

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

СИЧИК МАРИНА МИХАЙЛІВНА



УДК 616-72:616-71:004.891.3:616.12-008.318.1

**КАТЕТЕРНА РАДІОЧАСТОТНА АБЛЯЦІЯ АРИТМОГЕННИХ ЗОН СЕРЦЯ
ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в лабораторії електрофізіологічних, гемодинамічних та ультразвукових методів дослідження з рентген-операційною Державної установи «Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова Національної академії медичних наук України» та на кафедрі біомедичної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник — доктор медичних наук, професор
Максименко Віталій Борисович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
декан факультету біомедичної інженерії

Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор
Павлов Сергій Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
проректор з наукової роботи

— доктор технічних наук, професор
Аврунін Олег Григорович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри біомедичної інженерії

Захист відбудеться «19» вересня 2017 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » серпня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Швайченко В.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Метою катетерної радіочастотної абляції (РЧА) є вилучення джерела або потоку патологічних електричних сигналів в серці за рахунок незворотної термічної деструкції аритмогенної тканини міокарда на задану глибину.

Методи візуалізації серця, рентгеноскопії та картування електричної активності міокарда, дозволяють доставити електрод в необхідну камеру серця та визначити точну локалізацію субстрату аритмії [H.L. Estner et al., 2014]. Актуальною прикладною проблемою залишається розробка методів контролю та критеріїв оцінки ефективності та безпечності катетерної РЧА в реальному часі в умовах рентген-операційної [L.C Blomström et al., 2013].

До недавнього часу існували тільки електрофізіологічні показники для оцінки ефективності РЧА, серед яких – падіння амплітуди електричної активності міокарда на катетерній ендограмі в ділянці деструкції та стимуляційне картування провідної системи серця на предмет тахікардії в операційній. Контроль безпечності деструкції ґрунтувався на програмуванні автоматичного припинення подачі струму в момент досягнення гранично допустимої температури електроду в зоні контакту [J.G. Andrade et al., 2014; E.R. Cosman et al., 2014; А.Ш. Ревішвілі та ін., 2014]. Ці методи використовують в клінічній практиці і в наш час, проте вони не є достатньо точними, оскільки не забезпечують оцінки глибини деструкції і визначення температури в товщині міокарда, яка власне і характеризує ступінь ефективної коагуляції і можливі мікровибухи тканини. Наслідком може бути нетривале усунення аритмії [S. Yanagisawa, 2016; M. Das, 2016] або перфорація стінки серця та пошкодження прилеглих анатомічних структур (коронарних артерій, стравоходу, діафрагмальних нервів та ін.) [О.Л. Бокерія та ін., 2011; A. Chugh et al., 2013; S. Kumar et al., 2015].

Зазначені проблеми обумовлюють необхідність вирішення ряду актуальних завдань для удосконалення методу та засобів катетерної РЧА.

Математичне моделювання та графічне відображення електро-термодинамічних процесів в дотичній до електроду тканині міокарда дозволяє розробити інструмент для візуалізації ефективної глибини деструкції та прогнозування надійності усунення джерела аритмії без ризиків ускладнень термічного генезу [C.A. Linte et al., 2013; B. Zhang et al., 2016; J.A. Lopez Molina et al., 2016; A. González-Suárez et al., 2016; С.В. Павлов та ін., 2013; О.Г. Аврунін та ін., 2014].

Прикладне значення має удосконалення вибору оптимальних параметрів електричного впливу для ефективного вилучення субстратів аритмій та безпечної деструкції тканини міокарда в різних анатомічних зонах серця, які відрізняються товщиною стінки, структурою м'язової тканини та термоелектричними характеристиками міокарда [E. Anter et al., 2014; Z. Tian et al., 2016; Ю.І. Карпенко та ін., 2011; Б.Б. Кравчук, В.П. Залевський, О.С. Стичинський та ін., 2015].

Вимагає нових інженерно-технічних рішень РЧА джерел патологічного збудження у глибині м'язових масивів серця, ефективна деструкція яких не досягається класичним монополярним методом абляції, що потребує не тільки моделювання розповсюдження температурних полів, а й розробки на основі

отриманих даних нових технічних засобів і методик впливу [G. Roca et al., 2014; S. Gizurarson et al., 2014; M. Izquierdo et al., 2015].

Актуальність теми пов'язана з удосконаленням методу катетерної РЧА для покращення показників ефективності та безпечності абляції, зокрема: збільшення глибини деструкції, зменшення температури в товщині міокарда, регулювання потужності електричного впливу та тривалості експозиції з урахуванням адаптації до термоелектричних та морфометричних характеристик міокарда кожного пацієнта.

Дисертація є першою вітчизняною роботою в напрямку технічного удосконалення методу катетерної РЧА і відповідає сучасним тенденціям світової науки по актуальності проблеми і шляхам її вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в лабораторії електрофізіологічних, гемодинамічних та ультразвукових методів дослідження з рентген-операційною Державної установи «Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова Національної академії медичних наук України» згідно держбюджетної НДР «Оптимізувати радіочастотну термічну абляцію в залежності від морфо-функціональних характеристик зони впливу в серці» (№ ДР 0113U002145, період виконання: 2013-2015 рр.), у якій здобувач брала участь як виконавець.

Напрямок досліджень дисертаційної роботи узгоджується з науковими темами кафедри біомедичної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Результати роботи використані в НДР № НУ/9-2011 «Медико-інженерна розробка технічних засобів керованого термічного впливу та його контролю для хірургічного лікування серцево-судинних захворювань» (№ ДР 0110U001467, період виконання: 2011-2012 рр.), що виконувалася в рамках державної науково-технічної Програми «Наука в університетах», у якій здобувач брала участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності і безпечності радіочастотної абляції аритмогенних зон серця шляхом удосконалення методу катетерної РЧА, розробки математичної моделі аналізу температурних полів і оцінки глибини деструкції, та вибору оптимальних режимів електричного впливу з урахуванням термоелектричних та морфометричних характеристик ділянок серця при застосуванні різних інструментальних засобів.

Для досягнення зазначеної мети потрібно було вирішити такі задачі:

1. Провести експериментальні дослідження деструкційного ефекту різних типорозмірів активних електродів та параметрів РЧА на міокард тварин в лабораторних умовах з гістологічним аналізом препаратів зони деструкції.

2. Встановити закономірності термічної дії радіочастотного струму та визначити термоелектричні характеристики міокарда для різних анатомічних зон серця на основі створеної клінічної бази досліджуваних параметрів катетерної РЧА.

3. Здійснити математичне моделювання фізичних процесів взаємодії радіочастотного струму з тканиною міокарда для графічного відтворення поширення температурних полів та глибини деструкції з урахуванням термоелектричних, морфометричних характеристик міокарда та параметрів електричного впливу.

4. Удосконалити метод катетерної РЧА та розробити ефективну методику абляції джерел патологічного збудження, розташованих у глибині м'язових масивів міокарда для підвищення ефективності та безпечності процедури деструкції тканин серця.

5. Розробити практичні рекомендації з вибору оптимальних параметрів катетерної РЧА для різних анатомічних зон серця. Провести їх клінічну верифікацію.

Об'єктом дослідження є катетерна радіочастотна абляція та фізичні процеси деструкції аритмогенних зон серця.

Предметом дослідження є термоелектричні характеристики міокарда, параметри електричного впливу (потужність струму, тривалість однієї аплікації, температура в зоні контакту), параметри, які характеризують властивості поширення теплового поля в тканині серця та глибина деструкції.

Методи дослідження. Застосовувалися спеціалізовані медико-технічні методи візуалізації та діагностики для отримання об'єктивних даних: рентгенологічний контроль позиціонування електродів; інвазивне електрофізіологічне дослідження провідної системи серця; електроанатомічне картування аритмогенного субстрату; магнітно-резонансна томографія для вимірювання розмірів деструкції; поєднання вектор-кардіографії та ехокардіографії для оцінки деполяризації міокарда, гістологічні дослідження експериментальних зразків РЧ деструкції міокарда тварин. В статистичних пакетах SPSS та Excel проведена обробка даних: регресійний аналіз взаємозв'язку потужності струму та температури тканини в зоні впливу, а також розрахунок термоелектричних характеристик міокарда. Моделювання поширення температурних полів у тканині міокарда виконувалося в програмі автоматизованого моделювання біофізичних процесів Comsol Multiphysics.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- дістав подальшого розвитку метод катетерної РЧА аритмогенних зон міокарда за рахунок застосування електричного впливу з двох катетерних електродів, які розміщуються в серці під час операції по різні сторони тканини міокарда один навпроти одного, що дозволяє збільшити вдвічі глибину деструкції при незмінній потужності струму, безпечних значеннях температурного впливу, меншій тривалості експозиції, порівняно з процедурою монополярної абляції;

- вперше запропоновано математичну модель електро-термодинамічних процесів в зоні впливу при катетерній РЧА, яка базується на реальних термоелектричних характеристиках працюючого серця людини, і дозволяє відтворити графічне зображення поширення температурного поля в тканині міокарда різних анатомічних зон серця з урахуванням їх морфометричних властивостей;

- вперше встановлено закономірності термічної дії радіочастотного струму різних діапазонів потужності на ділянки міокарда, в яких класично виконується катетерна РЧА, що дозволило визначити тепловий опір тканини міокарда, ступінь тепловідведення в навкооелектродній зоні та параметри теплопередачі, і науково обґрунтувати прогностичні критерії ефективності та безпечності абляції аритмогенних джерел в різних анатомічних зонах серця;

– розроблено адаптивну процедуру розрахунку термоелектричних характеристик міокарда (питомої електропровідності, теплоємності, коефіцієнтів теплопровідності, тепловіддачі, ступеню капілярної перфузії, лінійної швидкості крові в навколоелектродному просторі) шляхом розв’язання зворотної задачі термодинаміки, що враховує індивідуальні електро- та теплофізичні параметри відгуку тканини серця на вплив радіочастотного струму, та дозволяє виконувати обчислення вказаних величин для міокарда кожного пацієнта під час процедури катетерної РЧА в операційній.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено методику біполярної катетерної РЧА, яка дозволяє виконувати деструкцію патологічних джерел збудження, розташованих у глибині потовщених м’язових масивів гіпертрофованої стінки серця, що не досягалася при монополярній процедурі абляції, з можливістю оцінки ефективності по моніторингу зменшення амплітуди активності сигналу джерела патологічного збудження на ендogramах обох електродів;

– реалізовано спосіб візуалізації глибини РЧ деструкції міокарда та оцінки максимальної температури в тканині, який базується на математичній моделі поширення теплового поля, і дозволяє регулювати параметри електричного впливу, виконувати прогнозування надійності усунення джерела аритмії та можливих ускладнень термічного генезу;

– розроблено практичні рекомендації з вибору технічних засобів та параметрів радіочастотного впливу (діапазонів вихідної потужності генератору, моніторованої температури електроду, яка контролюється, та тривалості аплікації) для різних анатомічних зон серця, що дозволяють виконувати ефективну та безпечну трансмуральну деструкцію аритмогенних тканин міокарда;

– запропоновані методи та засоби катетерної РЧА впроваджено в клінічну практику електрофізіологічних рентген-операційних шістьох кардіохірургічних центрів України.

Клінічні впровадження результатів роботи підтверджені відповідними актами: ДУ «Національний інститут серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України» (акти впровадження від 16.12.2015 та від 10.02.2017), КУ «Одеська обласна клінічна лікарня» (акт впровадження від 03.02.2017), ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології ім. акад. М.Д. Стражеска» НАМН України (акт впровадження від 02.02.2017), ДУ «Інститут серця МОЗ України» (акт впровадження від 10.02.2017), КУ «Дніпропетровський обласний клінічний центр кардіології та кардіохірургії Дніпропетровської обласної ради» (акт впровадження від 08.02.2017), ДУ «Науково-практичний медичний центр дитячої кардіології та кардіохірургії МОЗ України» (акт впровадження від 09.02.2017).

Теоретичні та практичні результати дисертації використані у навчальному процесі факультету біомедичної інженерії КПІ імені Ігоря Сікорського при розробці та впровадженні програм нових навчальних дисциплін: «Прилади для електрофізіологічних досліджень та катетерної деструкції», «Біотермодинаміка та масоперенос», «Діагностичні та терапевтичні методи в аритмології і електрофізіології» (акт впровадження від 10.05.2017).

Особистий внесок здобувача. Робота є узагальненням самостійних досліджень та особистої участі здобувача у проведенні близько 4 тис. клінічних процедур катетерної РЧА як технічного асистента, відповідального за інженерний супровід комплексу рентгенологічного та електрофізіологічного обладнання при діагностиці аритмогенних ділянок серця та контролю їх вилучення, в тому числі за вибір, отримання та оцінку технічних параметрів та характеристик РЧА. Автор приймав безпосередню участь у виконанні електрофізіологічних досліджень та отриманні використаних в роботі даних.

Дисертація є самостійною роботою автора. Формулювання мети і задач роботи, вибір методологічних підходів для їх вирішення, узагальнення наукових положень та результатів дослідження для практичного використання в клінічній практиці виконані безпосередньо дисертантом та узгоджені з лікарями.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що включено до дисертації, доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних конференціях: III, IV Міжнародна конференція «Біомедична інженерія і технологія. Актуальні проблеми біомедичної інженерії в охороні здоров'я» (м. Київ, 2012, 2013), VIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Сучасна кардіологія і кардіохірургія – шлях від проблем до вирішення» (м. Судак, 2013), науково-практична конференція «Інженерні інновації для кардіохірургії» (м. Київ, 2013), V (67) Міжнародний науково-практичний конгрес студентів та молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної медицини» (м. Київ, 2013), International Scientific-Practical Conference «Virtual Instruments in Biomedicine» (м. Клайпеда, Литва, 2013, 2014), V Конгрес серцево-судинних хірургів України і Польщі «Актуальні питання серцево-судинної хірургії» (м. Ужгород, 2013), Всеукраїнська конференція «Актуальні проблеми та перспективи біомедичної інженерії» (м. Київ, 2014, 2016), IX, X міжнародна науково-практична конференція «Зварювання та термічна обробка живих тканин. Теорія. Практика. Перспективи» (м. Київ, 2014, 2015), Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні питання біомедичної та реабілітаційної інженерії» (м. Київ, 2015), IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015) (м. Київ, 2015), Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (м. Київ, 2016), Науково-практична конференція біомедичних інженерів і технологів України «Вітчизняні інженерні розробки для охорони здоров'я» (м. Київ, 2016).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 36 наукових праць, в тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 5 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття у закордонному виданні), 1 патент на винахід, 4 патенти на корисну модель, 6 статей у наукових медичних виданнях, 15 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 260 найменувань, 1 додатку. Робота містить 76 рисунків, 20 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 225 сторінок, з яких основний зміст викладений на 156 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету і задачі, визначено наукову новизну та практичне значення дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертації проаналізовано особливості технічних засобів та електрофізичних параметрів, які є визначальними при формуванні зони деструкції міокарда та впливають на результат катетерної РЧА. Встановлено, що для підвищення ефективності та безпечності деструкції проводять дослідження з оптимізації стандартизованих протоколів РЧА з урахуванням відповіді біологічної тканини серця на вплив електричного струму. На основі аналізу літературних джерел пріоритетним напрямком дослідження визначено розробку математичної моделі електро-термодинамічних процесів катетерної РЧА та графічного відображення поширення температурного поля в тканині міокарда, оцінки по ньому глибини ефективної деструкції та можливих ускладнень термічного генезу для регулювання параметрів електричного впливу. Науково обґрунтовано шляхи підвищення точності моделі, безпечності і ефективності її застосування в клінічній практиці, використанням для моделювання міокарда термоелектричних характеристик тканини серця кожного пацієнта. Прикладне значення має удосконалення методу катетерної РЧА для збільшення глибини деструкції, вилучення джерел патологічного збудження в потовщених тканинах серця у пацієнтів з гіпертрофічною кардіоміопатією та при епікардіальній локалізації субстрату аритмії.

У другому розділі роботи в ході експериментального дослідження катетерної РЧА на серці тварин встановлено прогностичні закономірності та числові значення розмірів деструкції міокарда в залежності від типорозмірів електродів, параметрів радіочастотної енергії та теплофізичних умов середовища взаємодії. Використання довшого електроду, вищих значень потужності та збільшення ступеню тепловідведення зумовлювали лінійну динаміку зростання розмірів деструкції. Гістологічний аналіз препаратів зони деструкції дозволив виявити основні патоморфологічні маркери ефективної та безпечної абляції, а саме: зосередження деструкції в товщі міокарда за рахунок дії електричного струму і резистивного нагрівання, та коагуляційні форми провідного нагрівання, що проявлялися різними ступенями змін цитоплазми кардіоміоцитів по контуру відповідно до температурних полів. Вони зумовлювали розриви м'язових волокон, достатні для блокування патологічних сигналів, і не потребували руйнування тканини серця в навколоелектродному просторі.

Третій розділ присвячений аналізу клінічної бази даних процедур катетерної РЧА субстратів аритмій в різних анатомічних зонах серця для розрахунку термоелектричних характеристик міокарда працюючого серця людини. Предметом дослідження стали потужність електричного впливу та температура тканини міокарда в зоні контакту з електродом. На рис. 1 приведені рівняння регресії впливу різних діапазонів потужності на температуру поверхні ділянок серця, в яких класично виконують РЧА. Встановлені закономірності мають лінійну динаміку і визначають тепловий опір тканини міокарда (виражений через коефіцієнт регресії), ступінь тепловідведення в навколоелектродній зоні (коефіцієнт залишкової детермінації $1-R^2$), що характеризують електро- та теплофізичні умови середовища взаємодії.

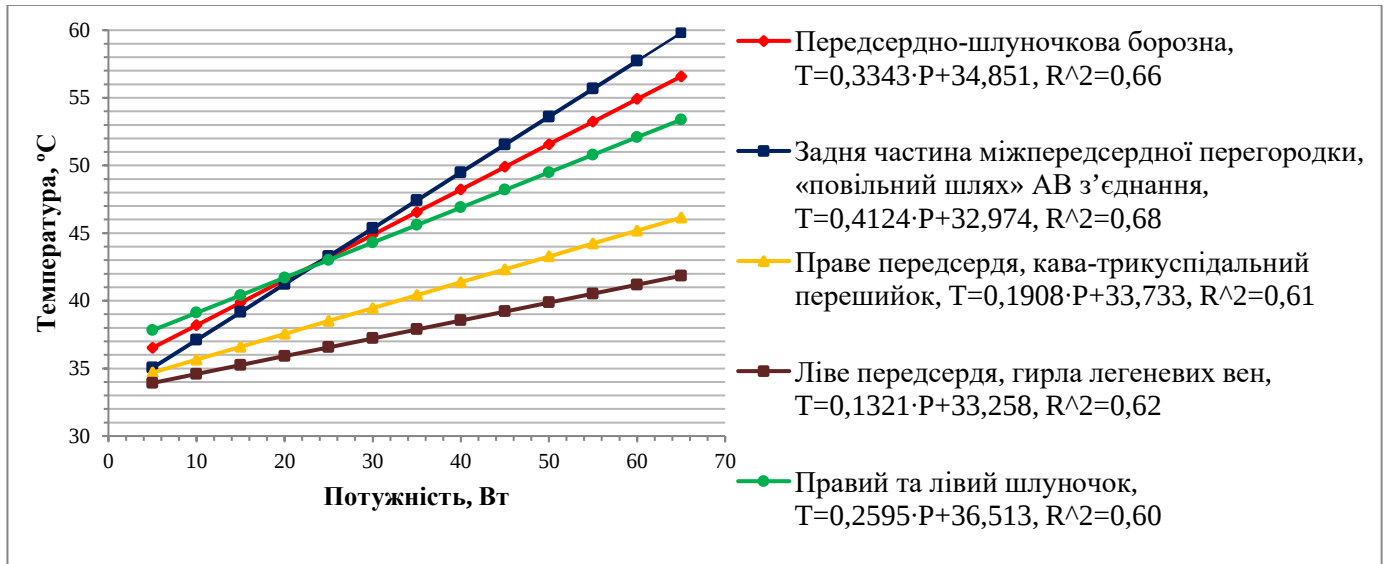


Рисунок 1 – Закономірності термічної дії РЧА в різних анатомічних зонах серця (N=210 процедур РЧА, n = 3227 точок РЧ аплікацій, $p < 0,05$)

В основу розрахунків термоелектричних характеристик покладені параметри відповіді тканини міокарда (середня потужність перехідного процесу, температура в зоні контакту, імпеданс) на вплив електричного струму з вихідною потужністю $P_{\text{вих}}$, які реєструвалися на електрофізіологічному обладнанні (табл. 1).

Таблиця 1 – Електрофізичні параметри відповіді тканини міокарда на вплив радіочастотного струму (N = 83 процедур РЧА, n = 1358 точок аплікацій, $p < 0,05$)

Зона РЧ впливу	Вихідна потужність, $P_{\text{вих.}}$, Вт	Потужність перехідного процесу, P, Вт	Напруга, U_0 , В	Сила струму, I, мА	Імпеданс, R, Ом	Температура електроду, T_e , °C
Передсердно-шлуночкова борозна	30	$26,7 \pm 1,4$	50 ± 3	496 ± 35	113 ± 17	$46,8 \pm 3,2$
«Повільний шлях» АВ з'єднання	30	$25,2 \pm 1,6$	49 ± 3	492 ± 33	107 ± 14	$43,6 \pm 2,7$
Кава-трикуспідальний перешийок	60	$54,1 \pm 1,3$	63 ± 4	804 ± 63	85 ± 11	$47,5 \pm 3,9$
Ліве передсердя, гирла легеневих вен	30	$28,6 \pm 0,9$	50 ± 2	553 ± 17	101 ± 10	$37,1 \pm 0,9$
Правий та лівий шлуночок	40	$35,3 \pm 1,4$	55 ± 3	612 ± 35	99 ± 9	$46,6 \pm 3,7$

В ході регресійного аналізу взаємозв'язку потужності і температури в ділянці взаємодії визначено коефіцієнти регресії β (Вт/°C), які за своїм фізичним значенням є параметром теплопередачі і показують яка величина потужності передається тканині міокарда при зміні температури на 1 °C. Знаючи початкову температуру в зоні контакту $T_0 = 37$ °C, виконаний розрахунок потужності H (Вт), що перетворювалася в тепло тканинами міокарда (абсорбована потужність) (табл. 2):

$$H = \beta \cdot (T_e - T_0). \quad (1)$$

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта регресії, зміни температури при дії РЧ стуму і абсорбованої потужності ($N = 83$ процедур РЧА, $n = 1358$ точок аплікацій, $p < 0,05$)

Зона радіочастотного впливу	Коефіцієнт регресії, β , Вт	Зміни температури, $(T_e - T_0)$, °C	Абсорбована потужність, Н, Вт
Передсердно-шлуночкова борозна	0,2971	$9,8 \pm 3,2$	$2,92 \pm 0,05$
«Повільний шлях» АВ з'єднання	0,4182	$6,6 \pm 2,7$	$2,74 \pm 0,06$
Кава-трикуспідальний перешийок	0,2201	$11,5 \pm 3,9$	$2,53 \pm 0,04$
Гирла легеневих вен	0,1648	$15,1 \pm 0,9$	$2,48 \pm 0,01$
Правий та лівий шлуночок	0,2718	$9,6 \pm 3,7$	$2,62 \pm 0,05$

Розрахунок термоелектричних характеристик міокарда ґрунтувався на законах резистивного нагрівання і рівнянні теплообміну з урахуванням наступних положень. Площа поверхні пасивного електроду ($\approx 150\text{-}300 \text{ см}^2$) в багато разів більша від площі активного електроду ($\approx 18 \text{ мм}^2$). При подачі РЧ енергії на електрод 7 Fr діаметром 2,3 мм електричний струм розповсюджується в радіальному напрямку від джерела. Резистивна продукція тепла в міокарді пропорційна потужності струму, опору тканини і обернена величині питомої електропровідності σ (См/м). Джерело тепла являється об'ємним і розподіляється в ділянці тканини, що наближено дорівнює радіусу електроду r (м). Глибина провідного нагрівання залежить від температури, що отримується від резистивного нагріву. Швидкість визначається питомою теплоємністю c (Дж/К · кг) і теплопровідністю k (Вт/К · м) тканини. Частина тепла відводиться локальним кровотоком, який визначається коефіцієнтом тепловіддачі h (Вт/К · м²) і має дві складові: лінійну швидкість потоку в навколоелектродній зоні u (м/с) та ступінь капілярної перфузії міокарда ω (м³/м³/с).

Для розрахунку питомої електропровідності розглянута квазістатична модель електричного поля зі стаціонарним розподілом потенціалу у просторі з використанням рівняння Лапласа:

$$\nabla[\sigma \nabla V] = 0, \quad (2)$$

де V – електричний потенціал, В; $\nabla V = \partial V / \partial r$ – оператор градієнта потенціалу.

Застосувавши граничну умову напруги на поверхні активного електроду, визначено електричний потенціал з точкового джерела струму I (А):

$$\nabla V = \frac{V_0}{4\pi r} = \frac{I}{\sigma 4\pi r}.$$

В зоні зосереджена найбільша густина струму j (А/м), визначена із закону Ома:

$$j = \sigma(-\nabla V).$$

Радіочастотна енергія переходить і поглинається тканиною, перетворюючись в тепло згідно з законом Джоуля:

$$J = \frac{j^2}{\sigma} = \sigma(-\nabla V)^2,$$

де J (Вт/м³) позначає дозу поглиненої енергії, генеровану потужністю РЧА P (Вт), прикладеною до одиниці об'єму тканини $v = 4/3 \pi r^3$.

Потужність визначалася за законом Кірхгофа для кола послідовного з'єднання з урахуванням втрат на кабелі та пасивний електрод ($R_{\text{втрати}} = 30 \text{ Ом}$):

$$P = P_{\text{вих}} \frac{R - R_{\text{втрати}}}{R}.$$

Виконавши необхідні перетворення над формулами для дози генерованого тепла J та з урахуванням значень потужності і сили струму, розраховано питому електропровідність σ тканини міокарда:

$$\sigma = \frac{I^2}{12P\pi r}. \quad (3)$$

В основу розрахунку термодинамічних характеристик міокарда лягло рівняння теплообміну Пенна, яке відображає формування тривимірного просторового розподілу температури в біологічній тканині:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + J - \rho_b c_b \vec{u} \nabla T - \rho_b c_b \omega (T - T_0) + Q_m, \quad (4)$$

де ρ – густина міокарда, кг/м³; ∇T – градієнт температури; ρ_b – густина крові, кг/м³; c_b – питома теплоємність крові, Дж/(кг·К); Q_m – кількість тепла, що виділяється від метаболізму, Вт/м³.

З урахуванням геометрії і розподілу тепла від джерела J , усталеної температури на границі середовищ міокард-електрод-кров $T = T_e$, розв'язано зворотну задачу термодинаміки. Узагальнена гранична умова складного теплообміну на поверхні двох середовищ розрахункової області має вигляд $q_k + q_h + q_j(t) = 0$, складові якої визначають закон збереження енергії на границі поверхні (Вт/м²) і характеризують кондуктивний q_k , конвективний q_h теплообмін та тепловий потік зовнішнього джерела тепла $q_j(t)$, який задає температуру в обмеженій ділянці тканини.

Для вирішення рівняння використані граничні умови Кранка-Ніколсона, які задають умови теплообміну на межі контакту двох середовищ з різними термодинамічними властивостями, базуючись на неперервності температурного поля та закону збереження питомих теплових потоків в усталеному стані.

Задані початкові умови в момент часу $t = 0$ для температури міокарда, електроду та крові: $T(r, t) = T(r, 0) = T_0 = 37^\circ\text{C}$.

Граничні умови II роду задають значення густини теплового потоку в зоні контакту: $(q_k + q_j)_{Si} = 0$, де зовнішнє поверхнєве джерело тепла q_j визначено з урахуванням параметрів теплопередачі (коефіцієнта регресії β):

$$q_j = \frac{H}{S} = \frac{H}{4\pi r^2} = \frac{\beta(T_e - T_0)}{4\pi r T_e}.$$

Кондуктивний тепловий потік q_k описано законом Фур'є:

$$q_k = -k \nabla T = -k \frac{\partial T}{\partial r}.$$

З рівності теплових потоків q_k і q_j :

$$\frac{H}{4\pi r^2} = -k \frac{\partial T}{\partial r},$$

отримано формулу розрахунку коефіцієнта теплопровідності k міокарда:

$$k = \frac{H}{4\pi r T_e} = \frac{\beta(T_e - T_0)}{4\pi r T_e}. \quad (5)$$

Взаємодія тканини міокарда і капілярної перфузії описуються згідно граничних умов III роду $(q_k + q_h)_{Si} = 0$, де конвективний тепловий потік q_h визначено за законом Ньютона-Ріхмана з урахуванням коефіцієнта тепловіддачі h :

$$q_h = h(T_0 - T_e).$$

Виконавши диференціювання рівняння рівності теплових потоків q_k і q_h з урахуванням термодинамічних умов:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_0 - T_e),$$

отримано формулу для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі h :

$$h = \frac{k}{r} = \frac{6\beta(T_e - T_0)}{4\pi r^2 T_e}. \quad (6)$$

Коефіцієнт капілярної перфузії w_b визначено з формули:

$$h = \rho_b c_b w_b, \\ w_b = \frac{\rho_b c_b}{h} = \frac{4\pi r^2 T_e \rho_b c_b}{6\beta(T_e - T_0)}. \quad (7)$$

Тепло, що зумовлює нагрівання ділянки серця радіусом r також виражено через кондуктивну теплопровідність:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

і визначено питому теплоємність c тканини міокарда:

$$c = \frac{6k}{\rho r^2} = \frac{6\beta(T_e - T_0)}{4\pi \rho r^3 T_e}. \quad (8)$$

Згідно граничних умов III роду отримано рівняння охолодження електроду потоком крові:

$$\rho_e c_e v_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = h_e S_e \Delta T_e, \quad (9)$$

де $S_e = 2\pi r h$ – площа поверхні електроду, м^2 ; $v_e = \pi r^2 h$ – об'єм електроду, м^3 ; ρ_e – густина матеріалу електроду, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_e – питома теплоємність матеріалу електроду, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\partial T_e / \partial t = (T_e - T_b)$ – температура нагрівання електроду при РЧА, $^\circ\text{C}$; ΔT_e – коливання температури під впливом охолодження потоком крові, $^\circ\text{C}$.

Для різних ділянок міокарда і термодинамічних умов РЧА розраховано коефіцієнт тепловіддачі з поверхні електроду в потік крові:

$$h_e = \frac{\rho_e c_e \pi r^2 h (T_e - T_b)}{2\pi r \Delta T_e} = \frac{\rho_e c_e r (T_e - T_b)}{2\Delta T_e}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для циліндричного тіла електроду, що охолоджується потоком крові в поперечному напрямку, визначено за формулою:

$$Nu = \frac{h_e L}{k_b},$$

де L – характерний розмір тіла (для циліндра і сфери – діаметр), м ; Nu – число Нуссельта; k_b – коефіцієнт теплопровідності крові, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

За наявності конвекції число Нуссельта Nu є функцією чисел Рейнольдса і Прандтля, які і визначають, відповідно, рівень вимушеної і природної конвекції:

$$Nu = 0,664(Re^{1/2})(Pr^{1/3}), \quad Re = \frac{\rho_b u L}{\mu}, \quad Pr = \frac{c_b \mu}{k_b},$$

де $\mu = 0,0021 \text{ кг}/\text{м} \cdot \text{с}$ – в'язкість крові, u – лінійна швидкість крові, $\text{м}/\text{с}$.

Звідси, лінійну швидкість потоку крові визначено за наступною формулою:

$$u = \frac{(Nu)^2 \mu}{0,44 \rho_b L (Pr)^{2/3}}. \quad (10)$$

Таким чином, обчислені термоелектричні характеристики тканини міокарда працюючого серця людини для досліджуваних анатомічних ділянок, в яких класично виконують РЧА субстратів аритмій (табл. 3).

Таблиця 3 – Термоелектричні характеристики міокарда різних анатомічних зон серця (N = 83 процедур РЧА, n = 1358 точок аплікацій, p < 0,05)

Зона РЧ впливу	Питома електро- провідність, σ , См/м	Коефіцієнт тепло- провідності, k , Вт/К·м	Питома тепло- ємність, c , Дж/К·кг	Коефіцієнт капілярної перфузії, w , м ³ /м ³ /с	Коефіцієнт тепловіддачі міокарда, h , Вт/К·м ²	Лінійна швидкість крові, u , м/с
Передсердно-шлуночкова борозна	0,181	0,605	2293	$120 \cdot 10^{-6}$	504	0,171063
«Повільний шлях» АВ з'єднання	0,179	0,574	2176	$115 \cdot 10^{-6}$	478	0,10698
Кава-трикуспідальний перехід	0,238	0,523	1981	$104 \cdot 10^{-6}$	435	0,196577
Гирла легеневих вен	0,225	0,531	2010	$106 \cdot 10^{-6}$	442	5,075097
Правий та лівий шлуночок	0,207	0,543	2058	$108 \cdot 10^{-6}$	452	0,122958

Рівняння розрахунку термоелектричних характеристик (3), (5)-(8), (10) введено в блок формул електрофізіологічної системи LabSystem Pro (Bard, США), яка дозволяє автоматизовано реєструвати і вносити в пам'ять електро- та теплофізичні параметри відгуку тканини серця на вплив радіочастотного струму, і таким чином виконувати розрахунок вказаних величин для міокарда кожного пацієнта. Дані показники є додатковими критеріями оцінки ефективності та безпечності абляції міокарда, що удосконалюють процедуру катетерної РЧА. Актуальне значення має використання термоелектричних характеристик міокарда при моделюванні тканини серця та біофізичних механізмів катетерної РЧА, яка дозволить візуалізувати розміри деструкції і обрати оптимальні параметри електричного впливу.

Четвертий розділ містить покроковий алгоритм розроблення математичних моделей катетерної РЧА міокарда в програмному середовищі Comsol Multiphysics та інтерпретації результатів для створення нового інформаційного забезпечення процедури абляції, підвищення її ефективності та безпечності [1, 27-29, 34]. При математичному моделюванні електр-термодинамічні механізми РЧА реалізовані за рахунок використання фізичних модулів Joule Heating («Резистивне нагрівання») та Bioheat transfer («Теплообмін в біологічній тканині») із заданням параметрів капілярного кровотоку та внутрішнього тепла в тканині. Введено модуль Heat Transfer in Fluids («Теплообмін в рідині») для реалізації потоку крові. Фізичні процеси в модулях описувалися диференціальними рівняннями електричного поля Лапласа і теплообміну Пенна. Результатом моделювання стало графічне зображення поширення теплового поля (рис. 2) в тканині міокарда з можливістю оцінки глибини та ширини деструктивних температурних змін.

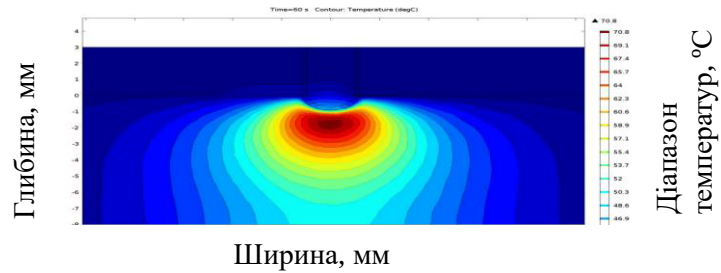


Рисунок 2 – Діаграма розподілу ізотерм температур в тканині міокарда

Інтерпретація глибини ефективної деструкції виконувалася по ізотермічному контуру $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 3 наведено результати аналізу залежності температурних змін (максимальної температури в тканині $T_{\max}$ і на поверхні контакту з електродом T_e) та глибини деструкції h міокарда в ділянці «передсердно-шлуночкова борозна» при потужності електричного впливу 30 Вт, тривалості 60 с з інтервалом 5 с.

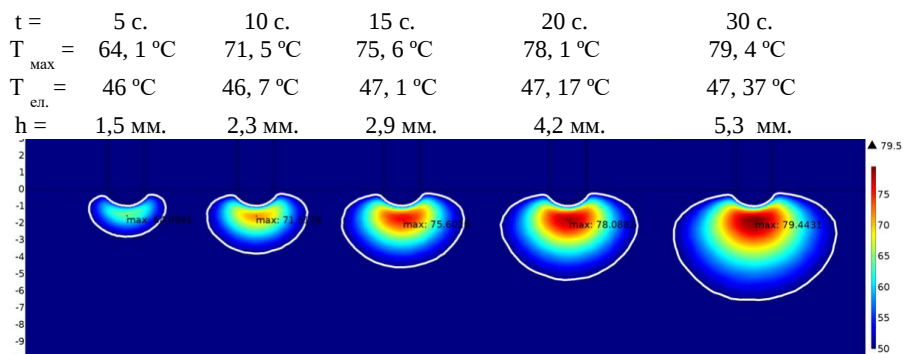


Рисунок 3 – Температура і глибина деструкції в ізотермічному контурі $>50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Модель впроваджено в клінічну практику як спосіб візуалізації глибини деструкції міокарда і прогнозування надійності усунення джерела аритмії, запобігання перфоративних ускладнень термічного генезу. На рис. 4 приведені температурні діаграми досліджуваних анатомічних ділянок серця з урахуванням термоелектричних характеристик міокарда при РЧА з наступними однаковими параметрами електричного впливу: потужність – 30 Вт, тривалість дії – 30 с, електрод 4 мм. Отримані різні значення температури на поверхні міокарда, максимальної температури в глибині тканини та розміри деструкції, по яких оцінювалася ефективність та безпечність РЧА відносно товщини стінки серця, обмеженої пунктиром. Модель продемонструвала прогнозування температури на поверхні тканини з похибкою $\pm 1,22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

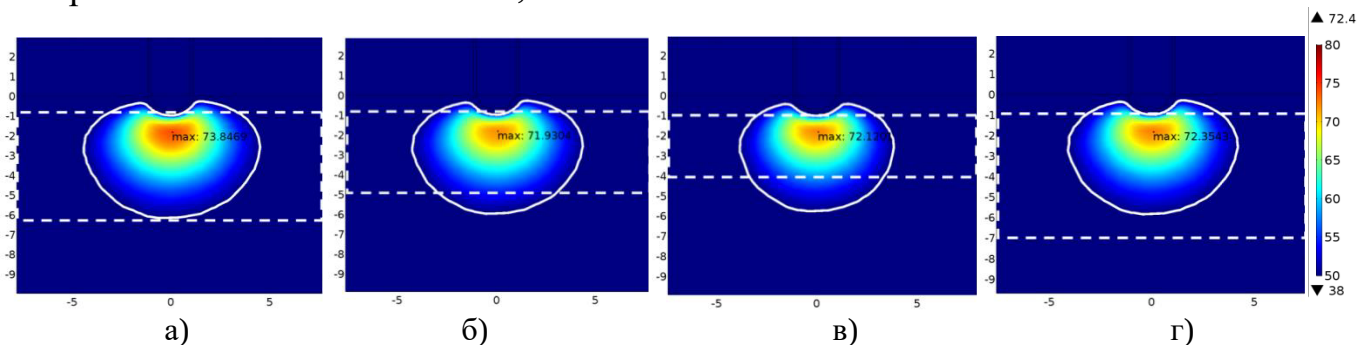


Рисунок 4 – Температурні діаграми і оцінка ефективності та безпечності РЧА тканин міокарда різних ділянок серця: а) передсердно-шлуночкова борозна; б) «повільний шлях» АВ-з'єднання; в) гирла легеневих вен; г) правий шлуночок

Точність моделі перевірена за допомогою незалежного визначення розмірів РЧ деструкції тканини міокарда на зображеннях, отриманих методом магнітно-резонансної томографії (Vantage Titan HSR 1,5T, Toshiba, Японія) за допомогою кардіологічного програмного пакету QMass (QMass MR Advanced edition), який забезпечував точність зображення з похибкою 2 %. Абсолютна похибка отриманих на моделі розмірів деструкції складала $\pm 0,8$ мм.

У п'ятому розділі дисертації представлено технічну реалізацію засобів електричного впливу для удосконалення методу катетерної РЧА джерел патологічного збудження, розташованих у глибині м'язових масивів серця.

Дослідження поширення температурних полів у тканині міокарда шлуночків дозволили встановити, що максимальна глибина радіочастотної деструкції досягає 10 ± 2 мм при гранично безпечних параметрах потужності (50 Вт), нагріванні тканини серця (≈ 100 °C) та тривалості впливу (60 с) в монополярному режимі. Такі характеристики не дозволяють виконати ефективну деструкцію аритмогенної зони при гіпертрофії стінки серця понад 15-20 мм (гіпертрофічна кардіоміопатія).

Для вирішення даної проблеми розроблено методику біполярної катетерної РЧА із застосуванням двох активних електродів, які розміщуються в серці під час операції по різні сторони тканини міокарда один навпроти одного, що забезпечує збільшення вдвічі глибини деструкції при незмінній потужності струму, безпечних значеннях температури, меншій тривалості експозиції (патент на корисну модель № 114436, опубл. 10.03.2017, бюл. № 5, заявл. № u201609146 від 31.08.2016; заявка на винахід України № a201609145 від 31.08.2016). Для практичної реалізації методики (рис. 5) розроблено двопінову «розпайку» (а) індиферентного роз'єму генератора, яка дозволяє замість пасивної пластини під спиною пацієнта (б) підключати ще один абляційний електрод, заведений в камеру серця (в). Другий «пін-роз'єм» підключається до блоку реєстрації внутрішньосерцевої ендोगрами (г, д), що дозволяє виконувати електрофізіологічну оцінку ефективності РЧА по моніторингу зменшення амплітуди активності сигналу джерела патологічного збудження на ендোগрамах з обох електродів (е).

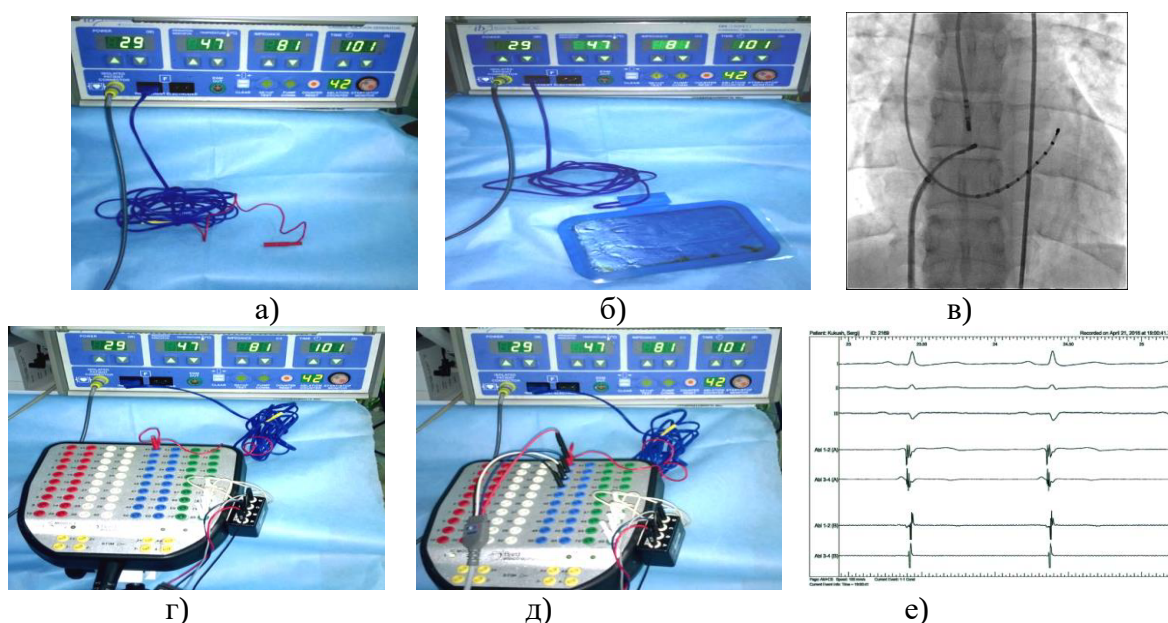


Рисунок 5 – Практична реалізація катетерної біполярної РЧА

На рис. 6 представлені результати моделювання РЧА тканини міокарда товщиною 15 мм при потужності електричного струму 40 Вт. Наглядно видно, що при біполярній РЧА змінилася геометрична форма деструкції, стала більш вузка і концентрована на глибині тканини. Зменшилася температура в товщі міокарда близько на 20 °С, проте досягалася трансмуральність деструкції відносно до товщини міжшлуночкової перегородки. Це пояснювалося тим, що в монополярному режимі найвища щільність струму зосереджувалася в ділянці активного електрода, біля якого і відбувався деструкційний вплив. При біполярній РЧА вона розділилася між двома електродами згідно фізичних законів електричного поля між двома зарядами однакових розмірів. При цьому зросла роль теплопровідності більших об'ємів тканини, яка і зумовлювала збільшення загальної глибини деструкції при нижчих значеннях температури в тканині, отриманої від резистивного нагрівання.

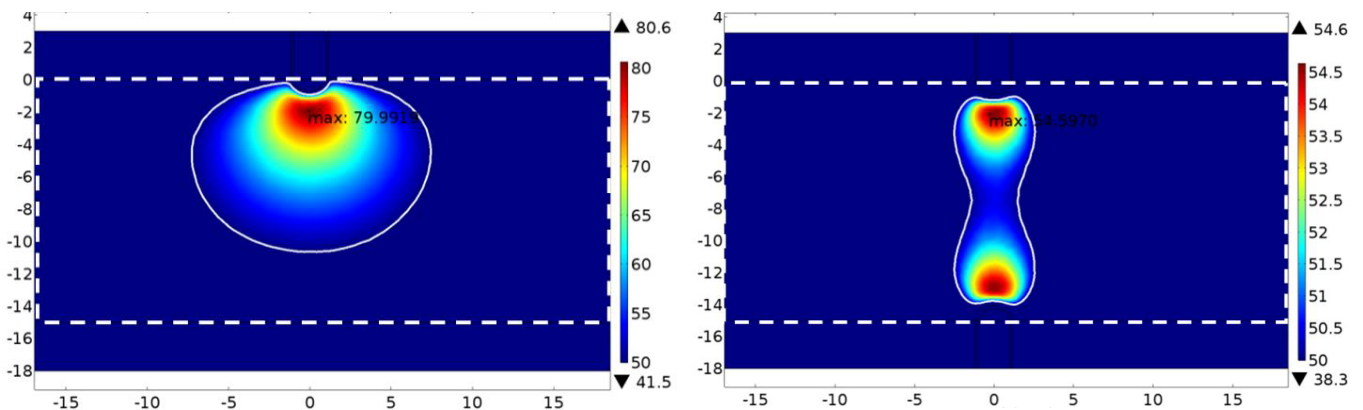


Рисунок 6 – Температурні діаграми монополярної і біполярної РЧА потужністю 40 Вт тканин міокарда міжшлуночкової перегородки товщиною 15 мм

Клінічна ефективність впровадженої методики підтверджена усуненням тахікардії у 25 пацієнтів з 27 (93 %). Біполярна катетерна РЧА започаткувала нову методику виконання ендо-епікардіальної абляції та редукції міжшлуночкової перегородки у пацієнтів з кардіоміопатіями.

Базуючись на результатах моделювання та вдосконаленнях засобів РЧА, розроблено практичні рекомендації (рис. 7) з вибору електродів та параметрів катетерного РЧ впливу (вихідної потужності генератору $P_{onm} \pm \Delta P$, моніторованої температури електрода $T_{onm} \pm \Delta T$, тривалості аплікації $t_{onm} \pm \Delta t$) для різних анатомічних зон серця, що дозволяють виконувати ефективну та безпечну абляцію субстратів аритмій. Також запропоновано алгоритм виконання РЧА в залежності від теплофізичних умов середовища взаємодії (рис. 8), який описує рекомендовані шляхи вибору оптимальної потужності струму, ефективність якої оцінюється по падінню амплітуди сигналу на ендограмі активного електрода, припиненням тахікардії та неможливістю запустити її в ході електрофізіологічного дослідження (ЕФД). Запропоновані практичні рекомендації впроваджені в електрофізіологічних рентген-операційних шістьох кардіохірургічних центрів України, і згідно актів впровадження, з загальної кількості спостережень 1623 хворих забезпечили ефективне видалення аритмій у 1615 пацієнтів (99,5 %).

На основі експериментальних досліджень запропоновані параметри безпечної та ефективної РЧА катетерними електродами також на відкритому серці.

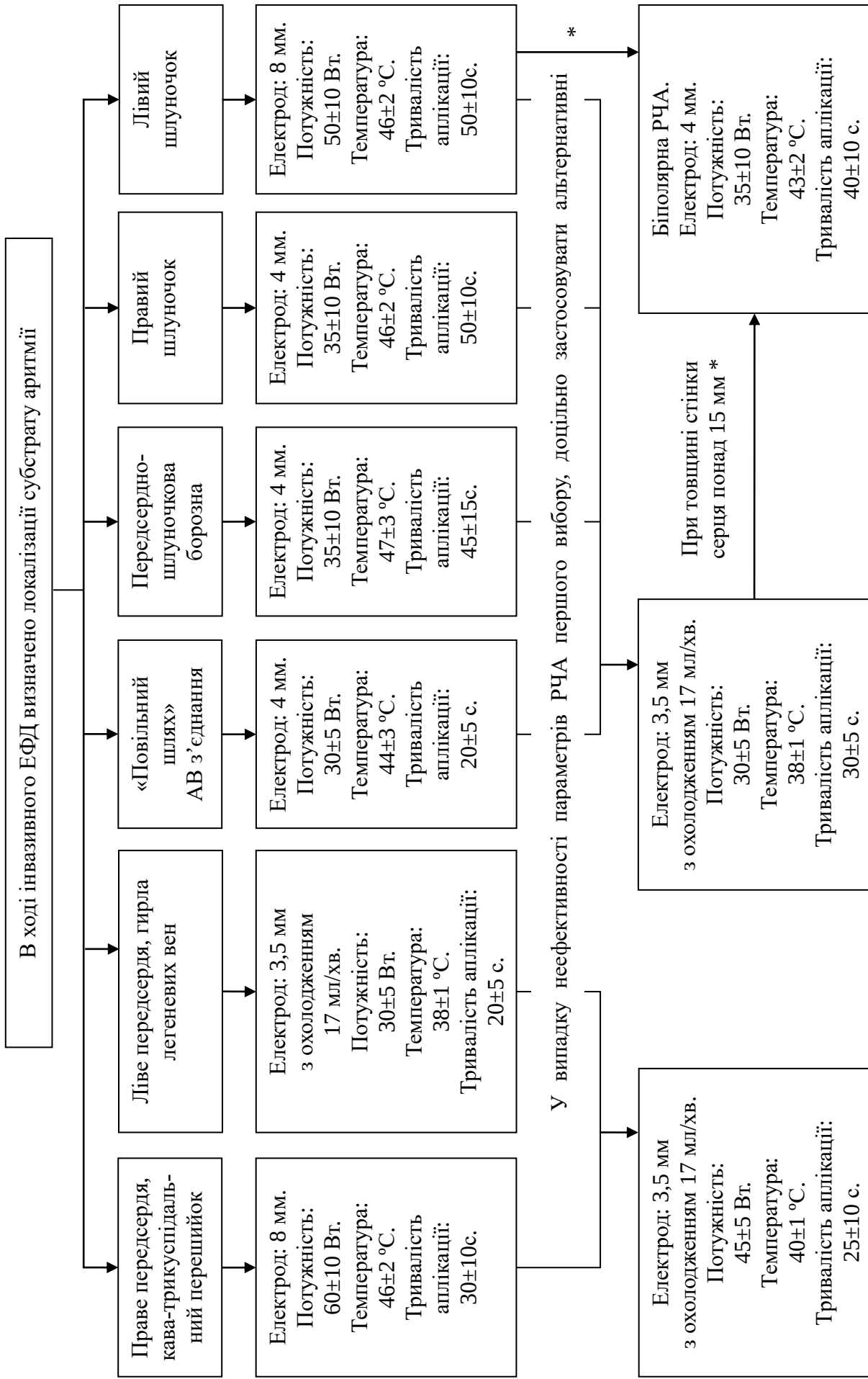


Рисунок 7 – Практичні рекомендації з вибору параметрів РЧА тканин міокарда для різних ділянок серця

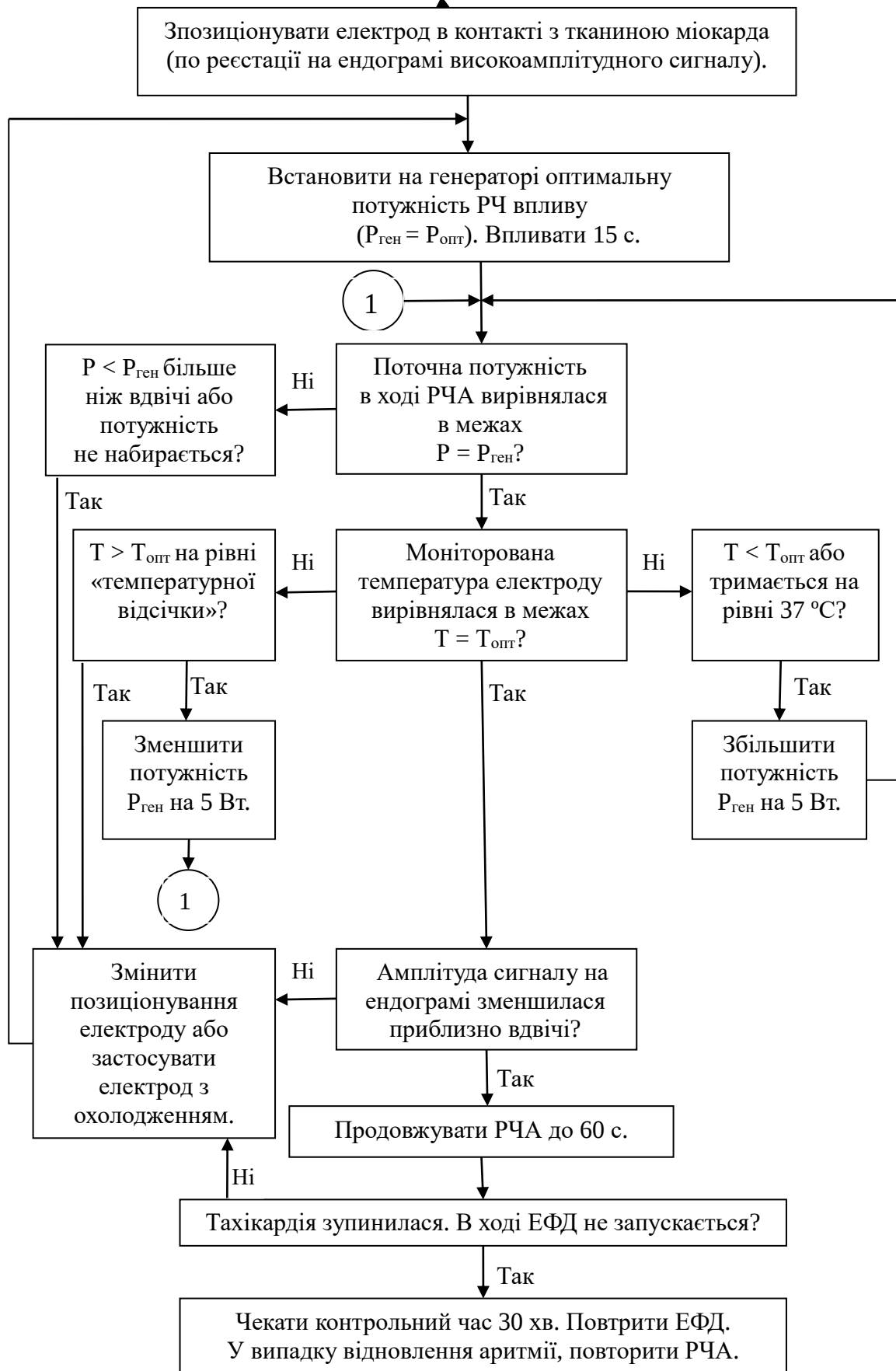


Рисунок 8 – Методика виконання РЧА в залежності від теплофізичних умов середовища взаємодії

У *додатку* подано акти впровадження результатів дисертації в хірургічній практиці електрофізіологічних рентген-операційних кардіохірургічних центрів України, у навчальному процесі факультету біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського та при виконанні державних науково-дослідних робіт.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача – підвищення ефективності і безпечності радіочастотної абляції аритмогенних зон серця шляхом удосконалення методу катетерної РЧА, розробки математичної моделі аналізу температурних полів і оцінки глибини деструкції, та вибору оптимальних режимів електричного впливу з урахуванням термоелектричних та морфометричних характеристик ділянок серця при застосуванні різних інструментальних засобів.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Дістав подальший розвиток метод катетерної РЧА за рахунок розробки методики біполярної катетерної радіочастотної абляції патологічних джерел збудження, розташованих у глибині потовщених м'язових масивів гіпертрофованої стінки серця, яка при застосуванні електричного впливу з двох електродів, що розміщуються в серці під час операції по різні сторони тканини міокарда один навпроти одного, дозволяє збільшити вдвічі глибину деструкції товстої стінки серця при незмінній потужності струму, безпечних значеннях температурного впливу, меншій тривалості експозиції, що не досягалось при монополярній абляції. Клінічна ефективність впровадженої методики підтверджена усуненням тахікардії у 25 пацієнтів з 27 (93 %).

2. Розроблено тривимірну модель електро-термодинамічних процесів катетерної РЧА в програмному середовищі Comsol Multiphysics, яка базується на реальних термоелектричних характеристиках працюючого серця людини, і дозволяє відтворити графічне зображення поширення температурного поля в тканині міокарда різних анатомічних зон серця з урахуванням їх морфометричних властивостей.

3. Модель впроваджено в клінічну практику як спосіб візуалізації та оцінки глибини деструкції міокарда для регулювання параметрів електричного впливу, прогнозування надійності усунення джерела аритмії та запобігання ускладнень термічного генезу. Точність моделі перевірена і підтверджена за допомогою незалежного визначення розмірів РЧ деструкції тканини міокарда на зображеннях, отриманих методом магнітно-резонансної томографії. Абсолютні похибки склали: для глибини деструкції $\pm 0,8$ мм, температури електроду $\pm 1,22$ °С.

4. Вперше встановлено закономірності термічної дії радіочастотного струму різних діапазонів потужності на ділянки міокарда, в яких класично виконується катетерна РЧА, що дозволило визначити тепловий опір тканини міокарда, ступінь тепловідведення в навколоелектродній зоні та параметри теплопередачі, і науково обґрунтувати прогностичні критерії ефективності та безпечності абляції аритмогенних джерел в різних анатомічних зонах серця.

5. На основі отриманих закономірностей розроблено адаптивну процедуру розрахунку термоелектричних характеристик міокарда (електропровідності, питомої теплоємності, коефіцієнтів теплопровідності, тепловіддачі, ступеню капілярної

перфузії, лінійної швидкості крові в навколоелектродному просторі) шляхом розв'язання зворотної задачі термодинаміки, що враховує індивідуальні електро- та теплофізичні параметри відгуку тканини серця на вплив радіочастотного струму, та дозволяє виконувати обчислення вказаних величин для міокарда кожного пацієнта під час процедури катетерної РЧА в операційній.

6. Розроблено практичні рекомендації з вибору типорозмірів електродів та параметрів катетерної радіочастотної абляції (діапазонів вихідної потужності генератору, моніторованої температури електроду, яка контролюється, та тривалості аплікації) для різних анатомічних зон серця, що дозволяють виконувати ефективну та безпечну трансмуральну деструкцію аритмогенних тканин міокарда. Вони впроваджені в шістьох кардіохірургічних центрах України, і згідно актів впровадження, з загальної кількості спостережень 1623 хворих забезпечили ефективне вилучення аритмій у 1615 пацієнтів, що становило 99,5 %.

7. Експериментальні гістологічні дослідження препаратів зони РЧ деструкції міокарда тварин дозволили виявити основні патоморфологічні маркери ефективної та безпечної РЧА, прогностичні закономірності розмірів деструкції в залежності від типорозмірів електродів, параметрів радіочастотної енергії та теплофізичних умов середовища взаємодії. На основі отриманих даних, запропоновані параметри РЧА для безпечної та ефективної деструкції джерел патологічного збудження катетерними електродами також для операцій на відкритому серці.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моделювання електричного та термодинамічного впливу радіочастотної абляції на міокард в програмі Comsol Multiphysics 4.3a. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Ю.П. Стасюк, Є.Г. Сорочан, М.В. Савкіна // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – № 5. – С. 37-43. *Особистий внесок – математичне моделювання електро-термодинамічних процесів РЧА; визначення теплоємності міокарда; інтерпретація результатів; розробка нового інформаційного забезпечення процедури катетерної РЧА. (Ulrich's Web Global Serials Directory, PИИЦ, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, OAJI, CiteFactor, Scientific Indexing Services)*

2. Експериментальне обґрунтування режиму радіочастотної абляції тканин міокарда для операції Maze на відкритому серці. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук, О.О. Лафета // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 3. – С.125-130. *Особистий внесок – обробка та узагальнення результатів дослідження для застосування в клінічній практиці; оцінка результатів клінічного впровадження. (PИИЦ)*

3. Спосіб деструкції джерел патологічного збудження в серці оригінальним монополярним електродом. / М.М. Сичик, Ю.П. Стасюк, М.В. Савкіна, Є.Г. Сорочан, В.Б. Максименко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія – «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2016. – Випуск 65. – С. 108-118. *Особистий внесок – розробка монополярного електроду для РЧА; узагальнення даних гістологічних досліджень; обґрунтування оптимальних параметрів РЧА для клінічного використання. (DOAJ, Web of Science, PИИЦ, Index Copernicus, WorldCat, EBSCO, DRJI)*

4. Оригінальна методика біполярної транскатетерної радіочастотної абляції аритмогенних ділянок серця. / М.М. Сичик, Р.В. Романенко, Б.Б. Кравчук, Ю.І. Карпенко, В.Б. Максименко // Вісник Національного технічного університету

України «Київський політехнічний інститут». Серія – «Приладобудування». – 2016. – Випуск 52(2). – С. 102-107. *Особистий внесок – розробка принципової схеми біполярної катетерної РЧА; експериментальна перевірка та обґрунтування параметрів електричного впливу; рекомендації з методології застосування. (Index Copernicus, PIIIC, BASE, WorldCat, OpenAIRE)*

5. Прогнозування ефективності катетерної радіочастотної абляції аритмогенних зон серця за оцінкою контакту між електродом та тканиною міокарда. / М.М. Сичик, В.В. Ковшевацька, В.Б. Максименко, Л.Д. Тарасова // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія – «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». – 2017. – Випуск 68. – С. 59-63. *Особистий внесок – електро-анатомічне картування серця; розробка методики оцінки контакту електрода і стінки серця; розробка програмного комплексу в Matlab; практичні рекомендації та впровадження в операційній. (Web of Science, DOAJ, PIIIC, Index Copernicus, WorldCat, EBSCO, DRJI)*

6. Анализ и оценка термодинамических свойств миокарда сердца как инновационный подход к выбору параметров катетерной радиочастотной абляции. / Г.В. Книшов, М.М. Сычик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук // Международный научно-практический журнал «Инновационные технологии в медицине». – 2013. – Випуск 1(01). – Ст. 24–28. *Особистий внесок – створення клінічної бази даних; регресійний аналіз зв'язку потужності струму та температури в зоні взаємодії; розробка системи вибору параметрів РЧА в залежності від термодинамічних властивостей ділянок серця. (Закордонне фахове видання, PIIIC)*

7. Патент на винахід № 108786. Україна, МПК (2015.01) А61В 5/0452 (2006.01) А61В 8/00. Спосіб визначення часу сегментарної електромеханічної затримки в міокарді шлуночків серця / Г.В. Книшов, Є.О. Білінський, В.В. Лазоришинець, М.М. Сичик та ін.; заявн.: ДУ «НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України». – № u201310954; заявл. 13.09.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1/2014 – 13с.

8. Патент на корисну модель № 86978. Україна, МПК А61В 5/0452 (2006.01). Спосіб визначення часу сегментарної електромеханічної затримки в міокарді шлуночків серця / Г.В. Книшов, Є.О. Білінський, В.В. Лазоришинець, М.М. Сичик та ін.; заявн.: ДУ «НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України». – № u201310954; заявл. 13.09.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1/2014 – 13 с. *Особистий внесок в роботах [7, 8] – обґрунтування практичної значимості розробки; апробація методу в клінічній практиці; аналіз даних впровадження; оформлення ілюстративного матеріалу.*

9. Патент на корисну модель № 75705. Україна, МПК А61В 5/0402 (2006.01). Спосіб векторкардіографічної діагностики відсутності нав'язування ритму стимулюючим електродом при застосуванні кардіоресинхронізаційної стимуляції / Г.В. Книшов, Є.О. Білінський, В.В. Лазоришинець, Р.М. Вітовський, М.М. Сичик та ін.; заявн.: ДУ «НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України». – № u201206608; заявл. 30.05.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. – 9 с.

10. Патент на корисну модель № 75704. Україна, МПК А61В 5/0402 (2006.01). Спосіб векторкардіографічної діагностики просторового зміщення стимулюючих електродів при лікуванні кардіостимуляцією / Г.В. Книшов, Є.О. Білінський, В.В. Лазоришинець, Р.М. Вітовський, М.М. Сичик та ін.; заявн.: ДУ «НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України». – № u201206607; заявл. 30.05.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. – 8 с. *Особистий внесок в роботах [8, 9] – обґрунтування практичної значимості; апробація методу в клінічній практиці; оформлення ілюстративного матеріалу.*

11. Патент на корисну модель № 114436. Україна, МПК А61В 18/12 (2006.01), А61В 18/14 (2006.01). Спосіб біполярної транскатетерної радіочастотної абляції

аритмогенних зон серця / Ю.І. Карпенко, Б.Б. Кравчук, Р.В. Романенко, М.М. Сичик, В.Б. Максименко; заявл.: ДУ «НІССХ ім. М.М. Амосова НАМН України», КУ «Одеська обласна клінічна лікарня». – № u201609146; заявл. 31.08.2016; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. – 6 с. *Особистий внесок – обґрунтування практичної значимості розробки; побудова принципової схеми біполярної катетерної РЧА; розробка рекомендацій з застосування; оцінка результатів впровадження; оформлення патенту; підготовка до подання.*

12. Корекція електричного збудження та механіки шлуночкової систоли оптимальним розташуванням стимулюючого електроду у хворих з кардіоміопатіями. / Б.Б. Кравчук, О.О. Пунщикова, М.М. Сичик // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України «Серцево-Судинна Хірургія». – 2011. – №19. – С. 127-131. *Особистий внесок – виконання статистичної обробки даних механіки шлуночкової систоли за результатами ехокардіографії та електричного збудження по ендограмі.*

13. Поверхностное картирование сердца с помощью многоканальной системы ЭКГ для определения локализации аритмии. / Е. Пунщикова, П. Кнеппо, В. Максименко, М. Тишлер, М. Сычик // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України «Серцево-Судинна Хірургія». – 2012. – Випуск 20. – С. 414-418. *Особистий внесок – виконання та оформлення літературного огляду, що стосується методології, приладу та програмного забезпечення; проведення клінічних досліджень.*

14. Дослідження режимів радіочастотного впливу на тканини міокарда з метою підвищення ефективності та безпеки абляції провідних шляхів серця. / М.М. Сичик, О.О. Пунщикова, В.Б. Максименко, Б.В. Бацак, Д.С. Щолок // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України «Серцево-Судинна Хірургія». – 2012. – Випуск 20. – С.470-476. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень на серці тварин; обробка результатів досліджень та обґрунтування ефективних і безпечних параметрів потужності, температури, тривалості впливу для абляції аритмогенних зон серця.*

15. Оптимізація технології електроабляції тканин міокарда в умовах операції Maze на відкритому серці. / М.М. Сичик, В.В. Попов, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук, Б.В. Бацак // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України «Серцево-Судинна Хірургія». – 2013. – Випуск 21. – С. 471–474. *Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень; обробка результатів та обґрунтування оптимальних параметрів впливу для клінічного впровадження оригінального монополярного електроду.*

16. Аналіз та оцінка впливу морфо-функціональних особливостей анатомічних зон субстратів аритмії на процедуру їх катетерної радіочастотної абляції. / М.М. Сичик, Б.Б. Кравчук, В.Б. Максименко // Таврический медико-биологический весник. – 2013. – Том 16, № 3, ч.1 (63). – Ст. 145–147. *Особистий внесок – створення клінічної бази даних параметрів РЧА; оцінка залежності відгуку міокарда на дію РЧ струму від морфо-функціональних характеристик тканини серця різних анатомічних ділянок. (РІНЦ)*

17. Підвищення ефективності ресинхронізаційної терапії шляхом радіочастотної абляції шлуночкової екстрасистоїї. / Б.Б. Кравчук, Р.Г. Малярчук, О.З. Парацій, М.М. Сичик // Серце і судини. Український науково-практичний журнал. – 2014. – № 4(48). – С. 67-72. *Особистий внесок – виконання електрофізіологічного дослідження тахіаритмії та вибір параметрів РЧА; обробка даних та оцінка ефективності. (РІНЦ)*

18. Дослідження роздільного впливу потужності та температури електродів на розміри зони деструкції при радіочастотній катетерній абляції в експерименті. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук та ін. // Технічні вісті. Науковий часопис. – 2014. – № 1(39), 2(40). – С.45-48. *Особистий внесок в роботах – проведення*

експериментальних досліджень; розробка практичних рекомендацій з вибору оптимальних технічних засобів та параметрів катетерної РЧА для різних ділянок серця. (Index Copernicus)

19. Dependence of destruction from the characteristics of radiofrequency impact and length of the electrode. / М.М. Sychyk, V.B. Maksymenko, E.O. Perepeka, B.B. Kravchuk, B.V. Batsak // 2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Україна, Київ, 2015. – Р. 314-316. *Особистий внесок – виконання експериментальних досліджень для оцінки розмірів РЧ деструкції міокарда від технічних характеристик електродів; обробка результатів та клінічне обґрунтування параметрів РЧА.*

20. Оптимизация технологии электроабляции тканей миокарда в условиях операции Maze на открытом сердце. / М.М. Сычик, Б.Б. Кравчук, В.Б. Максименко, В.В. Попов, Б.В. Бацак и др. // Proceedings of International Scientific-Practical Conference «Virtual Instruments in Biomedicine – 2013». – Klaipeda, Lithuania, 2013. – Р. 271–275. *Особистий внесок – розробка електроду; проведення експериментальних досліджень; обґрунтування ефективних та безпечних параметрів РЧА на відкритому серці.*

21. Оценка термодинамических свойств морфо-функциональных зон субстратов аритмий. / М.М. Сычик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук и др. // Proceedings of International Scientific-Practical Conference «Virtual Instruments in Biomedicine – 2014». – Klaipeda, Lithuania, 2014. – Р. 170–173. *Особистий внесок – створення клінічної бази даних ефективних та безпечних параметрів катетерної РЧА; визначення залежності термодинамічних властивостей різних ділянок серця при РЧА від їх морфо-функціональних характеристик.*

22. Оптимальні режими електроабляції провідних шляхів серця в експерименті. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко // Матеріали III Міжнародної конференції «Біомедична інженерія і технологія». – Київ, 2012. – С.172-173.

23. Впровадження в клінічну практику монополярних електродів для операції Maze. / М.М. Сичик, В.В. Попов, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук // Український науково-медичний молодіжний журнал: матеріали конференції. – Київ, 2013. – Випуск № 4 (74). – С. 17.

24. Оптимізація технології електроабляції тканин міокарда в умовах операції Maze на відкритому серці. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук, В.В. Попов, Б.В. Бацак // IV Міжнародна конференція «Біомедична інженерія і технологія. Актуальні проблеми біомедичної інженерії в охороні здоров'я». – Київ, 2013. – С. 95. *Особистий внесок в роботах [22, 23, 24] – проведення експериментальних досліджень РЧА на серці тварин; обробка даних та обґрунтування параметрів РЧА для операцій на відкритому серці.*

25. Ефективні та безпечні параметри радіочастотної катетерної абляції при лікуванні тахіаритмій. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук, В.Л. Леончук, К.О. Юр'єва // Матеріали всеукраїнської конференції «Актуальні проблеми та перспективи біомедичної інженерії». – Київ, 2014. – С. 120-121.

26. Клінічне і експериментальне обґрунтування вибору параметрів радіочастотної абляції для різних ділянок міокарда. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Б.Б. Кравчук, Б.В. Бацак та ін. // X международная научно-практическая конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы». Сборник тезисов докладов. – Киев, 2015. – С. 27-28. *Особистий внесок в роботах [25, 26] – розробка практичних рекомендацій з вибору технічних засобів та параметрів РЧА.*

27. Моделювання фізичних процесів в біологічних тканинах та електродах електрохірургічних інструментів при проходженні через них електричного струму. / М.М. Сичик, Д.В. Власенко, В.А. Бевз та ін. // IX международная научно-практическая

конференція «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы». Сборник тезисов докладов. – Киев, 2014. – С. 56-57.

28. Термодинамічна модель радіочастотної абляції тканин міокарда. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Ю.П. Стасюк та ін. // Науково-практична конференція «Актуальні питання біомедичної та реабілітаційної інженерії». – Київ, 2015. – С. 94.

29. Модель радіочастотного термічного впливу на тканини міокарда. / М.М. Сичик, Ю.П. Стасюк // Вітчизняні інженерні розробки для охорони здоров'я: матеріали науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України. – Київ, 2016. – С. 81. *Особистий внесок в роботах [27, 28, 29] – розробка концепції та вхідних даних для математичного моделювання; розрахунок термоелектричних характеристик міокарда серця людини; розробка нового інформаційного забезпечення процедури катетерної РЧА.*

30. Выбор системы электро-анатомического картирования сердца в зависимости от клинических задач и технических условий. / В.В. Ковшевацкая, М.М. Сычик // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: матеріали конференції. – Київ, 2016 р. – С. 175-177.

31. Роль навігаційних систем електро-анатомічного картування серця при радіочастотній абляції тахіаритмій. / В.В. Ковшевацкая, М.М. Сычик // Вітчизняні інженерні розробки для охорони здоров'я: матеріали науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України. – Київ, 2016 р. – С. 54-55.

32. Візуалізація анатомії серця та електрофізіологічне планування радіочастотної абляції аритмогенних зон за допомогою програми Vitrea. / В.В. Філімонова, М.М. Сичик // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: матеріали конференції. – Київ, 2016 р. – С. 196-198.

33. Застосування програмного забезпечення Vitrea для електрофізіологічного планування радіочастотної абляції тахікардії. / В.В. Філімонова, М.М. Сичик // Вітчизняні інженерні розробки для охорони здоров'я: матеріали науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України. – Київ, 2016 р. – С. 92-93. *Особистий внесок в роботах [30, 31, 32, 33] – проведення клінічних процедур електрофізіологічного дослідження та електро-анатомічного картування тахіаритмій; узагальнення досвіду роботи.*

34. Спосіб візуалізації радіочастотної термічної абляції різних ділянок серця в 3D просторі середовища Comsol Multiphysics. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Л.Д. Тарасова, Б.В. Бацак, Ю.П. Стасюк // Інформаційний бюлетень НАМН України. Наукові пропозиції установ НАМН України, які рекомендовано до впровадження у практику охорони здоров'я. – 2016. – № 41. – С. 81.

35. Алгоритм вибору безпечних та ефективних параметрів радіочастотної абляції / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Л.Д. Тарасова, Б.Б. Кравчук // Інформаційний бюлетень НАМН України. Наукові пропозиції установ НАМН України, які рекомендовано до впровадження у практику охорони здоров'я. – 2016. – № 41. – С. 82.

36. Метод лікування фібриляції передсердь із застосуванням монополярних електродів для електроабляції тканин міокарда навколо легеневих вен при проведенні операції Maze. / М.М. Сичик, В.Б. Максименко, Л.Д. Тарасова, В.В. Попов, Б.Б. Кравчук // Інформаційний бюлетень НАМН України. Наукові пропозиції установ НАМН України, які рекомендовано до впровадження у практику охорони здоров'я. – 2016. – № 41. – С. 82-83. *Особистий внесок в роботах [34, 35, 36] – апробація нововведень в клінічній практиці; оцінка ефективності вилучення тахікардії, обробка результатів впровадження.*

АНОТАЦІЯ

Сичик М.М. Катетерна радіочастотна абляція аритмогенних зон серця підвищеної ефективності та безпечності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

В дисертаційній роботі викладені результати досліджень щодо підвищення ефективності і безпечності катетерної радіочастотної абляції (РЧА) аритмогенних зон серця шляхом удосконалення методу та вибору режимів електричного впливу з урахуванням термоелектричних та морфометричних характеристик ділянок серця. Розроблено адаптивну методику розрахунку термоелектричних характеристик міокарда, на основі аналізу індивідуальних електро- та теплофізичних параметрів відгуку тканини серця на вплив радіочастотного струму, шляхом розв'язання зворотної задачі термодинаміки та реалізації її при математичному моделюванні графічного поширення деструктивних температурних полів у тканині міокарда. Розроблено тривимірну модель катетерної РЧА і впроваджено в хірургічну практику як спосіб візуалізації глибини деструкції міокарда для вибору параметрів електричного впливу, прогнозування надійності усунення джерела аритмії та запобігання перфоративних ускладнень термічного генезу. Запропоновано алгоритм вибору параметрів РЧА для різних анатомічних зон серця, який дозволяє виконувати ефективну та безпечну трансмуральну деструкцію тканини міокарда. Розроблено методику біполярної катетерної РЧА патологічних джерел збудження, розташованих у глибині потовщених м'язових масивів гіпертрофованої стінки серця, шляхом застосування двох активних електродів, що забезпечують збільшення вдвічі глибини деструкції, яка не досягалася класичним методом монополярної абляції.

Ключові слова: аритмогенна тканина серця, біполярна катетерна радіочастотна абляція, глибина деструкції, ефективність та безпечність, математична модель поширення температурних полів, термоелектричні характеристики міокарда.

АННОТАЦИЯ

Сычик М.М. Катетерная радиочастотная абляция аритмогенных зон сердца повышенной эффективности и безопасности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 – биологические и медицинские приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по повышению эффективности и безопасности катетерной радиочастотной абляции (РЧА) аритмогенных зон сердца путем совершенствования метода и выбора режимов электрического воздействия с учетом термоэлектрических и морфометрических характеристик участков сердца. Разработано адаптивную методику расчета термоэлектрических характеристик миокарда на основе анализа индивидуальных электро- и теплофизических параметров отклика ткани сердца на воздействие радиочастотного тока, путем решения обратной задачи термодинамики и реализации

ее при математическом моделировании графического распространения деструктивных температурных полей в ткани миокарда. Разработано трехмерную модель катетерной РЧА и внедрено в хирургическую практику в качестве способа визуализации глубины деструкции миокарда для выбора параметров электрического воздействия, прогнозирования надежности устранения источника аритмии и предотвращения перфоративных осложнений термического генеза. Предложен алгоритм выбора параметров РЧА для различных анатомических зон сердца, который позволяет выполнять эффективную и безопасную трансмуральную деструкцию ткани миокарда. Разработано методику биполярной катетерной РЧА патологических источников возбуждения, расположенных в глубине утолщенных мышечных массивов гипертрофированной стенки сердца, путем применением двух активных электродов, обеспечивающих увеличение вдвое глубины деструкции, которая не достигалась классическим методом монополярной абляции.

Ключевые слова: аритмогенная ткань сердца, биполярная катетерная радиочастотная абляция, глубина деструкции, эффективность и безопасность, математическая модель распространение температурных полей, термоэлектрические свойства миокарда.

ABSTRACT

Sychyk M. M. Catheter radiofrequency ablation of cardiac arrhythmogenic zones of improved efficiency and safety. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences (Ph.D.) on specialty 05.11.17 – biological and medical devices and systems. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to solving the problem of improving of the efficiency and safety of radiofrequency ablation (RFA) of cardiac arrhythmogenic zones by perfection of the method of catheter RFA, development of mathematical model for analyzing of temperature fields and assessing of the depth of destruction, and improvement of selection of optimal electrical exposure modes based on thermoelectric and morphometric characteristics of heart areas by the use of different technical tools.

The thesis presents the interrelated results of research of radiofrequency thermal destruction of animals myocardium in experiments, analysis of parameters of electrical current and thermoelectric characteristics of human miocardium during clinical procedures of catheter radiofrequency ablation of cardiac arrhythmogenic zones and mathematical modeling of biophysical mechanisms of highfrequency electrical exposure on the biological tissue. In the process of doing the research the latest specialized high-tech medical equipment for objective diagnosis of arrhythmogenic zones in the heart, standardized criteria control the efficiency of extraction of sources of arrhythmia, certified and metrologically entrusted technical tools of RFA were used.

For the first time, regularities of the thermal effect of the radiofrequency current of different power ranges on the areas of the myocardium were established, which allowed to determine the thermal resistance of the myocardium tissue, the degree of heat loss in the around the electrode zone and the parameters of heat transfer, and to scientifically substantiate the prognostic criteria of the efficiency and safety of ablation of arrhythmogenic sources in different anatomical zones of the heart.

Adaptive method of calculating the thermoelectric characteristics of myocardium (specific electrical conductivity, specific heat capacity, thermal conductivity coefficient, heat transfer coefficient, degree of capillary perfusion, linear velocity of blood in the electrode space) was developed based on analysis of individual electrical and thermal parameters of response of heart tissue to the exposure of radiofrequency current by the solution of inverse problem of thermodynamics. It allows to calculate the specified values for each patient's myocardium during the procedure of the catheter RFA in the operating room. For the first time there were determined the thermoelectric characteristics of five anatomical heart areas, in which standard RFA is performed.

The obtained characteristics were put into the development of mathematical model of catheter radiofrequency ablation to reproduce the three-dimensional graphic image of the distribution of the thermal field in the thickness of the myocardium in different areas of the heart with regard to their morphometric properties. The model is implemented in clinical practice as a tool for the visualization of the depth of myocardium destruction and predicting effective eliminate the source of arrhythmia and perforating complications based on thermogenesis. The accuracy of the model has been tested and confirmed by an independent determination of the RF destruction of myocardial tissue in images obtained by magnetic resonance imaging. Absolute errors of the model were: for the depth of destruction $\pm 0,8$ mm, for the electrode temperature $\pm 1,22$ °C.

Method of catheter RFA of cardiac arrhythmogenic zones was obtained further development by the due to the use of electrical effects from two catheter electrodes. The effective technique of catheter bipolar RFA of pathological sources in abnormally thickened wall of the heart was developed. By the application of an electric exposure from two electrodes located in the heart during operation on different sides of myocardial tissue opposite each other, new method provides a doubling of the depth of destruction of a thick myocardial wall at the same power, safe values of temperature effects and shorter duration of exposure, that are not achieved with standard monopolar ablation. The clinical efficiency of the introduced method was confirmed by the complete elimination of the tachycardia in 25 patients out of 27 (93 %). The bipolar catheter RFA initiated a new technique for performing endo-epicardial ablation and reduction of intraventricular septum in patients with cardiomyopathies.

Based on the simulation results of thermoelectric processes and improving the method of RFA, practical recommendations and algorithms of choosing parameters of radiofrequency ablation (sizes of electrodes, ranges of output power, monitored electrode temperature which are controlled, time of application) for different anatomical areas of the heart were developed. They allow to perform effective and safe transmural destruction of arrhythmogenic tissue of the myocardium. They were introduced in clinical practice of electrophysiology departments of six cardiac surgery centers of Ukraine, in which of 1623 procedures catheter ablation confirmed the efficiency of extraction of arrhythmias in 1615 patients (99,5 %) without complications.

Key words: arrhythmogenic tissue of the heart, bipolar catheter radiofrequency ablation, depth of destruction, efficiency and safety, mathematical model of temperature fields distribution, thermoelectric properties of the myocardium.