

ФІЗІОЛОГІЧНІ ТА БІОМЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ ГЕМО- ТА ЛІМФОДИНАМІКИ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК ТАНЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ОБЕРТОВИХ РУХІВ (НА ПРИКЛАДІ TOURS CHAÎNÉS)

¹Національний університет фізичного виховання і спорту України (м. Київ, Україна)

²Національний університет оборони України (м. Київ, Україна)

³МЦРХМ Українська академія балету (м. Київ, Україна)

s.babak.s.1234@gmail.com

У статті теоретично обґрунтовано та змодельовано фізіологічні й біомеханічні особливості гемо- та лімфодинаміки в дистальних відділах верхніх кінцівок танцівників під час виконання швидких обертових рухів шене (*tours chaînés*). На основі фундаментальних праць з біомеханіки та авіаційної медицини розкрито фізіологічний механізм впливу відцентрового прискорення на виникнення градієнта трансмурального й гідростатичного тиску, що зумовлює перерозподіл крові та лімфи від центральної осі обертання до периферії. Проведено системно-структурний аналіз 8 варіантів положень верхніх кінцівок (*arrondi*, *allongé*, I, II, III позиції, підготовче положення та руки на талії). Встановлено, що геометрія рук та їхня просторова орієнтація відносно рівня серця є визначальними чинниками локального крово- та лімфообігу і перфузії тканин. Положення *arrondi* завдяки зменшеному радіусу та суглобовим вигинам мінімізує гідродинамічний напір і стимулює «м'язову помпу». Положення *allongé* максимізує відцентрову силу й фасціальний натяг, спричиняючи венозний застій, ішемізацію або гіперемію пальців. Підйом рук вище рівня серця створює гравітаційний градієнт, який нівелює відцентровий вектор і запобігає транссудації та набрякам, тоді як опущення рук максимально перевантажує судинне русло. Фіксація рук на талії забезпечує стабільний дренаж, але статичний згин загрожує локальною компресією судинно-нервових пучків. Описано молекулярно-рефлекторні компенсаторні механізми адаптації мікроциркуляторного русла. Захист судин від гідродинамічного удару базується на механотрансдукції: розтягнення мембран відкриває механочутливі канали Piezo1 та SACs, запускаючи Ca²⁺-залежне скорочення гладком'язових клітин, міогенну вазоконстрикцію (рефлекс Бейлісса) та вено-артеріальний аксон-рефлекс. Водночас виділення ендотеліального оксиду азоту (NO) викликає дозовану вазодилатацію, запобігаючи тривалій ішемії тканин під час обертальних навантажень.

Ключові слова: гемодинаміка, лімфодинаміка, біомеханіка танцю, шене (*tours chaînés*), відцентрова сила, трансмуральний тиск, мікроциркуляція, вазодилатація, механотрансдукція.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри медичної біології та спортивної дієтології Національного університету фізичного виховання і спорту України «Вплив фізичних навантажень і нутріціологічної підтримки на соматичний і психоемоційний стан цивільних осіб і ветеранів війни» (номер держаної реєстрації 0126U003866).

Вступ.

Танцювальне мистецтво, як і спорт, – пов'язані із досить складними та інтенсивними фізичними навантаженнями на організм людини. Хореографічне мистецтво висуває екстремальні вимоги до фізичної підготовки, координації та адаптаційних можливостей серцево-судинної системи виконавців [1–3]. В танці виконуються різноманітні рухи, що потребує розвитку сили, витривалості, гнучкості, швидкості. Танцюрист здійснює рухи – прямолінійні, обертові, рівномірні, з прискоренням та ін. [4–6]. Серед усього різноманіття хореографічних елементів особливе місце посідають швидкі обертові рухи, такі як шене (*tours chaînés*), фуєте (*fouettés*) та піруети (*pirouettes*). Під час їхнього виконання тіло танцівника перетворюється на неінерційну систему відліку, в якій на всі

органи та рідкі тканини починають діяти значні відцентрові сили (сили інерції) [4].

Обертові рухи потребують розвитку високого рівня роботи вестибулярного апарату. Сила обертання навколо вертикальної осі без просування і з просуванням у просторі поширюється на все тіло, викликаючи відносне зміщення і деформацію його частин. Зміщення та деформація залежать від діючої сили та швидкості: вони будуть тим значнішими, чим більша величина діючої сили та швидкості і чим менше зчеплення між частинами організму, тому у різних тканинах і органах вони будуть неоднаковими. Під впливом обертання найбільшому інерційному зміщенню і деформації піддаються рідкі тканини – кров та лімфа, оскільки вони володіють найменш міцними внутрішніми зв'язками. Цьому сприяє і велика еластичність судин. Під впливом довготривалих прискорень, спрямованих по ходу великих кровоносних судин, кров легко переміщається з однієї частини тіла в іншу.

Попри візуальну легкість та естетичність обертань, з погляду фізіології та біомеханіки цей процес супроводжується колосальним гідродинамічним навантаженням на судинне русло верхніх кінцівок. Залежно від позиції рук (*arrondi* чи *allongé*) та їхнього просторового розташування відносно рівня серця й осі обертання, судинна система передпліччя, кистей та

пальців зазнає суттєвих локальних змін. Дослідження гемо- та лімфодинаміки у верхніх кінцівках танцівників під час швидких обертань є маловивченою галуззю. Більшість наявних наукових праць описують загальний вплив хореографічного навантаження на організм, тоді як точні механізми адаптації судинного русла кисті до відцентрових сил та гравітаційних градієнтів залишаються поза увагою дослідників. Розуміння цих процесів є критично важливим для профілактики професійних патологій судин (таких як хронічний венозний застій, парестезії, мікроангіопатії), розроблення реабілітаційних прийомів для допомоги танцівнику, (зокрема, застосовувати різні рухи при масажі кисті), а також для оптимізації методики викладання хореографії [7–12].

Тема дослідження безпосередньо пов'язана з вивченням фізіологічних та біомеханічних закономірностей адаптації рухового апарату та судинної системи до специфічних фізичних навантажень. Робота виконана в контексті інтеграції законів фізики, біомеханіки класичного танцю та авіаційної медицини, що дає змогу екстраполювати фундаментальні дані про вплив перевантажень (g) на локальний крово- та лімфообіг верхніх кінцівок [13–18].

Мета дослідження.

Теоретично обґрунтувати та змодельовати фізіологічні і біомеханічні особливості гемо- та лімфодинаміки в кистях і пальцях танцівників під дією відцентрових сил та гравітаційних градієнтів під час виконання *tours chaînés* у різних положеннях верхніх кінцівок.

Об'єкт і методи дослідження.

Застосовано теоретичний аналіз фізіологічних і біомеханічних джерел (бази PubMed, Google Scholar та ін.), метод математичного та гідродинамічного моделювання фізичних сил (відцентрової сили, трансмурального й гідростатичного тиску) та системно-структурний аналіз 8-ми анатомо-біомеханічних позицій і конфігурацій рук у хореографії (*arrondi*, *allongé*, I, II, III позиції, підготовче положення, руки на талії).

Основна частина.

Гемо- та лімфодинаміку у пальцях кисті танцівників під час виконання оберткових рухів доцільно розглядати в контексті поєднання законів фізики, біомеханіки та фізіології. Під час виконання фуєте, піруетів, шене та інших складних оберткових рухів на тіло танцівника діють відцентрові сили.

Одним із найскладніших оберткових рухів у хореографії є шене (*Tours chaînés*, від фр. *chaînés* – «ланцюжок»). Це серія швидких, безперервних поворотів на двох ногах по прямій лінії або колу, де кожен крок на півпальцях становить рівно півоберт, утворюючи безперервний ланцюг руху [18, 19].

Якщо розглядати шене як приклад оберткового руху, то слід зазначити, що є різні варіанти виконання шене, зважаючи на позицію рук. Позиція впливає на перерозподіл рідких тканин в кистях. Основні положення рук – аронді та альонже.

Аронді (*Arrondi*) – округлий; положення рук, де руки утворюють овальну або округлу лінію. Альонже (*Allongé*) – видовжений; положення рук, за якого руки утворюють пряму лінію від плеча до кінчиків витягнутих пальців (долоня «пласка» і направлена вниз) [18, 19].

З огляду на це, даємо опис таких варіантів шене з різною позицією рук:

1. Перша класична позиція рук, положення рук *arrondi*.

2. Перша сучасна позиція рук, положення рук *allongé*.

3. Друга класична позиція рук, положення рук *arrondi*.

4. Друга класична / сучасна позиція рук, положення рук *allongé*.

5. Третя класична позиція рук, положення рук *arrondi*.

6. Третя класична позиція рук, положення рук *allongé*.

7. Підготовче положення рук у сучасному танці, положення рук *allongé*.

8. Руки на талії (положення рук у танці) [18, 19].

Стосовно шене з різними позиціями рук, наукових досліджень практично немає. Проте на основі відомих фізичних законів і формул (відцентрова сила, гідростатичний тиск), описаних фізіологічних механізмів (зокрема, міогенна реакція Бейлісса, закон Старлінга) та молекулярних процесів, а також на основі анатомічних знань (будова, топографія та функціонування серцево-судинної системи, особливості стінок артерій, вен і лімфатичних судин, робота клапанного апарату, напрямок руху крові і лімфи тощо) та анатомічного опису позицій класичного танцю (*arrondi*, *allongé*) можна аналітично спрогнозувати реакції судин і перерозподіл крові та лімфи в кистях під час оберткових рухів залежно від роботи м'язів, натягу фасцій і положення верхніх кінцівок [20, 21, 10, 22, 17, 23, 6, 24–27].

Для розуміння процесів, що відбуваються при оберткових рухах у кистях танцівників потрібно знати, які структури верхньої кінцівки та які фізіологічні і біохімічні механізми задіяні в цьому процесі. Згідно із законами фізики при оберткових рухах найбільше реагують, деформуються рідкі тканини – кров та лімфа, а їхні гідродинамічні зміни корегують стан стінок кровоносних та лімфатичних судин. Анатомічна структура верхньої кінцівки включає артерії, вени, анастомози, колатералі, гемомікроциркуляторне русло, лімфатичні капіляри, мережі та судини [23]. Великі артерії верхньої кінцівки – плечова артерія (живить плече), ліктьова артерія (живить медіальну частину передпліччя і кисті), променева артерія (живить латеральну частину передпліччя і кисті). Променева та ліктьова артерії на долонній поверхні кисті об'єднуються в глибоку та поверхневу долонні дуги. Від них відходять п'ясткові та загальні пальцеві артерії, які анастомозують між собою і продовжуються у пальці як власні долонні пальцеві артерії. Долонні дуги виконують три важливі функції: по-перше, вони створюють необхідний тиск для проштовхування крові до пальців; по-друге, забезпечують колатеральний (обхідний) кровотік на випадок оклюзії однієї з артерій; по-третє, амортизують і зменшують силу хвильового гідродинамічного удару в капілярне русло пальців під час обертання. В капілярнах гемомікроциркуляторного русла внаслідок дії відцентрової сили або опускання рук зростання гідростатичного тиску посилює фільтрацію рідкої фракції плазми в інтерстиціальний простір згідно із законом Старлінга для транскapілярного обміну [20, 28].

Венозна кров рухається поверхневими венами, які збирають кров зі шкіри і підшкірної клітковини та

глибокими венами, що супроводжують артерії і збирають кров з м'язів. Вени мають клапанний апарат, який запобігає зворотному руху рідини.

Лімфатична система верхньої кінцівки, зокрема кисті та передпліччя, відіграє критичну роль у дренажі міжклітинної рідини, імунному нагляді та транспорті високомолекулярних сполук. Лімфатичні капіляри долонної поверхні кисті утворюють досить щільну двошарову (поверхневу та глибоку) мережу. На тильній поверхні кисті: мережа капілярів менша, але досить рухлива та легко розтягується. Лімфокапілярні мережі передпліччя локалізовані в шкірі, підшкірній клітковині, фасціях, окісті та м'язах (сухожильно-м'язових з'єднаннях), вони утворюють суцільну тривимірну структуру. Лімфа з капілярів прямує до поверхневих і глибоких лімфатичних судин, які також оснащені клапанами. Переважна більшість глибоких та медіальних поверхневих судин прямує до ліктьової ямки, де частина переривається в ліктьових вузлах, а решта продовжує хід у складі плечового лімфатичного пучка напряму до пахвових лімфатичних вузлів. Лімфатична система не має власного центрального насоса (як серце для крові), тому просування лімфи від периферії (кисті та передпліччя) повністю залежить від роботи м'язової помпи, зміщення фасцій, клапанного апарату, зміни внутрішньотканинного тиску та відцентрової сили. При тривалій статичній ізометрії відсутність ритмічного скорочення/розслаблення м'язів ускладнює відтік [29–31].

Оскільки артеріальна кров рухається артеріями відцентрово (від серця до кисті та пальців), а венозна кров венами та лімфа лімфатичними судинами – доцентрово (до серця), рух рідин, швидкість розтягування судин, застійні явища та ступінь залучення клапанного апарату будуть суттєво відрізнятися в цих судинних колекторах під час обертання. У цьому



Рисунк 1 – Перша класична позиція рук, положення рук аронді (arrondi).

контексті позиція рук та швидкість обертання мають ключове значення [20, 29, 31].

Перша класична позиція рук, положення рук – *arrondi* (рис. 1). Руки зігнуті в ліктьових та променево-зап'ясткових суглобах, утворюючи округлу форму. Кисті знаходяться близько до осі обертання тіла. Руки трохи зігнуті і в плечових суглобах (рис. 1). Для такого положення рук характерним є збалансоване тонічне напруження м'язів-згиначів та розгиначів без гіперекстензії. Внутрішньосуглобові та міжм'язові фасціальні футляри перебувають у стабільному ізометричному тонусі. Під час обертання на верхні кінцівки діє відцентрова сила (сила інерції, яка виникає в неінерційній системі відліку, пов'язаній з тілом танцівника). Вона впливає на рідкі середовища (артеріальну та венозну кров, лімфу), спрямовуючи їх вздовж радіуса обертання – від центра до периферії, тоді як пружні стінки судин та натяг навколишніх тканин забезпечують доцентрове утримання [29, 31, 28].

Відцентрова сила розраховується за формулою:

$$F_{вц} = m\omega^2 r,$$

де $F_{вц}$ – відцентрова сила (Н), m – маса тіла (кг), ω – кутова швидкість обертання (рад/с), r – радіус колової траєкторії / відстань від осі обертання до тіла (м). Чисельно ця сила інерції врівноважується доцентровою реакцією стінок судин та тканин ($F_{дц}$): $F_{дц} = -m\omega^2 r$.

Округла форма верхніх кінцівок положення рук *arrondi* має менший радіус для дії відцентрової сили, ніж при випрямленому положенні верхньої кінцівки (положення *allongé*), що зменшує вектор відцентрового прискорення на кисті та мінімізує гідродинамічне перевантаження.

Положення рук *arrondi* забезпечується ізометричним скороченням м'язів. Лімфатичні та венозні судини мають клапани, які задіюються у роботі клапанно-м'язового насосу, що проштовхує венозну кров та лімфу доцентрово. М'які вигини в суглобах запобігають механічному перетисканню лімфатичних та венозних судин. Завдяки округлій формі та м'якому тонусу м'язів венозний відтік крові через глибокі та поверхневі вени передпліччя відбувається вільніше.

Анатомічні вигини в суглобах запобігають натягу фасціально-судинних пучків, тому у мережах підтримується помірний внутрішньотканинний тиск, що сприяє активному збору міжклітинної рідини. У поверхневих судинах передпліччя відбувається рівномірний відтік лімфи без механічних перешкод, а в глибоких судинах просуванню рідини сприяє помірною компресія м'язами-згиначами й розгиначами (робота м'язової помпи) [30].

Перша сучасна позиція рук, положення рук – *allongé*. Лікті та кисті максимально витягнуті вперед/вбік (рис. 2). Радіус від осі обертання до кінчиків пальців більший, ніж при *arrondi*. Для утримання такого положення рук під час обертання потрібне тривале ізометричне напруження м'язів передпліччя, дельтоподібних м'язів та розгиначів кисті. У положенні *allongé* через більший радіус (r) відцентрова сила ($F_{вц}$), що спрямована до дистальних відділів (долонь та фаланг пальців), є вищою, порівняно із положенням рук *arrondi*. Це створює додатковий гідростатичний тиск у судинному руслі кисті. Артеріальний тиск у положенні рук *arrondi* та *allongé* не є однаковим,

оскільки у положенні *allongé* розвивається вищий м'язовий тонус передпліччя, що створює певний додатковий опір притоку за рахунок помірного стиснення судин м'язовими футлярами. Артерії відкриті по всій довжині. Вони не можуть «перекрити» приплив крові механічно. Єдиним захисним механізмом артерій є м'язовий тонус їхніх стінок (міогенна реакція Бейлісса).

Щодо венозного відтоку, то в положенні рук *allongé* відцентрова сила «притискає» кров до кінчиків пальців і долонних вен, перешкоджаючи її природному відтоку до серця. Постійна ізометрична напруга м'язів передпліччя без фази розслаблення погіршує роботу «м'язової помпи». Внаслідок цього виникає тимчасовий венозний застій (венозна гіперемія) та зростає внутрішньосудинний тиск у венозних сітках кисті й пальців [29, 31].

Положення рук *allongé* подовжує кисть, випрямлення пальців та легка пронація/супінація передпліччя призводять до натягу долонного апоневрозу та поверхневої фасції передпліччя. При цьому натягується шкіра та фасції стінки підшкірних лімфокапілярів. Це відкриває міжклітинні ендотеліальні щілини в ендотелії лімфокапілярів, різко збільшуючи всмоктування міжклітинної рідини в капілярну мережу тилу та долоні. Натяг фасціальних футлярів створює градієнт тиску, який буквально витягує лімфу з капілярної мережі кисті у відповідні поверхневі судини. У поверхневих судинах спостерігається розтягнення судинних стінок і прискорення відтоку від тилу кисті, тоді як у глибоких судинах відтік визначається фасціальним натягом при зменшенні динамічної м'язової компресії.

При виконанні поворотів *tours chaînés* у II класичній позиції рук біомеханічні умови значно відрізняються від I позиції. Головна причина – збільшення радіуса обертання (r) до максимуму, оскільки плечі відведені в боки, а лікті розкриті під кутом приблизно $160\text{--}170^\circ$. При однаковій кутовій швидкості повороту (ω) відцентрова сила ($F_{\text{вц}}$), що діє на венозну кров та на лімфу всередині судин, збільшується пропорційно до радіусу (r). Виникає виражений вектор гідростатичного тиску, який спрямовує рідину від пахвової ділянки до кінчиків пальців [32, 29, 30, 31, 28].

Друга класична позиція з округлими кистями – *arrondi* (рис. 3). Руки розведені в боки, але збережено дугоподібний згин у ліктьовому суглобі, а кисть майже спрямована донизу/всередину. Радіус від осі обертання помірний. Кисті знаходяться приблизно на рівні плечей або дещо нижче плечового суглоба (на рівні грудей). Тонус м'язів-розгиначів та згиначів передпліччя – збалансований, відсутні гіперекстензії у суглобах. У положенні *arrondi* дугоподібний вигин у лікті та заокруглення кисті зменшують абсолютний радіус (r), а також створюють анатомічний «амортизаційний кут», що знижує прямолінійний напір рідини на судини кисті [29, 31].

Артеріальний потік крові у променевій та ліктьовій артеріях до поверхневої та глибокої долонних дуг залишається стабільним. Фізіологічне положення зап'ястя не здавлює судинно-нервові пучки в зап'ястковому каналі. Венозному відтоку до серця сприяє підтримання округлої кисті, що забезпечується тонічним скороченням м'язів. Венозний відтік покращений, особливо поверхневі вени. Незначне згинання

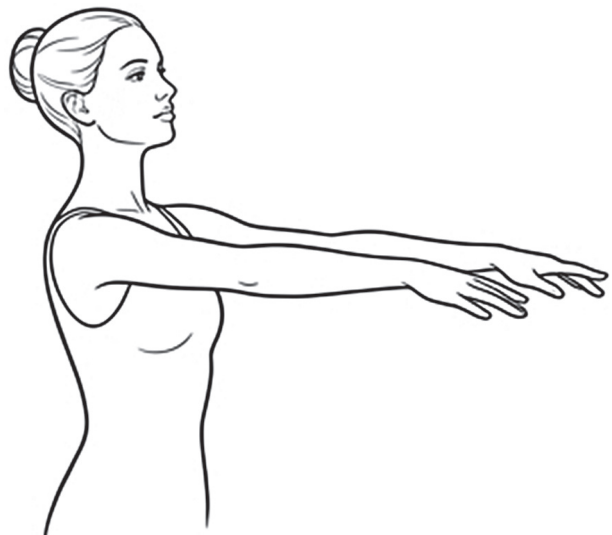


Рисунок 2 – Перша сучасна позиція рук, положення рук альонже (*allongé*).

пальців оптимізує циркуляції крові в гемомікроциркуляторному руслі пальців. Кровообіг при такому положенні кисті сприяє меншій втомлюваності м'язів і судин запобігає застою крові та нормалізує локальну температуру шкіри. Відцентрова сила помірна і не перевантажує клапанний апарат вен кисті та пальців.

Дугоподібна траєкторія судин та відсутність перенапруження фасцій сприяють ефективному забору інтерстиціальної рідини початковими лімфокапілярами та її просуванню до ліктьових і пахвових лімфатичних вузлів. Півмісяцеві клапани лімфатичних судин щільно змикаються, не допускаючи зворотного току лімфи до кисті. У лімфангіонах підвищується частота власного скорочення, як відповідь на розтягнення рідиною [30].

Отже, друга позиція *arrondi* зберігає оптимальний баланс судинного тонусу. Завдяки зменшеному радіусу та дугоподібній формі кінцівки відцентрове навантаження мінімізується, що забезпечує адекватний венозний та лімфатичний відтік від кистей і пальців.

Друга класична позиція з прямими кистями (долоні вниз) – *allongé* (рис. 4). Руки максимально випрямлені в боки, лікті, передпліччя та кисті утворюють довгу горизонтальну лінію. Радіус обертання (r) є максимальним серед усіх позицій на рівні плечей. Кисті виведені на один горизонтальний рівень із плечовим суглобом. Позиція підтримується значним



Рисунок 3 – Друга класична позиція рук, положення рук аронді (*arrondi*).



Рисунок 4 – Друга класична / сучасна позиція рук, положення рук альонже (allongé).

статичним та ізометричним напруженням розгиначів кисті, пальців і дельтоподібних м'язів. Відцентрова сила $F_{вц}$ спрямована прямо вздовж осі кінцівки – від плеча через передпліччя у напрямку до долонь та кінчиків пальців. Під дією високої відцентрової сили артеріальна кров інтенсивно нагнітається до дистальних відділів. Проте тривала ізометрична напруга м'язів передпліччя та повне випрямлення ліктьового суглоба можуть викликати часткове звуження просвіту судин через натяг фасціальних футлярів, створюючи опір мікроциркуляції в капілярах пальців. Артеріальний приплив може бути обмежений через тиск на судини в зап'ястку, це призведе до зниження локальної температури шкіри внаслідок ішемізації). В результаті може розвинути або синюшність (ціаноз) або блідість кистей через погіршення кровообігу [29, 31, 28].

Висока відцентрова сила діє як гідравлічний бар'єр, який «притискає» венозну кров до кінчиків пальців і тильної венозної сітки кисті. Статично напружені м'язи передпліччя втрачають ритмічну помпову функцію («м'язову помпу»), що призводить до пасивного переповнення вен (венозна гіперемія). Розвивається виражений венозний застій та відчуття важкості у долонях.

У другій позиції *allongé* максимально натягаються якірні нитки, що прикріплюють ендотелій капілярів до колагенових волокон сполучної тканини. Ендотеліюцити лімфокапілярів розходяться, і міжклітинні щілини максимально розширюються. Це викликає пікове всмоктування міжклітинної рідини та білкових молекул у лімфатичне русло (особливо на тилу кисті та латеральній поверхні передпліччя). Оскільки радіус r сягає максимуму, гідростатичне навантаження на стінки судин кисті та передпліччя стає найбільшим. Натяг поверхневих фасцій при розпрямленні руки у цій позиції *allongé* звужує просвіт підшкірних судин за рахунок поздовжнього розтягнення, що створює ефект «пасивного витискання» рідини проксимально у момент, коли клапани замкнені. Випрямлення ліктьового суглоба повністю розправляє ліктьові лімфатичні вузли та судини ліктьової ямки, знижуючи гідродинамічний опір для лімфи, що прямує від медіальної групи судин передпліччя до пахвової ямки [29, 30, 31, 28].



Рисунок 5 – Третя класична позиція рук, положення рук аронді (arrondi).

Третя класична позиція рук, положення рук – *arrondi* (рис. 5). Руки підняті над головою, утворюють овал зі збереженням округлого згину в ліктьових та зап'ясткових суглобах. Кисті розташовані ближче до центральної осі обертання та знаходяться суттєво вище рівня серця. Тонічний статус м'язів плечового пояса та передпліччя збалансований, фізіологічний згин у суглобах – м'який.

Під час швидких обертань *chaînés* на судини дистальних відділів діють два ключові гідродинамічні фактори: відцентрова сила $F_{вц}$, яка спрямовує кров до периферії, та зниження гідростатичного тиску внаслідок підйому кінцівок вище рівня серця, що описується формулою:

$$\Delta P = -\rho g h,$$

де ρ – густина крові, g – прискорення вільного падіння, h – висота підйому кінцівки над рівнем серця.

На відміну від позицій, де руки опущені, підйом кистей над головою (як на рис. 5, так і на рис. 6) створює сприятливий для венозного та лімфатичного відтоку градієнт тиску – рідина під дією сили тяжіння природним чином прагне відтікати від кінчиків пальців та долонь до центру (гравітаційний дренаж). Відцентрова сила при обертанні намагається спрямувати кров та інтерстиціальну рідину на периферію (до кистей і пальців).

На рис. 5 (*arrondi*) менший радіус (r) зменшує відцентровий судинний напір. На рис. 6 (*allongé*) більший радіус (r) посилює відцентрову силу, яка «протидіє» гравітаційному відтоку крові вниз.

Артеріальний тиск у поверхневій та глибокій долонних дугах підтримується на рівні, достатньому для повноцінного живлення тканин, незважаючи на підйомне положення кінцівок. Фізіологічні вигини в ліктьовому та променево-зап'ястковому суглобах запобігають перетисканню чи натягу підключичних

та променевих судинних пучків. Природне гравітаційне падіння тиску сприяє швидкому й легкому відтоку венозної крові від пальців та долонь до підключичних вен і верхньої порожнистої вени. Відсутність гіперекстензії суглобів забезпечує вільний прохід венозних клапанів [29, 31, 28].

Оскільки в обох третіх позиціях гідростатичний тиск у капілярах кисті знижений за рахунок високого положення рук над головою, інтенсивність капілярної фільтрації мінімальна. Це повністю виключає ризик виникнення набряку або відчуття розпирання в пальцях під час обертання.

Положення *arrondi* (рис. 5) є оптимальним для лімфовідтоку. М'який дугоподібний контур кінцівки не створює анатомічних заломів для поверхневих та глибоких лімфатичних судин. Лімфа вільно стікає до пахвових та підключичних лімфатичних вузлів, астійні явища в дистальних відділах рук відсутні [30].

Третя класична позиція рук, положення рук – *allongé* (рис. 6). Руки розведені та витягнуті вгору й у боки, лікті та кисті максимально випрямлені. Відстань від осі обертання до кінчиків пальців більша (r (*allongé*) > r (*arrondi*)). Кисті також знаходяться вище

рівня серця, проте вектор кінцівок більш відхилений у боки. Утримання випрямленого положення забезпечується статичним ізометричним напруженням м'язів-розгиначів, дельтоподібних та трапецієподібних м'язів, що може спричиняти помірне механічне звуження судинно-нервових пучків у ділянці драбинчастих м'язів та пахвової западини. Це може призводити до тимчасового зменшення мікроциркуляторної перфузії в пальцях. Артеріальний приплив через тиск на судини в зап'ястку стає обмеженим [32, 29, 31]. Гравітаційний відтік високий, проте посилена відцентрова сила прагне затримати частину крові у венозних сплетеннях тилу кисті та пальців. Статичне напруження м'язів передпліччя у випрямленому стані може дещо підвищувати внутрішньофасціальний тиск, створюючи додатковий опір венозним колекторам.

У положенні *allongé* витягнутість та натяг м'яких тканин можуть створювати помірний фасціальний натяг вздовж медіальної поверхні плеча та передпліччя, що дещо знижує просвіт початкових лімфатичних капілярів, хоча загальний лімфодренаж залишається ефективним завдяки силі тяжіння. Наявність клапанів у лімфатичних судинах запобігають зворотному току лімфи. Однак при тривалому виконанні інтенсивних обертань в *allongé* можливе тимчасове підвищення мікросудинного тиску в кистях (відчуття «наповненості» або легкого розпирання в пальцях). Розкриття та подовження грудних м'язів розвантажує ділянку підключичної вени та підключичного лімфатичного стовбура, що полегшує впадання лімфи у венозний кут [20, 29, 31, 30, 6]. Отже, створюється додатковий гідродинамічний тиск на дистальні відділи рук за рахунок більшого радіуса обертання, але розкрита позиція грудної клітки покращує кінцевий скид лімфи у венозне русло.

Підготовче положення рук у сучасному танці, положення рук – allongé (рис. 7). Відстань до осі обертання мінімальна, але кисті знаходяться в найнижчій точці відносно рівня серця, де активно діє гравітаційний чинник. Руки витягнуті вниз, м'язи передпліччя перебувають у відносно вільному, але витягнутому стані. Через вертикальне опущення кінцівок гідростатичний тиск у судинному руслі кисті є найвищим серед усіх позицій. Оскільки радіус (r) невеликий (кисті близько до тулуба), відцентрове прискорення помірне, проте воно прямо спрямоване вниз – уздовж судинного русла до кінчиків пальців. Поєднання високого гідростатичного тиску та відцентрового вектора створює максимальне депонування крові та рідини в дистальних відділах (пальці, долоні).

Артеріальний приплив через променеву та ліктьову артерії відбувається вільно і посилюється гравітаційним фактором. Обертання призводить до розширення судин долонних дуг через високий внутрішньосудинний тиск. Венозний відтік суттєво ускладнений, оскільки венозним клапанам кисті та передпліччя доводиться працювати



Рисунок 6 – Третя класична позиція рук, положення рук альонже (*allongé*).

проти високого гідростатичного стовпа та відцентрового вектора. Відсутність активної «м'язової помпи» передпліччя (руки просто висять у статичному витягненні) призводить до венозного застою, розширення венозної мережі на тильній стороні кисті та тимчасової гіперемії пальців [29, 31, 28].

При опущених руках високий капілярний гідростатичний тиск викликає підвищену трансудацію (вихід плазми) у міжклітинний простір долонь та пальців. Це зумовлює швидку появу відчуття важкості або набряклості в пальцях під час інтенсивних обертань. Лімфовідтік до пахвових вузлів суттєво сповільнений. У цій позиції вектор сили тяжіння та вектор відцентрової сили діють синергічно – в одному напрямку (вниз до кінчиків пальців), створюючи значний сумарний гідростатичний опір. Рух лімфи у проксимальному напрямку (вгору до серця) за таких умов забезпечується виключно активною роботою клапанного апарату та власною скоротливою активністю лімфангіїв, яким доводиться долати цей подвійний гемодинамічний бар'єр [30].

Руки на талії (положення рук у танці) (рис. 8). Відстань помірно мала (лікть розведені, але кисті зафіксовані в районі талії/попереку). Кисті розташовані ближче до рівня середньої лінії тулуба (вище, ніж у рис. 7). Фіксація пальців і долонь на талії створює локальний механічний тиск на м'які тканини та судини долоні й попереку.

Кисті підняті вище, ніж у позиції на рис. 7, що зменшує гравітаційне перевантаження та полегшує природний гідродинамічний тиск у судинах кисті. Радіус (r) для кистей залишається невеликим, а їх фіксація на талії перешкоджає вільному коливанню м'яких тканин під дією обертання. Судинне русло менше піддається депонуванню рідини під дією відцентрових сил по-

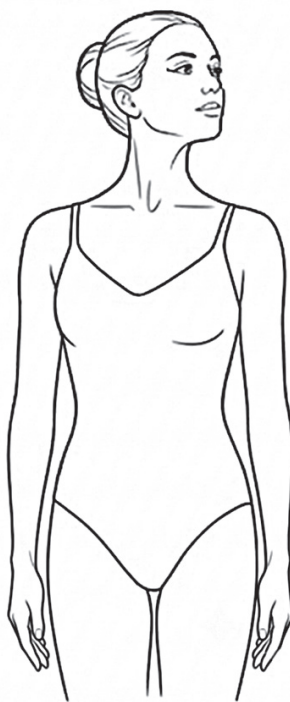


Рисунок 7 – Підготовче положення рук у сучасному танці, положення рук альонже (*allongé*).

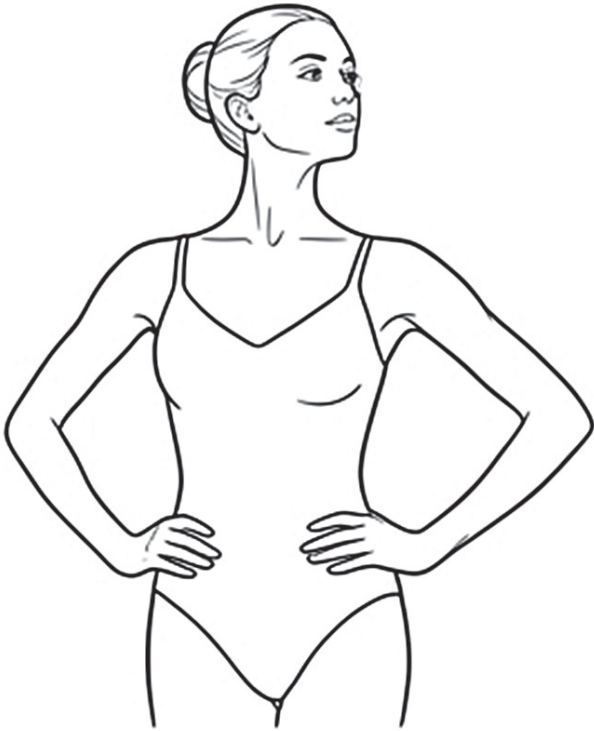


Рисунок 8 – Руки на талії (положення рук у танці).

рівняно з опущеними руками. За рахунок механічного опору (притискання долонь до тулуба/одягу) можливе локальне часткове стиснення поверхневих гілок артерій долоні, що дещо знижує локальну перфузію в поверхневих капілярах пальців під час фіксації [29, 31, 28].

Венозний відтік від кисті поліпшений порівняно з опущеними руками за рахунок вищого розташування відносно серця. Проте статичний притиск долоні та згин у променево-зап'ястковому суглобі можуть викликати локальну компресію поверхневих судин та нервових закінчень, що провокує відчуття оніміння або парестезії в ділянці кисті. При руках на талії гідростатична фільтрація значно нижча, тому ризик накопичення інтерстиціальної рідини в пальцях мінімальний. Кут згину в ліктьовому та суглобах зап'ястя при руках на талії створює певний анатомічний опір для лімфатичних колекторів, але менший гідростатичний тиск компенсує це, забезпечуючи стабільніший дренаж [29, 31, 28].

Зрозуміло, що цей опис не є вичерпним, оскільки варто додатково розглядати біомеханічні та гідродинамічні процеси, що відбуваються окремо у ведучій та веденій руці при виконанні шене. Розуміння всіх процесів, що відбуваються в судинах та рідинах кисті, стане базою для розроблення обґрунтованих рекомендацій для танцівників.

Дослідження гемодинаміки у верхніх кінцівках танцівників під час швидких обертань є маловивченою галуззю, де ключову роль відіграють праці з біомеханіки та авіаційної медицини [33]. При описі особливостей гемо- та лімфодинаміки при позиціях шене із різним положенням рук ми спиралися на фундаментальні праці відомих вчених. Першопрохідцем у біомеханіці класичного танцю є американський професор фізики Kenneth Laws. Вчений розрахував кінематику й динаміку швидких обертань (таких як *tours chaînés* та *fouettés*) і довів, що при швидкості 2–3

оберти на секунду кисті рук, розташовані на відстані 0,6–0,8 м від осі обертання, зазнають прискорення від 30 до 70 м/с² (що відповідає 3–7g). Під дією такої відцентрової сили кров як рідке середовище буквально віджимается від центральної осі тіла до периферії – вздовж судинного русла прямо в кисті та пальці. Це створює суттєвий градієнт гідростатичного тиску, призводить до депонування (застою) крові та може викликати мікрогематоми й механічне розтягнення стінок капілярів і венул [34, 35].

Вивчення гідростатичного тиску під дією прискорення сягає праць Wood E. H. (1946) та фундаментальних досліджень Otto Gauer і Henry O. Sieker (1953) у галузі авіаційної медицини [23, 33, 36]. Серед сучасних науковців Gentilin A. (2024) вказує на тривале навантаження на серцево-судинну систему й залишкову вазодилатацію після навантажень [12], а професор Wyon M. (2009) описує обертання як «інтервальне тренування» для судин кисті. За даними Wyon, кров діє на стінки артеріол як гідравлічний удар, виникає венозний застій через утруднення роботи венозних клапанів, а також включається рефлекс Бейлісса (міогенне звуження судин у відповідь на їхнє різке розтягнення) [22, 3, 27].

Фізичний зміст зростання трансмурального тиску (різниці між внутрішнім і зовнішнім тиском на стінку судини) описується формулою $\Delta P = 1/2 \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)$, (ρ – густина крові, ω – кутова швидкість обертання в радіанах за секунду (рад/с), а r_1 та r_2 – відстань від осі обертання до початкової та кінцевої точок ділянки судини відповідно). Тиск зростає пропорційно квадрату кутової швидкості та квадрату відстані від осі. При високій швидкості обертання цей тиск може спричинити петехії (точкові внутрішньошкірні крововиливи через розрив дрібних капілярів) [37]. Для запобігання масовому відтоку крові від мозку та непритомності, в організмі спрацьовують захисні компенсаторні механізми:

1. М'язова помпа підвищує зовнішній тиск на вени.
2. Вено-артеріальний рефлекс (локальний симпатичний аксон-рефлекс) при підвищенні тиску у венозному руслі понад 25 мм рт. ст. звужує прилеглі артеріоли, обмежуючи надмірний приплив крові та захищаючи капіляри кисті від гідродинамічного удару.
3. Барорефлекторна регуляція через судиноруховий центр збільшує частоту серцевих скорочень та викликає системну вазоконстрикцію судин черевного русла [32, 37].

На молекулярному рівні захисна реакція судин базується на механотрансдукції – здатності ендотеліоцитів та міоцитів перетворювати механічне розтягнення на хімічний сигнал. Розтягнення мембрани під дією тиску відкриває механочутливі іонні канали (Piezo1 та SACs) [38, 39, 40]. Вхід іонів Na⁺ та Ca²⁺ викликає деполаризацію мембрани й відкриття потенціал-керованих кальцієвих каналів L-типу, що стимулює додатковий викид Ca²⁺ із саркоплазматичного ретикулуму через рианодинові рецептори. Комплекс Ca²⁺-кальмодулін активує кіназу легких ланцюгів міозину (MLCK), запуск «гребкових» рухів міозину по актину та вазоконстрикцію. Для тривалого утримання тонусу без перевитрати АТФ залучається Rho-кіназа (ROCK), яка пригнічує міозинову фосфатазу. Одночас-

но напруження зсуву стимулює ендотелії до вироблення оксиду азоту (NO), який дозовано розслаблює судину, запобігаючи надмірному спазму та ішемії тканин. Отже, швидкість та ефективність адаптації судин танцівника до відцентрових навантажень залежить від експресії та чутливості каналів Piezo1, швидкості мобілізації внутрішньоклітинного Ca^{2+} у міоцитах та балансу між активністю MLCK (скорочення) та ендотеліальним виділенням NO (контроль мікроциркуляції) [32, 41, 42, 24, 25].

Висновки.

1. Під час виконання швидких обертових рухів шене (*tours chaînés*) виникає відцентрове прискорення, яке діє на рідкі середовища верхніх кінцівок як гідравлічний фактор. Цей ефект спричиняє перерозподіл крові та лімфи від центральної осі обертання до дистальних відділів кистей, створюючи значний градієнт трансмурального й гідростатичного тиску, величина якого прямо пропорційна радіусу обертання та квадрату кутової швидкості.

2. Гемо- та лімфодинаміка залежить від позиції рук. Положення *arrondi* (округле). Завдяки зменшеному радіусу та збереженню фізіологічних анатомічних вигинів у суглобах, які виступають «амортизаційним кутом», мінімізується гідродинамічний напір на судини кисті. Збалансоване ізометричне напруження м'язів-згиначів та розгиначів активує м'язову помпу та клапанний апарат, забезпечуючи стабільний венозний і лімфатичний відтік та запобігаючи застою рідини. Положення *allongé* (випрямлене). Збільшення радіуса обертання до максимуму суттєво посилює дію відцентрової сили. Статичне ізометричне напруження м'язів передпліччя та натяг фасціальних футлярів обмежують артеріальний приплив через здавлення судин і викликають динамічну функцію м'язової помпи. Це призводить до вираженого венозного застою, тимчасової ішемізації або гіперемії пальців, а

також до пікового всмоктування міжклітинної рідини через натяг лімфокапілярів.

3. Просторова орієнтація кінцівок відіграє ключову роль у компенсації гідродинамічного перевагання. Підйом рук вище рівня серця (третя позиція) створює сприятливий гравітаційний градієнт тиску, який нівелює відцентрову силу і полегшує відтік венозної крові та лімфи, повністю виключаючи ризик виникнення набряків. Навпаки, опущення рук (підготовче положення) поєднує високий гравітаційний тиск із відцентровим вектором, створюючи максимальне депонування рідини в пальцях і перевагуючи клапанний апарат судин. Фіксація рук на талії стабілізує м'які тканини від коливань, проте тривалий статичний згин у суглобах може викликати локальну компресію судинно-нервових пучків.

4. В кистях танцівника під час виконання обертових рухів працюють молекулярні та рефлекторні механізми компенсації. Захист мікроциркуляторного русла кистей танцівників від гідродинамічного удару забезпечується активацією механотрансдукції. Механічне розтягнення мембран відкриває канали Piezo1, запускаючи Ca^{2+} -залежний каскад скорочення гладком'язових клітин та викликаючи компенсаторну вазоконстрикцію. Цей міогенний тонус (рефлекс Бейлісса) разом із вено-артеріальним аксон-рефлексом обмежує надмірне кровонаповнення, тоді як виділення ендотеліального оксиду азоту (NO) запобігає тривалому спазму судин, підтримуючи трофіку тканин під час тривалих обертальних навантажень.

Перспективи подальших досліджень.

Експериментальна верифікація теоретично сформульованих моделей за допомогою сучасних діагностичних методів безпосередньо під час та після обертальних навантажень; розробка методичних рекомендацій, вправ та прийомів масажу кисті для профілактики професійних судинних патологій у хореографії.

Література

- Oleshko TM, Ataman YuO, Oleshko OM, Petrenko NV, Starchenko AYU. Reaktsiia hemodynamiky u sportsmeniv lehkoatletiv riznoho ravnia fizychnoi pratsездatnosti pry vykonanni submaksymalnoho testu PWC170. Aktualni problemy suchasnoi medytsyny: Visnyk Ukrainskoi medychnoi stomatolohichnoi akademii. 2023;23(1):98-104. [in Ukrainian].
- McCarren F. Dance Pathologies: Performance, Poetics, Medicine. Stanford: University Press; 1998. 296 s.
- Metsios GS, Wyon M, Patel K, Allen N, Koutedakis Y. Dancers' heart: Cardiac screening in elite dancers. Eur J Sport Sci. 2020;20(7):920-925. DOI: <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1672793>
- Bezpalenko Yu. Fundamentalni poniattia pro tilo tantsivnyka v khoreohrafi. Aktualni pytannia humanitarnykh nauk. 2021;43(1):41-47. [in Ukrainian].
- Dykstra A, Kooistra A, Merucci N, Zeitler DW, Alderink G. The Margin of Stability During a Single-Turn Pirouette in Female Amateur Dancers: A Pilot Study. Appl. Sci. 2025;15(13):7519. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15137519>
- Haas J. Dance Anatomy. USA: Human Kinetics Publishers; 2024. 293 s.
- Nevedomska YeO, Omeri ID, Lekholetova MM, Tymchuk OV, Yatsenko SP. 6 vyd Anatomii, fiziologii ta bezpeka zhyttiedialnosti u khoreohrafi. K.: Kyivsk. stolych. un-t imeni Borysa Hrinchenka; 2025. 58 s. [in Ukrainian].
- Bakunovskiy OM, Poltoratska IYe, Babak SV, Andrushchenko VO. Metodyka doslidzhennia vplyvu statychnoho navantazhennia na stan sertsevo-sudynnoi systemy z vykorystanniam reohrafi ta elektrokardiohrafi. Visnyk problem biolohii i medytsyny. 2025;1(176):366-373. DOI: <https://doi.org/10.29254/2077-4214-2025-1-176-366-373> [in Ukrainian].
- Krutienko MV, Babak SV. Neobkhidnist masazhu dlia pokrashchennia hemodynamiky u tantsiurystiv. Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii Khoreohrafichna terminolohia: vykyky suchasnosti; 2025 Lyst 12; Kyiv. K.: NUFVUSU; 2025. p. 86-90. [in Ukrainian].
- Spesvykh OO, Soronovych IM. Osoblyvosti statodynamichnoi stiikosti sportsmeniv, yaki zaimaiutsia sportyvnyimi tantsiamy. Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. 2014;118(1):338-340. [in Ukrainian].
- Bakunovskiy OM, Babak SV, Poltoratska IY. Methods of simultaneous study of central and peripheral hemodynamics during dosed physical exertion in laboratory conditions: organization and setting. Visnyk problem biolohii i medytsyny. 2024;1(172):324-329. DOI: <https://doi.org/10.29254/2077-4214-2024-1-172-324-329> [in Ukrainian].
- Gentilin A, Cevese A, Tam E. Postexercise cardiovascular hemodynamics assessment before and after a 30-minute standing still recovery. J Sports Med Phys Fitness. 2024;64(2):201-210. DOI: <https://doi.org/10.23736/s0022-4707.23.15330-8>
- Zaikin AV, Sudak NI. Biomekhanik. Kamianets-Podilskyi: Kamianets-Podilskyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Ohienka; 2024. 144 s. [in Ukrainian].
- Kozubenko OS, Tupieiev YuV. Biomekhanika fizychnykh. Mykolaiv: MNU imeni V.O. Sukhomlynskoho; 2015. 215 s. [in Ukrainian].
- Nosko MO, Arkhypov OA. Biomekhanichna kharakterystyka rukhovykh yakosteiv liudyny (Teoretychnyi analiz). Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. 2014;118(1):227-240. [in Ukrainian].
- Hakman AV. Osnovy biomekhaniky rukhu. Chernivtsi: Chernivetskyi nats. un-t; 2019. 144 s. [in Ukrainian].

17. Gauer OH, Henry JP. Circulatory basis of fluid volume control. *Physiol Rev.* 1963;43:423-81. DOI: <https://doi.org/10.1152/physrev.1963.43.3.423>
18. Bihus OO, Manshylin OO, Kondratiuk DO, Mova LV, Zhuravlova AV, Herts II, ta in. Batieieva Suchasnyi tanets. *Osnovy teorii i praktyky.* Kyiv: Vydavnytstvo Lira-K; 2016. 264 s. [in Ukrainian].
19. Kotov V, Oderii L. Teoriia i metodyka klasychnoho tantsiu: metodychni rekomendatsii do kursu «Praktykum klasychnoho tantsiu». Slovi-ansk: Vyd-vo B. I. Matorina; 2021. 58 s. [in Ukrainian].
20. Chalyi OV. Medychna i biolohichna. 4-te vyd. Vinnytsia: Nova Knyha; 2017. 528 s. [in Ukrainian].
21. Smetaniuk OV, Bulyk TS, Oleksiuk AV. Biomekhanika ta klinichna kineziolohiia. Chastyna 1. Chernivtsi: BDMU; 2025. 248 s. [in Ukrainian].
22. Allen N, Wyon M. Dance Medicine: Athlete or Artist. *Sport Ex Medicine.* 2008;35:6-9.
23. Gauer OH, Sieker HO. The Hydrostatic Factor in the Circulation. *Circulation.* 1953;8(6):920-933.
24. Laughlin MH, Davis MJ, Secher NH, van Lieshout JJ, Arce-Esquivel AA, Simmons GH, et al. Peripheral circulation. *Compr Physiol.* 2012;2(1):321-447. DOI: <https://doi.org/10.1002/cphy.c100048>
25. Somlyo AP, Somlyo AV. Ca²⁺ sensitivity of smooth muscle and nonmuscle myosin II: modulated by G proteins, kinases, and myosin phosphatase. *Physiol Rev.* 2003;83(4):1325-58. DOI: <https://doi.org/10.1152/physrev.00023.2003>
26. Wyon M, Allen N, Brown-Appenzelle D, Cloak R, Devonport T, Gregory K, et al. Resting energy expenditure in professional dancers as an objective measure of low energy expenditure. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2026;12(2):e003216. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2026-003216>
27. Wyon M. The cardiorespiratory demands of contemporary dance. Saarbrücken: VDM Verlag Dr Muller Akteingesellschaft & Co; 2009. 335 p.
28. Hall JE, Hall ME. Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. 15th ed. Philadelphia: Elsevier; 2005. 1120 p.
29. Boron WF, Boulpaep EL. Medical Physiology. 3rd ed. Philadelphia: Elsevier; 2016. 1312 p.
30. Földi M. Földi's Textbook of Lymphology: For Physicians and Lymphedema Therapists. Philadelphia: Elsevier, Urban&FischerVerlag; 2006. 735 p.
31. Standring S. Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice. 42nd ed. Philadelphia: Elsevier; 2020. 1606 p.
32. Kostyuk PH, Zyma VL, Mahura IS, Miroshnychenko MS, M. F. Shuba MF. Biofizyka. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskiyi universytet»; 2008. 575 s. [in Ukrainian].
33. Wood EH, Lambert EH, Baldes EJ, Code CF. Effects of acceleration in relation to aviation. *Federation Proceedings.* 1946;5:327-344.
34. Kenneth L. The Physics of Dance. New York: Schirmer Books; 1984. 160 p.
35. Kenneth L. Physics and the Art of Dance: Understanding Movement. Oxford: Oxford University Press; 2002. 236 p.
36. Wong AYW, Kocielek AM, Keir PJ. The Effects of Altered Blood Flow, Force, Wrist Posture, Finger Movement Speed, and Population on Motion and Blood Flow in the Carpal Tunnel: A Mega-Analysis. *Biomechanics.* 2025;5(1):15. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomechanics5010015>
37. Li Y, Xi Y, Hongyu W, Anqiang, Xiaoyan, Zngshen, et al. The impact of rotor configurations on hemodynamic features, hemocompatibility and dynamic balance of the centrifugal blood pump: A numerical study. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2023;9(2):e3671. DOI: <https://doi.org/10.1002/cnm.3671>
38. Coste B, Mathur J, Schmidt M, Earley T, Ranade S, Petrus MJ, et al. Piezo1 and Piezo2 Are Essential Components of Distinct Mechanically Activated Cation Channels. *Science.* 2010;330(6000):55-60. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1193270>
39. Li J, Hou B, Tumova S, Muraki K, Bruns A, Ludlow MJ, et al. Piezo1 integration of vascular architecture with physiological force. *Nature.* 2014;515(7526):279-282. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13701>
40. Retailliau K, Duprat F, Arhatte M, Ranade SS, Peyronnet R, Martins JR, et al. Piezo1 in Smooth Muscle Cells Is Involved in Hypertension-Dependent Arterial Remodeling. *Cell Rep.* 2015;13(6):1161-1171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2015.09.072>
41. Ando J, Yamamoto K. Vascular mechanobiology: endothelial cell responses to fluid shear stress. *Circ J.* 2009;73(11):1983-92. DOI: <https://doi.org/10.1253/circj.cj-09-0583>
42. Kamm KE, Stull JT. Dedicated myosin light chain kinases with diverse cellular functions. *J Biol Chem.* 2001;276(7):4527-4530. DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.R000028200>

ФІЗІОЛОГІЧНІ ТА БІОМЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ ГЕМО- ТА ЛІМФОДИНАМІКИ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК ТАНЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ОБЕРТОВИХ РУХІВ (НА ПРИКЛАДІ *TOURS CHAÎNÉS*)

Бабак С. В., Бабак К. В., Крутієнко М. В., Соронович І. М., Дралов Є. О.

Резюме. Виконання інтенсивних обертальних елементів у хореографії, зокрема шене (*tours chaînés*), супроводжується тривалим впливом значних відцентрових прискорень на організм танцівника. На відміну від нижніх кінцівок, дистальні відділи верхніх кінцівок зазнають специфічних і високодинамічних гідродинамічних навантажень через постійну зміну їхньої просторової орієнтації, радіуса обертання та висоти відносно рівня серця. Комплексне розкриття фізіолого-біомеханічних та молекулярно-рефлекторних механізмів регуляції локального крово- й лімфообігу в кистях і пальцях є необхідним для розуміння меж адаптаційних можливостей судинного русла та запобігання ангіотрофічним розладам у балетній медицині.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати та змодельовати фізіологічні і біомеханічні особливості гемо- та лімфодинаміки в кистях і пальцях танцівників під дією відцентрових сил та гравітаційних градієнтів під час виконання *tours chaînés* у різних положеннях верхніх кінцівок.

Застосовано теоретичний аналіз фізіологічних і біомеханічних джерел (бази PubMed, Google Scholar та ін.), метод математичного та гідродинамічного моделювання фізичних сил (відцентрової сили, трансмурального й гідростатичного тиску) та системно-структурний аналіз 8-ми анатомо-біомеханічних позицій і конфігурацій рук у хореографії (*arrondi*, *allongé*, I, II, III позиції, підготовче положення, руки на талії).

Змодельовано гідродинамічний перерозподіл крові та лімфи від центральної осі обертання до периферії під дією відцентрового прискорення, що викликає виражений градієнт трансмурального тиску в дистальних судинах рук. Встановлено, що положення *arrondi* завдяки зменшеному радіусу обертання та наявності помірних суглобових вигинів мінімізує гідродинамічний напір і стимулює функцію «м'язової помпи» передпліччя. Натомість положення *allongé* максимізує відцентровий вектор і фасціальний натяг, створюючи передумови для венозного застою, транссудації та реактивної гіперемії пальців. Підйом рук вище рівня серця (III позиція) формує протидіючий гравітаційний градієнт, який повністю або частково нівелює відцентровий вектор і запобігає виникненню набряків, тоді як опущення рук у підготовче положення максимально переважує капілярне русло. Фіксація рук на талії забезпечує стабільний венозний дренаж, але тривалий статичний згин створює ризик локальної компресії судинно-нервових пучків.

Розкрито молекулярно-рефлекторні компенсаторні механізми захисту мікроциркуляції від гідродинамічного удару: механічне розтягнення ендотелію та гладеньком'язових клітин відкриває механочутливі іонні

канали Piezo1 та SACs, запускаючи Ca^{2+} -залежне скорочення гладеньких м'язів, міогенну вазоконстрикцію (рефлекс Бейлісса) та вено-артеріальний аксон-рефлекс. Ця виражена констрикція компенсується паралельним виділенням ендотеліального оксиду азоту (NO), що забезпечує дозовану вазодилатацію та запобігає тривалій ішемізації тканин.

Геометрія рук та їхня просторова орієнтація відносно рівня серця під час виконання *tours chaînés* є визначальними чинниками регіонарної мікроциркуляції, гідродинамічного тиску та перфузії тканин. Фізіологічна адаптація судинного русла верхніх кінцівок забезпечується спровокованим механотрансдукцією балансом між міогенною вазоконстрикцією та ендотеліозалежною вазодилатацією, що захищає капіляри від структурних пошкоджень.

Ключові слова: гемодинаміка, лімфодинаміка, біомеханіка танцю, шене (*tours chaînés*), відцентрова сила, трансмуральний тиск, мікроциркуляція, вазодилатація, механотрансдукція.

PHYSIOLOGICAL AND BIOMECHANICAL ASPECTS OF HEMO- AND LYMPHODYNAMICS OF THE UPPER LIMBS OF DANCERS DURING ROTATIONAL MOVEMENTS (ON THE EXAMPLE OF *TOURS CHAÎNÉS*)

Babak S. V., Babak K. V., Krutiienko M. V., Soronovych I. M., Dralov Ye. O.

Abstract. The performance of intensive rotational elements in the choreography, in particular *tours chaînés*, is accompanied by a long-term effect of significant centrifugal accelerations on the dancer's body. Unlike the lower limbs, the distal parts of the upper limbs are subjected to specific and highly dynamic hydrodynamic loads due to the constant change in their spatial orientation, radius of rotation and height relative to the level of the heart. Comprehensive disclosure of physiological-biomechanical and molecular-reflex mechanisms of local blood and lymph circulation regulation in the hands and fingers is necessary for understanding the limits of the adaptive capabilities of the vascular bed and preventing angiotrophic disorders in ballet medicine.

The purpose of the research is to theoretically substantiate and model the physiological and biomechanical features of hemo- and lymphodynamics in the hands and fingers of dancers under the action of centrifugal forces and gravitational gradients during *tours chaînés* in different positions of the upper limbs.

Theoretical analysis of physiological and biomechanical sources (PubMed, Google Scholar, and other databases) was performed, along with mathematical and hydrodynamic modeling of physical forces (centrifugal force, transmural pressure, and hydrostatic pressure) and a systematic structural analysis of eight anatomical and biomechanical arm positions and configurations used in choreography (*arrondi*, *allongé*, first, second, and third positions, preparatory position, and hands on the waist).

The hydrodynamic redistribution of blood and lymph from the central axis of rotation to the periphery under the action of centrifugal acceleration, which causes a pronounced gradient of transmural pressure in the distal vessels of the hands, is simulated. It has been established that the *arrondi* position, due to the reduced radius of rotation and the presence of moderate joint bends, minimizes the hydrodynamic pressure and stimulates the function of the «muscle pump» of the forearm. Instead, the *allongé* position maximizes the centrifugal vector and fascial tension, creating the conditions for venous stasis, transudation, and reactive hyperemia of the fingers. Raising the hands above the level of the heart (*III* position) forms an opposing gravitational gradient, which completely or partially cancels the centrifugal vector and prevents swelling, while lowering the hands to the preparatory position maximally overloads the capillary bed. Fixation of the hands on the waist ensures stable venous drainage, but prolonged static bending creates the risk of local compression of vascular and nerve bundles.

Molecular-reflex compensatory mechanisms of microcirculation protection against hydrodynamic shock have been revealed: mechanical stretching of endothelium and smooth muscle cells opens mechanosensitive Piezo1 ion channels and SACs, triggering Ca^{2+} -dependent contraction of smooth muscles, myogenic vasoconstriction (Bayliss reflex) and veno-arterial axon reflex. This pronounced constriction is compensated by the parallel release of endothelial nitric oxide (NO), which provides dosed vasodilation and prevents long-term tissue ischemia.

The geometry of the hands and their spatial orientation relative to the level of the heart during *tours chaînés* are determining factors of regional microcirculation, hydrodynamic pressure and tissue perfusion. Physiological adaptation of the vascular bed of the upper limbs is provided by the mechanotransduction-induced balance between myogenic vasoconstriction and endothelium-dependent vasodilation, which protects capillaries from structural damage.

Key words: hemodynamics, lymphodynamics, dance biomechanics, *tours chaînés*, centrifugal force, transmural pressure, microcirculation, vasodilatation, mechanotransduction.

ORCID кожного автора та його внесок до статті:

Babak S. V.: <https://orcid.org/0000-0002-6985-1394> ABDEF

Babak K. V.: <https://orcid.org/0009-0005-8027-6924> ABDE

Krutiienko M. V.: <https://orcid.org/0009-0001-6185-0530> ABD

Soronovych I. M.: <https://orcid.org/0000-0001-7519-5322> BDEF

Dralov Ye. O.: <https://orcid.org/0009-0000-5762-9879> BDEF

Конфлікт інтересів:

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Адреса для кореспонденції

Бабак Світлана Віталіївна

Національний університет фізичного виховання і спорту України
Україна, 03150, м. Київ, вул. Фізкультури 1
Тел.: +380638335443
E-mail: s.babak.s.1234@gmail.com

А – концепція роботи та дизайн, В – збір та аналіз даних, С – відповідальність за статичний аналіз, D – написання статті, Е – критичний огляд, F – остаточне затвердження статті.

Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії **Creative Commons Attribution (CC-BY)**, яка дозволяє не-обмежене використання, поширення та відтворення в будь-якому форматі за умови належного цитування оригінальної роботи © Всі автори, 2026

Стаття надійшла 06.05.2026 року
Стаття прийнята до друку 19.08.2026 року
Опубліковано 29.09.2026 року

DOI 10.29254/2077-4214-2026-3-182-22-31

УДК 616.12-008.46:159.9:316.6

¹Борисюк І. Ю., ²Шевчук О. К., ³Сніцар Є. В.

ВПЛИВ ТРИВАЛОГО ВОЄННОГО СТРЕСУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЖИТТЯ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ХРОНІЧНОЮ СЕРЦЕВОЮ НЕДОСТАТНІСТЮ

¹Міжнародний університет (м. Одеса, Україна)

²Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова (м. Вінниця, Україна)

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» (м. Київ, Україна)

borisyuk.kaynova@gmail.com

Хронічна серцева недостатність спричиняє істотні обмеження життєдіяльності, а тривалий воєнний стан додатково ускладнює перебіг хвороби та повсякденне функціонування пацієнтів. За таких умов особливого значення набуває комплексний аналіз медичних і психосоціальних чинників, які формують їхнє самопочуття. Мета – узагальнити сучасні докази щодо змін якості життя дорослих із серцевою недостатністю за наявності тривалого стресового навантаження, пов'язаного з воєнними подіями. Здійснено систематичний пошук та відбір оригінальних клінічних досліджень відповідно до попередньо визначеної моделі PICOS (Population – популяція; Intervention/Exposure – втручання/вплив; Comparison – порівняння; Outcomes – результати; Study design – дизайн дослідження) та рекомендацій PRISMA 2020. Аналіз охоплював показники якості життя, симптомне навантаження, функціональні обмеження, емоційний стан і соціальні детермінанти. Особливу увагу приділено відмінностям між пацієнтами залежно від інтенсивності стресового впливу, доступності допомоги та ресурсів адаптації. Сукупні результати свідчать про взаємозв'язок фізичних симптомів, психоемоційних порушень і соціальної вразливості. Неприятливі умови проживання, вимушене переміщення, переривання медичного супроводу та обмеження підтримки можуть посилювати функціональні труднощі й суб'єктивне погіршення добробуту. Якість життя пацієнтів із серцевою недостатністю доцільно розглядати як комплексний показник, чутливий до одночасної дії соматичних і соціально-середовищних чинників. Моніторинг має бути регулярним і поєднувати клінічну, психологічну та соціальну оцінку, що дає змогу своєчасно визначати групи підвищеного ризику та адаптувати реабілітаційні стратегії. Особливої актуальності набувають забезпечення безперервності лікування, психологічний супровід та сприяння соціальній інтеграції пацієнтів.

Ключові слова: хронічна серцева недостатність, якість життя, воєнні події, стресове навантаження, психосоціальні чинники, функціональні обмеження, медична допомога, адаптація, реабілітація, систематичний огляд.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Дослідження виконано з власної ініціативи авторів і не пов'язане з виконанням планової науково-дослідної роботи. Результати систематичного огляду розширюють наукові уявлення про взаємозв'язок серцевої недостатності, воєнного стресу та психосоціальних детермінант, а також обґрунтовують необхідність удосконалення комплексного медичного супроводу.

Вступ.

Хронічна серцева недостатність (далі – ХСН) є одним із найпоширеніших серцево-судинних за-

хворювань із тривалим прогресуючим перебігом, обмеженням фізичної активності, частими декомпенсаціями та потребою в постійному медичному спостереженні. Її вплив не обмежується гемодинамічними та структурно-функціональними порушеннями, а поширюється на повсякденну активність, психологічний стан, соціальне функціонування та здатність пацієнта підтримувати звичний спосіб життя. Отже, якість життя є важливим показником стану пацієнтів із ХСН та одним із критеріїв ефективності лікування поряд із клінічними й лабораторними показниками.

Особливого значення ця проблема набуває в Україні в умовах тривалого воєнного стресу. Постій-