

ISSN 1607-0771(Print); ISSN 2408-9494 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0771-2023-4-22-34>

Расчет показателей миокардиальной работы левого желудочка при ультразвуковом исследовании сердца: методика, возможности, преимущества и ограничения

С.И. Иванов^{1*}, С.П. Лещинская², М.Н. Алёхин^{3, 4}

¹ ФГБУ “Клиническая больница” Управления делами Президента Российской Федерации; 107150 Москва, ул. Лосиноостровская, д. 45, корп. 2, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО “Российский университет медицины” Минздрава России (бывший “Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова”); 127473 Москва, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1, Российская Федерация

³ ФГБУ ДПО “Центральная государственная медицинская академия” Управления делами Президента Российской Федерации; 121359 Москва, ул. Маршала Тимошенко, д. 19, стр. 1А, Российская Федерация

⁴ ФГБУ “Центральная клиническая больница с поликлиникой” Управления делами Президента Российской Федерации; 121359 Москва, ул. Маршала Тимошенко, д. 15, Российская Федерация

Данная статья посвящена оценке показателей миокардиальной работы левого желудочка (ЛЖ) с помощью методики построения кривых давление–деформация – новому инструменту в эхокардиографии, способному учесть влияние постнагрузки сердца на сократительную способность ЛЖ. Подробно изложены алгоритм действий по оценке миокардиальной работы,

возможные трудности и особенности расчета ее основных показателей, обсуждены ограничения и недостатки методики. В статье приведены нормальные значения показателей миокардиальной работы ЛЖ, представлены их характерные изменения и преимущества использования при различных заболеваниях и патологических состояниях сердца.

Иванов Сергей Игоревич – канд. мед. наук, врач кардиологического отделения ФГБУ “Клиническая больница” Управления делами Президента Российской Федерации, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-6768-1045>

Лещинская Светлана Павловна – студентка ФГБОУ ВО “Российский университет медицины” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0004-4482-990X>

Алехин Михаил Николаевич – доктор мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ, заведующий отделением функциональной диагностики ФГБУ “Центральная клиническая больница с поликлиникой” Управления делами Президента Российской Федерации; профессор кафедры терапии, кардиологии и функциональной диагностики с курсом нефрологии ФГБУ ДПО “Центральная государственная медицинская академия” Управления делами Президента Российской Федерации, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9725-7528>

Контактная информация*: Иванов Сергей Игоревич – e-mail: 1539ivanov@mail.ru

Ключевые слова: миокардиальная работа; кривая давление-деформация; speckle-tracking; эхокардиография; левый желудочек

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Цитирование: Иванов С.И., Лещинская С.П., Алёхин М.Н. Расчет показателей миокардиальной работы левого желудочка при ультразвуковом исследовании сердца: методика, возможности, преимущества и ограничения. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2023; 4: 22–34. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2023-4-22-34>.

Концепция миокардиальной работы впервые была использована в экспериментальном исследовании Н. Suga в 1979 г. [1]. Ранее ввиду сложности расчета силы миокарда в качестве ее суррогата было предложено использовать давление, а площадь кривой или петли давление–объем левого желудочка (ЛЖ) – в качестве показателя миокардиальной работы [2]. Известно, что состояние нагрузки ЛЖ весьма динамично и зависит от изменений пред- и постнагрузки сердца. Петля давление–объем ЛЖ обеспечивает визуальное представление этого сложного процесса, иллюстрируя физиологическую адаптацию сердца к поддержанию ударного объема при различных условиях нагрузки, так как отношение механической энергии, сообщаемой миокардом изгоняемой крови, к общему расходу энергии зависит от условий нагрузки [3, 4]. Было установлено, что площадь петли давление–объем пропорциональна потреблению кислорода миокардом ЛЖ и его ударной работе [1]. Однако, несмотря на всю пользу, инвазивно полученные при катетеризации сердца петли давление–объем оказались слишком трудозатратны для повседневной клинической практики.

Дальнейшая эволюция методов сердечно-сосудистой визуализации привела к появлению эхокардиографической (ЭхоКГ)

методике оценки миокардиальной работы с помощью построения кривых (петель) давление–деформация (рис. 1). Эта методика, первоначально предложенная К. Russell и соавт. в 2012 г., включает комбинацию измеренной по методике speckle-tracking продольной систолической деформации (ПСД) и давления в ЛЖ, полученного неинвазивно с помощью эталонной кривой на основе артериального давления (АД) в плечевой артерии [5]. Эта неинвазивная оценка кривых давление–деформация была подтверждена путем сравнения их с инвазивно полученными кривыми, а также путем выявления их корреляции с потреблением кислорода и поглощением глюкозы миокардом ЛЖ, изученными с помощью позитронно-эмиссионной томографии [6]. Учитывая условия нагрузки ЛЖ, анализ показателей миокардиальной работы обеспечивает более углубленный подход к оценке работоспособности миокарда, чем оценка фракции выброса (ФВ) ЛЖ и глобальной продольной систолической деформации (ГПСД) [4]. Новые показатели миокардиальной работы ЛЖ дополняют количественную оценку как глобальной, так и региональной сократительной способности миокарда и позволяют судить в том числе и о наличии его субклинической дисфункции [7, 8].

Ранее нами уже был представлен обзор самых актуальных исследований по оценке показателей миокардиальной работы ЛЖ с помощью построения кривых давление–деформация [9]. **Цель этого исследования:** освещение технических аспектов методики и ее ограничений, которые могут повлиять на корректность оценки показателей миокардиальной работы.

Этапы оценки миокардиальной работы

К настоящему времени для распространения и стандартизации процедуры построения кривых давление–деформация разработана специальная опция программного обеспечения для ультразвукового оборудования, обеспечивающая количественную оценку показателей миокардиальной работы в соответствии с новой методикой [5]. Здесь мы приводим алгоритм расчета этих показателей непосредственно для данной программы.

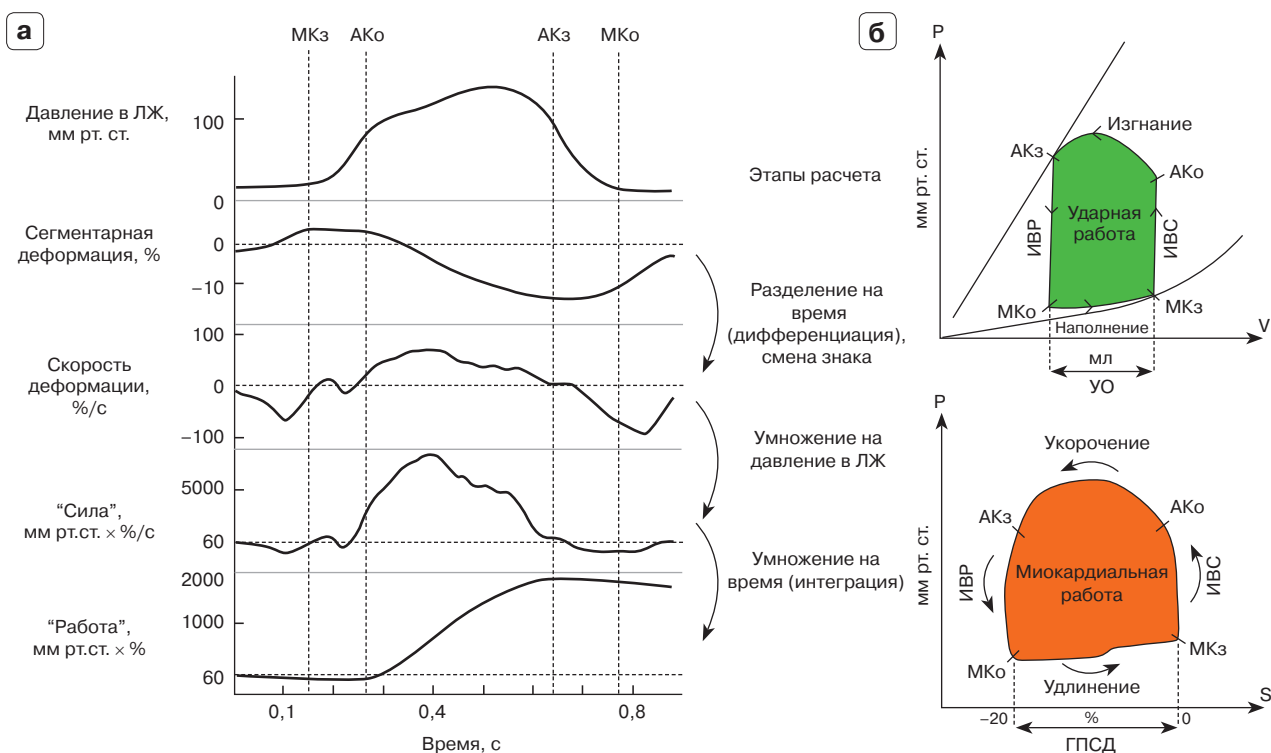


Рис. 1. а – этапы математического расчета кривой сегментарной миокардиальной работы из кривых давления в ЛЖ и сегментарной деформации [6]; б – схемы кривых (петель) давление–объем ЛЖ и давление–деформация, отражающие связь ударной и миокардиальной работы [4].

Примечание. АКз – закрытие аортального клапана, АКо – открытие аортального клапана, ИВР – фаза изоволюмического расслабления, ИВС – фаза изоволюмического сокращения, МКз – закрытие митрального клапана, МКо – открытие митрального клапана, УО – ударный объем.

Fig. 1. a – stages of mathematical calculation of the segmental myocardial work curve from the LV pressure and segmental strain curves [6]; **б** – schemes of LV pressure–volume and pressure–strain curves (loops), reflecting the relationship between stroke work and myocardial work [4].



Рис. 2. Последовательность действий по оценке показателей миокардиальной работы ЛЖ по методике построения кривых давление–деформация (описание в тексте).

Fig. 2. Sequencing of actions for estimation of LV myocardial work indicators using the method of constructing pressure-strain loops.

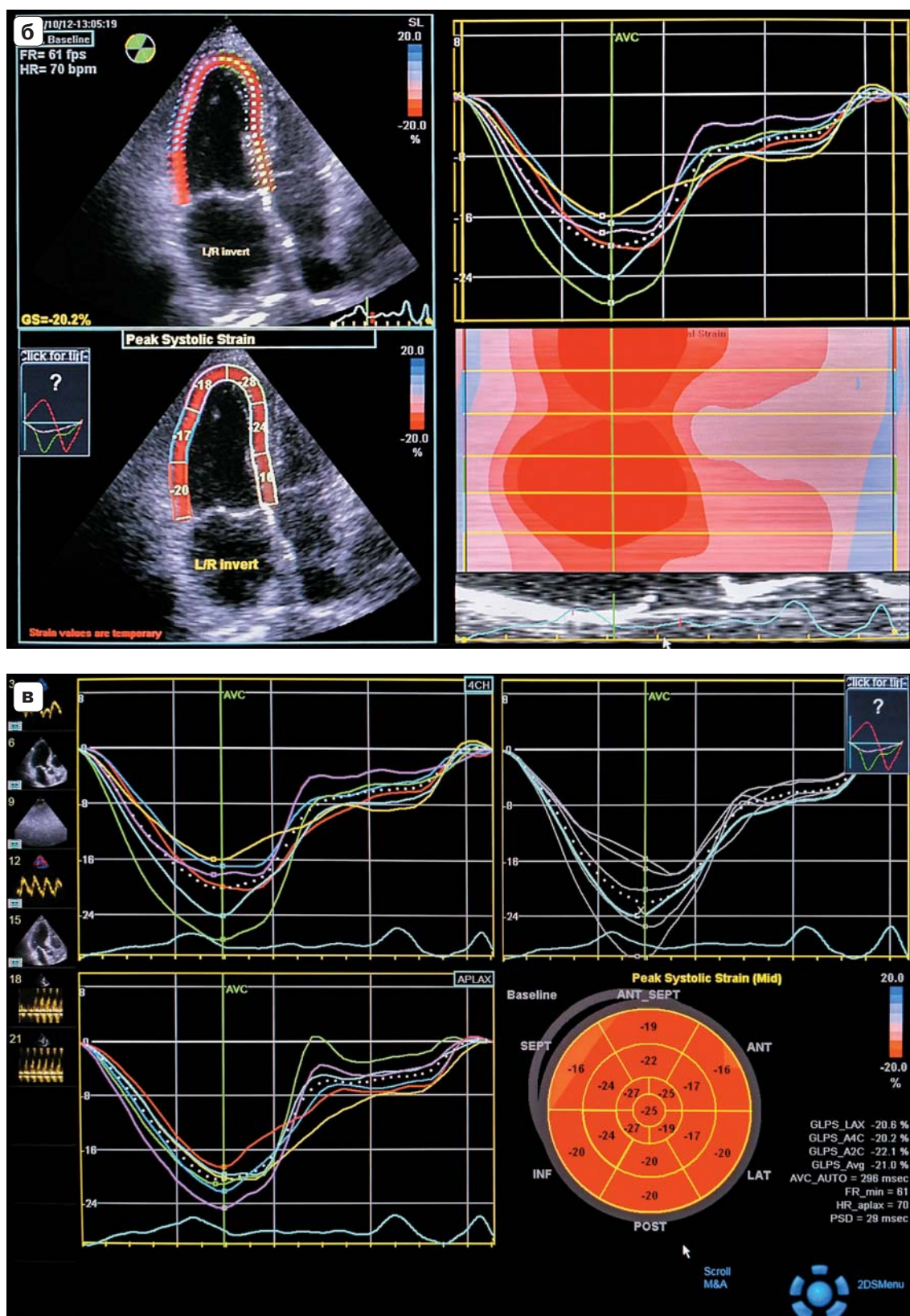


Рис. 2 (продолжение).

Fig. 2 (continuation).

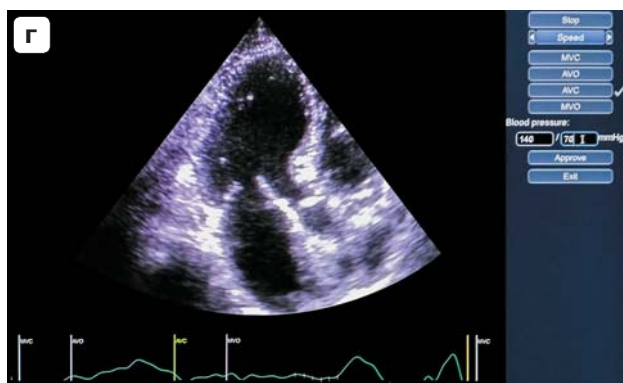
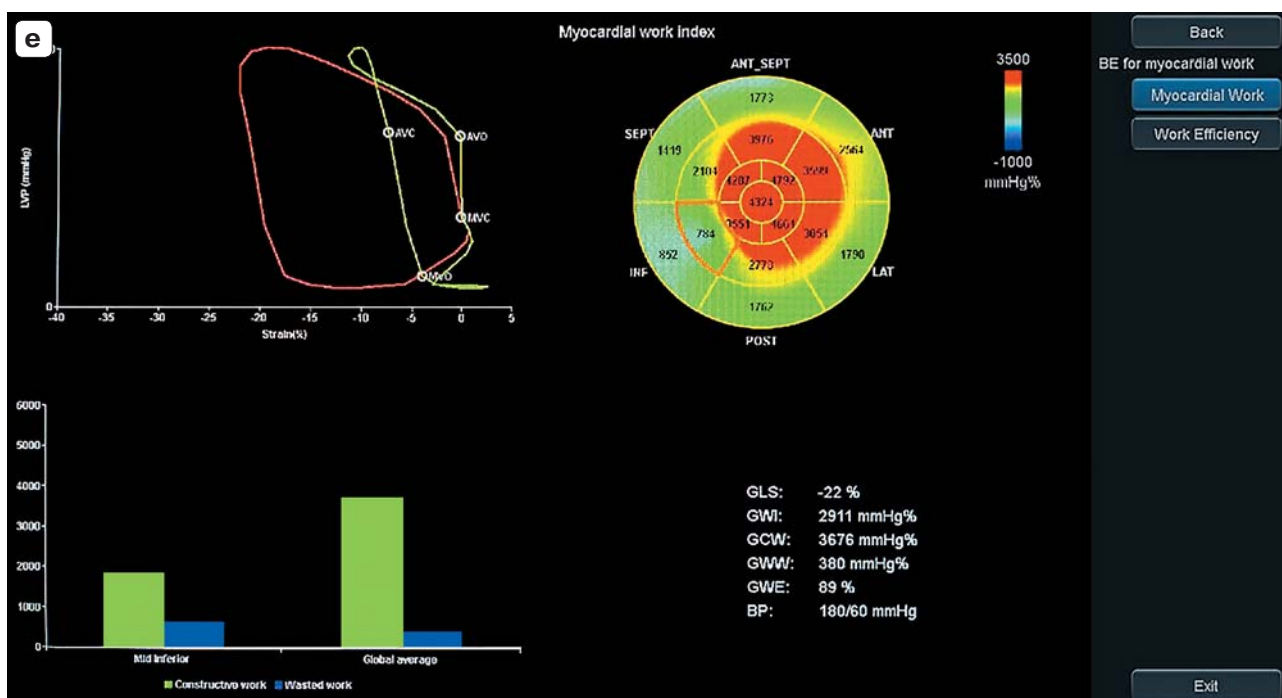
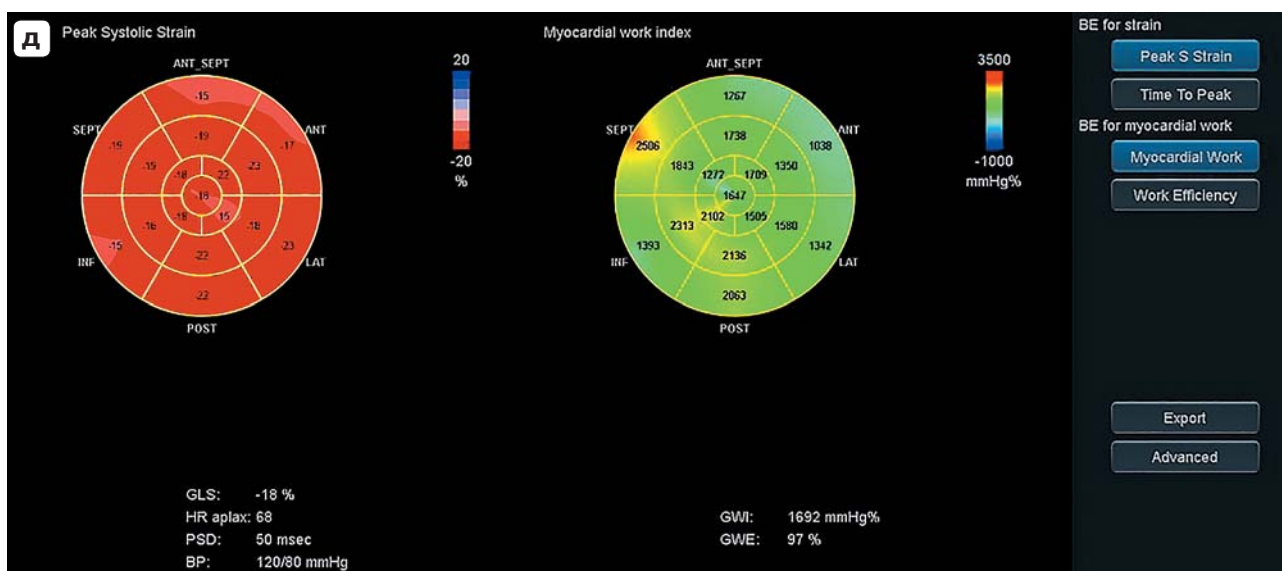


Рис. 2 (окончание).
Fig. 2 (end).



Первым этапом является выведение стандартных ЭхоКГ-позиций: из верхушечной позиции по длинной оси ЛЖ (трехкамерной), верхушечной четырехкамерной и верхушечной двухкамерной. При этом должны быть соблюдены следующие правила записи серошкальных изображений: запись минимум одного полного сердечного цикла с частотой более 40 кадров в секунду; одинаковая частота сердечных сокращений (ЧСС) в клипах; обязательная сопутствующая регистрация электрокардиограммы (ЭКГ); оптимальная визуализация границ миокарда всех сегментов ЛЖ.

Используя функцию автоматической компьютерной обработки данных AFI (automated function imaging), стандартно определяют продольную систолическую деформацию последовательно в порядке, указанном выше, для каждого из трех изображений. При определении области интереса (ROI, region of interest) мы рекомендуем использовать ручную трассировку границы эндокарда (первоначальная автоматическая трассировка, как правило, допускает множество неточностей) и корректно устанавливать толщину стенки ЛЖ (рис. 2а). Следует помнить о следующих особенностях: папиллярные мышцы не должны быть включены в ROI; слишком широкая ROI с сопутствующим вовлечением перикарда приводит к снижению значений ПСД, а слишком узкая, включающая преимущественно эндокард, наоборот, – к завышенным значениям ПСД. Изображения, в которых определение ПСД затруднено в более чем 1 сегменте миокарда, следует исключать из анализа [10].

В итоге отображается конечный результат speckle-tracking-ЭхоКГ: для каждого изображения из соответствующей позиции разными цветами строятся графики зависимости значения ПСД конкретного сегмента ЛЖ от фазы сердечного цикла (рис. 2б), а также значения ПСД для каждого из 17 сегментов ЛЖ на диаграмме “бычий глаз” (рис. 2в).

Следующим этапом является собственно расчет показателей миокардиальной работы ЛЖ, который включает в себя 2 части. В панели инструментов ультразвукового оборудования необходимо выбрать соответствующую программу (“Myocardial Work”). Первой важной частью этапа является кор-

ректное определение моментов открытия и закрытия митрального и аортального клапанов для определения продолжительности фаз изоволюмического сокращения, изгнания и изоволюмического расслабления. Это можно выполнить двумя способами, которые отобразятся в появившемся окне. При выборе “Event Timing” клапанные события будут выставлены автоматически на записи ЭКГ внизу экрана при условии, что ранее, при выполнении стандартного ЭхоКГ-исследования, они были установлены с помощью импульсно-волновой доплерографии соответствующих клапанов. Это подходит для ситуаций, когда четкая визуализация моментов открытия и закрытия клапанов затруднена, например при наличии протеза клапана или выраженного кальциноза. При выборе “AFI / 2DStrain” клапанные моменты нужно будет установить самостоятельно в соответствии с данными изображения двухмерной ЭхоКГ из верхушечной трехкамерной позиции (рис. 2г). Здесь опять становится актуальным качество полученных серошкальных изображений, так как должны хорошо визуализироваться створки клапанов и моменты их смыкания и размыкания – для митрального клапана это, как правило, не вызывает проблем, в отличие от аортального.

На этом же этапе нужно указать значения систолического и диастолического АД (“Blood pressure”), которые необходимо получить при измерении у пациента сфигмоманометром на плечевой артерии одновременно с проведением ультразвукового исследования и в том же положении тела пациента (это необходимо для обеспечения достоверной корреляции АД с постнагрузкой ЛЖ во время получения изображений [11]). Ключевую роль играет здесь систолическое АД, так как, согласно методике, оно приравнивается к пиковому давлению в ЛЖ, и на его основе строится эталонная кривая давления в ЛЖ (рис. 3) [5].

Эталонная кривая давления в ЛЖ рассчитана К. Russell и соавт. на основе экспериментальных данных следующим путем: растяжение или сжатие необработанных “сырых” инвазивных записей давления в ЛЖ за один цикл в соответствии со временем клапанных событий; объединение записей в одну усредненную кривую давления за один цикл; растягивание кривой

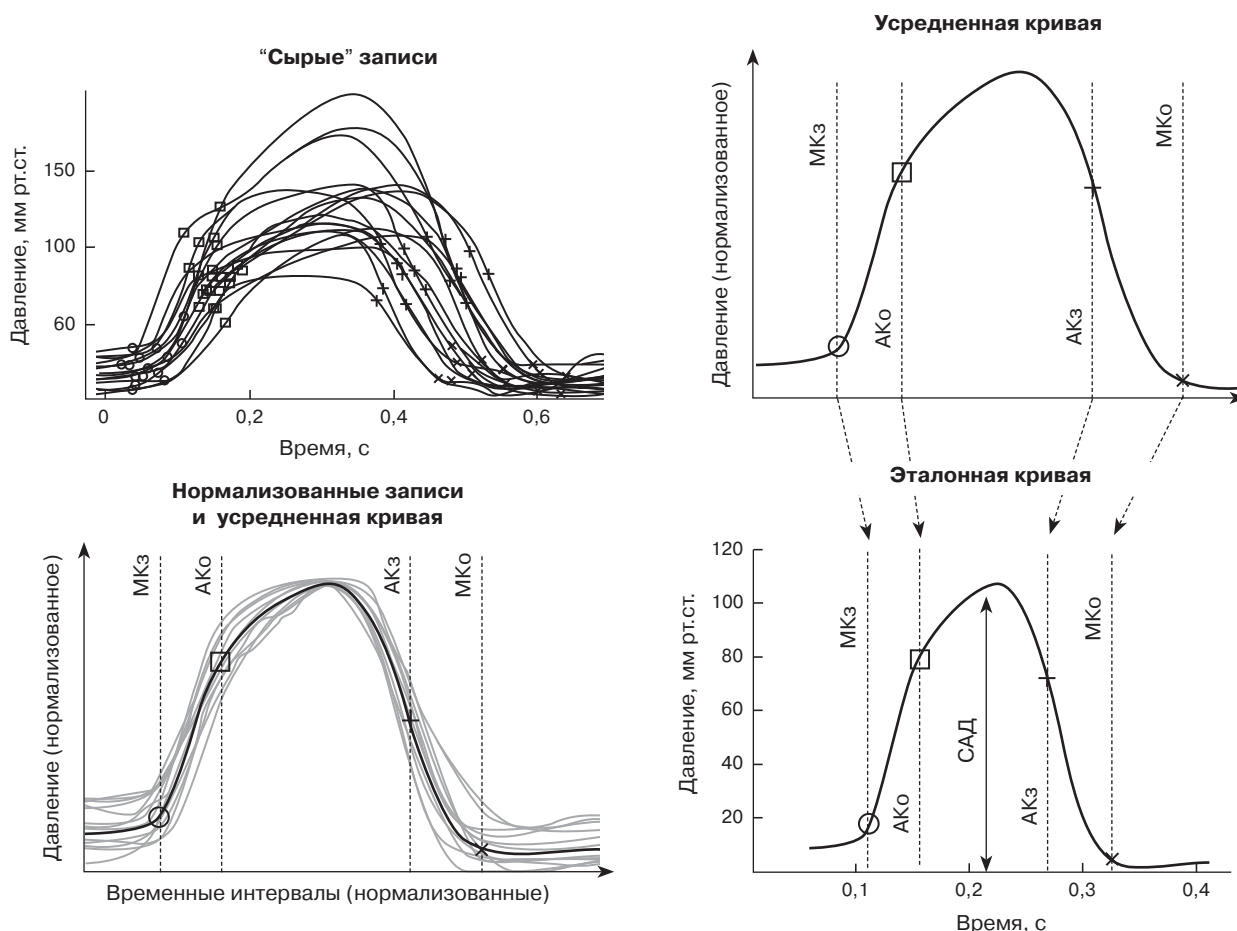


Рис. 3. Создание кривой давления в ЛЖ на основе эталонной модели и АД в плечевой артерии.

Fig. 3. Creating of the left ventricular pressure curve based on estimated model and brachial arterial blood pressure.

по вертикали до соответствующего пикового значения, равного неинвазивному систолическому АД в плечевой артерии [5].

Затем на основе полученных данных деформации, значений АД и установленных моментов открытия и закрытия митрального и аортального клапанов путем построения петли давление–деформация рассчитываются показатели миокардиальной работы ЛЖ (табл. 1).

В табл. 1 представлены основные показатели миокардиальной работы ЛЖ и границы их нормальных значений согласно наиболее крупным проведенным исследованиям [12–14].

Помимо значений показателей глобальной миокардиальной работы, на экране также отображаются значения индекса миокардиальной работы и ПСД для каждо-

го из 17 сегментов ЛЖ в виде диаграммы “бычий глаз” (цветовое картирование позволяет наглядно визуализировать различия между высокими, нормальными и сниженными значениями [11]) (рис. 2д), а при выборе опции “Advanced” справа – соотношение конструктивной и потерянной работ в виде гистограммы и общая кривая давление–деформация вместе с кривой отдельно для каждого сегмента (при выборе на диаграмме “бычий глаз”) (рис. 2е). Следует обратить внимание, что на всех диаграммах представлены средние значения показателей так называемой шапки верхушки ЛЖ, тогда как при более детальном анализе, который можно получить при выборе “Export”, значения показателей даны для 18-сегментной модели ЛЖ, то есть с разделением верхушки на 6 сегментов.

Таблица 1. Определение основных показателей миокардиальной работы ЛЖ и границы их нормальных значений

Наименование	Определение	Границы нормальных значений
Индекс глобальной миокардиальной работы (GWI, Global Work Index)	Вся работа, совершаемая ЛЖ за период времени от закрытия до открытия митрального клапана (в течение механической систолы), определяемая как площадь петли давление–деформация	Все: 2010 (95% ДИ 1907–2113) мм рт. ст.×% Женщины: 2155 ± 275 мм рт.ст. ×% Мужчины: 2062 ± 269 мм рт.ст.×%
Глобальная конструктивная работа (GCW, Global Constructive Work)	Работа, выполненная миокардом ЛЖ, способствующая изгнанию крови во время систолы; отражает укорочение кардиомиоцитов во время систолы и их удлинение в фазу изоволюмического расслабления	Все: 2278 (95% ДИ 2186–2369) мм рт.ст.×% Женщины: 2283 ± 286 мм рт.ст.×% Мужчины: 2229±275 мм рт.ст.×%
Глобальная потерянная работа (GWW, Global Wasted Work)	Работа, выполненная миокардом ЛЖ, которая не способствует изгнанию крови из полости ЛЖ; отражает удлинение кардиомиоцитов во время систолы и их укорочение в фазу изоволюмического расслабления	Все: 80 (95% ДИ 73–87) мм рт.ст.×% Женщины: 68 (49–93) мм рт.ст.×% Мужчины: 60 (42–84) мм рт.ст.×%
Эффективность глобальной миокардиальной работы (GWE, Global Work Efficiency)	Расчетный показатель – отношение конструктивной работы к сумме конструктивной и потерянной работ (GCW/[GCW + GWW])	Все: 96 (95% ДИ 96–96)% Женщины: 97 (96–98)% Мужчины: 97 (96–98)%

Примечание. Границы нормальных значений представлены в виде средних значений ± стандартное отклонение или медианы, нижнего и верхнего квартилей (для всех пациентов представлены границы 95% доверительного интервала (ДИ)).

Ограничения методики построения кривых давление–деформация

Закономерно к ограничениям оценки показателей миокардиальной работы с помощью построения кривых давление–деформация относятся ограничения speckle-tracking-ЭхоКГ: адекватное качество визуализации (частота кадров не менее 40 в секунду, отсутствие “срезанных” изображений, корректное определение границы эндокарда ЛЖ); правильный сердечный ритм – оценка деформации невозможна при фибрилляции предсердий или выраженной разнице в ЧСС между ЭхоКГ-клипами [10].

Необходимо еще раз подчеркнуть, что, с физиологической точки зрения, главный показатель методики построения кривых давление–деформация, индекс миокардиальной работы ЛЖ, является лишь эквивалентом истинной работы миокарда, а сама

методика – лишь дополнение к ЭхоКГ-методике speckle-tracking, именно поэтому показатели методики измеряются не в джоулях, а в мм рт.ст.×%. Расчет показателей миокардиальной работы основан на ряде определенных допущений, которые влекут за собой возможные ошибки и серьезные ограничения. В первую очередь, это предположение, что периферическое систолическое давление, измеренное манжетным тонометром в плечевой артерии, условно равно максимальному внутрисердечному давлению в ЛЖ. В связи с этим любые патологические состояния, при которых периферическое давление достоверно отличается от центрального или значительно варьируется между разными участками артериального русла, искажают истинную оценку миокардиальной работы [15]. К таким состояниям относятся, например, тяжелый

аортальный стеноз, гипертрофическая кардиомиопатия со значимой обструкцией выносящего тракта ЛЖ (с градиентом более 30 мм рт.ст.), выраженный атеросклероз сосудов верхних конечностей, когда разница значений давления, полученных в разных плечевых артериях, может составлять 20 мм рт.ст. и более, и др.

Оценка показателей миокардиальной работы может быть неточна у пациентов, левый желудочек которых подвергся обширному ремоделированию [11]. В наследство от speckle-tracking-ЭхоКГ-методики построения кривых давление–деформация досталось предположение, что толщина стенки ЛЖ одинакова во всех сегментах миокарда. Однако установлено, что региональная гипертрофия может влиять на деформацию миокарда, а следовательно, и на показатели миокардиальной работы [16]. В методике теоретически также не учитывается геометрия ЛЖ, которая, согласно закону Лапласа, играет немаловажную роль в работе ЛЖ. Условно пациент с дилатированным сферическим ЛЖ и пациент с нормальными размерами ЛЖ должны показывать схожие значения GWI при одинаковых ГПСД и АД [4]. Однако, несмотря на это, в исследовании M. Tokodi и соавт. была продемонстрирована хорошая адаптация показателей миокардиальной работы к изменению геометрии ЛЖ в ответ на нагрузку на примере имитации спортивного сердца у крыс [17]. Наконец в расчете показателей миокардиальной работы используется только продольная деформация, пренебрегая работой, связанной с радиальной и циркулярной деформацией, которая также вносит свой вклад в сократимость ЛЖ [4].

В настоящее время существует только один производитель программного обеспечения для собственных ультразвуковых аппаратов со встроенной функцией оценки показателей миокардиальной работы с по-

мощью построения кривых давление–деформация, что также может являться ограничением методики, поскольку ее использование доступно соответственно только для обладателей сканеров этого единственного производителя [11].

Внутри- и межисследовательская воспроизводимость показателей миокардиальной работы ЛЖ аналогична воспроизводимости ГПСД [18]. Требования к исследователю для расчета показателей миокардиальной работы сводятся, как правило, к его способности выполнения методики speckle-tracking. Согласно экспертному мнению, рекомендуется провести как минимум 100 исследований по оценке продольной систолической деформации с коэффициентом внутриклассовой корреляции $>0,90$ для достижения приемлемого уровня компетентности [8].

Оценка миокардиальной работы в клинической практике

Несмотря на все представленные выше ограничения методики, в многочисленных исследованиях показатели миокардиальной работы оказались более чувствительными маркерами нарушения региональной и глобальной сократительной функции ЛЖ по сравнению с ФВ ЛЖ и ГПСД. Главное преимущество методики построения кривых давление–деформация заключается в оценке нескольких компонентов (показателей) миокардиальной работы (см. табл. 1), комбинированная интерпретация которых позволяет дать более глубокое понимание адаптации ЛЖ к изменяющимся условиям нагрузки при различных патофизиологических состояниях, в отличие от расчета одного единственного показателя [4]. В табл. 2 кратко представлены результаты наиболее значимых исследований по применению оценки показателей миокардиальной работы ЛЖ при различных заболеваниях [11].

Таблица 2. Доказанные преимущества применения показателей миокардиальной работы ЛЖ в клинической практике

Патология	Значение показателей миокардиальной работы
Артериальная гипертензия	GWI и GCW увеличиваются с увеличением постнагрузки (при АГ), в то время как ГПСД и ФВ ЛЖ остаются неизменными [18, 19] GWI увеличивается постепенно вместе с каждой степенью АГ [20]

Таблица 2 (окончание).

Патология	Значение показателей миокардиальной работы
Ишемическая болезнь сердца	Оценка региональной миокардиальной работы превосходит ФВ ЛЖ и ГПСД в выявлении острой коронарной окклюзии у пациентов с инфарктом миокарда ЛЖ без подъема сегмента ST [21] Значение $GW_I \leq 1810$ мм рт.ст.×% имеет положительную прогностическую ценность в 95% в выявлении значимого поражения коронарных артерий [22] Значения показателей региональной миокардиальной работы, в частности GWE, снижаются в областях ЛЖ, снабжаемых стенозированными коронарными артериями, при стресс-ЭхоКГ [23]
Желудочковая диссинхрония	У пациентов с БЛНПГ выявлен статистически больший уровень потерянной миокардиальной работы, который улучшается после проведения СРТ [6] Потерянная миокардиальная работа сегментов межжелудочковой перегородки в сочетании с индексом локальной сократимости ЛЖ является сильным предиктором благоприятного ответа на СРТ [24]
Гипертрофическая кардиомиопатия	GCW статистически значимо снижена у пациентов с гипертрофической кардиомиопатией [25] Значения $GCW \leq 1550$ мм рт.ст.×% ассоциировались со значимым фиброзом миокарда ЛЖ по данным МРТ сердца с контрастированием гадолинием [26] Значения $GCW > 1730$ мм рт.ст.×% ассоциировались с лучшим прогнозом выживаемости при необструктивной гипертрофической кардиомиопатии [27]
Амилоидоз	GW_I превосходит ГПСД в прогнозировании неблагоприятных сердечно-сосудистых событий и смертности от всех причин [28]
Дилатационная кардиомиопатия	GW_I, GCW и GWE являются лучшими предикторами фиброза миокарда по данным МРТ, чем ГПСД [29] GW_I и GCW являются достоверными предикторами смертности от всех причин и имплантации вспомогательного устройства для ЛЖ либо трансплантации сердца [30]
Кардиоонкология	Показатели миокардиальной работы ассоциировались с более высокой вероятностью сопутствующей сердечно-сосудистой дисфункции, обусловленной противоопухолевым лечением, чем ГПСД, у небольшой подгруппы пациентов со снижением систолического АД > 21 мм рт.ст. и изменением ГПСД ($< 3,3\%$) [31]
Клапанные пороки сердца	GW_I, GCW и GWW статистически значимо увеличены у пациентов с аортальным стенозом. Снижение GW_I и GCW при последующем наблюдении ассоциировалось с повышением смертности [32] GW_I и GCW положительно коррелировали со степенью аортальной регургитации у пациентов с нормальной ФВ ЛЖ [33] GW_I является предиктором обратного ремоделирования ЛЖ с пороговым значением 1285 мм рт.ст.×% [33] Сниженные значения GW_I, GCW и GWW ассоциировались с худшей долгосрочной выживаемостью у пациентов с тяжелой функциональной митральной регургитацией [34] GCW улучшалась после транскатетерной пластики митрального клапана по методу “край-в-край” (в отличие от ГПСД и ФВ ЛЖ) [35]
COVID-19	Сниженные значения GWE ассоциировались с повышением внутрибольничной смертности при COVID-19 [36]

Примечание. GW_I – индекс миокардиальной глобальной работы, GCW – глобальная конструктивная работа, GWW – глобальная потерянная работа, GWE – эффективность глобальной миокардиальной работы, ГПСД – глобальная продольная систолическая деформация, ФВ – фракция выброса, ЛЖ – левый желудочек, АГ – артериальная гипертензия, БЛНПГ – блокада левой ножки пучка Гиса, СРТ – сердечная ресинхронизирующая терапия, МРТ – магнитно-резонансная томография.

Представленные в табл. 2 результаты исследований указывают на перспективность использования методики расчета показателей миокардиальной работы ЛЖ у пациентов с самыми разными заболеваниями. Несомненно, и список этих заболеваний, и сведения о характерных изменениях показателей миокардиальной работы при каждом из них в дальнейшем будут дополняться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет показателей миокардиальной работы ЛЖ с помощью построения кривых на основе неинвазивного давления и продольной деформации представляет собой методику комплексной оценки сократительной способности миокарда ЛЖ. Интерпретация показателей миокардиальной работы ЛЖ может предоставить ценную информацию об основных патофизиологических механизмах при различных сердечно-сосудистых заболеваниях. Очевидно, что методика имеет большой потенциал, вызывает растущий интерес, и для окончательного подтверждения ее диагностических и прогностических возможностей необходимы дальнейшие более масштабные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ [REFERENCES]

1. Suga H. Total mechanical energy of a ventricle model and cardiac oxygen consumption. *Am. J. Physiol.* 1979; 236 (3): H498–505. <http://doi.org/10.1152/ajpheart.1979.236.3.H498>
2. Bastos M.B., Burkhoff D., Maly J., Daemen J., den Uil C.A., Ameloot K., Lenzen M., Mahfoud F., Zijlstra F., Schreuder J.J., Van Mieghem N.M. Invasive left ventricle pressure-volume analysis: overview and practical clinical implications. *Eur. Heart J.* 2020; 41: 1286–1297. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz552>
3. Ilardi F., D'Andrea A., D'Ascenzi F., Bandera F., Benfari G., Esposito R., Malagoli A., Mandoli G.E., Santoro C., Russo V., Crisci M., Esposito G., Cameli M., On behalf of the working group of echocardiography of the italian society of cardiology sic. Myocardial work by echocardiography: principles and applications in clinical practice. *J. Clin. Med.* 2021; 10: 4521. <https://doi.org/10.3390/jcm10194521>
4. Moya A., Buytaert D., Penicka M., Bartunek J., Vanderheyden M. State-of-the-Art: Noninvasive Assessment of Left Ventricular Function Through Myocardial Work. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2023; 36 (10): 1027–1042. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2023.07.002>
5. Russell K., Eriksen M., Aaberge L., Wilhelmsen N., Skulstad H., Remme E.W., Haugaa K.H., Opdahl A., Fjeld J.G., Gjesdal O., Edvardsen T., Smiseth O.A. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work. *Eur. Heart J.* 2012; 33 (6): 724–733. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehs016>
6. Russell K., Eriksen M., Aaberge L., Wilhelmsen N., Skulstad H., Gjesdal O., Edvardsen T., Smiseth O.A. Assessment of wasted myocardial work: a novel method to quantify energy loss due to uncoordinated left ventricular contractions. *Am. J. Physiol. – Heart and Circ. Physiol.* 2013; 305 (7): H996–1003. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00191.2013>
7. Papadopoulos K., Özden Tok Ö., Mitrousi K., Ikonomidis I. Myocardial Work: Methodology and Clinical Applications. *Diagnostics (Basel)*. 2021; 11 (3): 573. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11030573>
8. Smiseth O.A., Donal E., Penicka M., Sletten O.J. How to measure left ventricular myocardial work by pressure-strain loops. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2021; 22 (3): 259–261. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeaa301>
9. Иванов С.И., Алехин М.Н. Неинвазивные показатели работы миокарда в оценке систолической функции левого желудочка. *Кардиология.* 2020; 60 (3): 80–88. <https://doi.org/10.18087/cardio.2020.3.n925>
Ivanov S.I., Alekhin M.N. Myocardial work in assessment of left ventricular systolic function. *Kardiologiya.* 2020; 60 (3): 80–88. <https://doi.org/10.18087/cardio.2020.3.n925> (In Russian)
10. Collier P., Phelan D., Klein A. A Test in Context: Myocardial Strain Measured by Speckle-Tracking Echocardiography. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2017; 69 (8): 1043–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2016.12.012>
11. Marzlin N., Hays A.G., Peters M., Kaminski A., Roemer S., O'Leary P., Kroboth S., Harland D.R., Khandheria B.K., Tajik A.J., Jain R. Myocardial Work in Echocardiography. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2023; 16 (2): e014419. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.122.014419>
12. Manganaro R., Marchetta S., Dulgheru R., Ilardi F., Sugimoto T., Robinet S., Cimino S., Go Y.Y., Bernard A., Kacharava G., Athanassopoulos G.D., Barone D., Baroni M., Cardim N., Hagendorff A., Hristova K., López-Fernández T., de la Morena G., Popescu B.A., Penicka M., Ozyigit T., Rodrigo Carbonero J.D., van de Veire N., Von Bardeleben R.S., Vinereanu D., Zamorano J.L., Rosca M., Calin A., Moonen M., Magne J., Cosyns B., Galli E., Donal E., Carerj S., Zito C., Santoro C., Galderisi M., Badano L.P., Lang R.M., Oury C., Lancellotti P. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices: results from the EACVI NORRE study. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2019; 20 (5): 582–590. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jey188>
13. Truong V.T., Vo H.Q., Ngo T.N.M., Mazur J., Nguyen T.T.H., Pham T.T.M., Le T.K., Phan H., Palmer C., Nagueh S.F., Chung E.S. Normal Ranges of Global Left Ventricular Myocardial Work Indices in Adults: A Meta-Analysis. *J. Am. Soc.*

- Echocardiogr.* 2022; 35 (4): 369–377.e8. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2021.11.010>
14. Olsen F.J., Skaarup K.G., Lassen M.C.H., Johansen N.D., Sengeløv M., Jensen G.B., Schnohr P., Marott J.L., Søgaard P., Gislason G., Svendsen J.H., Møgelvang R., Aalen J.M., Remme E.W., Smiseth O.A., Biering-Sørensen T. Normal Values for Myocardial Work Indices Derived From Pressure-Strain Loop Analyses: From the CCHS. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2022; 15 (5): e013712. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.121.013712>
 15. Chan J., Edwards N.F.A., Scalia G.M., Khandheria B.K. Myocardial Work: A New Type of Strain Imaging? *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; S0894–7317 (20) 30295–30299. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.05.004>
 16. Dobrovie M., Bèzy S., Ünlü S., Chakraborty B., Petrescu A., Duchenne J., Beela A.S., Voigt J.U. How Does Regional Hypertrophy Affect Strain Measurements With Different Speckle-Tracking Methods? *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2019; 32 (11): 1444–1450. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.06.008>
 17. Tokodi M., Oláh A., Fábíán A., Lakatos B.K., Hizoh I., Ruppert M., Sayour A.A., Barta B.A., Kiss O., Sydó N., Csulak E., Ladányi Z., Merkely B., Kovács A., Radovits T. Novel insights into the athlete's heart: is myocardial work the new champion of systolic function? *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2022; 23 (2): 188–197. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeab162>
 18. Chan J., Edwards N.F.A., Khandheria B.K., Shiino K., Sabapathy S., Anderson B., Chamberlain R., Scalia G.M. A new approach to assess myocardial work by non-invasive left ventricular pressure – strain relations in hypertension and dilated cardiomyopathy. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2019; 20 (1): 31–39. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jez131>
 19. Tadic M., Cuspidi C., Pencic B., Grassi G., Celic V. Myocardial work in hypertensive patients with and without diabetes: an echocardiographic study. *J. Clin. Hypertens. (Greenwich).* 2020; 22: 2121–2127. <https://doi.org/10.1111/jch.14053>
 20. Jaglan A., Roemer S., Perez Moreno A.C., Khandheria B.K. Myocardial work in stage 1 and 2 hypertensive patients. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2021; 22: 744–750. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeab043>
 21. Boe E., Russell K., Eek C., Eriksen M., Remme E.W., Smiseth O.A., Skulstad H. Non-invasive myocardial work index identifies acute coronary occlusion in patients with non-ST-segment elevation-acute coronary syndrome. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2015; 16: 1247–1255. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev078>
 22. Edwards N.F.A., Scalia G.M., Shiino K., Sabapathy S., Anderson B., Chamberlain R., Khandheria B.K., Chan J. Global myocardial work is superior to global longitudinal strain to predict significant coronary artery disease in patients with normal left ventricular function and wall motion. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2019; 32: 947–957. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.02.014>
 23. Borrie A., Goggin C., Ershad S., Robinson W., Sasse A. Noninvasive myocardial work index: characterizing the normal and ischemic response to exercise. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33: 1191–1200. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.05.003>
 24. Vecera J., Penicka M., Eriksen M., Russell K., Bartunek J., Vanderheyden M., Smiseth O.A. Wasted septal work in left ventricular dyssynchrony: a novel principle to predict response to cardiac resynchronization therapy. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2016; 17: 624–632. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jew019>
 25. Galli E., Vitel E., Schnell F., Le Rolle V., Hubert A., Lederlin M., Donal E. Myocardial constructive work is impaired in hypertrophic cardiomyopathy and predicts left ventricular fibrosis. *Echocardiogr.* 2019; 36: 74–82. <https://doi.org/10.1111/echo.14210>
 26. Gonçalves A.V., Rosa S.A., Branco L., Galrinho A., Fiarresga A., Lopes L.R., Thomas B., Baquero L., Carmo M.M., Ferreira R.C. Myocardial work is associated with significant left ventricular myocardial fibrosis in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* 2021; 37: 2237–2244. <https://doi.org/10.1007/s10554-021-02186-3>
 27. Hiemstra Y.L., van der Bijl P., El Mahdoui M., Bax J.J., Delgado V., Marsan N.A. Myocardial work in nonobstructive hypertrophic cardiomyopathy: implications for outcome. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33: 1201–1208. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.05.010>
 28. Clemmensen T.S., Eiskjær H., Ladefoged B., Mikkelsen F., Sørensen J., Granstam S.O., Rosengren S., Flachskampf F.A., Poulsen S.H. Prognostic implications of left ventricular myocardial work indices in cardiac amyloidosis. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2021; 22: 695–704. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeaa097>
 29. Cui C., Li Y., Liu Y., Huang D., Hu Y., Wang Y., Ma L., Liu L. Association between echocardiographic non-invasive myocardial work indices and myocardial fibrosis in patients with dilated cardiomyopathy. *Front Cardiovasc. Med.* 2021; 8: 704251. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.704251>
 30. Hedwig F., Nemchyna O., Stein J., Knosalla C., Merke N., Knebel F., Hagendorff A., Schoenrath F., Falk V., Knierim J. Myocardial work assessment for the prediction of prognosis in advanced heart failure. *Front. Cardiovasc. Med.* 2021; 8: 691611. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.691611>
 31. Calvillo-Argüelles O., Thampinathan B., Somerset E., Shalmon T., Amir E., Steve Fan C.P., Moon S., Abdel-Qadir H., Thevakumaran Y., Day J., Woo A., Wintersperger B.J., Marwick T.H., Thavendiranathan P. Diagnostic and prognostic value of myocardial work indices for identification of cancer therapy-related cardiotoxicity. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2022; 15: 1361–1376. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2022.02.027>
 32. Ilardi F., Postolache A., Dulgheru R., Trung M.N., de Marneffe N., Sugimoto T., Go Y.Y., Oury C., Esposito G., Lancellotti P. Prognostic value of non-invasive global myocardial work in asymptomatic aortic stenosis. *J. Clin. Med.* 2022; 11: 1555. <https://doi.org/10.3390/jcm11061555>

33. Meucci M.C., Butcher S.C., Galloo X., van der Velde E.T., Marsan N.A., Bax J.J., Delgado V. Noninvasive left ventricular myocardial work in patients with chronic aortic regurgitation and preserved left ventricular ejection fraction. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2022; 35: 703–711.e3. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2022.01.008>
34. Yedidya I., Lustosa R.P., Fortuni F., van der Bijl P., Namazi F., Vo N.M., Meucci M.C., Ajmone Marsan N., Bax J.J., Delgado V. Prognostic implications of left ventricular myocardial work indices in patients with secondary mitral regurgitation. *Circ. Cardiovasc. Imaging.* 2021; 14: e012142. <https://doi.org/10.1161/circimaging.120.012142>
35. Hubert A., Galli E., Leurent G., Corbineau H., Auriane B., Guillaume L., Leclercq C., Donal E. Left ventricular function after correction of mitral regurgitation: impact of the clipping approach. *Echocardiogr.* 2019; 36: 2010–2018. <https://doi.org/10.1111/echo.14523>
36. Minhas A.S., Gilotra N.A., Goerlich E., Metkus T., Garibaldi B.T., Sharma G., Bavaro N., Phillip S., Michos E.D., Hays A.G. Myocardial work efficiency, a novel measure of myocardial dysfunction, is reduced in COVID-19 patients and associated with in-hospital mortality. *Front Cardiovasc. Med.* 2021; 8: 667721. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.667721>

The estimation of left ventricular myocardial work indicators during cardiac ultrasound imaging: methodology, capabilities, advantages and limitations

S.I. Ivanov^{1*}, S.P. Leschinskaya², M.N. Alekhin^{3,4}

¹ Clinical Hospital of the Presidential Administration of the Russian Federation; 45, bldg. 2, Losinoostrovskaya str., 107150 Moscow, Russian Federation

² Russian University Of Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (former “A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry”); 20/1, Delegatskaya str., Moscow 127473, Russian Federation

³ Central State Medical Academy of the Presidential Administration of the Russian Federation; 19-1A, Marshal Timoshenko str., Moscow 121359, Russian Federation

⁴ Central Clinical Hospital of the Presidential Administration of the Russian Federation; 15, Marshal Timoshenko str., Moscow 121359, Russian Federation

Sergey I. Ivanov – Cand. of Sci. (Med.), doctor of Department of Cardiology, Clinical Hospital of the Presidential Administration of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-6768-1045>

Svetlana P. Leschinskaya — student of Russian University Of Medicine of the Ministry of health of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0004-4482-990X>

Mikhail N. Alekhin – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of Functional Diagnostics Department, Central Clinical Hospital of the Presidential Administration of the Russian Federation; Professor, Division of Therapy, Cardiology, Functional Diagnostics, and Nephrology, Central State Medical Academy of the Presidential Administration of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9725-7528>

Correspondence* to Dr. Sergey I. Ivanov – e-mail: 1539ivanov@mail.ru

This article is dedicated to the assessment of left ventricular (LV) myocardial work indicators using the method of constructing pressure-strain loops, a new tool in echocardiography that can take into account the influence of cardiac afterload on LV contractility. The algorithm of actions for estimating myocardial work, possible difficulties and features of calculating its main indicators are described in detail, the limitations and disadvantages of the method are discussed. The normal ranges of LV myocardial work indicators are given in the article, and it presents their typical changes and the advantages of using in various diseases and pathological conditions of the heart.

Keywords: : myocardial work; pressure-strain loop; speckle-tracking; echocardiography; left ventricle

Conflict of interests. The authors have no conflicts of interest to declare.

Financing. This study had no sponsorship.

Citation: Ivanov S.I., Leschinskaya S.P., Alekhin M.N. The estimation of left ventricular myocardial work indicators during cardiac ultrasound imaging: methodology, capabilities, advantages and limitations. *Ultrasound and Functional Diagnostics.* 2023; 4: 22–34. <https://doi.org/10.24835/1607-0771-2023-4-22-34> (In Russian)