Про механізм біологічної дії ультразвуку

М. І. Гуревич, С. А. Берштейн

Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця Академії наук УРСР, Київ

Вперше біологічний ефект дії ультразвуку відзначив Ланжевен у 1917 р. при випробуванні ультразвукового генератора, призначеного для виявлення підводних човнів.

Перші цілеспрямовані дослідження біологічної дії ультразвуку були проведені Вудом і Лумісом у 1924 р. [83]. Опромінення ультразвуком риб, жаб і мишей призводило до їх загибелі в процесі опромінення або незабаром після нього. На розтині виявлені внутріочеревинні крововиливи, а також зруйнування еритроцитів.

Після повідомлення Польмана [63] про терапевтичне застосування ультразвуку цей метод набув поширення в Німеччині, Франції, Австрії і Швейцарії. Його рекомендували при багатьох захворюваннях: невралгіях, міалгіях, артритах, артрозах та ін., коли необхідне локальне прогрівання.

Як це часто трапляється з новим лікувальним засобом, на фоні його великої популярності почали надходити сигнали про шкідливий вплив, спричинюваний ультразвуком [24, 41, 60, 61]. Це призвело до деякої настороженості при терапевтичному застосуванні ультразвуку.

Отже, виникла необхідність глибшого вивчення питання про доцільність застосування ультразвуку в медицині.

Основане на емпіричних даних, лікувальне застосування ультразвуку висувало необхідність вивчення механізму його біологічної дії, а також дослідження реакцій різних систем організму на опромінення.

Якщо зважити на те, що ультразвук у біології та медицині застосовують лише останні 10—20 років, то стане зрозумілим, чому досі ще не можна повністю пояснити механізм біологічної дії ультразвуку.

Ультразвук спричиняє різноманітний вплив на біологічні об'єкти. Частинки середовища в ультразвуковому полі здійснюють інтенсивні коливні рухи з великими прискореннями. В опромінюваних об'єктах на дуже невеликій відстані, яка дорівнює половині довжини звукової хвилі, виникає різниця тиску в кілька атмосфер. Ці фактори зумовлюють, переважно, механічний вплив ультразвуку, оскільки амплітуда зміщення частинок і швидкість їх руху незначні, тоді як величина прискорення і різниця тиску досягають досить значних величин.

За даними А. М. Рибакова і Л. С. Новикова (1956), при впливі ультразвукових коливань частотою 1000 *кгц* і інтенсивністю 1 *вт/см*^{2} на м'язову тканину довжина хвилі ультразвукових коливань становить 1,5 *мм,* максимальна амплітуда коливань — 1 *мк,* величина змінного тиску звуку дорівнює ± 1 *атм,* максимальна швидкість частинок — 10 *см/сек,* максимальне прискорення — 10^5 *см/сек*^{2}, глибина проникнення — 5—6 *см.*

Ці дані не можна повністю поширити на живий організм, оскільки складна структура тканин організму значно змінює умови поширення ультразвукових коливань, проте вони дають уявлення про величини механічних зусиль, що виникають в ультразвуковому полі. Певне значення мають також і властивості середовища, в якому поширюються ультразвукові хвилі. Залежно від цих властивостей переважного значення набуває один з названих факторів — прискорення або тиск.

Змінний звуковий тиск, як уже було відзначено, приводить до створення на відстанях у половину довжини хвилі (порядку 1 *мм* для діапазону застосовуваних в терапії частот) різниці тиску в кілька атмосфер. Поява негативного тиску означає напруження розтягнення всередині середовища. Дегазовані рідини за своєю міцністю на розрив не поступаються перед твердими тілами, а біологічні рідини, в зв'язку з наявністю в них найдрібніших твердих частинок і пузирків газу мають локальні ослаблення. Тому при появі напруження в місцях цих локальних ослаблень відбувається

розрив рідини з утворенням порожнин. Цей процес розриву рідини з утворенням мікроскопічних порожнин називається кавітацією. Проте утворення порожнин є лише першою фазою кавітаційного процесу. Другою фазою кавітаційного процесу вважають захлопування (анігіляцію) порожнин внаслідок створення позитивного тиску. Саме з другою фазою пов'язують появу в озвучуваній рідині найбільших механічних сил [3].

Вплив ультразвукової кавітації, що виникає вище певного порогового значення змінного звукового тиску для кожної рідини, залежить від частоти звукових коливань [23]. Ці ж автори визначили амплітуду змінного акустичного тиску, при якій в різних рідинах при нормальному атмосферному тиску виникає кавітація. Так, у касторовій олії кавітація виникає при амплітуді тиску в 3 *атм,* у гасі — при 2 *атм,* у чотирихлористому вуглеці — 1,75. На основі цих досліджень була встановлена залежність порогового значення кавітації від в'язкості рідини. Чим менша в'язкість рідини, тим менша амплітуда змінного тиску, необхідна для виникнення кавітації. Встановлено [23], що коли в рідині виникла кавітація, то при дальшій роботі з цією рідиною кавітаційний поріг змінного тиску знижується. Виникнення кавітації залежить також від зовнішнього тиску. При підвищенні зовнішнього тиску розрив рідини настає не так швидко і, отже, порогове значення амплітуди тиску вище. Проте зімкнення кавітаційних порожнин при підвищеному тиску відбувається різкіше, що зумовлює вищу інтенсивність вторинних процесів.

В дегазованих рідинах процес кавітації починається при значно вищому негативному тиску, тобто при більших інтенсивностях ультразвуку, ніж у недегазованих, проте в дегазованій рідині кавітація здійснює значно більш сильний вплив. Тому вважають, що справжня кавітація може виникнути лише в повністю дегазованій рідині на відміну від псевдокавітації, яка виникає в рідині з розчиненими в ній газами.

При опроміненні біологічних рідин і суспензій різних біологічних субстратів звичайно спостерігається псевдокавітація, оскільки для справжньої кавітації необхідне застосування ультразвуку дуже високої інтенсивності.

Відповідні спостереження були проведені ще Вудом і Лумісом [83], які виявили, що в полі ультразвукових хвиль швидко настає загибель парамецій.

Руйнівним впливом кавітації пояснюють [40] моментальні розриви клітин (яйця морського їжака) при опроміненні ультразвуком їх суспензії в рідині.

При дослідженні впливу ультразвуку на ракові клітини in vitro встановлено, що розрив ракових клітин є результатом дії механічних сил, які розвиваються в процесі кавітації всередині пухлинної тканини.

Вивчення впливу ультразвуку на біологічні об'єкти, зумовленого кавітацією, показало [34], що опромінення різними методами суспензії еритроцитів приводить до їх зруйнування лише тоді, коли розчин містить газ, тобто причиною зруйнування еритроцитів є псевдокавітація.

Дехто вважає, що біологічна дія ультразвуку зумовлена механічними силами кавітаційної природи [53, 49, 45, 15]. Інші зазначають, що не лише механічні сили кавітаційного походження, а й пов'язані з кавітацією вторинні хімічні і фотохімічні процеси відіграють неабияку роль у біологічному впливі ультразвуку [66, 18, 70, 76, 55, 81]. Так, вони твердять, що з кавітацією пов'язано прискорення деяких хімічних, в тому числі і ферментативних реакцій. Портер і Юнг [66] пояснюють прискорення хімічних реакцій місцевим нагріванням, яке виникає при сильному стисненні маленьких пузирків газу в процесі кавітації.

Шмідт і Роммель [75] встановили, що одним з наслідків кавітації є деполяризація макромолекул в ультразвуковому полі.

Френцель і Шультес [30] виявили, що внаслідок сильної іонізації води на поверхнях розділу кавітаційних порожнин утворюється атомарний водень і вільні гідроксильні іони, які характеризуються високою хімічною активністю в окисно-відновних процесах. Спостережувану при цьому люмінесценцію автори вважали зумовленою окисними процесами при кавітації.

До цієї ж точки зору приєднався також І. Е. Ельпінер [11], який разом з співавторами спостерігав розпад порфірину на окремі піролові кільця при опроміненні ультразвуком 10^{-5}-мольного розчину протопорфірину в 10%-ному HCl. На думку авторів, причиною розпаду порфіринового комплексу є окисний вплив вільних радикалів.

Велику роль у з'ясуванні причини виникнення великої різниці потенціалів в кавітаційних порожнинах відіграли дослідження Я. М. Френкеля [6], який обчислив електричне поле між двома стінками кавітаційної порожнини. Автор розрізняє так звану рівноважну кавітацію, що виникає при повільному зниженні тиску з утворенням сферичних порожнин, і кавітацію при розриві, що виникає при швидкому зниженні тиску з утворенням лінзоподібних порожнин. На його думку, електричні розряди можуть відбуватися лише в другому випадку. Висунуті Френкелем положення були в дальшому розвинуті Г. Л. Натансоном [2].

Багато авторів [68, 59, 47, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] на основі результатів своїх досліджень прийшли до висновку, що електричні заряди, які вільно рухаються, викликають

у кавітаційній порожнині іонізацію молекул, які перебувають тут у паро- або газоподібному стані.

В результаті іонізації молекул води утворюються валентно ненасичені хімічно активні радикали: OH, OH_2 тощо.

Отже, в зв'язку з кавітацією спостерігається також і значний окисний вплив ультразвуку. З вторинних процесів, пов'язаних з кавітацією, слід відзначити можливість виникнення в кавітаційній порожнині при електричному розряді світлового потоку, до складу якого, за даними Прюдома і Брюссо [67], входить ультрафіолетове випромінення.

За сучасними уявленнями, кавітація, як і псевдокавітація, в тканині людини і тварини не відбувається (в межах застосовуваних інтенсивностей). Проте, за даними Польмана [64], в м'язовій тканині також утворюються порожнини. При впливі ультразвуку терапевтичної інтенсивності в м'язовій тканині утворюються лінзоподібні порожнини, мабуть, пов'язані не з розривом, а з розсуванням м'язових фібрил. Розмір утворюваних проміжків не перевищує величини кількох діаметрів молекул. Дані Польмана [64] підтвердили дослідження Майно [56], який показав, що при опроміненні ультразвуком високої інтенсивності відбувається відділення тканини від надкісниці.

Бергман [1951] вважає, що тепер незрозуміло, чи дійсно кавітація відсутня в тканинах при впливі ультразвуку терапевтичної інтенсивності. Але, якщо навіть прийняти, що кавітація і пов'язані з нею вторинні процеси не відбуваються в тканинах при застосуванні ультразвуку терапевтичних інтенсивностей, слід взяти до уваги механічний вплив ультразвуку так званого некавітаційного походження.

Численні автори [12, 25, 58 та ін.] у своїх працях відзначають, що деякі ефекти, спостережувані при опромінюванні біологічних об'єктів ультразвуком, зумовлені, видимо, властивістю ультразвукових хвиль здійснювати на шляху свого поширення зміщення частинок.

На думку Грабара [33], струшування складових частинок клітинної цитоплазми як результат зміщення частинок в ультразвуковому полі, а також локальні підвищення температури при стисканні частинок середовища можуть стимулювати різні реакції опромінюваного об'єкта. Істотні зміни структури і функції клітин можуть відбуватися внаслідок підвищення інтенсивності ферментативних процесів, а також невластивого контакту між клітинними субстанціями в різних ділянках клітин.

Навіть при застосуванні ультразвуку невеликих інтенсивностей під мікроскопом спостерігали рухи в цитоплазмі клітин [25, 39].

Деякі автори [52, 80] повідомляють про механічний вплив ультразвукових коливань на внутріклітинні структури при збереженні цілості клітин. Вивчаючи вплив ультразвуку на формені елементи крові, автори спостерігали обертання гранул протоплазми еозинофілів навколо своєї осі навіть при незначних інтенсивностях ультразвуку. Швидкість обертання збільшувалася з підвищенням інтенсивності ультразвуку. Обертання зазнавали також і окремі еритроцити.

Причиною підвищення інтенсивності ферментативних реакцій і, отже, посилення обмінних процесів більшість дослідників вважають прискорення процесів дифузії в ультразвуковому полі.

Дані багатьох авторів [1, 7, 19, 27, 29, 44] свідчать про прискорення процесів дифузії крізь напівпроникні оболонки під впливом ультразвукових коливань, особливо в полі стоячих звукових хвиль.

За даними Польмана [64], утворення стоячих звукових хвиль необхідно для прискорення процесів дифузії. Оскільки основною причиною прискорення процесів дифузії автор вважає перепад тиску, то, отже, необхідно, щоб напівпроникна перетинка знаходилася в певний момент у вузлі звукової хвилі, а дифундуючі молекули — у пучності тиску звукової хвилі.

Відсутність обліку характеру звукового поля (біжучі або стоячі звукові хвилі, сфокусоване або розсіяне звукове поле), можливо, є причиною появи праць, які заперечують вплив ультразвуку на процеси дифузії [72, 80].

Байєр і Дернер [20] вважають, що причиною прискорення дифузних процесів може бути розпушення мембрани клітин завдяки періодичним коливанням змінного звукового тиску.

Оскільки опромінення ультразвуком біологічних об'єктів неминуче викличе теплоутворення в них, при вивченні механізму біологічного впливу ультразвуку необхідно враховувати роль теплового фактора.

Ще в 1932 р. була показана [28] можливість прогрівання кісткового мозку з допомогою ультразвуку, не пошкоджуючи кісткової тканини. Ці дані були підтверджені дослідженнями Доньйон і Біанкані [25], які встановили, що під впливом ультразвуку однакової інтенсивності на однакову кількість різних речовин спостерігалось різне підвищення температури. Так, температура яєчного жовтка підвищувалась на 11°, яєчного білка — на 2°, жирової тканини — на 25°, тканини печінки — на 9°. Цим була показана можливість селективного нагрівання різних тканин тіла людини і тварини.

Розенбергер [71] виявив, що при опроміненні у тварин ділянки сідничного нерва, сам нерв нагрівається більше, ніж оточуючі м'які тканини.

Петцольд і Борн [62] наводять дані про вибірне підвищення температури сухожиль і фасцій м'язів.

Які ж причини теплоутворення в опромінюваних ультразвуком об'єктах?

Основною причиною є поглинання звукових хвиль в опромінюваному середовищі. Акустична енергія при цьому, переважно, переходить у теплову.

Як відомо, поглинання звуку залежить від в'язкості і теплопровідності середовища, а також від внутрімолекулярного поглинання. Цими факторами зумовлюється величина коефіцієнта поглинання. Виходячи з цього, поглинання в тканинах організму, особливо в м'язах тканин, які містять багато білкових і колоїдних розчинів, що визначають в'язкість цих тканин, має бути досить значним.

Не менше значення має утворення тепла на поверхнях розділу двох середовищ за рахунок різної швидкості руху частинок стичних середовищ, яка особливо значна, коли акустичні опори цих середовищ набагато відмінні одне від іншого. Багато поверхонь розділу середовищ з різним акустичним опором в тканинах людини і тварин створює можливості для інтенсивного теплоутворення.

Третя причина утворення тепла пов'язана з самою природою звукових хвиль, які створюють на своєму шляху періодичні стиснення частинок середовища, що приводить до адіабатичних підвищень температури. В тканинах тваринного організму ці локальні підвищення температури порівняно невеликі, через їх незначну стисливість. Якщо опромінюване середовище містить дрібні пузирки газу, то ці локальні підвищення температури можуть бути порівняно великими.

Для з'ясування ступеня нагрівання в результаті поглинання ультразвукових хвиль деякі автори [65] досліджували розподіл температури в живому організмі при опромінюванні ультразвуком. Сідничну ділянку на відрізку діаметром 2 *см* опромінювали протягом 20 *сек* ультразвуком частотою 800 *кгц* при інтенсивності 4 *вт/см²*. На різну глибину вводили термоголки і температуру вимірювали кожні 10 *сек* після вимкнення генератора. Протягом 20 *сек* після опромінювання в тілі встановлювалась теплова рівновага, причому на глибинах 0,2—3 *см* температура підвищувалась на 2,7—5,7°. Відразу після вимкнення апарата температура починала знижуватися. Встановлення теплової рівноваги, як і зниження температури після вимкнення апарата відбувається внаслідок віднесення тепла кров'ю і теплопровідності тканин. У мертвих тканинах, де ці фактори не діють, температура підвищується безперервно. За даними цих авторів, а також Зандена [74], приблизно 79—82% усього утворюваного тепла відводиться кров'ю, а решта 18—21% під впливом теплопровідності прилеглих тканин.

Аналогічні виміри на мертвих і живих тканинах провів Хорват [46], який, крім того, відзначив, що найбільше нагрівається поверхня, протилежна тій, яка стикається з випромінювачем.

Дані про підвищення температури, одержані цими авторами, характеризують середнє її, оскільки неможливо врахувати великої кількості максимумів і мінімумів інтенсивності коливань, які виникають в умовах складних інтерференційних явищ у звуковому полі.

Значно більший ступінь нагрівання спостерігається на суміжних ділянках двох середовищ [31, 43, 48, 77], тоді як температура м'яза підвищується на 2,2° [60], температура кортикального шару кістки за тих самих умов підвищується на 10,5°. Фрай [31] відзначає, що початкове підвищення температури на кістці досягає 55° за 1 *сек*, при початковому підвищенні температури на нерві і м'язі — 1,8° за 1 *сек*.

Останнім часом у тлумаченні ролі теплового фактора в механізмі біологічної дії ультразвукових коливань виявились дві протилежні точки зору. Одні автори вважають, що теплоутворенню належить провідна роль, інші, навпаки, заперечують значення цього фактора у впливі ультразвуку на тваринний організм.

При великих інтенсивностях і тривалому впливі ультразвуку в результаті значного теплоутворення можуть настати необоротні зміни в тканинах, аж до денатурації білка. Вивчаючи біологічний вплив ультразвукових коливань значної інтенсивності, багато зарубіжних авторів прийшли до висновку, що він зводиться виключно до теплової дії.

Численні автори [16, 21, 60], застосовуючи при вивченні біологічної дії ультразвуку високі інтенсивності, вважають, що руйнівний вплив ультразвуку також зумовлений теплоутворенням.

Герік [41], досліджуючи потенціал дії на ізольованому сідничному нерві жаби під впливом ультразвуку, показав, що лише після припинення охолодження нерва і досягнення ним певного температурного рівня амплітуда потенціалу дії починала знижуватися. В процесі охолодження автор не зареєстрував змін амплітуди потенціалу дії.

Руст і Фейндт [77], вивчаючи вплив ультразвуку на парамеції, відзначили утворення тепла на поверхнях різних клітинних включень (ядра, мітохондрій тощо), які є

суміжними поверхнями. Теплоутворення ці автори вважають причиною загибелі парамецій в ультразвуковому полі.

Гюнзель [38] вміщував піддослідних щурів у водяну баню з температурою води 40—43° С. При цьому він виявив у сім'яниках щурів ті самі морфологічні зміни, що й після ультразвукового впливу.

При дослідженні обміну нуклеїнових кислот у сім'яниках щурів, Хурсін [7] прийшов до висновку, що істотна роль у впливі ультразвуку на обмін нуклеїнових кислот належить тепловому фактору, оскільки охолодження сім'яників в процесі опромінення запобігало зруйнуванню нуклеїнових кислот, а вплив на сім'яники водою, нагрітою до 46—49° С, подібно до ультразвуку, призводить до зменшення вмісту нуклеїнових кислот. Згадані автори та багато інших на основі одержаних даних наполягають на тому, що біологічний вплив ультразвуку оснований на тепловому ефекті.

В літературі є дані, що заперечують переважне значення теплоутворення у біологічному впливі ультразвуку [32]. Опромінюючи ультразвуком значної інтенсивності хребет, автори спостерігали деструктивні зміни в спинному мозку не лише під час роботи генератора у безперервному, а й в імпульсному режимі, коли шпаруватість імпульсів виключала можливість місцевого нагрівання тканин. На основі цього автори зробили висновок, що принаймні ураження нервових клітин не пов'язано з теплоутворенням.

Деякі автори [50, 51], досліджуючи вплив ультразвуку на проникність біологічних мембран для іонів, встановили, що під впливом ультразвуку значно посилюється проходження іонів хлору крізь шкіру жаби. Проте цим авторам не вдалося кількісно відтворити зміни проникності шкіри жаби для іонів хлору, впливаючи теплом з підвищенням температури шкіри до тих самих показників, як і при впливі ультразвуку.

Вуттге [84] також вважає, що підвищення клітинної проникності пов'язано не лише з тепловим ефектом, а значною мірою є наслідком механічного впливу.

В зв'язку з цим певний інтерес становить висловлювання Бауера про те, що енергію ультразвукових коливань не можна порівнювати з будь-якою іншою формою теплового впливу. Цю точку зору поділяє Скидрзик [79], на думку якого вибірність локалізації теплоутворення відрізняє ультразвук від інших фізичних факторів, як індуктометрія, УВЧ-поле тощо, які характеризуються так званим розлитим тепловим впливом.

Вказівки деяких авторів [22] на те, що ці локальні нагрівання швидко нівелюються в процесі віднесення тепла кров'ю, видимо, не зовсім обгрунтовані, тому що теплоутворення в цих ділянках підтримується в процесі впливу ультразвуку. Крім того, заслуговує на увагу думка про своєрідне взаємовідношення між тепловим і механічним факторами у впливі ультразвуку [72, 79]. Очевидно, ці два фактори взаємопосилюють один одний, і розділяти їх не можна, оскільки теплова енергія є механічною енергією частинок, що рухаються,— атомів і молекул, а ультразвукові коливання на шляху свого поширення також викликають рух частинок, переважно молекул.

При розгляді механічного і теплового компонентів дії ультразвуку були відзначені хімічні та фізико-хімічні прояви впливу ультразвуку на біологічні об'єкти. Як прояв цього фактора, що діє в ультразвуковому полі, передусім привертає увагу окисний вплив ультразвуку.

Слід відзначити, що всі явища, пов'язані з окисним впливом ультразвуку, спостерігаються лише при наявності води і при кавітації.

Більшість авторів [14, 34, 36, 37, 54, 59] вважає, що завдяки кавітації і пов'язаної з нею іонізації утворюються вільні радикали Н і ОН, які є причиною окисного впливу ультразвуку. Доказом цього служать праці [34, 82], які довели, що й у воді, яка не містить кисню, а також при додаванні до неї аргону, гелію або азоту, відбуваються окисні реакції. Цих реакцій не буває, коли у воді розчиняють H_2 і CO_2, оскільки вільні радикали знову зв'язуються воднем, а завдяки CO_2 не виникає люмінесценції, тому що CO_2 заповнює кавітаційні порожнини і перешкоджає виникненню електричних зарядів.

Існує також багато інших теорій, що пояснюють ефект окислення при ультразвуковому опромінюванні. Є вказівки на те, що хімічний вплив ультразвуку викликаний місцевим нагріванням [35], яке виникає в процесі стиснення частинок середовища. Є висловлювання про те, що кавітаційні сили розривають зв'язки типу О—Н з утворенням Н і ОН [57], які й здійснюють окисний вплив. На думку автора, окисний вплив ультразвуку пов'язаний з озоном, який утворюється в результаті мікроелектролізу [69].

Найбільш вірогідною причиною окисного впливу ультразвуку слід, очевидно, вважати утворення в процесі кавітації хімічно активних радикалів Н, ОН, OH_2 тощо. Теплоутворення, видимо, є причиною, що прискорює ці окисні реакції.

Деякі автори вказують на прискорення хімічних реакцій, зокрема на прискорення обмінних процесів, як на один з проявів хімічного впливу ультразвуку.

Одні дослідники [4, 19, 27, 29, 44] причиною прискорення процесів дифузії вважають перепад тиску, інші [20, 50, 51] зазначають, що цією причиною є зміна влас-

тивостей біологічної мембрани. Грабар [33] гадає, що причиною цього може бути неприродний контакт між різними клітинними елементами в процесі зміщення частинок в полі ультразвукових хвиль.

Викладене дозволяє прийти до висновку, що ультразвуковим коливанням властиві механічний вплив кавітаційної і некавітаційної природи, теплова дія і вторинний хімічний та фізико-хімічний вплив.

Проте привертає увагу той факт, що окремі автори надають тому чи іншому виду впливу переважного значення, причому така думка, як правило, підтверджується відповідними експериментальними даними. Підхід до пояснення механізму впливу ультразвукових коливань з точки зору переважного значення одного фактора, на нашу думку, не зовсім обгрунтований. Нема сумніву в тому, що специфічним для ультразвукових коливань є механічний ефект. Це випливає із самої природи ультразвуку. Проте безперечно й те, що опромінення ультразвуком різних об'єктів супроводжується теплоутворенням у них.

Чи можна говорити про специфічність теплоутворення для ультразвуку?

Нагрівання опромінених об'єктів спостерігається також і при застосуванні інших видів енергетичного впливу. Але було показано, що ультразвуку властиве вибірне нагрівання, особливо на пограничних розділах тканин з різним акустичним опором. Це вже властивість, специфічна для ультразвукових коливань. Отже, ми маємо право говорити певною мірою і про специфічність теплового впливу ультразвуку.

Що ж до хімічного і фізико-хімічного впливу ультразвуку на біологічні об'єкти, то і з цього питання висловлені різні точки зору. Визнаючи ці компоненти впливу ультразвуку вторинними, деякі автори вважають їх результатом механічного впливу, а інші — теплового.

Причиною такого стану, на нашу думку, є: по-перше, різні параметри ультразвукового впливу, які іноді неможливо порівнювати; по-друге, різні об'єкти дослідження; по-третє, різні методи дослідження.

Різні параметри ультразвукового впливу призводять до того, що в одних випадках більшою мірою проявляється механічний вплив, а в інших — тепловий. Різні об'єкти дослідження проявляють різну чутливість до механічного або до теплового впливу. І, нарешті, різні методи дослідження дають можливість виявити різні реакції біологічного об'єкта на ультразвуковий вплив. Виявляючи реакцію, викликану тепловим впливом, ці методи не дають можливості визначити реакції, пов'язані з механічним впливом або навпаки.

Отже, механічний і тепловий впливи проявляються паралельно. Не можна при поясненні механізму впливу ультразвуку відділяти механічний вплив від теплового.

Ці два фактори впливу, видимо, взаємопосилюють один одний, оскільки теплова енергія є механічною енергією рухомих частинок (атомів і молекул), а ультразвукові коливання також викликають рух частинок, переважно, молекул.

Виходячи з викладеного, найбільш правильно, на нашу думку, вважати, що реакції тваринного організму на ультразвуковий вплив є результатом спільного впливу механічного, теплового і пов'язаних з ними хімічного та фізико-хімічного факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зотова А. Т., Тез. научн. сессии Ин-та физиотерапии, М., 1957.
2. Натансон Г. Л., ДАН СССР, 1948, 59, с. 83.
3. Полоцкий И. Г., Уразовский С. С., Врач. дело, 1946, 1—2, с. 84.
4. Рокитянский В. И., Здравоохран. Сов. Латвии, 1951, 7.
5. Рыбаков А. М., Новиков Л. С., Материалы по обмену передовым опытом в мед. промышл., 1956, 1—2, с. 13.
6. Френкель Я. И., Журн. физ. химии, 1940, 14, с. 3.
7. Хурсин Н. Е., Фізіол. журн. АН УРСР, 1961, VII, 2, с. 266.
8. Эльпинер И. Е., Успехи совр. биол., 1950, 30, с. 113.
9. Эльпинер И. Е., ЖТФ, 1951, 21, с. 1205.
10. Эльпинер И. Е., Биофизика, 1956, 1, 6, с. 513.
11. Эльпинер И. Е., Блюменфельд Л. А., Красовицкая С. Э., ДАН СССР, 1951, 79, с. 495.
12. Эльпинер И. Е., Дворкин Г. А., ДАН СССР, 1956, 106, 5, с. 835.
13. Эльпинер И. Е., Дризе И. М., Биофизика, 1956, 1, 1, с. 30.
14. Эльпинер И. Е., Колесникова М. Ф., ДАН СССР, 1950, 75, с. 837.
15. Ackermann E., Phys. Rev., 1950, 79, p. 231.
16. Anderson T. P., Wakim K. G., Herrik J. E., Bennet W. A., Krusen F. H., Arch. of Phys. Med., 1952, 32, p. 71.
17. Auler H., Woite H., Zs. Krebsforsch., 1942, 53, S. 90.
18. Barret E. W., Porter C. W., Journ. Amer. Chem. Soc., 1941, 63, p. 3434.
19. Baumgartl F., Arztl., Forsch., 1949, 3, S. 525.
20. Beier W., Dörner E., Der Ultraschall in Biologie und Medizin, Leipzig, 1954.
21. Bercy A., Acta Physioter. Rheumat. Belg., 1951, 6, p. 53.

22. Bode H. G., Theismann H., Der Ultraschall in der Medizin (Kongressbericht der Erlanger Ultraschalltagung), 1949, S. 291.
23. Briggs H. B., Johnson I. B., Mason W. P., J. Acoust. Soc. Amer., 1947, 19.
24. Buchtala V., Therapeutische Berichte, 1950, 22, S. 91.
25. Dognon A, Biancani E. H., Ultrasons et biologie, Paris, 1937.
26. Dognon A., Dognon E., Biancani H., Radiologica, 1938, 3, p. 40.
27. Florsted H., Pohlman R., Zs. ges. exp. Med., 1940, 107, S. 212.
28. Freundlich H., Söllner K. u. Rogowski F., Klin. Wochenschr., 1932, 11.
29. Frenzel H., Hinsberg K., Schultes H., Zs. ges. exp. Med., 1935, 96, S. 811.
30. Frenzel H., Schultes H., Zs. phys. Chem., 1935, 27, S. 421.
31. Fry W. J., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1952, 24, p. 412.
32. Fry W. J., Tucker D., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1951, 23, p. 627.
33. Grabar P., Advances in Biological and Medical Physics, 1953, 3, S. 383.
34. Grabar P., Prudhome P. O., Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 114.
35. Griffing V., Journ. Chem. Phys., 1950, 18, p. 997.
36. Günter P., Angew. Chem., 1951, 63, S. 241.
37. Günter P., Angew. Chem., 1947, 59, S. 164.
38. Günsel E., Der Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 198.
39. Harvey E. N., Biol., 1930, 59, p. 306.
40. Harvey E. N., Loomis A. L., Journ. Gen. Physiol., 1931, 15, p. 147.
41. Henkel K., Med. Mschr., 1949, 3, S. 651.
42. Herrick J. F., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1953, 25, p. 12.
43. Herrick J. F., a. Krusen F. H., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1954, 26, p. 236.
44. Holland G., Schultes H., Zs. ges. exp. Med., 1936, 98, S. 207.
45. Horton I. P., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1953, 25, p. 480.
46. Horvath I., Arztl. Forsch., 1947, I, S. 357.
47. Hunter A. N., Proc. Phys. Soc., 1951, 64, p. 1086.
48. Hüter T. E., Arztl. Forsch., 1949, 3, S. 585.
49. Lehmann J., Der Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 159.
50. Lehmann J., Becker G., Strahlentherapie, 1951, 84, S. 306.
51. Lehmann J., Becker G., Jaenicke W., Strahlentherapie, 1950, 83, S. 311.
52. Lehman J., Becker G., Otto J., Strahlentherapie, 1952, 87, S. 550.
53. Lehmann J. a. Herrick J. F., Arch. Phys. Med., 1953, 34, p. 86.
54. Lindström O., Lamm O., Journ. Phys. Coll. Chem., 1951, 55, p. 1139.
55. Lliboutry L., Journ. Chem. Phys., 1944, 41, p. 173.
56. Maino G., Arch. Sci., 1948, I, p. 532.
57. Marboe E. Ch., Chem. Rng. Nervs., 1949, 27, S. 2198.
58. Marinesco N., Journ. Chim. Phys., 1936, 33, p. 99.
59. Miller N., Trans. Farad. Soc., 1950, 46, p. 546.
60. Nelson P. A., Herrick J. F., Krusen F. H., Arch. of Phys. Med., 1950, 31.
61. Nelson P. A., Herrick J. F., Krusen F. H., Arch. of Phys. Med., 1950, 31, p. 6.
62. Pätzold J. u. Born H., Strahlentherapie, 1947, 76, S. 486.
63. Pohlmen R., Dtsch. Med. Wschr., 1948, 73, S. 373.
64. Pohlman R., Der Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 131.
65. Pohlman R., Parow-Souchon E. u. Schlungbaum E., Klin. Wschr., 1948, 26, S. 277.
66. Porter C. W., Young L., Journ. Amer. Chem. Soc., 1938, 60, S. 1497.
67. Prudhome R. O., Busso R. H., Compt. Rend., 1952, 235, p. 1486.
68. Prudhome R. O., Grabar P., Journ. Chim. Phys., 1949, 46, 149, p. 323.
69. Renaud P., Journ. Chim. Phys., 1951, 48, p. 336.
70. Richards W. T., Loomis A. L., Journ. Amer. Chem. Soc., 1927, 49, p. 3086.
71. Rosenberger H., Der Chirurg., 1950, 21, S. 404.
72. Rust H. H., Deutsche med. Wschr., 1949, 74, S. 1505.
73. Rust H. H., Feindt W., Ultraschall in der Medizin, 1952, 5, S. 22.
74. Sanden K., Der Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 45.
75. Schmidt G., Rommel O., Forsch. u. Fortschr., 1939, 15, S. 430.
76. Schumb W. C., Rittner E. S., Journ. Amer. Chem. Soc., 1940, 62, p. 3416.
77. Schwan H. a. Carstensen E. L., J. A. M. A., 1952, 49, p. 122.
78. Skudrsyk E., Der Ultraschall in der Medizin, 1952, 5, S. 51.
79. Skudrsyk E., Acta phys. Austriaca, 1949, 3, S. 56.
80. Stuhlfauth K., Wuttge K. H., Klin. Wschr., 1949, 27, S. 662; 1950, 28, S. 71.
81. Thompson D., Wildrandt F. C., Gray W. C., J. Acoust. Soc. Amer., 1953, 25.
82. Weisler A., Cooper H. W., Snyder St., Journ. Acoust. Soc. Amer., 1948, 20.
83. Wood R. W., Loomis A. L., Phys. Rev., 1927, 29, p. 373.
84. Wuttge K., Der Ultraschall in der Medizin, 1949, S. 142.

Надійшла до редакції
12.X 1963 р.