації зустрічаються незначні технічні помилки, зокрема: не всі латинські символи відображено курсивом, а грецькі символи прямим шрифтом; текстові позначення в деяких виразах та рисунках менші мінімально-допустимих.

Однак зазначені зауваження не носять принциповий характер і не знижують цінності проведеного здобувачем дослідження, актуальності, новизни та практичної значущості дисертаційної роботи.

Висновки, щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати в галузі медичної інформатики та кібернетики, які складають істотний внесок у подальший розвиток теоретичних засад, методів і засобів неінвазивного вимірювання температурного поля, оброблення термографічних зображень та оцінювання термодинамічних характеристик міокарда, і в сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему підвищення достовірності контролю температурного поля серця під час штучного кровообігу шляхом побудови моделей, методів та інформаційної технології неінвазивного контролю температурного поля серця людини в умовах регульованого охолодження та зігрівання.

Тематика та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності і профілю спеціалізованої вченої ради.

Вважаю, що представлена дисертаційна робота за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних теоретичних і клінічних досліджень, науковою новизною, достовірністю та обґрунтованістю висновків, значенням для науки та практики відповідає вимогам п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. № 567, щодо докторських дисертацій, а її автор, Шликов Владислав Валентинович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.09 – медична і біологічна інформатика та кібернетика.

Офіційний опонент,
професор кафедри обчислювальної
техніки та програмування Національного
технічного університету «Харківський
політехнічний інститут», МОН України,
доктор технічних наук, професор

 А. І. Поворознюк

