

УДК 616.72:[616.8-009.12:615.823]](048.3)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-598720231100-107>

Концептуальна модель впливу низькочастотної вібрації на процес відновлення рухливості суглобів після іммобілізації

О. А. Тяжелов ¹, А. А. М. Хасавнех ², О. Д. Карпінська ¹,
М. Ю. Карпінський ¹, М. З. Біцадзе ¹

¹ ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України», Харків

² Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова МОЗ України

Disruption of joint mobility (contracture) is a frequent consequence of the treatment of injuries or orthopedic diseases, when the method of immobilization is used in the treatment process. One of the physiotherapeutic methods of preventing contractures and restoring joint mobility after long-term immobilization is vibration therapy. Objective. Create a concept of the effect of low-frequency vibration on joints and peri-articular tissues after immobilization. Methods. The work was performed using a meta-analysis of literature sources from scientific databases. The publications were analyzed, which considered the impact of vibration on joints or had data on its biological impact on body tissues. Results. The physiological impact of vibration on the body is based on mechanical, physico-chemical and thermal effects. The expression of the physiological response depends on the frequency and amplitude of oscillations, conditions of conducting and localization. The concept is based on the features of the impact of vibration on the structural elements of limbs and joints. The vibration applied to the limb irritates mechanoreceptors, which send a signal to the central nervous system, and thanks to motoneurons, muscle contraction occurs, which affects peripheral blood flow and blood oxygenation. Accordingly, redox processes in tissues are launched. Micromovements caused by vibration contribute to the nutrition of cartilage and metabolism in the synovial fluid, improving the nutrition of periarticular tissues. This contributes to the recovery of both joint and adjacent tissues. Contraction of muscles through motoneurons gives impetus to a gradual increase in their motor activity and strength, restoration of nutrition and cartilage surface - to restoration of mobility. Conclusions. The created conceptual model of the effect of low-frequency vibration on joints with limited mobility due to immobilization takes into account tissue changes under its influence. The concept involves restoration of nutrition of tissues and muscles adjacent to the joint. It is vibration, due to the possibility of transmitting vibrational energy between tissues, that enables the processes of muscle contraction, which increase the blood supply and metabolism of the joint. Key words. Joint, immobilization, conceptual modeling, low-frequency vibration.

Порушення рухомості суглобів (контрактури) є частим наслідком лікування травм або ортопедичних захворювань, коли у процесі лікування застосовують метод іммобілізації. Одним із фізіотерапевтичних методів профілактики контрактур і відновлення рухомості суглобів після тривалої іммобілізації є вібротерапія. Мета. Створити концепцію впливу низькочастотної вібрації на суглоби та періартикулярні тканини після іммобілізації. Методи. Роботу виконано за допомогою метааналізу джерел літератури з наукових баз даних. Проаналізовано публікації, де розглянуто вплив вібрації на суглоби або є дані щодо її біологічного впливу на тканини організму. Результати. В основі фізіологічного впливу вібрації на організм лежать механічні, фізико-хімічні та теплові ефекти. Вираженість фізіологічної відповіді залежить від частоти й амплітуди коливань, умов проведення та локалізації. Концепція базується на особливостях впливу вібрації на структурні елементи кінцівок і суглобів. Застосовувана до кінцівки вібрація подразнює механорецептори, які подають сигнал у ЦНС і завдяки мотонейронам відбувається скорочення м'язів, котре впливає на периферичний кровоток і оксигенацію крові. Відповідно, запускаються окислювально-відновні процеси в тканинах. Мікропереміщення, спричинені вібрацією, сприяють живленню хряща й обміну речовин у синовіальній рідині, покращенню живлення періартикулярних тканин. Це сприяє відновленню як тканин суглоба, так і прилеглих до нього. Скорочення м'язів через мотонейрони дає поштовх до поступового збільшення їхньої рухової активності та сили, відновлення живлення та поверхні хряща — до відновлення рухомості. Висновки. Створена концептуальна модель впливу низькочастотної вібрації на суглоби з обмеженням рухомості внаслідок іммобілізації враховує зміни тканин під її дією. Концепція передбачає відновлення живлення прилеглих до суглоба тканин і м'язів. Саме вібрація завдяки можливості передавання енергії коливання між тканинами дає змогу ввімкнути процеси скорочення м'язів, які посилюють кровопостачання й обмін речовин суглоба.

Ключові слова. Суглоб, іммобілізація, концептуальне моделювання, низькочастотна вібрація

Вступ

Контрактури — це втрата рухомості суглобів, спричинена структурними змінами не кісткової тканини, а м'язів, зв'язок і сухожилків. На сьогодні — це найпоширеніша клінічна проблема, оскільки зазначений патологічний стан негативно впливає на повсякденне життя пацієнтів, знижуючи його якість [1]. Порушення рухомості суглобів є частим наслідком лікування різних травм або ортопедичних захворювань, коли застосовують метод іммобілізації. Пацієнти з іммобілізацією кінцівок, особливо довготривалою, мають великий ризик розвитку контрактур суглобів, які впливають на кінцеві результати лікування травм й ортопедичних захворювань [2].

Одним із фізіотерапевтичних методів профілактики контрактур і відновлення рухомості суглобів після тривалої іммобілізації є вібротерапія (лат. *vibrare* — дрожати, коливатися та грец. *therapeia* — лікування) [3, 4]. Методика передбачає вплив механічними хвилями низької частоти, який здійснюється за безпосереднього контакту з тканинами або тілом хворого та приводить до вибіркового збудження вібрацією різних механорецепторів, спричинюючи низку фізіологічних змін і саногенетичних ефектів. Найважливішими серед них є анагетичний, трофічний, протизапальний, лімфодренувальний, вазоактивний і тонізуючий. Апаратуру для вібротерапії поділяють на пристрої для місцевої (вібромасаж) та загальної дії (для всього тіла). Раніше ми розробили концептуальну модель формування контрактури (стійкого обмеження рухів) у суглобах після тривалої іммобілізації чи обмеження рухливості [5].

Мета: створити концепцію впливу низькочастотної вібрації на суглоби та періартикулярні тканини після іммобілізації.

Матеріал і методи

Роботу виконано за допомогою метааналізу джерел літератури з наукових баз: Cochrane Library, Scopus, National Library of Medicine — National Institutes of Health, ReLAB-HS Rehabilitation Resources Repository, Mendeley Reference Manager, бібліотеки «The Physiological Society» та літератури з фізіології та біохімії вітчизняних і закордонних авторів.

Вивчали дані щодо впливу вібрації на тканини суглобів, кровеносну систему, м'язи. Проаналізовано 80 джерел, з яких відібрано 32, де розглянуто безпосередньо вплив вібрації на суглоби або на тканини організму.

Результати та їх обговорення

В основі фізіологічного впливу вібрації на організм лежать механічні, фізико-хімічні та теплові (проявляються меншою мірою) ефекти. Вираженість фізіологічних механізмів залежить від інтенсивності та параметрів (частоти, амплітуди) впливу, умов проведення та локалізації [3, 4, 6, 7]. Найпомітніший вплив на тканини організму чинять частоти в діапазоні 10–200 Гц.

Первинна реакція організму на локальну дію механічних коливань виникає завдяки прямій взаємодії з клітинами та навколишнім середовищем. Кількість енергії, яка передається від джерела вібрації людині прямо залежить від частоти й амплітуди коливань. Сенсорне сприйняття вібрації здійснюють нервові рецептори шкіри, клубочкоподібні тільця Мейсснера і тільця Пачіні. Частотний діапазон вібраційної чутливості тілець Мейсснера становить 2–40 Гц, а гранична амплітуда — 35–100 мкм. Механорецептори підсилюють процеси, які перебігають у тканинах, і перетворюють їх на енергію, котра значно перевершує таку діючого вібраційного чинника. Імпульси від віброрецепторів передаються в центральну нервову систему (ЦНС) через задні стовпи спинного мозку. Аферентні потоки, що виникли після подразнення механорецепторів, формують локальні, сегментарні, генералізовані реакції організму [8, 9].

Механічні коливання частотою понад 50 Гц відповідають за вибіркове подразнення механорецепторів, судин, вегетативних нервових провідників, що приводить до розширення судин м'язового типу, посилення локального кровотоку та лімфовідтоку, сприяє зниженню тону м'язів і активації трофічних процесів в інших тканинах.

Одним із головних впливів лікувальної дії вібрацій є знеболювальний. Механізм його обумовлений адаптацією організму у зв'язку з розвитком у ЦНС явищ гальмування. Слабкі вібраційні подразнення призводять до звуження судин, сильні — до розширення. За низьких частот механічних коливань виникає атонія судин, за високих (100–200 Гц) — спазм.

Механічні коливання в частотах передаються в ЦНС і реалізуються на периферії у вигляді короткочасних скорочень м'язів. Вібрація діє по всьому їхньому обсягу, відбувається значне збільшення скорочувальної здатності м'язів, посилюється обмін речовин без накопичення молочної кислоти, що дозволяє швидко відновлювати м'язи після фізичного навантаження та травм.

Вібрація сприяє релаксації та посиленню розтягнення м'язів, підвищує еластичність зв'язок і сухожилків, збільшує рухомість у суглобово-зв'язковому апараті, нормалізує трофічні процеси, сприяючи повноцінному виробленню синовіальної рідини [2, 10].

Контрактури, які формуються внаслідок іммобілізації відповідають на низькочастотну вібрацію, яка прикладена безпосередньо до ураженого суглоба. Позитивний вплив низькочастотних коливань на збільшення амплітуди рухів у суглобах відмічений дослідниками, але без комплексного вивчення [2, 10]. Дослідження щодо впливу низькочастотної локальної вібрації на суглоби проведені радянським дослідником В. Т. Назаровим. Ним створено низку приладів локального низькочастотного вібраційного впливу для збільшення обсягу рухів у спортсменів і танцюристів, а згодом обґрунтовано лікувальний вплив вібрації на uszkodжені суглоби та періартикулярні тканини [11, 12]. На жаль, доведена ефективність локальної вібрації не знайшла широкого застосування в медичній реабілітації.

Зміни у тканинах, прилеглих до суглоба, починаються з блокування нервових рухових імпульсів, які поступово зменшують і з часом вимикають функцію скорочення м'язів. На думку М. І. Аринчина [13], м'язи виконують не лише функцію підтримки та руху, а й відіграють значну роль у кровообігу, забезпечують так звану функцію «периферичного серця». Зменшення постачання поживних речовин до тканин суглоба та втрата живлення м'язів через уповільнення кровообігу призводить до їхньої перебудови — атрофії, фібротизації, деформації та дегенерації хряща.

Завдання реабілітації полягає в перезавантаженні процесів відновлення рухливості суглобів. Його реалізація починається саме з відновлення живлення, тобто кровообігу в м'язах кінцівки, і залучення до процесу тканини суглоба. Звісно, це — тривала робота, бо відновлення не відбувається швидко.

Отже, якщо зміни в суглобах кінцівок починаються з уповільнення кровообігу, варто припустити, що відновлення залежить від повноцінного кровопостачання. Важливу роль у роботі судин кінцівок відіграє скорочення м'язів. Відомо, що імпульси, передані від ЦНС до м'язів руховими нервами, призводять до скорочення м'язів. Пропріорецептори відповідають за зворотний сигнал від м'яза до ЦНС. Рецептори, які відповідають на механічний подразник, називають механорецепторами. Вони наявні в сухожилках,

фасціях м'язів, суглобових сумках і в усіх органах. У разі деформації цих нервових кінчиків виникає подразнення нервів і біопотенціал від них направляється в ЦНС. Чутливість рецепторів дуже висока, вони реагують на механічні зміщення тканин у 10–11 м (розмір атома водню), за зміщення 10–6 м у них виникає генераторний потенціал [8, 9].

За законом подразнення Дюбуа-Реймона (акомодації), подразнююча дія залежить не лише від абсолютної величини сили постійного току чи його густини, а більше — від швидкості наростання його з плином часу. Під повільно збільшуваною дією подразника збудження не виникає через пристосувальну реакцію тканини. Таке явище отримало назву акомодації [14, 15]. І хоча закон Дюбуа-Реймона стосується подразнення тканин електричним струмом, спробуємо його віднести до механічних коливань, а саме до вібраційного впливу. Із деяким припущенням можна вважати, що для механорецепторів вібрація є дуже сильним подразником, оскільки напрямок механічної деформації при цьому швидко змінюється. Але є й обмеження швидкості зміни чинника збудження — вона не має бути надто великою, щоб рецептори реагували на такі подразнення. Для механорецепторів частота чутливості лежить у межах 10–104 Гц (рис. 1).

Слід зауважити, що частоти й амплітуди, оптимальні для подразнення механорецепторів, вищі, ніж для здійснення кровонасосної функції м'язів. Для визначення оптимального вібраційного впливу для її запуску розглянемо деякі положення роботи м'язів.

Скелетні (посмуговані) м'язи являють собою пучки м'язових волокон, які складаються з міосимпластів і міосателітоцитів. У цитоплазмі міосимпластів містяться міофібрили, які складаються з актинових і міозинових міофіламентів (скорочувальні білки актин та міозин). У фібрилі ці білки частково взаємно проникають у простір один одного і під час скорочення м'язів нитки актину ковзають між нитками міозину, під час розслаблення відбувається зворотна картина.

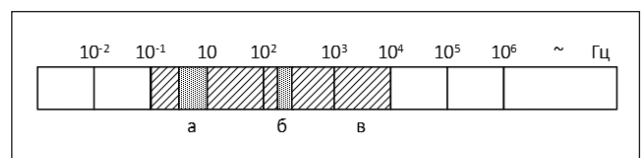


Рис. 1. Ділянка спектра чутливості механорецепторів до механічних коливань: а–в — межі чутливості, а — найефективніші частоти, резонансні для органів та організму людини; б — резонансні частоти для білків і клітин; в — прибілизний спектр частот, на який відповідає механорецептор

Енергія для такого відносного переміщення ниток білків надходить переважно від розщеплення на складові частини аденозинтрифосфорної кислоти (АТФ). Потім АТФ завдяки серії хімічних перетворень знову відновлюється й актин-міозинний білковий комплекс знову готовий до скорочення. Під впливом зовнішніх чинників, зокрема, вібрації, ферментативна активність змінюється. Актинміозин чутливий до вібрацій переважно у діапазоні 10–500 Гц. Його ферментативна активність виражено знижується за частот 25, 100, 200 і 300 Гц. Максимальне пригнічення активності актин-міозинового комплексу спостерігається внаслідок дії вібрації протягом 30 хв, коли зникає до 90 % ферментативної активності. Але ці зміни легко оборотні впродовж 5–30 хв. Отже, вібростимуляція буде корисною, якщо її тривалість не перевищуватиме означений час.

Таким чином, вібраційний вплив, який діє вздовж м'язового волокна подразнює механорецептори, що обумовлює скорочення м'язових волокон. Це, у свою чергу, впливає на розташовані в м'язах судини та запускає процес прокачування крові. Із відновленням кровообігу поступово відновлюється й живлення тканин. Чим більше судин, у тому числі дрібних, задіяно в процес кровообігу, тим швидше буде відбуватися відновлення.

Одним із доказів доцільності використання локальної низькочастотної вібрації для розробки іммобілізаційного обмеження рухомості суглобів є гіпотеза, яку висунув та розвив М. І. Аринчин [13].

У результаті вивчення функції водно-ліпідно-білкового комплексу клітин крові доведено зростання активності залежних від кисню реакцій під впливом низькочастотної вібрації. Тобто, на клітинному рівні визначено, що низькочастотна вібрація має позитивний вплив на активізацію енергетичного обміну між цитоплазмою та зовнішнім середовищем клітини [16–18]. Тому можна передбачити, що активізація киснезалежних процесів у клітинах і, відповідно, у тканинах, прискорює процеси загоєння. Більш того, додаткове надходження кисню, прискорює запуск окислювально-відновних реакцій обміну речовин, енергії та нервової діяльності.

К. Е. Games і співавт. [2] у результаті проведеного метааналізу виявили збільшення периферичного кровотоку внаслідок низькочастотної вібрації всього тіла, але без помітних ознак оксигенації м'язів. Можна передбачити, що відновлення повноцінного кровообігу забезпечує повне залучення кисню, який надходить у тканин під час вібраційної терапії, у біохімічні процеси.

Схематично описаний процес наведений на рис. 2.

Відомо, що тривала іммобілізація чи обмеження рухомості кінцівки призводить до зменшення сили м'язів, а згодом до атрофії, відбувається поступове розсмоктування її тканин, аж до повного відмирання кінцівок. І це на фоні збереження цілісності судин і нормальної роботи серця. Це, імовірно, пояснює дуже болісну перебудову організму після ампутації кінцівок. Адже вважалося, що кінцівки — це лише органи опори та пересування. Тому після загоєння кукси й усунення психічної травми можна було б очікувати полегшення в діяльності серця та кращого кровопостачання інших органів. Насправді виявляється навпаки. Організм болісно перебудовує свої функції ще кілька років [19]. Отже кожен м'яз є не лише органом руху, а й бере активну участь у забезпеченні кровопостачання певної ділянки системи та життєдіяльності організму загалом.

Якщо вплив низькочастотної вібрації на м'язи та кровоносну систему вивчено та його ефективність доведена в експериментальних дослідженнях, то лікувальна дія вібрації на кісткову, сполучну та хрящову тканини майже не досліджена. Це пояснюється тим, що зміни в зазначених тканинах відбуваються повільніше, ніж у м'язах і кровоносних судинах, тому вивчення процесу потребує тривалих спостережень.

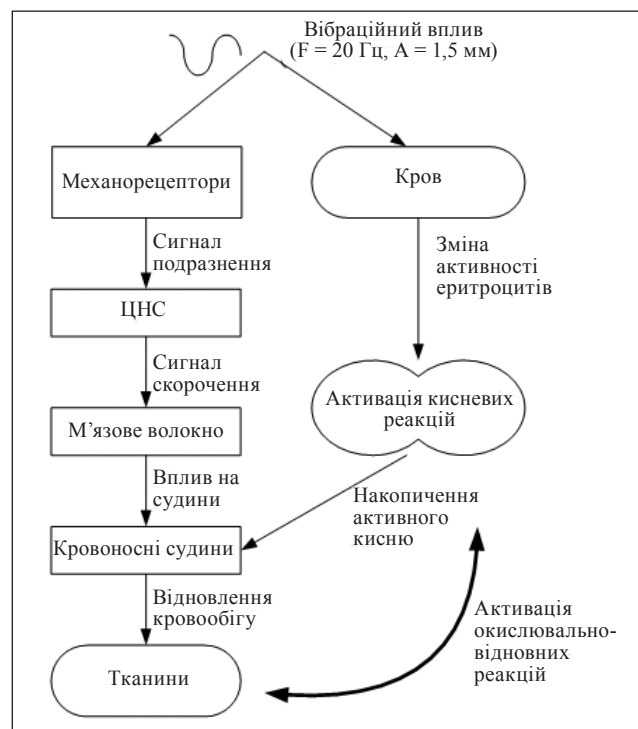


Рис. 2. Вплив вібрації на м'язи та кровоносну систему

Останніми роками популярним лікувальним і профілактичним способом стимуляції м'язового тону, енергетичних і нервових процесів в організмі стала вібрація всього тіла (WBV — whole-body vibration) [20]. Оцінці ефективності цього методу присвячено доволі багато досліджень, у тому числі метааналізів спеціалізованої літератури. Спробуємо використати цю інформацію для оцінювання впливу локальної низькочастотної вібрації на суглоби без залучення всього тіла.

Дослідження показали, що WBV має позитивний вплив на протидію втрати кісткової маси, пов'язаній із віком і спричиненій низькою руховою активністю [21, 22], може стримувати резорбцію кісток, сприяти кісткоутворенню, збільшувати кількість кісткової лужної фосфатази та посилювати м'язову силу [23, 24].

Ще одним позитивним впливом низькочастотної вібрації є профілактика остеопорозу [25, 26]. Слід відмітити, що саме остеопоротичні зміни є фактором ризику переломів кісток у людей похилого віку. Тому вібраційний вплив може бути не лише способом реабілітації іммобілізованого внаслідок травми суглоба, а й профілактикою причини перелому — остеопорозу. К. Pichler і співавт. [27] висловили гіпотезу, що за допомогою механічної стимуляції через зміну активності рецепторів моделювання/ремоделювання кістки можна пригнічувати її руйнування, тобто, механічна стимуляція може збільшувати формування кісткової тканини та запобігати переломам остеопоротичної кістки. Але ці дослідження поки що мають експериментальну цінність, яка має бути підтверджена в клінічних умовах.

Стосовно впливу низькочастотної вібрації на хрящ матеріалу обмаль. Зазвичай, фахівці вивчають стан периферичних тканин суглоба, руйнування суглобового хряща, а не його репарацію. Спробуємо з'ясувати процеси, які відбуваються в суглобовому хрящі під дією локальних низькочастотних коливань. Якщо напрямок вібраційного впливу буде прикладений уздовж кінцівки, наприклад, на п'ятку під час розробляння колінного суглоба, або на зону променево-зап'ясткового в стані повного розгинання за розробляння ліктьового, можна припустити, що коливання відбуватимуться в порожнині суглоба, при цьому спостерігатиметься мікропереміщення суглобових кінців кісток. Таким чином, розпочнуться рухові процеси в суглобі, але, на відміну від звичайних рухів із значною амплітудою, мікропереміщення не руйнуватимуть поверхню хряща, а лише запустять відновні процеси в ньому.

Подразнення механорецепторів і, відповідно, повздовжнє проходження механічних коливань викликатимуть скорочення м'язів, здавлювання ними судин і, відповідно, збільшення току крові. Це забезпечить винос продуктів метаболізму хряща та надходження поживних речовин, причому порціонно з достатньо високою для суглоба частотою. Притік крові до суглоба спровокує підвищення температури тканин, що, у свою чергу, через роботу терморекторів збільшить скорочення м'язів і, відповідно, кровопостачання.

Механічна хвиля, проходячи вздовж кістки та натикаючись на різні структури, переломлюється та змінює швидкість (рис. 3). Якась частка повертається та багаторазово відбивається у межах середовища. Ураховуючи, що полоса хвиль широка, у суглобі утворюється значна зона мікровібрацій, які діють у різних напрямках, стимулюючи порожнину суглоба та всю глибину хряща. Період коливання хвилі за частоти 20 Гц становить 0,05 с, отже через кожні 0,05 с посилається новий імпульс, а через те, що швидкість розповсюдження вібраційної хвилі в різних структурах кінцівки дуже відрізняється (кістка ~ 3300 м/с, шкіра ~ 1610 м/с, хрящ ~ 1510 м/с, синовіальна рідина ~ 1510 м/с, кров ~ 1600 м/с [28]), у різних тканинах утворюються окремі ділянки вібраційних коливань із різною густиною покриття. Репарація хряща посилюється за умов дії періодичних навантажень [29, 30], мікроколивання не приводять до його руйнування, а навпаки, періодичний м'який вплив може сприяти його відновленню. Проте повне відновлення може відбутися лише у разі нетривалих термінів знерухомилення, поки не відбулися незворотні зміни.

Таким чином, ми визначили основні позитивні механізми локальної низькочастотної вібрації на відновлення суглобів після іммобілізації. Цікавий експеримент проведений на щурах С. Zhang і співавт. [31].

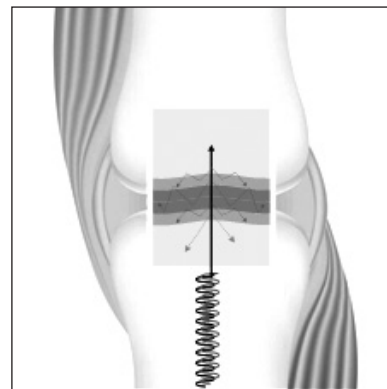


Рис. 3. Поширення механічної хвилі через суглоб

Метою дослідження було вивчення впливу вібрації на рефлекс розтягування та кількісний зв'язок між динамічними реакціями м'язів та низькочастотними вібраціями — 2–16 Гц. Визначено, що м'язова сила в стані «з рефлексом розтягування» була значно більшою, ніж без нього, причому різниця зростала з частотою вібраційного впливу.

Аналогічних робіт ми не знайшли, але на підставі цього дослідження можна передбачити, що введення елементів фізичних вправ, а саме розгинання та згинання під час вібраційної терапії зможе покращити стан суглоба. Постізометрична релаксація (ПР) є відомим способом малотравматичного розроблення суглобів. У цьому випадку працюватимуть не лише механічні вправи ПР, а й зміна напрямку вібраційного впливу, залучаючи в процес збудження все більший обсяг тканин. Більш того, помічено, що низькочастотна вібрація зменшує больовий синдром [32], тому під час ПР можна виконати більший обсяг рухів згинання/розгинання, ніж без вібрації.

Ми розглянули вплив низькочастотної вібрації на м'язи, кровоносну систему та суглоби. Спробуємо об'єднати в одне ціле викладені вище висновки (рис. 4).

Не будемо повторювати весь механізм впливу вібрації на структурні елементи кінцівок і суглобів, це описано вище, зупинимось на головних аспектах.

Отже, прикладена до кінцівки вібрація подразнює механорецептори, які подають сигнал до ЦНС і вже завдяки мотонейронам відбувається скорочення м'язів. Воно впливає на периферичний кровоток. Одночасно коливання діють на накопичення кисню в крові, що разом зі збільшеним

кровообігом запускає окислювально-відновні процеси в тканинах. Тобто, відбувається насичення тканин киснем, виведення продуктів метаболізму тощо.

Вплив вібрації на тканини суглобів полягає у відновленні мікропереміщень, що сприяє живленню хряща, а також обміну речовин синовіальної рідини суглоба з плазмою крові через синовіальну оболонку. Синовіальна болонка насичена кровоносними судинами та нервовими закінченнями, отже, через механорецептори відповідає на вібраційне подразнення скороченням і активацією кровообігу. У такий спосіб відбувається насичення вологою хряща, відновлення його поверхні, нормалізується здатність синовіальної рідини забезпечувати живлення.

Відновлення живлення періартикулярних тканин суглоба веде до їхньої регенерації, скорочення м'язів через мотонейрони дає поштовх до поступового збільшення їхньої рухової активності та сили, відновлення живлення та поверхні хряща — до активізації рухомості. Сукупність означених змін сприяє відновленню рухомості суглоба.

Звісно, що за тривалого знерухомлення кінцівок, коли виникли тканинні перетворення у вигляді окостеніння хряща, атрофія м'язів, перебудова судин, надії на повне відновлення рухомості мало. Більш того, цей процес як за допомогою вібрації, так і за використання інших фізіотерапевтичних методів потребує більше часу, ніж триває іммобілізація, і ця різниця зростає зі збільшенням часу знерухомлення.

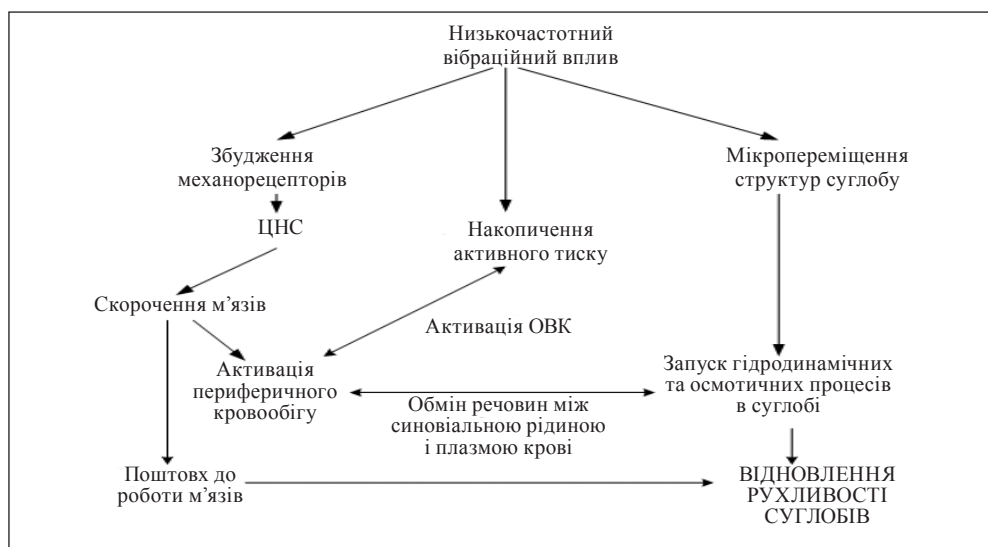


Рис. 4. Концептуальна модель впливу вібрації на кровоносні, суглобові та періартикулярні тканини

У цьому випадку логічно припустити, що для прискорення відновлення треба пригальмувати перебудову тканин суглоба в період іммобілізації. Якщо не можна завдавати зайвих навантажень на кінцівку та виконувати фізичні вправи згинання/розгинання, то можливо хоча б зберегти живлення хряща суглоба, кровообіг м'язів і прилеглих тканин. На сьогодні для цього використовують контрастні ванни чи пов'язки для забезпечення кровотоку, рекомендують виконувати рухи пальцями.

Можна припустити, що локальний низькочастотний вплив на іммобілізовану кінцівку також може привести до збереження, хоча й обмеженого, кровообігу та живлення хряща. Звісно, вплив має бути нетривалим, не викликати болю, коливання не слід прикладати до металевих конструкцій. Виконувати слід обов'язково під пильним контролем лікаря.

Висновки

Створена концептуальна модель впливу низькочастотної вібрації на суглоби з обмеженням рухомості внаслідок іммобілізації враховує зміни тканин суглоба під її дією. Концепція передбачає відновлення живлення прилеглих до нього тканин і м'язів. Саме вібрація завдяки можливості передаванню енергії коливання між тканинами дає змогу ввімкнути процеси скорочення м'язів, які посилюють кровопостачання й обмін речовин суглоба.

Використання моделі дозволить розробити систему лікувальних заходів щодо профілактики розвитку контрактур.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури

1. Wang L. Research advances in pathomechanism and treatment of joint contracture / L. Wang, Z. S. Jia, L. N. Zhang L. N. // *Zhongguo Gu Shang*. — 2020. — Vol. 33 (8). — P. 788–792. — DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2020.08.020. (in Chinese)
2. Games K. E. Whole-body vibration and blood flow and muscle oxygenation: a meta-analysis / K. E. Games, J. E. M. Sefton, A. E. Wilson // *Journal of athletic training*. — 2015. — Vol. 50 (5). — P. 542–549. — DOI: 10.4085/1062-6050-50.2.09.
3. Effect of higher frequency components and duration of vibration on bone tissue alterations in the rat-tail model / S. V. Peelukhana, S. Goenka, B. Kim [et al.] // *Industrial health*. — 2015. — Vol. 53 (3). — P. 245–259. — DOI: 10.2486/indhealth.2014-0117.
4. The knee smartphone-application goniometer is a more reliable tool than the standard goniometer in acute orthopaedic settings / S.-C. Tseng, R. K. Shields, L. Pereira [et al.] // *Physiotherapy*. — 2015. — Vol. 101. — P. e1192–e1193. — DOI: 10.1016/j.physio.2015.03.2117.
5. Conceptual model of the process of formation of immobilization contractures / O. A. Tyazhelov, A. M. Khasawneh Ayham, O. D. Karpinska [et al.] // *Orthopaedics, traumatology and prosthetics*. — 2022. — No. 3–4. — P. 53–61. — DOI: 10.15674/0030-598720223-452-61. (in Ukrainian and English)
6. Effects of localized vibration on knee joint position sense in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction / T. Nagai, N. A. Bates, T. E. Hewett, N. D. Schilaty // *Clinical biomechanics* (Bristol, Avon). — 2018. — Vol. 55. — P. 40–44. — DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2018.04.011.
7. Musculoskeletal response of dystrophic mice to short term, low intensity, high frequency vibration / S. A. Novotny, M. D. Eckhoff, B. C. Eby [et al.] // *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*. — 2013. — Vol. 13 (4). — P. 418–429.
8. Does vibration benefit delayed-onset muscle soreness? A meta-analysis and systematic review / X. Lu, Y. Wang, J. Lu [et al.] // *The Journal of international medical research*. — 2019. — Vol. 47 (1). — P. 3–18. — DOI: 10.1177/0300060518814999.
9. Local vibration stimuli induce mechanical stress-induced factors and facilitate recovery from immobilization-induced oxidative myofiber atrophy in rats / F. Usuki, M. Fujimura, A. Nakamura [et al.] // *Frontiers in physiology*. — 2019. — Vol. 10. — Article ID: 759. — DOI: 10.3389/fphys.2019.00759.
10. Whole body vibration exercise training for fibromyalgia / J. Bidonde, A. J. Busch, I. Spuy [et al.] // *Cochrane database of systematic reviews*. — 2017. — Vol. 9(9). — Article ID: CD011755. — DOI: 10.1002/14651858.CD011755.pub2
11. Nazarov V. T. Biomechanical stimulation: reality and hopes [Biomekhanicheskaya stimulyatsiya: yav' i nadezhdy] / V. T. Nazarov. — Minsk : Polymya, 1986. — 95 p.
12. Nazarov V. T. Human optimization [Optimizatsiya cheloveka] / V. T. Nazarov. — Riga: Nazarov Stimulation Institute, 1997. (in russian)
13. Arinchin N. I. Micropumping activity of skeletal muscles during their stretching [Mikronasosnaya deyatelnost' skeletnykh myshts pri ikh rastyazhenii] / N. I. Arinchin, G. F. Borisevich. — Minsk : Science and technology, 1986. — 112 p. (in russian)
14. Human Physiology: An Integrated Approach. — 7th Edition. — Pearson, 2015. — 960 p.
15. Finkelstein G. Mechanical neuroscience: Emil du Bois-Reymond's innovations in theory and practice / G. Finkelstein // *Frontiers in systems neuroscience*. — 2105. — Vol. 9. — Article ID: 133. — DOI: 10.3389/fnsys.2015.00133.
16. Dotsenko O. I. Study of the effect of low-frequency vibration on the activity of erythrocyte glutathione peroxidase [Izucheniye vliyaniya nizkochastotnoy vibratsii na aktivnost' glutation-peroksidazy eritrotsitov] / O. I. Dotsenko, V. O. Tkachenko // *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Biology"*. — 2010. — Vol. 11 (905). — P. 166–172. (in russian)
17. Pollack W. H. Cells, gels, and the engines of life / W. A. Pollack. — Seattle USA : Ebner & Sons, 2001. — 305 p.
18. Vogler E. A. Structure and reactivity of water at biomaterial surfaces / E. A. Vogler // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 1998. — Vol. 74. — P. 69–117. — DOI: 10.1016/S0001-8686(97)00040-7.
19. Hansen-Leth Chr. Investigations of the vascular changes following amputation on rabbits / Chr. Hansen-Leth // *Acta Orthopaedica Scandinavica*. — 1982. — Vol. 53 (197). — P. 7–89. — DOI: 10.3109/17453678209155628.
20. Musumeci G. The use of vibration as physical exercise and therapy / G. Musumeci // *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. — 2017. — Vol. 2 (2). — Article ID: 17. — DOI: 10.3390/jfmk2020017.
21. Whole-body vibration effects on bone before and after hind-limb unloading in rats / P. Yang, B. Jia, C. Ding [et al.] // *Aviation, space, and environmental medicine*. — 2009. — Vol. 80 (2). — P. 88–93. — DOI: 10.3357/asem.2368.2009.
22. Lynch M. A. Skeletal effects of whole-body vibration in adult and aged mice / M. A. Lynch, M. D. Brodt, M. J. Silva // *Journal of orthopaedic research*. — 2010. — Vol. 28 (2). —

- P. 241–247. — DOI: 10.1002/jor.20965.
23. Effects of whole body vibration on the skeleton and other organ systems in man and animal models: what we know and what we need to know / R. D. Prisby, M. H. Lafage-Proust, L. Malaval [et al.] // *Ageing research reviews*. — 2008. — Vol. 7 (4). — P. 319–329. — DOI: 10.1016/j.arr.2008.07.004.
 24. Low-level mechanical vibrations can influence bone resorption and bone formation in the growing skeleton / L. Xie, J. M. Jacobson, E. S. Choi [et al.] // *Bone*. — 2006. — Vol. 39 (5). — P. 1059–1066. — DOI: 10.1016/j.bone.2006.05.012.
 25. Oxygen uptake in whole-body vibration exercise: influence of vibration frequency, amplitude, and external load / J. Rittweger, J. Ehrig, K. Just [et al.] // *International journal of sports medicine*. — 2002. — Vol. 23 (6). — P. 428–432. — DOI: 10.1055/s-2002-33739.
 26. Whole-body vibration therapy for osteoporosis: state of the science / A. Wysocki, M. Butler, T. Shamliyan, R. L. Kane // *Annals of internal medicine*. — 2011. — Vol. 155 (10). — P. 680–686. — Article ID: W206-13. — DOI: .
 27. RANKL is downregulated in bone cells by physical activity (treadmill and vibration stimulation training) in rat with glucocorticoid-induced osteoporosis / K. Pichler, C. Loreto, R. Leonardi [et al.] // *Histology and histopathology*. — 2013. — Vol. 28 (9). — P. 1185–1196. — DOI: 10.14670/HH-28.1185.
 28. Berezovsky V. A. Biophysical characteristics of human tissues [Biofizicheskiye kharakteristiki tkaney cheloveka] : Handbook / V. A. Berezovsky, N. N. Kolotilov. — Kyiv : Naukova dumka, 1990. — P. 224 p. (in russian)
 29. Nature of imperfect elasticity of articular cartilage / S. M. Elmore, L. Sokoloff, G. Norris, P. Carmeci // *The Journal of Applied Physiology*. — 1963. — Vol. 18. — P. 393–396. — DOI: 10.1152/jappl.1963.18.2.393.
 30. McCutchen C. W. The frictional properties of animal joints / C. W. McCutchen // *Wear*. — 1962. — Vol. 5. — P. 1–17. — DOI: 10.9783/9781512807004-012.
 31. Effect of Low-Frequency Vibration on Muscle Response under Different Neurointact Conditions / C. Zhang, W. Wang, D. Anderson [et al.] // *Applied bionics and biomechanics*. — 2019. — Vol. 2019. — Article ID: 1971045. — DOI: 10.1155/2019/1971045.
 32. Butler D. Explain Pain Spiral-bound / D. Butler, L. Moseley. — 2-nd edition. — C/NOI Group, 2013. — 130 p.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2023

CONCEPTUAL MODEL OF THE INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY VIBRATION ON THE PROCESS OF RESTORATION OF JOINT MOBILITY AFTER IMMOBILIZATION

O. A. Tyazhelov ¹, A. A. M. Khasawneh ², O. D. Karpinska ¹, M. Yu. Karpinsky ¹, M. Z. Bitsadze ¹

¹ Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv

² National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya. Ukraine

✉ Olexiy Tyazhelov, MD, Prof. in Orthopaedics and Traumatology: alzhar3001@gmail.com

✉ Ayham Adli Mohammad Khasawneh, MD: dr.aiham.k@gmail.com

✉ Olena Karpinska: helen.karpinska@gmail.com

✉ Mykhaylo Karpinsky: korab.karpinsky9@gmail.com

✉ Marianna Bitsadze, MD, PhD in Orthopaedics and Traumatology: bitsadze.marianna@gmail.com