

Марина СИЧИК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

Мирослав ПЕТКАНИЧ<sup>2</sup>, лікар-хірург

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна,  
e-mail: sychukmm@gmail.com

<sup>2</sup> Державна установа «Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова НАМН України», м. Київ, Україна

## БІОФІЗИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ КАТЕТЕРНОЇ РАДІОЧАСТОТНОЇ АБЛЯЦІЇ З ВИСОКОЮ ПОТУЖНІСТЮ ТА КОРОТКОЮ ТРИВАЛІСТЮ ВПЛИВУ ДЛЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЛЕГЕНЕВИХ ВЕН У ПАЦІЄНТІВ ІЗ ДЕФЕКТОМ МІЖПЕРЕДСЕРДНОЇ ПЕРЕГОРОДКИ

**Анотація.** Робота присвячена вирішенню актуальної проблеми виконання катетерної радіочастотної абляції, ізоляції тіла лівого передсердя від легеневих вен, в яких локалізуються ділянки з аномальною активністю (установлена основна причина фібриляції передсердь) для пацієнтів з дефектом міжпередсердної перегородки. Запропоновано для пацієнтів із комбінацією фібриляції передсердь і дефекту міжпередсердної перегородки проводити радіочастотну абляцію із застосуванням нової методики абляції з високою потужністю та короткою тривалістю впливу. Виконано математичне моделювання власних клінічних даних електро-термодинамічного впливу радіочастотної абляції на міокард у програмі автоматизованого моделювання біофізичних процесів Comsol Multiphysics. Проведено аналіз та біофізичне обґрунтування параметрів радіочастотного впливу, високої потужності та короткої тривалості, для ефективної та безпечної ізоляції легеневих вен від тіла передсердя. Показано що дана методика забезпечує кращу стабільність та точність позиціонування катетера за короткий час впливу, що особливо актуально для пацієнтів з дефектом міжпередсердної перегородки, ізоляції легеневих вен по складній геометрії та без опори для електрода при дефекті.

**Ключові слова:** катетерна радіочастотна абляція; фібриляція передсердь; дефект міжпередсердної перегородки; безпечність і ефективність лікування; радіочастотна абляція високою потужністю та короткою тривалістю впливу.

### Актуальність дослідження

Згідно з даними Європейської Асоціації аритмологів (EHRA), фібриляція передсердь (ФП) стала найпоширенішою серед аритмій серцево-судинних захворювань у XXI столітті. Збільшення частоти виявлення цієї хвороби пов'язане з розвитком методик ефективного лікування, таких як катетерна радіочастотна абляція (РЧА) та ізоляція передсердя від легеневих вен.

Основна мета РЧА полягає у відновленні провідності через блокувальні лінії, що ізолюють легеневі вени від передсердя.

Однак, основною проблемою при проведенні катетерної РЧА є відновлення провідності через блокувальні лінії, особливо в складних випадках, таких як пацієнти з дефектом міжпередсердної перегородки. Це пов'язано з труднощами стабілізації катетера та інтраопераційною оцінкою ефективності абляції тканини міокарда в реальному часі.

Пропонується застосовувати нову методику абляції з використанням високої потужності та короткого тривалого впливу (ВПКТ) для пацієнтів з комбінацією фібриляції передсердь і дефектом міжпередсердної перегородки. Це дозволяє досягнути трансмуральності абляції за короткий час, що сприяє більш точному і стабільному утриманню електрода під час ізоляції легеневих вен при складних геометричних умовах та в умовах дефекту.

### Мета дослідження

Проаналізувати та обґрунтувати біофізично ефективність нового підходу до катетерної радіочастотної абляції, який передбачає використання високої потужності та короткої тривалості впливу, на основі математичного моделювання, використовуючи власні клінічні дані щодо електро-термодинамічного впливу радіочастотної абляції на серцевий м'яз.

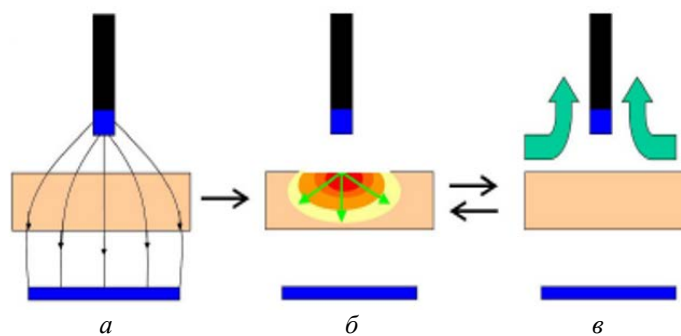
### Основні матеріали досліджень

Новий метод абляції з використанням високопотужної та короткочасної радіочастотної енергії (ВПКТ) був досліджений спільно електрофізіологами Національного інституту серцево-судинної

хірургії імені М.М. Амосова НАМН України та біомедичними інженерами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Досвід електрофізіологів та матеріали біомедичних інженерів сприяли біофізичному обґрунтуванню методики РЧА з використанням ВПКТ.

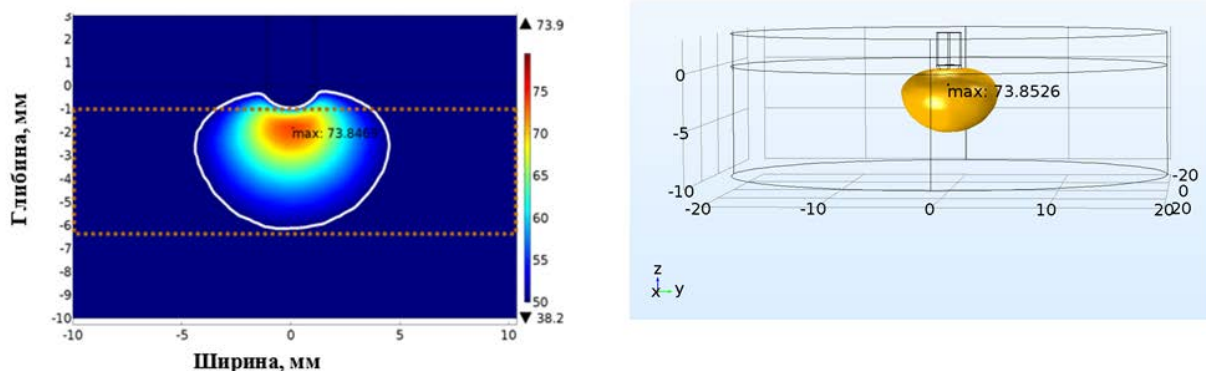
Біофізичне обґрунтування виконано шляхом математичного моделювання електро-термодинамічного впливу РЧА на міокард та аналізу власних клінічних даних у програмі автоматизованого моделювання біофізичних процесів Comsol Multiphysics. Математичне моделювання надає можливість візуалізувати клінічні дані та проводити дослідження нових протоколів абляції, легко змінюючи параметри потужності та тривалості впливу.

Алгоритм моделювання передбачає одночасне врахування трьох біофізичних складових впливу радіочастотного струму на біологічну тканину. Це включає проходження змінного електричного струму з частотою 500 кГц між активним та пасивним електродами, яке призводить до резистивного нагрівання тканини (рис. 1, *a*), провідного нагрівання міокарда за рахунок теплопровідності тканини (рис. 1, *б*), та охолодження електрода й тканини міокарда за рахунок конвекції потоку циркулюючої крові (рис. 1, *в*).



**Рис. 1.** Математичне моделювання електро-термодинамічних процесів при дії радіочастотної енергії на міокард: *a* – резистивне нагрівання електричним струмом; *б* – провідне нагрівання за рахунок теплообміну в біологічній тканині; *в* – охолодження електрода й тканини міокарда потоком циркулюючої крові за рахунок конвекції

Оцінку результатів моделювання виконували в 2D-перерізі, що дозволяє відображати розподіл температурних полів у міокарді й аналізувати глибину та ширину деструкції на різних рівнях (рис. 2).

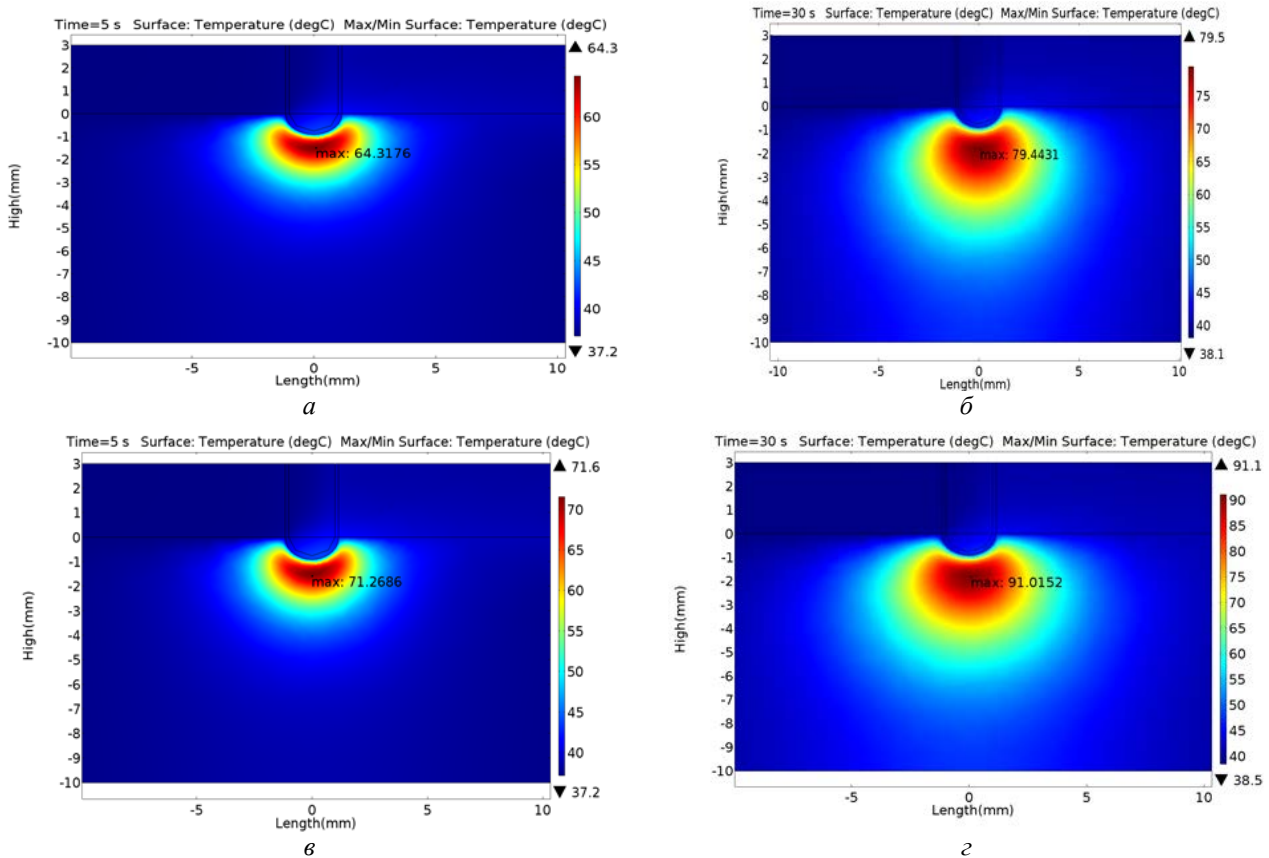


**Рис. 2.** Візуалізація поширення температурних полів у тканині міокарда й аналіз глибини та ширини деструкції при РЧА

Клінічні дослідження проводилися у Національному інституті серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова НАМН України. Для забезпечення об'єктивності отриманих та використаних у дослідженні клінічних даних використовувалося спеціалізоване високотехнологічне медичне обладнання.

### Результати

Математичне моделювання розподілу температурних полів за різних параметрів радіочастотного впливу надало можливість провести докладне біофізичне обґрунтування ефективності методики РЧА з високою потужністю та короткою тривалістю впливу (рис. 3).



**Рис. 3.** Температурні діаграми поширення температурних полів за різних параметрів радіочастотного впливу: а) потужність – 30 Вт, час впливу – 5 с, температура резистивного нагріву – 64 °С, глибина деструкції – близько 3 мм; б) потужність – 30 Вт, час впливу – 30 с, температура резистивного нагріву – 79 °С, глибина деструкції – близько 5 мм; в) потужність – 70 Вт, час впливу – 7 с, температура резистивного нагріву – 71 °С, глибина деструкції – близько 5 мм; г) потужність – 70 Вт, час впливу – 30 с, температура резистивного нагріву – 91 °С, глибина деструкції – близько 10 мм

Наприклад, застосування РЧА з потужністю 30 Вт та тривалістю впливу 5 с призвело до температури резистивного нагріву 64 °С та деструкції на глибину близько 3 мм. Підвищення тривалості впливу до 39 с при такій же потужності викликало температуру резистивного нагріву 79 °С та деструкцію на глибину близько 5 мм. Також, РЧА з потужністю 70 Вт та часом впливу 7 с показав подібні результати з попереднім варіантом, де температура резистивного нагріву становила 71 °С, а глибина деструкції була близько 5 мм, що не відрізнялося від попереднього варіанта з меншою потужністю й тривалішим часом впливу. Ці результати підтверджують можливість використання РЧА з більшою потужністю та коротшим часом впливу з однаковою ефективністю та безпечністю.

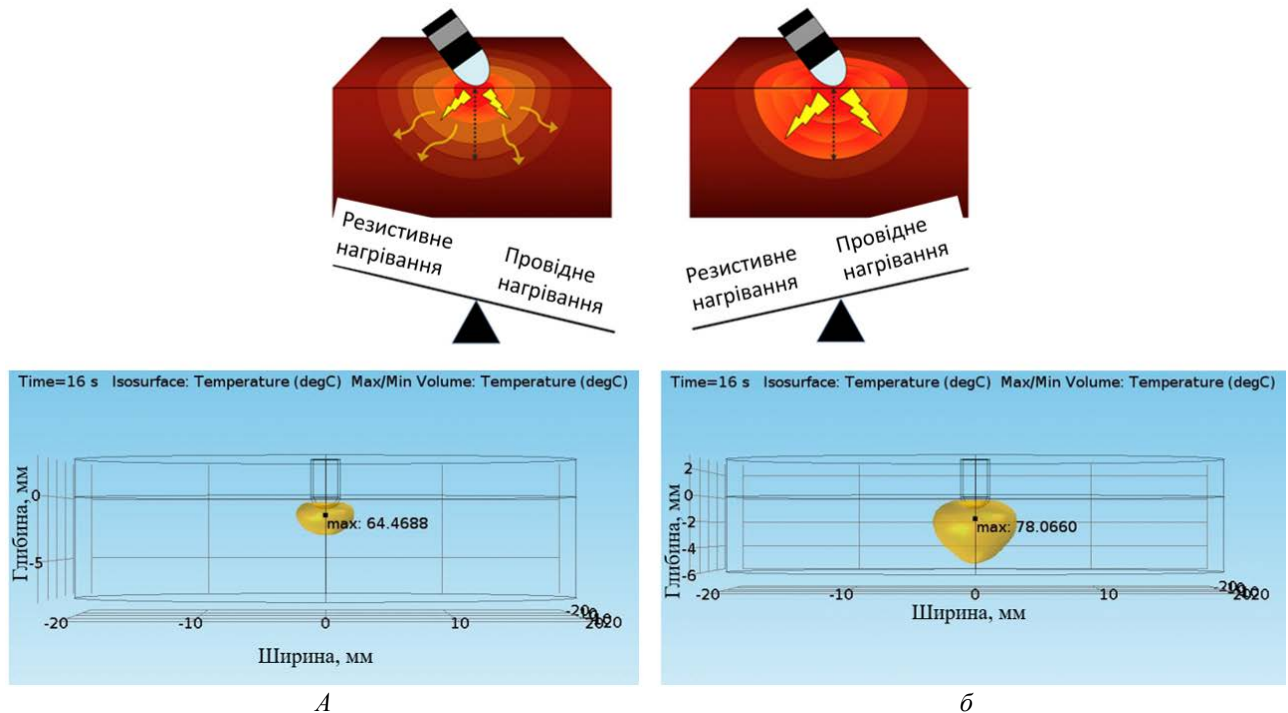
При моделюванні виявлено, що використання потужності 70 Вт та тривалості впливу 30 с призвело до температури резистивного нагріву 91 °С та глибини деструкції близько 10 мм. Така значна температура може призвести до потенційно небезпечних ускладнень, таких як мікрровибухи та обуглення. Тому рекомендується припинити застосування РЧА з тривалістю впливу 5...7 с при потужності 70 Вт, щоб уникнути цих ризиків.

Одним з додаткових заходів для підвищення безпеки процедури є збільшення охолодження навколоелектродного середовища. Це дозволить зменшити ризик закипання крові від високої температури та утворення тромбів під час застосування РЧА в лівому передсерді.

Можливість отримання трансмуральної РЧА за меншої тривалості впливу є актуальною у випадках ізоляції легеневих вен при складній геометрії гирла чи гребня переходу передсердя у вену. Це обумовлено складнощами стабілізації катетера в зоні РЧА, особливо у пацієнтів із дефектом міжпередсердної перегородки, та необхідністю інтраопераційної оцінки показників ефективності абляції тканини міокарда в реальному часі. Скорочення тривалості впливу значно підвищує точність позиціонування катетера під час абляції, що сприяє загальній ефективності операції. Це особливо важливо для пацієнтів, яким виконують закриття дефекту оклюдером, оскільки вони потребують

максимальної ефективності РЧА через складнощі повторного проведення процедури у разі рецидиву аритмії.

Отже, спостерігалася еволюція у клінічному застосуванні РЧА (рис. 4): спочатку вимагалася м'яка абляція з низькою потужністю та тривалим впливом, що базувалася на принципі теплопровідності. Цей підхід використовувався з самого початку впровадження РЧА. Однією з особливостей радіочастотного струму була його здатність проникати на певну глибину в біологічні тканини, що призводило до резистивного нагріву, а наступна деструкція міокарда відбувалася за рахунок теплопровідності.



**Рис. 4.** Біофізика та еволюція РЧА: *а* – стандартна абляція; *б* – абляція з високою потужністю та короткою тривалістю впливу

Клінічний досвід застосування РЧА протягом понад 30 років дозволив біофізикам висунути новий спосіб використання радіочастотного струму, заснований на резистивному нагріві міокарда. Цей підхід можна застосовувати з аналогічною ефективністю та безпечністю при короткому радіочастотному впливі із збільшеною потужністю струму.

Фізичні закони вимагають розробки технологічних рішень:

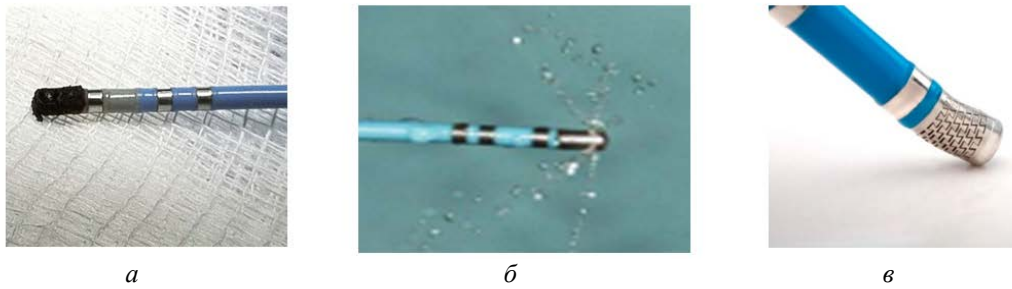
1. Використання великої потужності вимагає додаткового відведення тепла з області абляції, щоб уникнути небезпечних ускладнень, таких як закипання крові та утворення тромбів. Це привело до розробки катетера з більшою кількістю отворів для подачі охолоджуючої рідини в зону абляції.

2. Короткий час експозиції та аплікації вимагає аналізу та оцінки стабільності катетера в момент подачі потужності до стінки серця. Було розроблено алгоритм маркування точок абляції на навігаційній карті, що відображається в кольоровому спектрі, залежно від часу та позиції катетера, щоб визначити оптимальний час для ефективної абляції.

Для впровадження методики радіочастотної абляції з високою потужністю і короткою тривалістю використовується таке електрофізіологічне обладнання:

1. Катетер абляції FlexAbility™ Sensor Enabled™ (Abbott, США) з гнучким наконечником електрода та збільшеною площею зрошення. Цей катетер забезпечує ефективну, надійну та безпечну радіочастотну абляцію з іригацією, щоб уникнути проблем з закипанням крові та тромбоутворенням в місці абляції з високою потужністю (рис. 5). Він був розроблений у 2017 році.

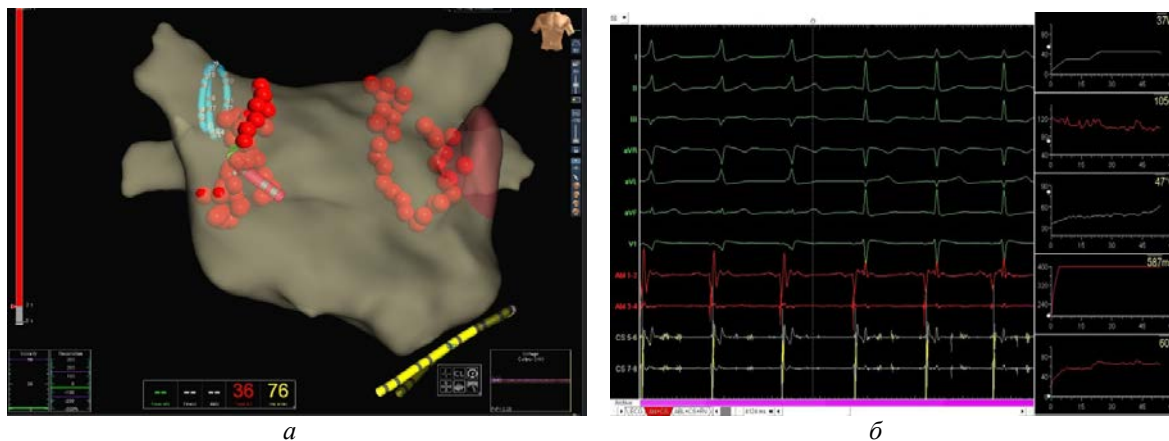
2. Навігаційна система електро-анатомічного картування EnSite Precision™ (Abbott, США), яка дозволяє автоматизовано маркувати точки радіочастотної абляції в режимі реального часу різними кольорами, залежно від тривалості впливу, і швидко відзначати точки аплікації для абляції тривалістю 5...7 секунд (рис. 6). Ця система була розроблена у 2016 році.



**Рис. 5.** Додаткове тепловідведення із зони абляції для зменшення небезпечних наслідків закипання крові та тромбоутворення: а – вигляд закипання крові та тромбоутворення; б – абляційний катетер зі стандартним охолодженням; в – абляційний катетер FlexAbility™ Sensor Enabled™ (Abbott, США) із гнучким наконечником електрода та збільшеною площею зрошення

Необхідно систематично в режимі неперервного моніторингу відслідковувати та правильно аналізувати всі показники, які фіксуються сучасними приладами під час процедури абляції, такі як прикладена потужність, тривалість, імпеданс і температура. Вони дозволяють оцінити ефективність процедури та ризик перегріву тканин.

На рис. 6 зображена електро-анатомічна карта лівого передсердя, створена у програмному середовищі навігаційної системи EnSite Precision (Abbott, США). Крім того, в реальному часі навігаційна система відображає положення катетерів. На побудованій карті точки абляції позначені колом-міткою різного діаметра. Точки абляції відображаються суцільною лінією, що електрично ізолює вени від передсердя, забезпечуючи переривання проходження патологічного імпульсу між веною та передсердям.



**Рис. 6.** Електро-анатомічна карта лівого передсердя пацієнта з відображенням точок РЧА та графіки автоматичної фіксації параметрів РЧА (потужність, температура, імпеданс, тривалість абляції)

Знання біофізичних принципів та енергії, що передається до тканини, дозволяє проаналізувати ситуацію, встановити безпечні параметри, передбачити можливі ускладнення від занадто тривалих або занадто інтенсивних впливів. Ці знання є надзвичайно важливими для забезпечення безпеки процедур.

Важливо зазначити, що у методики РЧА з високою потужністю та короткою тривалістю впливу (ВПКТ) є обмежене безпечне вікно. Тому жорстко визначені параметри абляції та використання автоматизованих систем зворотного зв'язку для контролю температури та регулювання потужності є обов'язковими. У нашому дослідженні за допомогою катетера FlexAbility SE (Abbott, США) було доставлено 70 Вт протягом 7 с, з використанням двох нейтральних електродів, розташованих під спиною пацієнта. Завдяки іншій конструкції наконечника катетера об'єм зрошення був збільшений з 17 до 20 мл/хв порівняно зі стандартною РЧА. Час на досягнення максимальної потужності було змінено з автоматичного режиму на 2 секунди.

#### Висновки

Розроблений підхід до катетерної радіочастотної абляції з високою потужністю та короткою тривалістю впливу (ВПКТ) для ізоляції легеневих вен у пацієнтів із дефектом міжпередсердної перегородки тепер впроваджено в клінічну практику Національного інституту серцево-судинної

хірургії імені М.М. Амосова НАМН України. Цей підхід вже став стандартом для проведення катетерної РЧА при лікуванні фібриляції передсердь.

Біофізичне обґрунтування нової методики катетерної РЧА з високою потужністю та короткою тривалістю впливу, що базується на математичному моделюванні клінічних даних електро-термодинамічного впливу РЧА на міокард, дало можливість сформулювати рекомендації щодо параметрів впливу: потужність – 70 Вт, тривалість впливу – 7 с для передньої стінки лівого передсердя та 5 с для задньої стінки.

### Література

1. Waldmann V, Bessière F, Gardey K, et al. Catheter ablation of atrial tachyarrhythmias in patients with atrioventricular septal defect. *EP Europace*. 2023;25(9):275. DOI: 10.1093/europace/euad275.
2. Kamioka M, Yoshihisa A, Hijioka N, et al. The efficacy of combination of transcatheter atrial septal defects closure and radiofrequency catheter ablation for the prevention of atrial fibrillation recurrence through bi-atrial reverse modeling. *J Interv Card Electrophysiol*. 2020;59(2):365-72. DOI: 10.1007/s10840-019-00656-2.
3. Kotadia ID, Williams SE, O'Neill M. High-power, short-duration radiofrequency ablation for the treatment of AF. *Arrhythm Electrophysiol Rev*. 2019;8(4):265-72. DOI: 10.15420/aer.2019.09.
4. Sychyk MM. Катетерна радіочастотна абляція аритмогенних зон серця підвищеної ефективності та безпеки: Автoref. dys. kand. tehn. nauk.: 05.11.17 – biologichni ta medychni prylady i systemy. Kyiv; 2017. 225 p. Ukrainian.
5. Müller J, Nentwich K, Berkovitz A, et al. Efficacy and safety of high-power short duration atrial fibrillation ablation in elderly patients. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 2022;33(7):1425-34. DOI: 10.1111/jce.15504.
6. Knotts RJ, Barbhaiya CR. High-power, short-duration ablation for atrial fibrillation: Pros and cons. *Prog Cardiovasc Dis*. 2021;66:86-91. DOI: 10.1016/j.pcad.2021.06.005.