

УДК 616-006.07

**КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРМАЛЬНОГО ТА ПАТОЛОГІЧНОГО  
СКОРОЧЕННЯ ЛІВОГО ШЛУНОЧКА СЕРЦЯ ЛЮДИНИ ЯК СПІРАЛЬНО  
ПОБУДОВАНОЇ СТРУКТУРИ. ОЦІНКА ДІАГНОСТИЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ****Книшов Г.В.<sup>1</sup>, Броварець О.О.<sup>2</sup>, Настенко Є.А.<sup>1</sup>, Забашта Ю.Ф.<sup>2</sup>, Бешляга В.М.<sup>1</sup>, Максименко  
В.Б.<sup>1</sup>, Захарова В.П.<sup>1</sup>, Костенко Ю.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Національний інститут серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова АМН України, Київ, Україна<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, кафедра молекулярної фізики, Київ, Україна  
e-mail: brovarets@list.ru

Надійшла до редакції 21.07.2009

В даній роботі змодельовано висхідний сегмент апікальної петлі лівого шлуночка серця (ЛШС) людини, щоб дослідити залежність фракції викиду (ФВ) та скорочувальної здатності (об'єм та заповнення) від його геометрії, а, відповідно, і від параметрів, що характеризують спіральну структуру серця. ЛШС людини змодельовано параболоїдом обертання. Кінцево-сistolічні та кінцево-діастолічні розміри ЛШС, - одночасне його вкорочення уздовж поздовжньої осі та звуження у поперечному перерізі, розглядаються як параметри, які формують спіральний кровотік в аорті, тобто виштовхування та закручування крові. Вибрані найбільші відмінні один від одного форми ЛШС нормальні, обумовлені стенозом мітрального клапану та дилатаційною кардіоміопатією.

Показана інформативність даного підходу для кількісної оцінки процесу формування недостатності кровообігу і доцільність його застосування для опису динаміки форми ЛШС і його насосної функції при інших захворюваннях клапанів, гіпоксичної та дилатаційної кардіоміопатії.

**Ключові слова:** лівий шлуночок серця людини; кінцево-сistolічні та кінцево-діастолічні розміри лівого шлуночка серця; «спіральне» скорочення лівого шлуночка; спіральна архітектоніка серця; спіральний кровотік в аорті; фракція викиду та скорочувальна функція лівого шлуночка; форма лівого шлуночка серця в нормі, при стенозі мітрального клапану та дилатаційній кардіоміопатії.

**ВСТУП**

В дослідженнях, започаткованих Торентом Гаспом [1], функціонування лівого шлуночка серця вивчається як скорочення спіральної згорнутої стрічки міокарду. Такий підхід підкріплюється експериментальними та евристичними роботами [2, 3] з вивчення орієнтації шлуночково-міокардіальної стрічки у просторі.

У даній роботі ми розглядаємо лише лівий шлуночок (ЛШ) як спіральну скорочувальну структуру, що підтверджується дослідженнями швидкості його деформації (рис.1). Правий (ПШ) має іншу анатомію, іншу функцію і забезпечує значно менший діапазон пульсації тиску крові. При тиску 10 мм. рт. ст. починається викид в легеневу артерію з ПШ, а з ЛШ в аорту – тільки при 70 мм. рт. ст. Завершують викид одночасно обидва шлуночка (у нормі немає роздвоєння другого тону фонокардіограми при закритті клапанів аорти і легеневої артерії).

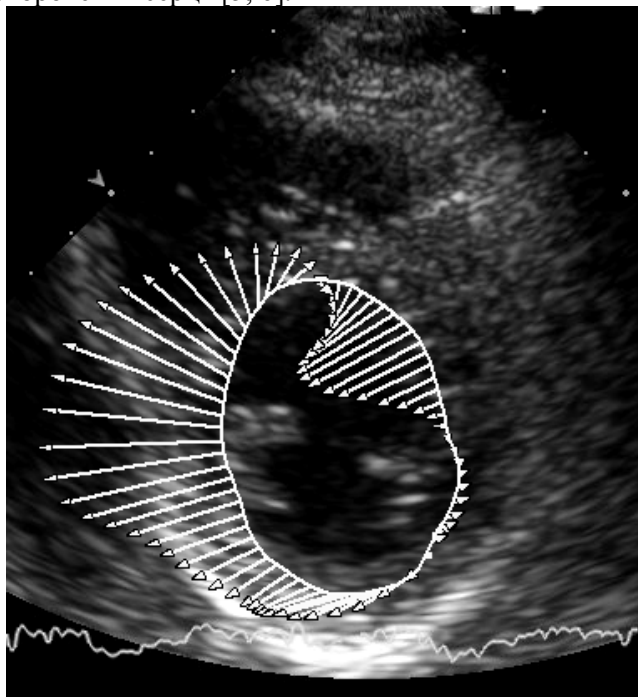
За рахунок подовження часу механічного викиду крові в легеневу артерію і приблизно в 10 -

12 разів нижчого периферичного опору в малому колі кровообігу, обидва шлуночка викидають за хвилину приблизно по 5 літрів крові, тобто в сумі - 10 літрів. Іншими словами, робота серця є синхронним функціонуванням двох насосів, що працюють в двох послідовно сполучених контурах малого і великого кіл кровообігу, і виганяють кров на різну відстань – 0,3 м і 1,5 м відповідно. При різному системному артеріальному тиску, у всіх теплових на рівні прекапілярних артеріол тиск приблизно однаковий – 20 - 30 мм рт. ст.

Важливою характеристикою є величина узагальненого кута нахилу поздовжніх волокон міокарду, що формують ЛШ і те, як цей кут змінюється при різній набутій патології серця. Це має велике значення, оскільки діастола ЛШ характеризується примусовим його заповненням наприкінці систоли, коли тиск в ньому може сягати негативних величин і кінцево-сistolічним тиском, який становить 0 - 5 мм. рт. ст. у нормі, і 10 - 30 мм. рт. ст. - за наявності патології [4].

Розроблено низку підходів до корекції набутих вад серця - аневризми лівого шлуночка,

дилатаційної кардіоміопатії та інших, з урахуванням спіральної архітекtonіки та спіралеподібного скорочення серця [5, 6].



**Рис. 1.** Напрямки деформації (*strain rate*) різних відділів лівого шлуночка у систолу за даними ультразвукових обстежень.

Ураження міокарду, перш за все, проявляються у зміні форми та кінематики скорочення шлуночків серця, більш за все – лівого, що призводить до розвитку серцевої недостатності (СН). Її лікування є однією із найбільш актуальних проблем кардіології та кардіохірургії, підходи до лікування постійно переглядаються і вдосконалюються.

Чималий інтерес викликає питання, які кількісні характеристики «спірального» скорочення лівого шлуночка (ЛШ), що спричиняють одночасне вкорочення відносно повздовжньої вісі та звуження у поперекових перерізах, змінюються при ураженнях клапанів серця та міокарду у порівнянні з нормою.

Для цього вибрано нормальний шлуночок серця та шлуночки при найбільш відмінних від норми та одна від одної вадах серця: *стенозі мітрального клапану* (ЛШ зменшений та погано заповнюється) та *дилатаційній кардіоміопатії* (ЛШ збільшений та погано скорочується, із істотним зменшенням фракції викиду).

Згідно з уявленнями Торента Гаспа [1] лівий шлуночок серця утворений єдиним м'язом, який закручується у спіралеподібну структуру, формуючи при цьому базальну та апікальну (вершинну) петлі.

В межах апікальної петлі виділяють висхідний та низхідний сегменти. В нормі один фрагмент стрічки міокарда (*низхідний сегмент* апікальної петлі) створює основний викид, скорочуючись першим і

виштовхуючи кров зі шлуночка, другий фрагмент (*висхідний сегмент* апікальної петлі) скорочується пізніше, змінюючи геометрію серця і, тим самим, здійснюючи активне всмоктування крові з передсердь.

Значимо, що, на відміну від класичної теорії, в якій вважається, що під час діастоли м'язові волокна розслаблені, в новій теорії припускається, що наповнення порожнини лівого шлуночка кров'ю є активним всмоктуванням і спричинене скороченням висхідного сегменту апікальної петлі [4].

В нашій роботі було змодельовано *висхідний сегмент* апікальної петлі ЛШ, щоб дослідити, як залежить скорочувальна здатність лівого шлуночка (об'єм та заповнення лівого шлуночка) від його геометрії, а, відповідно, і від параметрів, що характеризують спіральну структуру серця, оскільки набуті вади серця та ушкодження міокарда зумовлюють зміни форми ЛШ та показників його «гвинтового» скорочення.

В даній праці розглянуто показники гвинтового скорочення висхідного сегменту наприкінці систоли та діастоли (для серця в нормі та при стенозі мітрального клапану (СМК) та дилатаційній кардіоміопатії (ДКМП)), функціонування якого власне і забезпечує заповнення лівого шлуночка кров'ю. Вищевказані захворювання впливають на співвідношення повздовжньої та крутильної складових спірального руху крові і, відповідно, на енерговитрати серця при виштовхуванні крові.

Метою роботи була побудова математичної моделі висхідного сегменту апікальної петлі лівого шлуночка як спірально утвореної та спірально скоротливої структури.

Дослідити параметри скорочення ЛШ серця людини, в якості яких ми вибираємо кути нахилу  $\alpha$  висхідного сегменту відносно повздовжньої осі ЛШ (рис. 2), при його представленні в якості скорочувальної гвинтоподібної структури в нормі, при СМК та ДКМП, а також вивчити залежність фракції викиду ЛШ від значень вищезгаданих кутів нахилу висхідного сегменту наприкінці систоли та діастоли та проаналізувати залежність скорочувальної здатності лівого шлуночка від його геометрії.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

### Експериментальне отримання розмірів лівого шлуночка

У відділі ультразвукових методів дослідження Національного інституту серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова (зав. від. – Бешляга В.М.) за допомогою ехокардіографа були отримані відео записи (у форматі \*.avi), на яких представлено зміни у часі перерізу ЛШ (відносно повздовжньої осі ЛШ)

упродовж циклу серцевого скорочення для хворого та здорового серцець.

За допомогою пакету *VirtualDubMod* із відео отримано покадрові зображення (у форматі \*.png) із інтервалом часу  $\Delta t = 0,027$  с, з яких було визначено висоту  $h$  та діаметр  $D$  параболоїда обертання, що відповідає висоті  $h$ .

### Теоретичний розрахунок кута нахилу висхідного сегменту апікальної петлі

Для того, щоб розрахувати кут нахилу висхідного сегменту під час систоли та діастолі, розглянемо деякі відомі фізіологічні факти.

Скорочення ізольованого серцевого волокна при стимуляції рідко перевищує 20% [8- 10].

Геометрію будемо розглядати для ендокардіальної, або граничної поверхні лівого шлуночка. Тоді для спрощення порожнину лівого шлуночка впродовж серцевого циклу моделюємо параболоїдом обертання навколо вісі  $z$  ( $x$  та  $y$  - декартові координати), вигляду:

$$z = k \cdot (x^2 + y^2) \quad (1)$$

де параметр  $k$  визначає форму порожнини параболоїда (тобто геометрію лівого шлуночка), є змінним впродовж серцевого циклу і визначається за формулою

$$k = \frac{4 \cdot h}{D^2} \quad (2)$$

Тут  $h$  і  $D$  - висота та діаметр параболоїда обертання, що моделює порожнину лівого шлуночка.

Позначимо,  $k_s$  та  $k_d$  - значення параметра  $k$ , отримані для кінцевосистолічного та кінцеводіастолічного розмірів лівого шлуночка.

Поверхню лівого шлуночка будемо задавати двома параметрами -  $x$  та  $y$ . І якщо ці обидва параметри залежать від незалежної змінної  $t$ , тоді ми визначили криву, яка повністю лежить на цій поверхні. Залежність параметрів  $x$  і  $y$  від незалежної змінної  $t$  приймемо з міркувань зручності у вигляді параметрично заданої кривої:

$$\begin{cases} x(t) = b \cdot t \cdot \cos t; \\ y(t) = b \cdot t \cdot \sin t. \end{cases} \quad (3)$$

Ця крива моделює висхідний сегмент апікальної петлі, для якого параметр  $t$  змінюється в межах від  $t_0$  до  $t_1$ , а  $b$  є сталою величиною.

Отже, маємо таку залежність декартових координат кривої від змінної  $t$  у просторі:

$$\begin{cases} x(t) = b \cdot t \cdot \cos t; \\ y(t) = b \cdot t \cdot \sin t; \\ z(t) = k(x(t)^2 + y(t)^2) = k \cdot b^2 \cdot t^2, \end{cases} \quad (4)$$

де  $t_0 \leq t \leq t_1$ .

Враховуючи, що при скороченні висхідного сегменту його довжина наприкінці систоли  $L_s$  зменшується в  $q$  ( $0 < q < 1$ ) разів у порівнянні з довжиною наприкінці діастолі  $L_d$ , маємо рівняння:

$$L_s = q \cdot L_d \quad (5)$$

Обчисливши похідні від декартових координат

$$x'(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \quad y'(t) = \frac{dy(t)}{dt}, \quad z'(t) = \frac{dz(t)}{dt} \quad \text{по}$$

незалежній змінній  $t$ , можемо знайти довжину параметрично заданої кривої за формулою:

$$L = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2 + z'(t)^2} dt \quad (6)$$

тут  $t_0 = 0$  як для  $L_s$ , так і для  $L_d$ , а  $t_1 = t_s$  для  $L_s$  і  $t_1 = t_d$  для  $L_d$  відповідно.

Проінтегрувавши рівняння (5) та враховуючи формули (4), (6) та співвідношення, отримані з виразу (3):

$$t_s = \frac{R_s}{b}, \quad t_d = \frac{R_d}{b} \quad (7)$$

де  $t_s$  та  $t_d$  - значення параметра  $t$  наприкінці систоли та діастолі відповідно,  $R_s$  та  $R_d$  - значення радіуса лівого шлуночка  $R$  наприкінці систоли та діастолі відповідно, отримаємо рівняння відносно невідомої  $b$ , що визначає радіус спіральної кривої при певному значенні  $t$  і яка є сталою впродовж серцевого циклу. Дане нелінійне рівняння, яке ми тут не наводимо через його складність та громіздкість, було розв'язане чисельними методами за допомогою пакету *Maple 9.0* [13] відносно невідомої  $b$ . Тоді, знаючи  $b$ , можемо знайти значення  $t_s$  та  $t_d$  за формулами (7) при відомих радіусах  $R_s$  та  $R_d$ .

Узагальнений кут нахилу  $\alpha$  (рис. 2) кривої (4) відносно поздовжньої осі  $z$  при  $t \rightarrow 0$  буде визначатися так:

$$\operatorname{tg} \alpha = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{dy}{dz} \Rightarrow \alpha = \frac{180^\circ \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b \cdot k} \right)}{\pi}, \quad t_0 \leq t \leq t_1. \quad (8)$$

Тоді значення кутів наприкінці діастолі та наприкінці систоли позначимо як  $\alpha_d$  і  $\alpha_s$  відповідно.

### Експериментальний метод розрахунку об'єму та залежності кутів нахилу висхідного сегменту наприкінці систоли та діастолі від фракції скорочення (q) для здорового та хворого серцець

Об'єм порожнини лівого шлуночка розраховуємо по Л. Тейхольцу [14] (таблиця значень об'ємів для відповідних діаметрів). Ці значення інтерполюємо кривою в пакеті *Origin 6.1* і таким чином отримуємо формулу для знаходження об'єму (в мл):

$$V(d) = 9,48715 - 1,1593 \cdot d + 0,06675 \cdot d^2, \quad (9)$$

де  $d$  - вимірний діаметр лівого шлуночка в мм.

Через  $V(d_d)=V_d$  та  $V(d_s)=V_s$  позначимо кінцеводіастолічний та кінцевосистолічний об'єми відповідно, яким відповідають діаметри  $d_d$  та  $d_s$ :

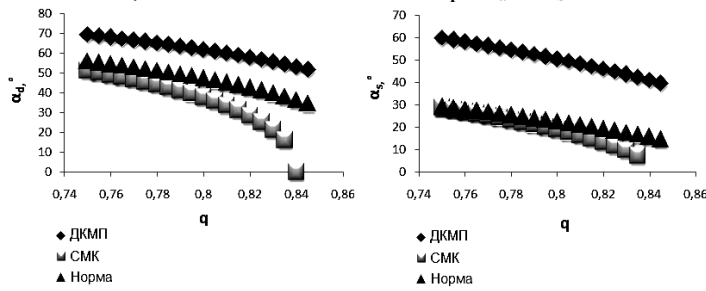


Рис. 2. Кут нахилу висхідного сегменту апікальної петлі відносно повздовжньої осі лівого шлуночка.

Тоді за формулою (9) визначаємо експериментальні об'єми наприкінці діастолі та систолі, знаючи діаметр  $d$ , а за формулою (2) обчислюємо відповідні експериментальні значення  $k$ , визначаючи геометричні розміри лівого шлуночка  $D$  та  $h$  із знімків ехокардіограми впродовж серцевого циклу. Тепер знаючи об'єми можемо знайти ударні об'єми та фракції викиду.

Отже, визначаючи за допомогою ехокардіограм радіуси та діаметри наприкінці систолі та діастолі, можемо за формулою (2) визначити значення параметра  $k$  наприкінці систолі та діастолі. Тоді, знайшовши із рівняння невідому  $b$  (при певному значенні фракції скорочення  $q$ ), за формулою (8) можемо знайти кути нахилу наприкінці систолі та діастолі. Проводячи такі обчислення для певного ряду значень фракції скорочення  $q$ , отримаємо залежність кута нахилу наприкінці систолі та діастолі від фракції скорочення  $q$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В рамках запропонованої моделі обчислено кінцевосистолічний  $\alpha_s$  та кінцеводіастолічний  $\alpha_d$  кути нахилу висхідного сегменту апікальної петлі відносно повздовжньої осі лівого шлуночка при різних значеннях фракції вкорочення  $q$  (відношення довжини волокна наприкінці систолі  $L_s$  до довжини наприкінці діастолі  $L_d$ ). Значення  $q$  обчислювали в межах 0,750 – 0,850 з кроком  $\Delta q = 0,005$ , як для хворих (ДКМП та СМК), так і для здорового серця.

Знайдено теоретичну залежність кута нахилу  $\alpha$  наприкінці систолі та діастолі від фракції вкорочення  $q$ , яка зображена на рис. 3. Ця залежність, як для  $\alpha_s$ , такі для  $\alpha_d$ , є монотонною і спадною, тобто чим більше скорочується м'язове волокно (при цьому  $q$  збільшується), тим меншим є кут нахилу цього волокна відносно повздовжньої осі. Легко помітити, що при різних значеннях  $q$  кути нахилу для ДКМП будуть найбільшими, а для СМК - найменшими.

При цьому значення кутів для здорового серця розташовуються поміж ними.

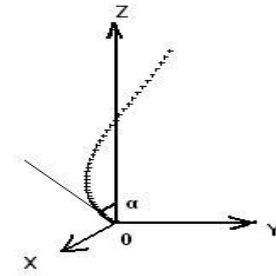


Рис. 3. Теоретичні залежності кута нахилу висхідного сегменту апікальної петлі відносно повздовжньої осі наприкінці діастолі (зліва)  $\alpha_d$  та систолі (справа)  $\alpha_s$  при різних фракціях вкорочення довжини  $q$  для здорового та хворого серця.

Досліджено залежність фракції викиду (ФВ) ЛШ, отриману експериментально, від кута нахилу для здорового та хворого серця.

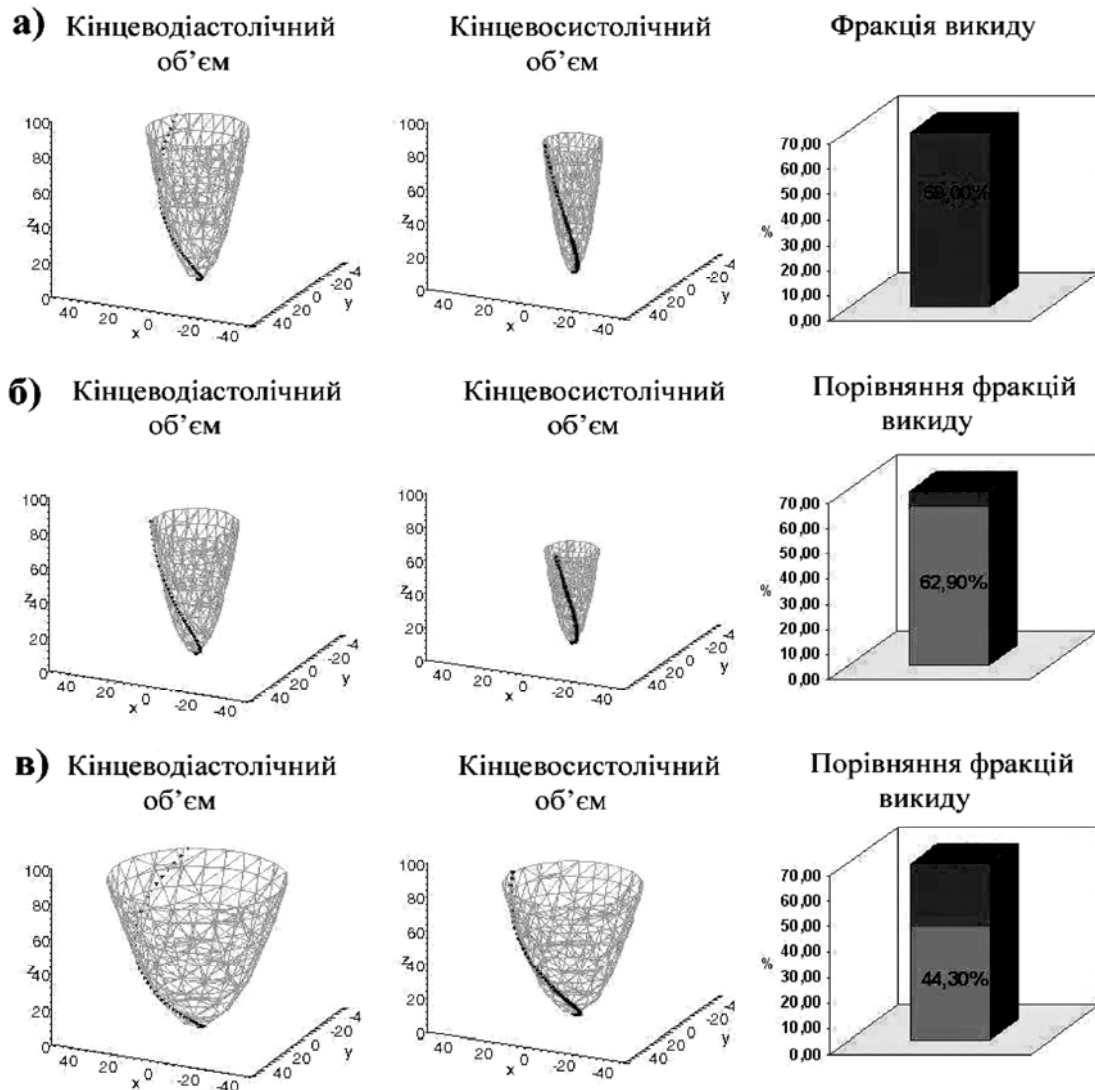
Оскільки основна частина досліджень [15, 16] була виконана при скороченні волокна 20% (якому відповідає значення фракції вкорочення довжини  $q=0,80$ ), що є фізіологічно межевою лінією, то величини кутів нахилу наприкінці діастолі  $\alpha_d$  та систолі  $\alpha_s$ , а також їх різниць  $\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_s$  (абсолютних та відносних) та фракцій викиду будемо аналізувати при  $q = 0,80$ . Ці значення кутів  $\alpha_d, \alpha_s, \Delta\alpha$  та значення ФВ і їх різниць  $\Delta\text{ФВ} = \text{ФВ}^{\text{Норма}} - \text{ФВ}^i$ , різниці значень кутів наприкінці діастолі  $\Delta\alpha_d = \alpha_d^{\text{Норма}} - \alpha_d^i$  та наприкінці систолі  $\Delta\alpha_s = \alpha_s^{\text{Норма}} - \alpha_s^i$ , де  $i = \{\text{ДКМП}, \text{СМК}\}$  наведені в табл.1.

З таблиці видно, що ФВ залежить від ступеня переорієнтації волокон на початку і наприкінці систолі.

При СМК кут нахилу наприкінці діастолі серця зменшується у порівнянні з нормою на 9,39°. Це можна пояснити тим, що волокна у шлуночково-міокардіальній стрічці при цьому захворюванні стають більш вертикально розташованими, що призводить до зменшення порожнини лівого шлуночка. При цьому ФВ при СМК зменшується на 6,10% у порівнянні з нормою.

При ДКМП кут нахилу наприкінці діастолі серця збільшується у порівнянні з нормою на 14,38°. Внаслідок цього змінюється розташування волокон у стінці лівого шлуночка, вони набувають горизонтальної орієнтації. Цим може пояснюватись розширення порожнини лівого шлуночка при ДКМП. При цьому ФВ для ДКМП зменшується на 24,70% у порівнянні з нормою.

Слід також зазначити, що різниця значень кутів  $\Delta\alpha$  є найбільшою для серця в нормі і становить 24,85° (або 52,63%) і найменшою для ДКМП – 11,27° (або 18,30%). Для СМК ж вона становить 18,86° (або 49,85%).



**Рис. 4.** Вигляд висхідного сегменту апікальної петлі та порожнини лівого шлуночка для серця: а) - в нормі, б) – при стенозі мітрального клапану (СМК), в) – при діляційній кардіоміопатії (ДКМП). Праворуч наведено значення фракцій викиду для здорового серця у порівняння із значеннями, отриманими для хворих сердець.

Таблиця 1.

Результати моделювання

ЛШ	$V_d$ , мл	$V_s$ , мл	ФВ, %	$\Delta$ ФВ, %	$\alpha_d$ , °	$\Delta\alpha_d$ , °	$\alpha_s$ , °	$\Delta\alpha_s$ , °	$\Delta\alpha$ , °	$\Delta\alpha$ , %
Норма	75,4	23,4	69,00	-	47,22	-	22,37	-	24,85	52,63
Стеноз МК	50,1	18,6	62,90	6,10	37,83	9,39	18,97	3,40	18,86	49,85
ДКМП	375,0	208,9	44,30	24,70	61,60	-14,38	50,33	-27,96	11,27	18,30

Це є свідченням того, що в нормі скорочувальна здатність лівого шлуночка (тобто здатність до ефективного вигнання та заповнення кров'ю) є максимальною, а при розглянутих вадах серця вона втрачається, про що свідчить зменшення ФВ.

Вигляд висхідного сегменту для здорового та хворого серця наприкінці систоли (при значення параметрів  $k_s$ ,  $0 \leq t \leq t_s$ ) та діастоли (при значенні параметрів  $k_d$ ,  $0 \leq t \leq t_d$ ), отриманий за допомогою

обчислювального пакету Maple 9.0, представлений на рис. 4.

Отримані результати показують, що оптимальна орієнтація волокон міокарда (зокрема, висхідного сегменту) є важливою для ефективного функціонування лівого шлуночка та серця в цілому і розраховані узагальнені кути нахилу волокон є чутливими параметрами якості функціонування лівого шлуночка.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень визначено кінцевосистолічні та кінцеводіастолічні кути нахилу висхідного сегменту апікальної петлі відносно повздовжньої осі лівого шлуночка для серця в нормі та при патології, зокрема, при стенозі мітрального клапану (СМК) та дилатативній кардіоміопатії (ДКМП).

Отримані такі кути нахилу для норми: наприкінці систоли  $\alpha_s = 22,37^\circ$ , наприкінці діастоли  $\alpha_d = 47,22^\circ$ , а середнє цих значень

становить  $\langle \alpha \rangle = \frac{22,37^\circ + 47,22^\circ}{2} = 34,80^\circ$  і в межах

$\sim 1^\circ$  співпадає із кутами, вимірними експериментально іншими дослідниками  $\langle \alpha \rangle = 37,60^\circ$  [18].

Встановлено, що при захворюваннях серця ( на прикладі СМК та ДКМП) відбувається істотне відхилення кутів нахилу наприкінці систоли та діастоли серця від тих значень, яка отримані для серця в нормі. Зокрема, при захворюваннях, зумовлених зменшенням порожнини лівого шлуночка (СМК) кути нахилу як наприкінці систоли, так і наприкінці діастоли - зменшуються, а при захворюваннях, обумовлених розширенням порожнини (ДКМП) - збільшуються у порівнянні із аналогічними значеннями кутів для здорового серця.

Досліджено також, що внаслідок дезорієнтації волокон знижується скоротлива здатність лівого шлуночка, а отже, і його фракція викиду.

Отримані результати мають як наукове, так і практичне значення для кардіохірургії. Узагальнені кути нахилу волокон міокардіальної стрічки є чутливими показниками ремоделювання лівого шлуночка серця та змін його скоротливості.

Ізольований розгляд режимів скорочення різних петель міокарду дозволяє аналізувати та кількісно оцінювати усі фази діяльності серця.

Великий інтерес становить дослідження ремоделювання лівого шлуночка серця при однотипних вадах серця різного ступеню у вигляді змін узагальнених кутів нахилу волокон міокарду, що його формує.

## Література

1. *Torrent-Guasp F.* La Mekanica Ventricular// Rev Lat Cardiol.- 2003. - Vol.24, №1. - P.24-48.
2. *Manuel Castella, Gerald D. Buckberg, Saleh S., Gharib M.* Structure function interface with sequential shortening of basal and apical components of the myocardial band//European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. - 2005. - Vol.27. - P.980-987.

3. *Coghlan H.C., Coghlan L.* Cardiac architecture : gothic versus romanesque. A cardiologist's view // Semin. J. Thorac. Cardiovasc. Surg. - 2001. - Vol. 13, № 4. - P.417-430.
4. *Torrent-Guasp F, Buckberg G.D., Clemente C, Cox J.L., Coghlan H.C., Gharib M.* The Structure and Function of the Helical Heart and its Buttress Wrapping. I. The Normal Macroscopic Structure of the Heart// Semin. Thorac Cardiovasc Surg.- 2001.- Vol.13, №4.- P. 301-319.
5. *Menicanti L., Dor V., Buckberg G.D., Athanasuleas C.L., M. Di Donatano and the Restore Group.* Inferior Wall Restoration: Anatomic and Surgical Consideration// Semin. in Thorac. and Cardiovasc. Surg. - 2001.-Vol.13. - P.504-513.
6. *Suma H. and the Restore Group.* Left ventriculoplasty for nonischemic dilated cardiomyopathy // Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg. - 2001. - Vol.13.-P.514-521.
7. *Зорич В.А.* Математический анализ. - М.:МЦНМО,2002. – 287 с.
8. *Sonnenblick E. H.* Force-velocity relations on mammalian heart muscle// Am. J. Phys. - 1962. - Vol.202. - P.931-939.
9. *Sonnenblick, E. H.* Series elastic and contractile elements in heart muscle: changes in muscle length // Am. J. Phys.- 1964. - Vol.207. - P.1330-1338.
10. *Sonnenblick E. H.* Instantaneous Force-Velocity-Length Determinants in the Contraction of Heart Muscle //Circ. Res. - 1965. - Vol.16. - P.441-451.
11. *Brady, A. J.* Onset of contractility in cardiac muscle// J. Phys. - 1966. - Vol.184. - P.560-580.
12. *Siegel R.E.* Why Galen and Harvey did not compare the heart to a pump// Am J Cardiol.- 1967.-Vol.20. - P.117-21.
13. *В.Дьяконов.* Maple 8 в математике, физике и образовании. –М.:Солон-Пресс, 2003. – 656 с.
14. *Teichholz L. E., Kreulen T., Herman M. V., Gorlin R.* Problems in echocardiographic volume determinations : echocardiographic-angiographic correlations in the presence or absence of asynergy // Am. J. Card. -1976.- Vol. 37. – P.7-11.
15. *Buckberg G.D., Clemente C, Cox J.L., Coghlan H.C., Castella M, Torrent-Guasp F, Gharib M.* The structure and function of the helical heart and its buttress wrapping. IV. Concepts of dynamic function from the normal macroscopic helical structure// Semin Thorac Cardiovasc Surg. - 2001. - Vol.13, №4. - P.342-357.
16. *Ross J.R., Sonnenblick E. H., Covell J. W., Kaiser G. A. Spmo D.* The Architecture of the heart in Systole and Diastole: Technique Of Rapid Fixation And Analysis Of Left Ventricular Geometry// Circ. Res. - 1967. - Vol.21. - P. 409-421.
17. *Streeter J.R., Patel D. J., Ross J.R., Sonnenblick E. H.* Fiber Orientation in the Canine Left Ventricle during Diastole and Systole // Circ. Res. - 1969. - Vol.24, №3. - P.339-347.
18. *Rademakers F.E., Rogers W.J., Guier W.H., Hutchins G.M., Siu C.O., Wei-sfeldt M.D., Weiss J.L., Shapiro E.P.* Relation of regional cross-fiber shortening to wall thickening in the intact heart. Three-dimensional strain analysis by NMR tagging // Circulation. - 1994. - Vol.89. - P.1174-1182.
19. *Sallin E. A.* Fiber orientation and ejection fraction in the human left ventricle // Biophys. J. - 1969. - Vol.9. - P.954-964.

---

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРМАЛЬНОГО И ПАТОЛОГИЧЕСКОГО СОКРАЩЕНИЯ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА КАК СПИРАЛЬНО ПОСТРОЕННОЙ СТРУКТУРЫ. ОЦЕНКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ****Кнышов Г.В., Броварец О.А., Настенко Е.А., Забашта Ю.Ф., Бешляга В.М., Максименко В.Б., Захарова В.П., Костенко Ю.А.**

В данной работе смоделирован восходящий сегмент апикальной петли левого желудочка сердца (ЛЖС) человека для того, чтобы исследовать зависимость фракции выброса (ФВ) и сократительной способности (объем и заполнение) от его геометрии, а, следовательно, и от параметров, которые характеризуют спиральную структуру сердца. ЛЖС человека смоделирован параболоидом вращения. Конечно-систолические и конечно-диастолические размеры ЛЖС, - одновременное его укорочение вдоль продольной оси и сужение в поперечном сечении, рассматриваются как параметры, формирующие спиральный кровоток в аорте, т.е. выталкивание и закручивание крови. Выбраны наиболее отличающиеся друг от друга формы ЛЖС : нормальные, обусловленные стенозом митрального клапана и дилатационной кардиомиопатией. Исследованы фракция выброса и сократительная функция ЛЖС.

Показана информативность данного подхода для количественной оценки процесса формирования недостаточности кровообращения и целесообразность его применения для описания динамики формы ЛЖС и его насосной функции при других пороках клапанов, гипоксической и дилатационной кардиомиопатии.

**Ключевые слова:** левый желудочек сердца человека; конечно-систолические и конечно-диастолические размеры левого желудочка сердца; “спиральное” сокращение левого желудочка; спиральная архитектура сердца; спиральный кровоток в аорте; фракция выброса и сократительная функция левого желудочка; форма левого желудочка сердца в норме, при стенозе митрального клапана и дилатационной кардиомиопатии.

**THE QUANTITATIVE PARAMETERS OF NORMAL AND PATHOLOGICAL CONTRACTION OF HUMAN HEART LEFT VENTRICLE AS HELICAL BUILT STRUCTURE. THE ESTIMATION OF THE DIAGNOSTIC ABILITY OF THE METHOD****Knyshov G.V., Brovarets O.O., Nastenko Ye., Zabashta Yu.A., Beshlyaga V.M., Maksymenko V.B., Zakharova V.P., Kostenko Yu.A.**

In this work the ascending segment of the human left ventricle (LV) apical loop is modelled in order to investigate dependence between ejection fraction (EF), contracting ability (volume and filling) and geometry, and respectively dependence of parameters which characterize helical structure of the heart. The human heart left ventricle is simulated as a paraboloid of rotation. End-systolic and end-diastolic sizes of LV, i. e. its simultaneous shortening along longitudinal axis and narrowing in a cross-sectional plane, considered as parameters of forming a spiral blood flow in aorta, i.e. ejection and torsion of blood. The most different from each other forms of LV are chosen: normal, mitral valve stenosis and dilatation cardiomyopathy.

It is shown the efficiency of this approach for the quantitative estimation of the heart failure forming process and expediency of its application for description of LV form dynamics and its pumping capacity at different heart valves failures, hypoxic and dilatation cardiomyopathy.

**Key words:** human heart left ventricle; end systolic and end diastolic sizes of left ventricle; “helical” contraction of left ventricle; spiral architectonics of heart; spiral blood flow in aorta; left ventricular ejection fraction and contractility; the form of normal left ventricle, at mitral valve stenosis and at dilatation cardiomyopathy.

---