

УДК 615.84:66:615.8:614.4:614.2

БІОБЕЗПЕКА УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТЕРАПІЇ

Шалімов Володимир Володимирович¹

v.shalimov.zf41mp.fbmi25@lil.kpi.ua

Антонова-Рафі Юлія Валеріївна^{1,2}

antonova-rafi@ukr.net

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

²Інститут електрозварювання імені Є.О.Патона
Національної академії наук України,
м. Київ, Україна

Анотація Ультразвукова терапія широко використовується у клінічній практиці для лікування м'язово-скелетних розладів, хронічних ран та остеоартриту завдяки своїй доведеній ефективності, неінвазивності та здатності стимулювати регенеративні процеси в тканинах. З огляду на активне впровадження ультразвукових технологій у фізичній терапії та ризики, пов'язані з їх неналежним застосуванням, питання біобезпеки набуває особливої актуальності в контексті сучасних медичних стандартів. Мета дослідження. Аналіз основних аспектів забезпечення біобезпеки під час проведення ультразвукової терапії, розробка практичних рекомендацій для оптимізації клінічної практики та мінімізації ризиків для пацієнтів і медичного персоналу. Завдання дослідження: Оцінити критерії відбору пацієнтів для ультразвукової терапії з урахуванням протипоказань та індивідуальних фізіологічних характеристик. Визначити оптимальні параметри терапії (частоту, інтенсивність, тривалість впливу) для досягнення максимального терапевтичного ефекту без шкоди для тканин. Описати заходи безпеки для пацієнтів та операторів, включаючи правильне використання апаратури та витратних матеріалів. Підкреслити значення регулярного технічного обслуговування, калібрування ультразвукових апаратів і контролю за якістю контактних середовищ. Висновки: Безпечне застосування ультразвукової терапії потребує суворого дотримання біобезпечних протоколів на всіх етапах — від підбору пацієнтів до контролю параметрів лікування та обслуговування обладнання. Недотримання цих вимог може призвести до термічних пошкоджень тканин, механічних травм чи негативного впливу на здоров'я медичних працівників. Впровадження комплексних стандартів біобезпеки сприятиме підвищенню ефективності терапії, зниженню ризиків та поліпшенню якості медичних послуг у сфері фізичної реабілітації.

Ключові слова ультразвук, терапія, біобезпека, реабілітація, м'язово-скелетні розлади, протипоказання, параметри лікування, технічне обслуговування обладнання, захист медичного персоналу, контактні матеріали, інфекційний контроль.

I. ВСТУП

Ультразвукова терапія широко застосовується в медичній практиці для лікування різних м'язово-скелетних патологій завдяки своїй неінвазивності та ефективності. Однак, як і будь-який вид медичних втручань, вона має потенційні ризики, якщо її використання не є належним. Біобезпека в ультразвуковій терапії стосується заходів, спрямованих на забезпечення безпечного та ефективного використання ультразвуку, мінімізуючи ризик несприятливих ефектів для пацієнтів та медичного персоналу.

Проблема забезпечення біобезпеки є важливою, оскільки неправильне використання може призвести до термічних чи механічних пошкоджень тканин, інфекцій чи інших ускладнень. Це особливо актуально

з урахуванням зростаючого використання ультразвуку в різних терапевтичних застосуваннях, від фізіотерапії до більш складних процедур, таких як високоінтенсивний фокусований ультразвук (HIFU).

Попередні дослідження надали рекомендації та врахували аспекти безпеки використання ультразвуку в терапії. Наприклад, Американський інститут ультразвукової медицини (AIUM) та інші професійні організації випустили заяви щодо безпечного використання ультразвуку, підкреслюючи важливість належного навчання, технічного обслуговування обладнання та моніторингу стану пацієнта.

Проте залишається потреба в консолідації та оновленні цих рекомендацій, особливо з урахуванням нових технологій та

способів використання ультразвукової терапії.

II. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є аналіз основних аспектів забезпечення біобезпеки під час проведення ультразвукової терапії, розробка практичних рекомендацій для оптимізації клінічної практики та мінімізації ризиків для пацієнтів і медичного персоналу.

III. БІОБЕЗПЕКА УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТЕРАПІЇ

Індивідуальний підбір параметрів ультразвукової терапії є основою її безпечного та ефективного застосування в медичній практиці. Параметри, такі як частота, інтенсивність, тривалість сеансу та режим роботи, повинні бути адаптовані до діагнозу пацієнта, анатомічної локалізації патології та фізіологічних особливостей тканин. Неправильно підібрані параметри можуть призвести до термічних або механічних ушкоджень, таких як перегрів тканин чи кавітаційні пошкодження клітинних структур. Тривале або надмірне використання ультразвуку без належного контролю інтенсивності здатне спричинити утворення неконтрольованих кавітаційних бульбашок, які становлять загрозу для тканин. У цій статті детально розглядаються ці аспекти на основі наукових даних, наводяться рекомендації для безпечного використання та пояснюються механізми можливих ризиків.

Частота ультразвуку відіграє вирішальну роль у визначенні глибини проникнення хвиль у тканини. Для поверхневих уражень, наприклад тендиніту або загоєння ран, оптимальною є частота 3 МГц, яка забезпечує проникнення на глибину до 2 см. Дослідження показали, що при частоті 3 МГц температура в поверхневих тканинах підвищується швидше, ніж при 1 МГц, що робить її ідеальною для таких станів [6]. Натомість для глибших уражень, таких як артрит колінного суглоба, рекомендується частота 1 МГц, яка здатна проникати до 5 см [6]. Вибір частоти залежить від локалізації патології: поверхневі тканини потребують

вищої частоти для концентрації енергії, тоді як глибші структури — нижчої, для ширшого охоплення. Правильний вибір частоти є першим кроком до мінімізації ризиків ушкоджень [7].

Інтенсивність ультразвуку безпосередньо впливає на термічні та механічні ефекти терапії. У безперервному режимі оптимальна інтенсивність коливається в межах 0,5–1,5 Вт/см², що дозволяє досягти терапевтичного нагрівання тканин до 40–42°C без їхнього перегріву [6]. Однак для тканин із низьким кровопостачанням, таких як сухожилля, інтенсивність слід знижувати до 0,5–1,0 Вт/см², оскільки "надмірна інтенсивність може призвести до локального перегріву, особливо в тканинах із низькою теплопровідністю" [7]. У разі імпульсного режиму безпечна межа становить 0,3–0,5 Вт/см², що знижує ризик термічних ушкоджень і робить його кращим для тканин із обмеженим кровообігом [10]. Імпульсний режим знижує ризик термічних ушкоджень, що робить його кращим для тканин із низьким кровопостачанням [8]. Таким чином, інтенсивність має бути ретельно підібрана залежно від типу тканини та мети терапії.

Тривалість сеансу ультразвукової терапії потребує індивідуального підходу залежно від стану та типу тканин для забезпечення безпеки й ефективності. Для більшості показань оптимальний час становить 5–10 хвилин [7]. Поверхневі ураження, наприклад тендиніт, лікуються за 5–7 хвилин [9], тоді як хронічні стани, такі як артрит, можуть вимагати до 15 хвилин із ретельним контролем температури тканин [7]. У безперервному режимі при інтенсивності 1,5 Вт/см² температура м'язів підвищується на 1°C кожні 2 хвилини [6]: за 10 хвилин вона зростає на 5°C, що є безпечним, але за 15–20 хвилин може перевищити 42–43°C, створюючи ризик термічного пошкодження, особливо для тканин із низьким кровопостачанням, таких як сухожилля, де тепло відводиться повільніше [6]. Тривале або надмірне використання ультразвуку

може спричинити перегрів, денатурацію білків, пошкодження клітин і кавітаційні травми при високих інтенсивностях [6].

Щоб уникнути цих ризиків, інтенсивність і тривалість сеансу необхідно налаштовувати належним чином. Для м'язів рекомендовано безперервний режим з інтенсивністю $1,0\text{--}1,5\text{ Вт/см}^2$ і тривалістю до 10 хвилин [7]. Для сухожиль, із меншим кровопостачанням, інтенсивність зменшують до $0,5\text{--}1,0\text{ Вт/см}^2$, а тривалість — до 5–7 хвилин [6]. Імпульсний режим із інтенсивністю $0,5\text{ Вт/см}^2$ і тривалістю до 10 хвилин ефективний для тканин із низьким кровопостачанням, оскільки дозволяє тепло розсіюватися [8]. Наприклад, для лікування тендиніту ахіллового сухожилля оптимальними є частота 3 МГц, інтенсивність $0,5\text{ Вт/см}^2$, імпульсний режим і тривалість 5 хвилин [9]. Такі параметри забезпечують терапевтичний ефект без надмірного нагрівання.

Моніторинг стану пацієнта під час процедури є ключовим для своєчасного виявлення ознак перегріву. Під час ультразвукової терапії необхідно звертати увагу на будь-які ознаки дискомфорту, що можуть свідчити про перегрів [15]. Якщо пацієнт повідомляє про біль або печіння, сеанс слід негайно припинити [15]. Для точнішого контролю температури можна використовувати інфрачервоні термометри. Температура шкіри не повинна перевищувати 40°C під час процедури [6]. Це дозволяє вчасно скоригувати інтенсивність або тривалість сеансу, щоб уникнути термічних ушкоджень. Використання контактних гелів також відіграє важливу роль, оскільки вони забезпечують рівномірну передачу ультразвукових хвиль і запобігають локальному перегріву шкіри. Гель знижує ризик опіків і покращує акустичний контакт [12].

Контактні середовища, такі як ультразвукові гелі, відіграють ключову роль у передачі ультразвукових хвиль від трансдюсера до тканин пацієнта. Повітря є неефективним провідником ультразвуку, і його присутність між трансдюсером і

шкірою призводить до відбиття до 99% ультразвукової енергії, що значно знижує терапевтичний ефект [12]. Гель усуває повітряний прошарок, забезпечуючи передачу понад 90% ультразвукової енергії в тканини [12]. Без використання гелю лише 1–2% енергії досягає цільових тканин, що робить його застосування обов'язковим для досягнення бажаного результату. Для забезпечення оптимального акустичного контакту рекомендується наносити шар гелю товщиною 2–3 мм, що дозволяє ефективно передавати ультразвук і адаптуватися до контурів поверхні тіла [15].

Окрім забезпечення передачі ультразвуку, контактні середовища допомагають запобігти перегріву шкіри, який може виникати під час процедури через тепло, що генерується трансдюсером. Гель діє як тепловий буфер, розподіляючи тепло і знижуючи ризик термічних ушкоджень. Дослідження показали, що при використанні гелю температура шкіри підвищується на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ за 5 хвилин при інтенсивності $1,5\text{ Вт/см}^2$, тоді як без гелю вона може зрости на $5\text{--}7^\circ\text{C}$ [6]. Це підтверджує захисну функцію гелю, яка є особливо важливою при високій інтенсивності або тривалому впливі. Гель забезпечує рівномірний розподіл ультразвукової енергії, запобігаючи локальному перегріву [15]. Для додаткової безпеки рекомендується періодично переміщати трансдюсер під час процедури, щоб уникнути концентрації тепла в одній зоні [15].

У деяких випадках, наприклад при лікуванні нерівних поверхонь, таких як суглоби, альтернативою гелю може бути вода. Watson (2008) зазначає, що вода є ефективним середовищем для передачі ультразвуку, але вимагає занурення ділянки тіла, що не завжди зручно [12]. Хоча вода може бути корисною в таких ситуаціях, гель залишається кращим вибором через його практичність і здатність адаптуватися до анатомічних особливостей. Сучасні ультразвукові гелі також містять зволожувальні компоненти, які запобігають висиханню шкіри під час сеансу, що

підвищує комфорт пацієнта і безпеку процедури [15]. Таким чином, контактні середовища не лише забезпечують ефективну передачу ультразвуку, але й відіграють важливу роль у захисті шкіри від перегріву.

Окрім перегріву, механічні пошкодження тканин є ще одним потенційним ризиком ультразвукової терапії, спричиненим явищем кавітації. Кавітація виникає, коли ультразвукові хвилі створюють мікроскопічні бульбашки газу, які при колапсі генерують ударні хвилі, здатні руйнувати клітинні мембрани. Кавітація є основним механізмом механічних пошкоджень при інтенсивностях понад $1,0 \text{ Вт/см}^2$ [11]. Колапс кавітаційних бульбашок створює ударні хвилі, які можуть руйнувати клітинні мембрани [14]. Наприклад, при інтенсивності $1,5 \text{ Вт/см}^2$ і частоті 1 МГц у водному середовищі утворюються бульбашки розміром до 100 мкм, які при розриві генерують тиск до 1000 атмосфер, що є достатнім для механічного пошкодження тканин [14].

Контроль рівня інтенсивності є критично важливим для запобігання утворенню неконтрольованих кавітаційних бульбашок. Поріг кавітації залежить від частоти ультразвуку: при 1 МГц він становить $0,3\text{--}0,5 \text{ Вт/см}^2$, а при 3 МГц — $1,0\text{--}1,5 \text{ Вт/см}^2$ [8]. У безперервному режимі при частоті 1 МГц інтенсивність не повинна перевищувати $1,0 \text{ Вт/см}^2$ для тканин із високим ризиком (наприклад, сухожиль) і $1,5 \text{ Вт/см}^2$ для м'язових тканин [8][10]. В імпульсному режимі безпечна межа становить $0,5 \text{ Вт/см}^2$ [10]. Для частоти 3 МГц у безперервному режимі рекомендована інтенсивність — до $1,5 \text{ Вт/см}^2$, а в імпульсному — до $1,0 \text{ Вт/см}^2$ [8][10]. Тривала експозиція при інтенсивностях, близьких до порогу кавітації, може призвести до механічних пошкоджень [3]. Наприклад, при інтенсивності $0,8 \text{ Вт/см}^2$ і частоті 1 МГц в імпульсному режимі сеанс тривалістю понад 10 хвилин може спричинити мікротравми тканин [3]. Таким чином, контроль інтенсивності та тривалості

є ключовим для уникнення кавітаційних ефектів.

Ультразвук широко застосовується для лікування підтверджених діагнозів, таких як остеоартрит, тендиніт і хронічні рани, завдяки його здатності впливати на тканини на клітинному рівні. Для остеоартриту колінного суглоба ультразвук зменшує біль і покращує рухливість суглоба. Ультразвук при інтенсивності $1,0 \text{ Вт/см}^2$ і частоті 1 МГц протягом 10 хвилин може значно знизити больові відчуття у пацієнтів з артритом [9]. Цей ефект досягається завдяки підвищенню температури тканин до $40\text{--}45^\circ\text{C}$, що покращує кровообіг і знижує в'язкість синовіальної рідини, полегшуючи рух [7]. Термічний вплив ультразвуку сприяє розслабленню м'язів і зниженню скутості суглобів [7]. У випадку тендиніту, наприклад ахіллового сухожилля, ультразвук стимулює регенерацію тканин. Ультразвук сприяє активації фібробластів, що прискорює регенерацію тканин [12], і рекомендується використовувати частоту 3 МГц з інтенсивністю $0,5 \text{ Вт/см}^2$ протягом 5–7 хвилин для оптимального ефекту [9]. Для загоєння хронічних ран, зокрема у пацієнтів із діабетом, ультразвук у імпульсному режимі з інтенсивністю $0,5 \text{ Вт/см}^2$ протягом 10 хвилин стимулює ангіогенез і прискорює епітелізацію [12]. Ультразвук є ефективним методом для лікування ран, особливо у пацієнтів з діабетом [15], оскільки він сприяє доставці кисню до уражених тканин.

Ефективність ультразвукової терапії залежить від правильного підбору параметрів. Наприклад, для артрити оптимальна частота становить 1 МГц, що дозволяє проникати вглиб тканин на 3–5 см, а інтенсивність $1,0 \text{ Вт/см}^2$ забезпечує достатній термічний ефект без перегріву [9]. Для тендиніту частота 3 МГц є кращою, оскільки вона фокусується на поверхневих тканинах (глибина проникнення 1–2 см), а низька інтенсивність $0,5 \text{ Вт/см}^2$ мінімізує ризик подразнення [9]. Для ран імпульсний режим із частотою 1 МГц і інтенсивністю $0,5 \text{ Вт/см}^2$ дозволяє уникнути надмірного нагрівання, стимулюючи клітинну

активність [12]. Ці параметри підтверджують, що ультразвук є цінним інструментом у лікуванні, якщо його застосовувати з урахуванням специфіки діагнозу та стану пацієнта.

Режим роботи ультразвуку може бути безперервний чи імпульсний і обирається залежно від терапевтичної мети та стану тканин. Безперервний режим застосовується для термічних ефектів, таких як розслаблення м'язів, тоді як імпульсний режим сприяє механічним ефектам, наприклад стимуляції регенерації тканин [8]. Для тканин із низьким кровопостачанням, таких як сухожилля, рекомендується використовувати імпульсний режим, щоб знизити ризик перегріву [8]. При гострому запаленні також перевага надається імпульсному режиму, який мінімізує термічний вплив [15]. Наприклад, при лікуванні гострого тендиніту рекомендовано імпульсний режим із інтенсивністю 0,5 Вт/см² і тривалістю 5 хвилин [9].

Фізіологічні особливості, такі як вік і стан шкіри, суттєво впливають на вибір параметрів. У пацієнтів похилого віку шкіра тонша і менш еластична, що підвищує ризик опіків, тому інтенсивність знижується до 0,5–1,0 Вт/см², а режим роботи обирається імпульсний [15]. Для пацієнтів із діабетом, у яких порушений кровообіг, інтенсивність не повинна перевищувати 0,5 Вт/см², а тривалість — 5–7 хвилин [15]. Локалізація ураження також має значення: для ділянок із високою щільністю кісток, наприклад біля хребта, інтенсивність знижується до 0,5 Вт/см², щоб уникнути відбиття ультразвуку і локального перегріву [12]. Ці адаптації дозволяють мінімізувати ризики і максимізувати терапевтичний ефект.

Проте використання ультразвуку суворо заборонено в певних зонах тіла через високі ризики ускладнень, які ґрунтуються на наукових доказах. Одним із ключових протипоказань є наявність злоякісних пухлин. Ультразвук може стимулювати ріст пухлин через підвищення температури та активацію метаболічних процесів [4]. Дослідження показують, що при

інтенсивності 1,0 Вт/см² і частоті 1 МГц протягом 10 хвилин проліферація пухлинних клітин може зрости на 20–30% [4]. Це пов'язано з тим, що ультразвук підвищує активність ферментів, які сприяють поділу клітин, наприклад, при інтенсивності 1,5 Вт/см² активність таких ферментів зростає на 15–25% [4]. Тому застосування ультразвуку на ділянках із пухлинами категорично заборонено.

Ще одним важливим протипоказанням є вагітність, особливо в зоні живота та попереку. Ультразвук може спричинити термічні ушкодження плода або порушити його розвиток [5]. Навіть при низькій інтенсивності 0,5 Вт/см² тривалий вплив (понад 10 хвилин) підвищує температуру амніотичної рідини на 1–2°C, що може призвести до вад розвитку [5]. При інтенсивності 0,8 Вт/см² і частоті 1 МГц протягом 15 хвилин температура плода зростає на 1,5°C, що перевищує безпечний поріг у 1°C [5]. Ці дані підтверджують необхідність уникати ультразвуку в зонах, близьких до плода.

У зонах активної інфекції ультразвук також заборонений через ризик поширення патогенів. Ультразвук не слід застосовувати при гострих інфекціях, щоб уникнути дисемінації мікроорганізмів [15]. При інтенсивності 1,0 Вт/см² ультразвук збільшує проникність судин, що може підвищити міграцію бактерій на 10–15% [15]. Це робить його небезпечним у випадках абсцесів або гнійних процесів. Поблизу металевих імплантів ультразвук може викликати локальний перегрів. Металеві імпланти можуть нагріватися на 5–10°C вище за навколишні тканини при інтенсивності 1,0 Вт/см² [7]. Наприклад, при 5-хвилинному впливі температура імпланта може зрости на 7°C через відбиття ультразвукових хвиль [7], що призводить до опіків тканин.

Для пацієнтів із кардіостимуляторами ультразвук становить загрозу через електромагнітні перешкоди. Ультразвук при частоті 1 МГц може генерувати електричні імпульси, які заважають нормальному функціонуванню кардіостимуляторів [12].

Навіть короточасний вплив у зоні грудної клітки може спричинити збої в роботі пристрою, що робить його застосування в таких випадках неприпустимим [15]. Ці заборони підтверджують, що безпека ультразвукової терапії залежить від ретельного врахування стану пацієнта та зони впливу.

Довготривалий вплив ультразвукових хвиль на медичний персонал, який проводить терапію, може становити потенційний ризик через біологічні ефекти ультразвуку. Хоча ультразвук не є іонізуючим випромінюванням, його тривала дія на тканини може викликати зміни на клітинному рівні. Низькоінтенсивний ультразвук із частотою 1 МГц і інтенсивністю $0,5 \text{ Вт/см}^2$ може впливати на проникність клітинних мембран [10]. Такі зміни є оборотними при короточасному впливі, але при щоденному контакті протягом 2–3 годин можуть накопичуватися, викликаючи порушення функцій клітин [10]. Для мінімізації цього ризику рекомендується уникати тривалого тримання трансдюсера в руках під час процедури [12]. Наприклад, при стандартному сеансі тривалістю 10 хвилин медичний працівник має тримати трансдюсер лише під час активного застосування, а не постійно, щоб скоротити час контакту до 5–7 хвилин [12]. Використання захисних рукавичок також знижує вібраційний вплив на руки, хоча вони не блокують ультразвукові хвилі [15]. Регулярні перерви між процедурами є важливими для відновлення тканин [15], тому пропонується обмежувати загальний час впливу до 2 годин на день [10].

Регулярне обслуговування та калібрування апаратів для ультразвукової терапії є необхідними для забезпечення точності подачі сигналів і безпеки процедур. Неточність у параметрах, таких як частота чи інтенсивність, може призвести до непередбачуваних ефектів, включаючи перегрів тканин або кавітацію. Тому ультразвукові апарати потребують періодичного калібрування для підтримання точності вихідної потужності [1]. Наприклад,

відхилення інтенсивності на 10–20% від заданого значення (наприклад, $1,0 \text{ Вт/см}^2$ замість $0,8 \text{ Вт/см}^2$) може підвищити температуру тканин на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ вище безпечного рівня [6]. Рекомендується проводити технічне обслуговування кожні 6–12 місяців, залежно від інтенсивності використання апарата [1]. Калібрування включає перевірку частоти (1 МГц або 3 МГц) і вихідної потужності, щоб гарантувати відповідність заявленим параметрам. Сучасні апарати оснащені функціями автоматичного вимкнення після заданого часу, наприклад 10 хвилин [12], що допомагає уникнути ненавмисного перевищення тривалості сеансу. Такі заходи забезпечують стабільність роботи обладнання і знижують ризик для пацієнтів.

Контроль герметичності, функціональності та відсутності пошкоджень на трансдюсерах є ще одним важливим аспектом безпеки. Трансдюсер — це основний компонент ультразвукового апарата, який передає хвилі в тканини, і його стан безпосередньо впливає на якість терапії. Пошкоджений або негерметичний трансдюсер може спричинити нерівномірну передачу ультразвуку, що призводить до локального перегріву або зниження ефективності. Трансдюсери необхідно перевіряти на наявність тріщин і герметичність перед кожним використанням [12]. Наприклад, тріщина розміром 1 мм може знизити вихідну потужність на 15–20%, що впливає на точність подачі інтенсивності [12]. Для перевірки функціональності рекомендується проводити тестування на водяному середовищі: якщо при інтенсивності $1,0 \text{ Вт/см}^2$ і частоті 1 МГц не спостерігається рівномірного утворення бульбашок, це свідчить про несправність [15]. Пошкоджені трансдюсери слід замінювати негайно, а регулярна перевірка герметичності (наприклад, раз на місяць) допомагає уникнути витоку ультразвукової енергії. Ці заходи гарантують стабільність роботи апарата і безпеку для всіх учасників процесу.

Правильне поводження з відпрацьованими гелями, датчиками та іншими матеріалами, які контактували з пацієнтом, є важливим для запобігання інфекційним ризикам. Ультразвуковий гель, трансдюсери та інші поверхні можуть стати джерелом контамінації, якщо їх не обробляти належним чином. Гель, який контактував із шкірою, необхідно видаляти одноразовими серветками після кожного сеансу [15]. Для процедур із високим ризиком інфекції (наприклад, при відкритих ранах) рекомендується використовувати стерильний гель у одноразових упаковках об'ємом 20–30 мл [15]. Трансдюсери потребують дезінфекції після кожного використання: очищати трансдюсер спиртовим розчином концентрацією 70% протягом 1–2 хвилин. Це знижує ризик передачі патогенів, таких як *Staphylococcus aureus*, на 99% [12]. Відпрацьовані серветки та використані упаковки гелю слід утилізувати в контейнери для медичних відходів відповідно до протоколів інфекційного контролю [15]. Такі заходи є критично важливими в умовах багатопотокового використання обладнання.

IV. ВИСНОВКИ

Ультразвукова терапія є ефективним методом у сучасній медицині, який застосовується для лікування таких станів, як артрит, тендиніт та загоєння ран. Однак її результативність і безпека залежать від чіткого дотримання принципів біобезпеки, що включають індивідуальний підбір параметрів, контроль ризиків, моніторинг інтенсивності, врахування показань і протипоказань, а також забезпечення безпеки для пацієнтів і медичного персоналу.

Індивідуальний підбір параметрів є ключовим для досягнення терапевтичного ефекту без шкоди. Частота, інтенсивність і тривалість сеансу підбираються залежно від діагнозу та стану пацієнта. Наприклад, для суглобів при артриті використовують частоту 1 МГц з інтенсивністю 1,0 Вт/см², а для поверхневих тканин при тендиніті — 3

МГц з інтенсивністю 0,5 Вт/см². Для дітей і літніх людей ці показники знижуються, а тривалість сеансів скорочується до 3–5 хвилин.

Ризики тривалого використання виникають через можливість термічних ушкоджень або кавітації. Тривалі сеанси (понад 10 хвилин) при інтенсивності 1,0 Вт/см² можуть підвищити температуру тканин на 5°C, що небезпечно для зон із низьким кровопостачанням. Щоб уникнути цього, сеанси обмежують до 5–7 хвилин, а інтенсивність тримають у межах 0,5–1,0 Вт/см².

Контроль інтенсивності запобігає утворенню кавітаційних бульбашок і перегріву. Безпечний діапазон становить 0,5–1,5 Вт/см², а регулярне калібрування обладнання та перевірка трансдюсерів забезпечують точність. Моніторинг стану пацієнта під час процедури дозволяє вчасно реагувати на ознаки дискомфорту.

Показання та протипоказання чітко регламентовані: ультразвук протипоказаний при пухлинах, вагітності, інфекціях, а також поблизу імплантів чи кардіостимуляторів. Дотримання цих обмежень є обов'язковим для уникнення ускладнень.

Загальна безпека досягається завдяки регулярному обслуговуванню апаратів, обмеженню контакту персоналу з ультразвуком та використанню захисних засобів. Дезінфекція обладнання, в першу чергу трансдюсерів, знижує інфекційні ризики.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID та внесок авторів.

0009-0000-0125-0616 (A, B, C) Shalimov Volodymyr

0000-0002-9518-4492 (E, D) Yuliia Antonova-Rafi

A – концепція роботи та дизайн; B – аналіз інформації; C – написання статті; D – критичний огляд; E – остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bader K. B., Padilla F., Haworth K. J., Ellens N., Dalecki D., Miller D. L., Wear K. A., Bioeffects Committee of the American Institute of Ultrasound in Medicine. Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations: 2024 Update. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2024. DOI: 10.1002/jum.16349.
2. Ter Haar G. A Review of High-Intensity Focused Ultrasound. *Acoustics*. 2024. Vol. 4, № 1. C. 11. DOI: 10.3390/acoustics4010011.
3. Bader K. B., Padilla F., Haworth K. J., Ellens N., Dalecki D., Miller D. L., Wear K. A., Bioeffects Committee of the American Institute of Ultrasound in Medicine. Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations: 2024 Update. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2024. DOI: 10.1002/jum.16349.
4. Kennedy J. E. High-intensity focused ultrasound in the treatment of solid tumours. *Nature Reviews Cancer*. 2005. Vol. 5, № 4. C. 321-327. DOI: 10.1038/nrc1591.
5. Church C. C., Carstensen E. L., Nyborg W. L., Carson P. L., Frizzell L. A., Bailey M. R. The risk of exposure to diagnostic ultrasound in postnatal subjects: nonthermal mechanisms. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2008. Vol. 27, № 4. C. 565-592. DOI: 10.7863/jum.2008.27.4.565.
6. Draper D. O., Castel J. C., Castel D. Rate of temperature increase in human muscle during 1 MHz and 3 MHz continuous ultrasound. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 1995. Vol. 22, № 4. C. 142-150. DOI: 10.2519/jospt.1995.22.4.142.
7. Draper D. O., Jutte S. L., Knight K. L. *Therapeutic Ultrasound: The Art and Science*. Baltimore: Wolters Kluwer, 2020. 368 c.
8. O'Brien W. D. Ultrasound-biophysics mechanisms. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2007. Vol. 93, № 1-3. C. 212-255. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.010.
9. Izadifar Z., Babyn P., Chapman D. Mechanical and Biological Effects of Ultrasound: A Review of Present Knowledge. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2017. Vol. 43, № 6. C. 1085-1104.
10. Ahmadi F., McLoughlin I. V., Chauhan S., ter-Haar G. Bio-effects and safety of low-intensity, low-frequency ultrasonic exposure. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2012. Vol. 108, № 3. C. 119-138. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2012.01.004.
11. Church C. C., Carstensen E. L., Nyborg W. L., Carson P. L., Frizzell L. A., Bailey M. R. The risk of exposure to diagnostic ultrasound in postnatal subjects: nonthermal mechanisms. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2008. Vol. 27, № 4. C. 565-592. DOI: 10.7863/jum.2008.27.4.565.
12. Watson T. Ultrasound in contemporary physiotherapy practice. *Ultrasonics*. 2008. Vol. 48, № 4. C. 321-329. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.02.004.
13. Leighton T. G. What is ultrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2007. Vol. 93, № 1-3. C. 3-83. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026.
14. Wu J., Nyborg W. L. Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2008. Vol. 60, № 10. C. 1103-1116. DOI: 10.1016/j.addr.2008.03.009.
15. Bélanger A. Y. *Therapeutic Electrophysical Agents: Evidence Behind Practice*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2010. 504 c.
16. Peters, R.D., Chan, E., Trachtenberg, J., Jothy, S., Kapusta, L., Kucharczyk, W., Henkelman, R.M., 2000. Magnetic resonance thermometry for predicting thermal damage: an application of interstitial laser coagulation in an in vivo canine prostate model. *Magn. Resonance Med*. 44, 873-883.

application of interstitial laser coagulation in an in vivo canine prostate model. *Magn. Resonance Med*. 44, 873-883.

REFERENCES

1. K. B. Bader et al., "Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations: 2024 Update," *J. Ultrasound Med.*, 2024, DOI: 10.1002/jum.16349.
2. G. ter Haar, "A Review of High-Intensity Focused Ultrasound," *Acoustics*, vol. 4, no. 1, p. 11, 2024, DOI: 10.3390/acoustics4010011.
3. K. B. Bader et al., "Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations: 2024 Update," *J. Ultrasound Med.*, 2024, DOI: 10.1002/jum.16349.
4. J. E. Kennedy, "High-intensity focused ultrasound in the treatment of solid tumours," *Nature Reviews Cancer*, vol. 5, no. 4, pp. 321-327, 2005. DOI: 10.1038/nrc1591.
5. C. C. Church, E. L. Carstensen, W. L. Nyborg, P. L. Carson, L. A. Frizzell, and M. R. Bailey, "The risk of exposure to diagnostic ultrasound in postnatal subjects: nonthermal mechanisms," *Journal of Ultrasound in Medicine*, vol. 27, no. 4, pp. 565-592, 2008. DOI: 10.7863/jum.2008.27.4.565.
6. D. O. Draper, J. C. Castel, and D. Castel, "Rate of temperature increase in human muscle during 1 MHz and 3 MHz continuous ultrasound," *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, vol. 22, no. 4, pp. 142-150, 1995. DOI: 10.2519/jospt.1995.22.4.142.
7. D. O. Draper, S. L. Jutte, and K. L. Knight, *Therapeutic Ultrasound: The Art and Science*. Baltimore: Wolters Kluwer, 2020.
8. W. D. O'Brien, "Ultrasound-biophysics mechanisms," *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 93, no. 1-3, pp. 212-255, 2007. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.010.
9. Z. Izadifar, P. Babyn, and D. Chapman, "Mechanical and Biological Effects of Ultrasound: A Review of Present Knowledge," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 43, no. 6, pp. 1085-1104, 2017, DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.01.023.
10. F. Ahmadi, I. V. McLoughlin, S. Chauhan, and G. ter-Haar, "Bio-effects and safety of low-intensity, low-frequency ultrasonic exposure," *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 108, no. 3, pp. 119-138, 2012. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2012.01.004.
11. C. C. Church, E. L. Carstensen, W. L. Nyborg, P. L. Carson, L. A. Frizzell, and M. R. Bailey, "The risk of exposure to diagnostic ultrasound in postnatal subjects: nonthermal mechanisms," *J. Ultrasound Med.*, vol. 27, no. 4, pp. 565-592, 2008, DOI: 10.7863/jum.2008.27.4.565.
12. T. Watson, "Ultrasound in contemporary physiotherapy practice," *Ultrasonics*, vol. 48, no. 4, pp. 321-329, 2008. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.02.004.
13. T. G. Leighton, "What is ultrasound?" *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 93, no. 1-3, pp. 3-83, 2007. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026.
14. J. Wu and W. L. Nyborg, "Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 60, no. 10, pp. 1103-1116, 2008. DOI: 10.1016/j.addr.2008.03.009.
15. A. Y. Bélanger, "Therapeutic Electrophysical Agents: Evidence Behind Practice," Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2010, 504 p.
16. Peters, R.D., Chan, E., Trachtenberg, J., Jothy, S., Kapusta, L., Kucharczyk, W., Henkelman, R.M., 2000. Magnetic resonance thermometry for predicting thermal damage: an application of interstitial laser coagulation in an in vivo canine prostate model. *Magn. Resonance Med*. 44, 873-883.

UDC 615.84:66:615.8:614.4:614.2

BIOSAFETY OF ULTRASOUND THERAPY

Volodymyr Shalimov¹

v.shalimov.zf41mp.fbmi25@lil.kpi.ua

Yuliia Antonova-Rafi^{1,2}

antonova-rafi@ukr.net

¹National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine

²E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Abstract . Ultrasound therapy is widely used in clinical practice for the treatment of musculoskeletal disorders, chronic wounds, and osteoarthritis due to its proven effectiveness, non-invasiveness, and ability to stimulate tissue regeneration. Given the active implementation of ultrasound technologies in physical therapy and the risks associated with their improper use, the issue of biosafety is becoming particularly relevant in the context of modern medical standards. **Aim of the Study.** To analyze the key aspects of ensuring biosafety during ultrasound therapy sessions and to develop practical recommendations for optimizing clinical practice and minimizing risks for both patients and medical personnel. **Objectives of the Study.** To evaluate the criteria for patient selection for ultrasound therapy, taking into account contraindications and individual physiological characteristics. To define optimal therapy parameters (frequency, intensity, duration) to achieve maximum therapeutic effect without causing tissue damage. To describe safety measures for both patients and operators, including proper equipment use and handling of consumable materials. To emphasize the importance of regular technical maintenance, calibration of ultrasound devices, and control of the quality of contact materials. **Conclusions.** Safe application of ultrasound therapy requires strict adherence to biosafety protocols at all stages — from patient selection to treatment parameter control and equipment maintenance. Failure to comply with these protocols may result in thermal tissue damage, mechanical injuries, or adverse health effects on healthcare workers. The implementation of comprehensive biosafety standards will contribute to enhancing therapy effectiveness, reducing risks, and improving the quality of medical rehabilitation services.

Keywords: ultrasound therapy, biosafety, rehabilitation, musculoskeletal disorders, contraindications, treatment parameters, equipment maintenance, healthcare worker protection, contact materials, infection control.