

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1231>

Кинетическая энергия, как фактор оценки работы сердца у пациентов с аортальным стенозом

© Сандриков В.А., Кулагина Т.Ю. *, Максимова А.Ю., Кузнецова Л.М., Попов С.О.

ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского»; 119991 Москва, ГСП-1, Абрикосовский пер., д. 2, Российская Федерация

Цель исследования: проанализировать эволюцию силы сокращения миокарда через оценку кинетической энергии (КЭ) у пациентов с аортальным стенозом, основываясь на внутривентрикулярных потоках крови.

Материал и методы. В соответствии с критериями отбора обследован 21 здоровый доброволец (средний возраст 34 ± 3 года) и 105 пациентов с аортальным стенозом (средний возраст 62 ± 4 года) до и после операции на 7–10-й день. Выполняли трансторакальную эхокардиографию на аппарате Vivid E9 в 2-, 3- и 4-камерных позициях с регистрацией внутривентрикулярных потоков крови, расчетом скорости изменения объема и КЭ в зависимости от КДО левого желудочка (ЛЖ), градиента давления (ΔP) на аортальном клапане, с оценкой смещения контура эндокарда ЛЖ, основанной на технологии слежения за спеклами ультразвуковых изображений в программе Мультивокс.

Результаты. Мы ставили своей целью количественное определение КЭ в течение всего сердечного цикла ЛЖ с помощью эхокардиографии. Одной из основных сильных сторон, выявленных в этих исследованиях, является высокая воспроизводимость кровотока и гемодинамики ЛЖ, средний коэффициент вариации $7 \pm 2\%$ для оценки функции ЛЖ. Исследования показали повышенную диагностическую достоверность без затрат дополнительного времени. Графически КЭ регистрировалась в систолу и диастолу. В систолу КЭ до операции в ЛЖ была выше нормальных значений (0,62–0,78 Дж). После операции КЭ приближалась к норме, составив в среднем 0,55 Дж.

Заключение. Изменения внутривентрикулярного кровотока у пациентов с перегрузкой сердца давлением демонстрируют более высокую систолическую энергию по сравнению с контрольной группой. Различные временные значения энергии в систолу и диастолу, наблюдаемые у пациентов до операции, представляют объективный подход в оценке работы сердца. Анализ энергии отражает более ранние признаки механических нарушений миокарда по сравнению с фракцией выброса и, возможно, позволяет предсказать развитие ремоделирования сердца. Адекватная коррекция порока нормализует работу сердца уже в раннем послеоперационном периоде.

Ключевые слова: механика сердца, внутривентрикулярный кровоток, кинетическая энергия

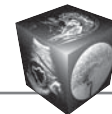
Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Сандриков В.А., Кулагина Т.Ю., Максимова А.Ю., Кузнецова Л.М., Попов С.О. Кинетическая энергия, как фактор оценки работы сердца у пациентов с аортальным стенозом. *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (3): 68–75. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1231>

Поступила в редакцию: 29.06.2022.

Принята к печати: 27.01.2023.

Опубликована online: 15.06.2023.



Kinetic energy as a factor in assessing the work of the heart in patients with aortic stenosis

© Valery A. Sandrikov, Tatiana Yu. Kulagina*, Anastasia Yu. Maksimova, Lyudmila M. Kuznetsova, Sergey O. Popov

Petrovsky Russian Research Center of Surgery; 2, Abrikosovsky lane, Moscow 119991, Russian Federation

Goal. To analyze the evolution of the myocardial contraction force through the assessment of kinetic energy in patients with aortic stenosis based on intraventricular blood flows

Material and methods. According to the selection criteria, 21 healthy volunteers (age 34 ± 3) and 105 patients with aortic stenosis (age 62 ± 4) were examined before and after surgery for 7–10 days. Transthoracic echocardiography was performed on a Vivid E9 device in 2, 3 and 4 chamber positions with registration of intraventricular blood flows, calculation of the rate of change in volume and kinetic energy depending on the left ventricular EDV, pressure gradient (ΔP) on the aortic valve with an assessment of the displacement of the left ventricular endocardium contour, based on technologies for tracking speckles of ultrasonic images in the MultiVox program.

Results. Our goal was to quantify kinetic energy (KE) during the entire cardiac cycle of the left ventricle (LV) using echocardiography. One of the main strengths identified in these studies is the high reproducibility of the assessment of LV blood flow and hemodynamics the average coefficient of variability $7 \pm 2\%$ for assessing LV function. Studies have shown increased diagnostic reliability without spending additional time. In systole, the KE before the LV operation was higher than normal values (0.62–0.78 J) after the operation, the KE approached the norm, averaging 0.55 J.

Conclusion. Changes in intraventricular blood flow in patients with pressure overload of the heart demonstrate higher systolic energy compared to the control group. Different time values of energy in systole and diastole, observed in patients before surgery, represent an objective approach to assessing the work of the heart. The energy analysis reflects earlier signs of mechanical myocardial disorders, compared with the ejection fraction and, possibly, predict the development of cardiac remodeling. Adequate correction of the defect normalizes the work of the heart already in the early postoperative period.

Keywords: heart mechanics, intraventricular blood flow, kinetic energy

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Sandrikov V.A., Kulagina T.Yu., Maksimova A.Yu., Kuznetsova L.M., Popov S.O. Kinetic energy as a factor in assessing the work of the heart in patients with aortic stenosis. *Medical Visualization*. 2023; 27 (3): 68–75. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1231>

Received: 29.06.2022.

Accepted for publication: 27.01.2023.

Published online: 15.06.2023.

Введение

Достижения в области визуализации сердечно-сосудистой системы позволяют неинвазивно оценивать внутривентрикулярные потоки крови и градиенты давления во время прогрессирования дисфункции сердца. На основании этих исследований в литературе обсуждаются вопросы по анализу затрат энергии сокращения миокарда, отражающих работу сердца в период сердечного цикла [1, 2] при нарушениях функции миокарда, и сравниваются с фракцией выброса и деформацией [3]. Высказываются предположения, что расход энергии является ранним маркером в оценке нарушения работы сердца. На основании эхокардиографических исследований и МРТ выполняются измерения массы, объемов и толщины стенки левого желудочка (ЛЖ) с описанием анатомической адаптации сердца в ответ на по-

вышенную перегрузку желудочка объемом и давлением [4]. Подобные процессы связаны с внутривентрикулярными потоками крови и работой миокарда. Однако в литературе нет достаточного обоснования затрат энергии у пациентов с перегрузкой ЛЖ давлением как до, так и после коррекции аортального клапана. Обсуждаемые вопросы оценки кинетической энергии (КЭ) у пациентов с патологией клапанного аппарата во многом противоречивы и не всегда дают представление о связи затрат энергии как предиктора оценки производительности сердца.

Цель исследования

Проанализировать эволюцию силы сокращения миокарда через оценку КЭ у пациентов с аортальным стенозом, основываясь на внутривентрикулярных потоках крови.



Материал и методы

Мы ставили своей целью количественное определение КЭ в течение всего сердечного цикла ЛЖ с помощью векторного анализа и внутрижелудочковых потоков крови. Количественные показатели КЭ определены у здоровых добровольцев ($n = 21$, средний возраст 34 ± 3 года) и у пациентов с аортальным стенозом ($n = 105$, средний возраст 62 ± 4 года) до и после операции на 7–10-й день после операции ($n = 92$) с расчетом показателей гемодинамики в программном комплексе Мульти-вокс. Как у здоровых, так и у пациентов выполнялась трансторакальная эхокардиография в 2-, 3- и 4-камерной позиции на аппарате Vivid E9 с расчетом объемов полостей сердца (КДО и КСО), градиента давления (ΔP) на аортальном клапане, с регистрацией внутрижелудочковых потоков крови, расчетом ускорения скорости изменения объема ($dVol/dt^2$) и КЭ. Оценивали изменения контура ЛЖ по технологии слежения за спеклами ультразвуковых изображений [5] с регистрацией смещения миокарда во времени, которые будут отражать состояние миокарда у конкретного пациента.

КЭ анализировали в период систолы и диастолы, основываясь на скорости потока (V) и плотности крови ($\rho = 1060 \text{ кг/м}^3$), согласно следующему уравнению: $KЭ = \rho mv^2/2$.

Статистика

Выполнялась проверка распределения полученных данных по критерию Стьюдента, Манна-Уитни. Кроме того, для оценки достоверности различий переменных параметров использовали критерий χ^2 . Во всех процедурах статистического анализа критический уровень значимости достоверности принимался $\leq 0,05$. Использовали статистические программы Statistica-12 (StatSoft, Inc., США) и JMP-7 (SAS, Inc., США). Результаты исследования представлены на рисунках и в таблице.

Результаты

Проведен анализ полученных результатов по гемодинамическим параметрам и внутрижелудочковым потокам крови в ЛЖ в норме и у больных с аортальным стенозом до и после операции (см. таблицу).

Отмечено, что достоверная разница наблюдается по градиенту давления, площади клапана и КЭ между нормой и результатами исследования до операции. Регистрируя внутрижелудочковые потоки крови в различные фазы сердечного цикла, рассматривали их количественные значения (рис. 1).

Характер кровотока в ЛЖ тесно связан с формой и движением миокарда, клапанов и магистральных сосудов и поэтому может быть чувствительным маркером сердечной функции и дис-

Таблица. Гемодинамика и кинетическая энергия миокарда левого желудочка в норме и у пациентов с аортальным стенозом (АС) до (д/о) и после (п/о) операции протезирования аортального клапана

Table. Hemodynamics and kinetic energy of the left ventricular myocardium normal and in patients with aortic stenosis (AS) before (b/o) and after (p/o) aortic valve replacement surgery

| Параметры Parameters | Норма Normal (n = 21) | АС д/о AS b/o (n = 105) | АС п/о AS p/o (n = 92) | p н – д/о n – b/o | p н – п/о n – p/o | p д/о–п/о b/o–p/o |
|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ЧСС в минуту / HR per min | 69 ± 12 | 71 ± 12 | 79 ± 11 | >0.5 | >0.05 | >0.4 |
| КДО, мл / EDV, ml | 108 ± 7 | 112 ± 9 | 112 ± 8 | >0.05 | >0.3 | >0.4 |
| КСО, мл / ESV, ml | 38 ± 8 | 48.2 ± 14 | 45 ± 13 | <0.05 | <0.05 | >0.05 |
| ФВ _{лж} , % / EF _{LV} , % | 61 ± 4 | 59.3 ± 12 | 60 ± 9 | >0.6 | >0.6 | >0.7 |
| ΔP_{max} , мм рт.ст. / ΔP_{max} , mmHg | 3 ± 0.7 | 56 ± 11 | 16 ± 2 | <0.0001 | <0.001 | <0.0002 |
| ΔP_{mean} , мм рт.ст. / ΔP_{mean} , mmHg | 0.9 ± 0.1 | 30.7 ± 9 | 9 ± 3 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| S_{AK} , см ² / S_{AV} , cm ² | 3.7 ± 0.4 | 0.76 ± 0.1 | 2.6 ± 0.2 | <0.002 | <0.04 | <0.001 |
| КЭ _{лж} , систола, Дж / KE _{LV} , systole, J | 0.54 ± 0.04 | 0.75 ± 0.2 | 0.55 ± 0.06 | <0.05 | >0.7 | <0.05 |

Примечание. КДО – конечный диастолический объем левого желудочка; КСО – конечный систолический объем левого желудочка; ФВ – фракция выброса; ΔP – максимальный и средний градиент давления; S_{AK} – площадь аортального клапана; КЭ – кинетическая энергия; ЧСС – частота сердечных сокращений.

Note. EDV – end-diastolic volume; ESV – end-systolic volume; EF – ejection fraction; ΔP – maximum and mean pressure gradient; AVA – aortic valve area; KE – kinetic energy; HR – heart rate.

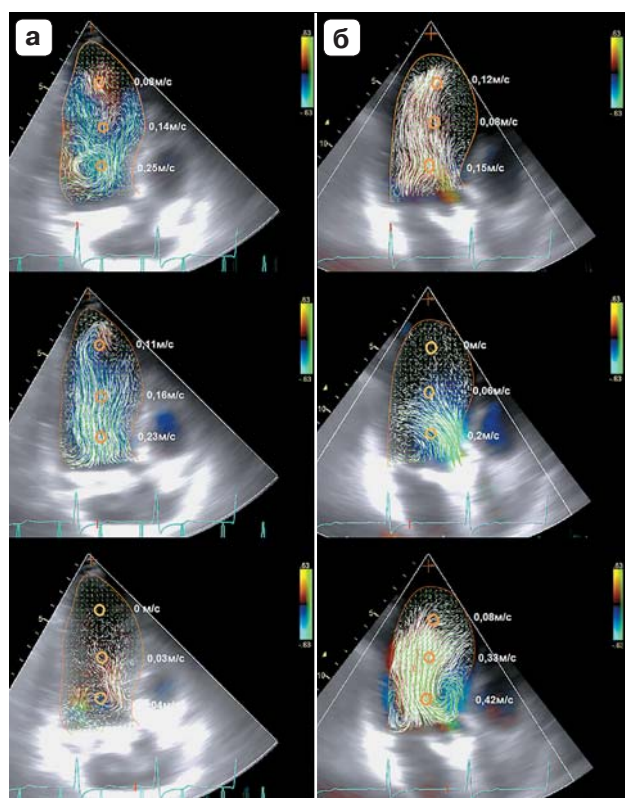
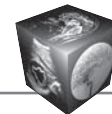
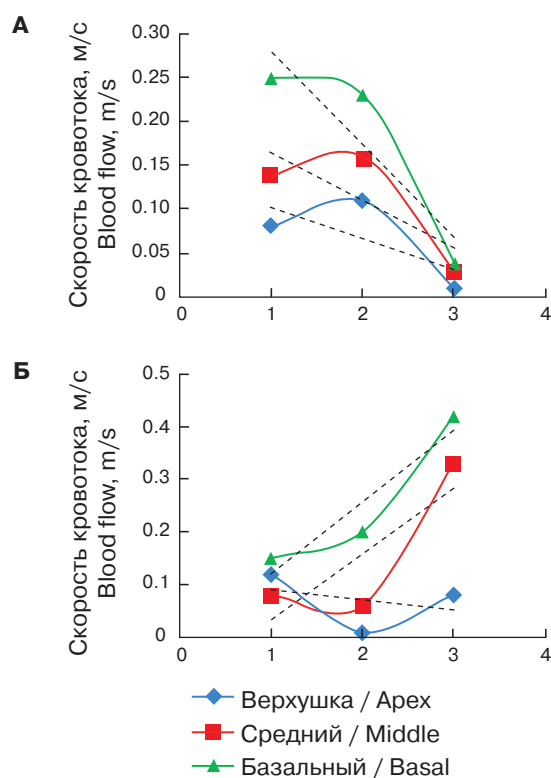


Рис. 1. Количественные величины скоростей кровотока в левом желудочке у пациентов с аортальным стенозом до (а) и после операции (б) в базальном, среднем и верхушечном отделах сверху – вниз в период изоволюмического напряжения, максимального изгнания и в диастолу. Графики скоростей потока до операции (А) и после операции (Б). 1 – изоволюмическое напряжение; 2 – максимальное изгнание; 3 – диастола.

Fig. 1. Quantitative value of blood flow rates in the left ventricle in patients with aortic stenosis before (a) and after surgery (б) in the basal, middle and apical sections from top to bottom during isovolumic stress, maximum ejection and diastole. Graphs of flow rates before surgery (А) and after surgery (Б). 1 – isovolumic stress; 2 – maximum ejection; 3 – diastole.

функции [6]. Так, до операции существенная разница в формировании потоков крови проявляется в период изоволюмического напряжения и практически не отличается в диастолу. После операции в период изоволюмии скорости практически во всех отделах ЛЖ приближаются к нормальному значению, а в диастолу потоки формируются в соответствии с поступлением крови в полость ЛЖ. При этом расход энергии будет формироваться в соответствии с формированием потоков крови, что отражает систолическую и диастолическую функцию (рис. 2). Предыдущие исследования показали, что при сердечной недостаточности легкой и средней степени тяжести по сравнению со здоровыми КЭ увеличивается [7]. Однако у пациентов с перегрузкой желудочка давлением и, в частности, при аортальном стенозе до и после протезирования клапана КЭ меняется в зависимости от скоростей внутрижелудочковых потоков и оставшегося градиента давления.



Ориентируясь на внутрисердечные потоки, было отмечено, что в период систолы у данной группы пациентов расход энергии был выше по сравнению с нормой на 28%. После операции отличий от нормальных значений по расходу энергии не отмечено. Рассматривая взаимосвязь расхода энергии в зависимости от КДО ЛЖ, нами не выявлена корреляционная зависимость как до, так и после операции (см. рис. 2).

При этом значения КЭ при КДО от 100 до 120 мл составляло от 0,5 до 1,3 Дж, а корреляционная связь была низкой ($r = 0,21$). После операции эти взаимоотношения практически не изменялись.

Поскольку объем желудочка является фактором, определяющим КЭ, проведенные нами исследования взаимосвязи КДО и КЭ не выявили высокой корреляционной зависимости. Напротив, было обнаружено, что при максимальном изгнании и скорости изменения объема ЛЖ КЭ была ниже. Более того, было обнаружено, что КЭ была

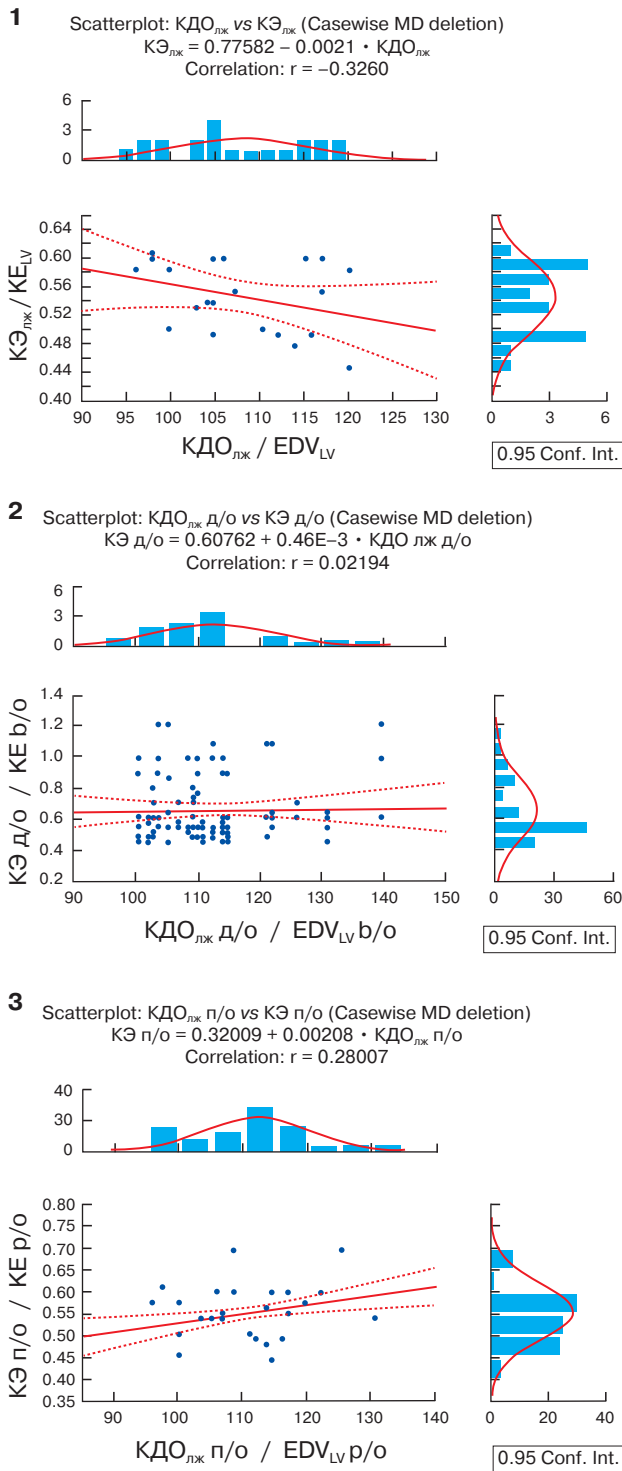
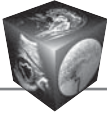


Рис. 2. Графики взаимоотношения между конечным диастолическим объемом (КДО) и кинетической энергией (КЭ) левого желудочка в норме (1) и у пациентов с аортальным стенозом до (2) и после операции (3).

Fig. 2. Graphs of the relationship between the final diastolic volume (EDV) and kinetic energy (KE) of the left ventricle in normal (1) and in patients with aortic stenosis before (2) and after surgery (3).

больше у пациентов с более высоким градиентом давления ($p < 0,05$). Это может быть связано с дополнительной турбулентностью в ЛЖ. Таким образом, работу можно разделить на КЭ и работу, направленную на преодоление сопротивления во время максимального изгнания.

Кроме того, одной из наиболее характерных особенностей кровотока в ЛЖ при аортальном стенозе является образование дополнительных и неравномерных вихревых потоков по направлению изгнания и в период быстрого наполнения [8].

Обсуждение

Недавние исследования показали, что особенности вихревого потока связаны с дисфункцией миокарда и клапанного аппарата [9]. Как по нашим данным, так и по данным литературы [10], неравномерность внутрижелудочковых потоков крови приводит к дополнительному росту градиента давления, что способствует ухудшению сердечной деятельности при аортальном стенозе.

В период изоволюмического напряжения у здоровых людей вихрь сохраняется в области выносящего тракта с направлением векторов к аортальному клапану. При открытии аортального клапана поток рассеивается по направлению от вершины к выносящему тракту ЛЖ. У пациентов с аортальным стенозом поток располагается в центре ЛЖ на протяжении всего цикла и не имеет равномерного распределения, как у нормальных людей. Усредненные по времени данные потока и стоп-кадры эхосигнала на апикальной длинной оси представляют вектор скорости без расхождений на плоскости сканирования, наложенный на восстановленное доплеровское представление. У пациентов с аортальным стенозом наблюдался сферический, расположенный в центре вихрь с некогерентным направлением потока ЛЖ (см. рис. 1).

Таким образом, изучение связи между образованием вихревых потоков, градиентом давления и КЭ может привести к новому пониманию развития патологического процесса.

Ударная работа в покое составляет расход энергии максимально по отношению к периоду напряжения ЛЖ. КЭ отражает ускорение потока крови во время изгнания и наполнения желудочков. Другими словами, КЭ – это мера объема работы, которая непосредственно связана с перемещением крови из-за ее инерции. Турбулентные потоки в желудочках в определенной мере способствуют экономии энергии, представляя собой адаптационный процесс. Такой механизм сохраняет расход КЭ, являясь более важным для наполнения желудочков в диастолу. Аналогичные дан-

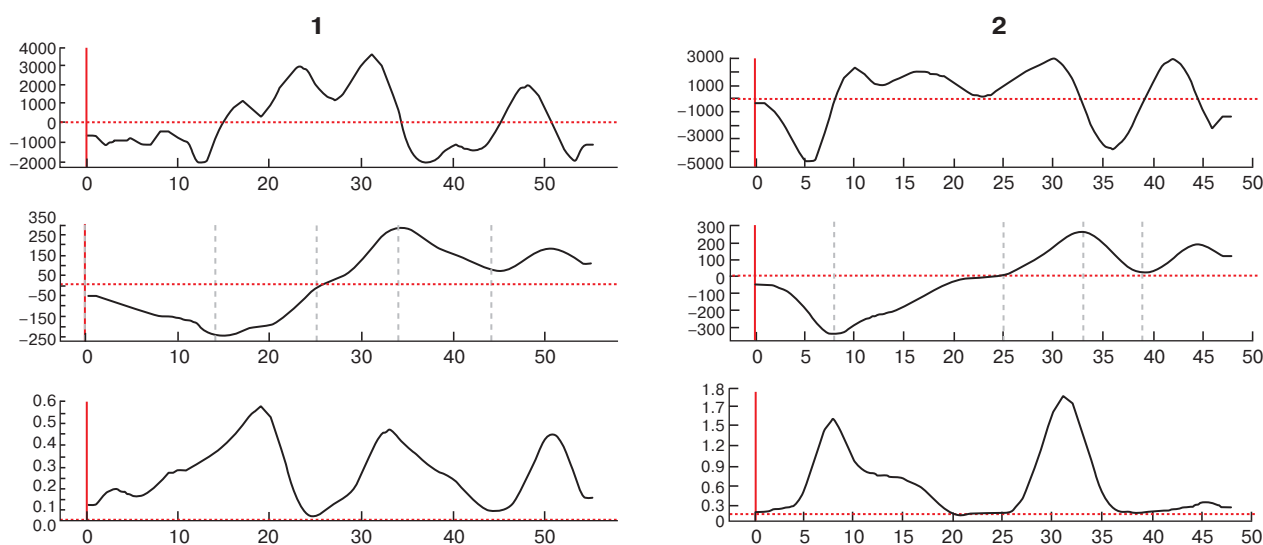
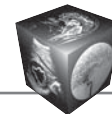


Рис. 3. Кинетическая энергия у пациента с аортальным стенозом до операции (1), после операции на 7-й день (2). Красный маркер – изоволюмическое напряжение левого желудочка; светлые маркеры разделяют систолу по времени 13–23, диастолу – от 23 до 43 и сокращение предсердия от 43 до 52. Верхний график – ускорение скорости изменения объема левого желудочка в систолу и диастолу ($dVol/dt^2$); средний график – изменение объема левого желудочка от КДО до КСО; нижний график – кинетическая энергия.

Fig. 3. Kinetic energy in a patient with aortic stenosis before surgery (1), after surgery on day 7 (2) The red marker is isovolumic tension of the left ventricle; light markers divide the systole by time 13–23, diastole – from 23 to 43 and atrial contraction 0t 43 to 52. The upper graph is the acceleration of the rate of change in the volume of the left ventricle in systole and diastole ($dVol/dt^2$); the middle graph is the change in the volume of the left ventricle from BW to CSR; the lower graph is kinetic energy.

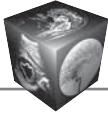
ные описаны и в литературе у пациентов с аортальным стенозом [11].

КЭ до операции представлена тремя пиками у пациента с аортальным стенозом с частотой сердечных сокращений 71 в минуту (рис. 3).

Вертикальные светлые пунктирные линии указывают на периоды сердечного цикла – изоволюмического напряжения, систолы и диастолы. Графики КЭ в послеоперационном периоде формируются двумя сокращениями, тогда как до операции тремя – в систолу, при раннем наполнении и сокращении предсердий соответственно. Следует отметить, что во время систолы внутрижелудочковый поток сопровождается неравномерностью расхода энергии и обладает большей КЭ по сравнению с диастолой. Компонент потока с задержкой выброса приводит к большей затрате энергии, что в период диастолы увеличивает КЭ во время сокращения предсердий. В послеоперационном периоде КЭ с течением времени сопровождается нормализацией расхода энергии и основная нагрузка направлена в период диастолы. Вектор силы направлен от самого высокого в область с самым низким давлением. Так, КДО ЛЖ сам по себе не объясняет более низкую или высокую

КЭ, наблюдаемую у пациентов с аортальным стенозом. Однако направление потока неизбежно связано с КДО и КСО, так как именно турбулентность является одной из составляющих развития энергии миокарда.

При этом внутрижелудочковое направление энергии не всегда может совпадать с направлением и скоростью кровотока. Это связано с тем, что развитие силы строго совпадает с ускорением кровотока. Однако практически у всех пациентов с высоким градиентом давления (более 100 мм рт.ст.) между выносным трактом ЛЖ и аортой ускорение потока всегда ступенчатое, что отражает неравномерность внутрижелудочкового градиента давления (см. рис. 3). После операции из-за уменьшения градиента ускорение потока становится более равномерным, но нормального вида не приобретает. Такое сочетание совместно с распределением внутрижелудочковых потоков в период цикла приводит к постепенному ремоделированию структур миокарда, а расход КЭ потенциально может отражать работу миокарда, что служит одним из критериев оценки реконструктивных операций на миокарде и клапанах сердца.



Заключение

Изменение внутрисердечного кровотока у пациентов с перегрузкой сердца давлением демонстрирует более высокую систолическую энергию по сравнению с контрольной группой. Динамика временных значений энергии в систолу и диастолу, наблюдаемая у пациентов до операции, представляет объективный подход в оценке работы сердца. Расход энергии отражает более ранние признаки механических нарушений миокарда по сравнению с фракцией выброса, что характерно для оценки развития ремоделирования сердца. Адекватная коррекция порока нормализует работу сердца уже в раннем послеоперационном периоде.

Участие авторов

Сандриков В.А. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Кулагина Т.Ю. – проведение исследования, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Максимова А.Ю. – обзор публикаций по теме статьи, сбор и обработка данных.

Кузнецова Л.М. – обзор публикаций по теме статьи, участие в научном дизайне, написание текста.

Попов С.О. – проведение исследования, сбор и обработка данных, участие в научном дизайне.

Authors' participation

Sandrikov V.A. – concept and design of the study, analysis and interpretation of the obtained data, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Kulagina T.Yu. – conducting research, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, preparation and creation of the published work.

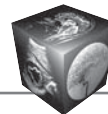
Maksimova A.Yu. – review of publications, collection and analysis of data.

Kuznetsova L.M. – review of publications, participation in scientific design, writing text.

Popov S.O. – conducting research, collection and analysis of data, participation in scientific design.

Список литературы [References]

1. Vallelonga F., Airale G., Pedrizzetti G. et al. Introduction in hemodynamic forces analysis moving into the new frontier of cardiac deformation analysis. *J. Am. Heart Assoc.* 2021; 10(24): e023417. <http://doi.org/10.1161/JAHA.121.023417>
2. Zajac J., Eriksson J., Dyverfeldt P. et al. Turbulent kinetic energy in normal and myopathic left ventricles. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2015; 41(4): 1021–1029. <http://doi.org/10.1002/jmri.24633>
3. Eriksson J., Dyverfeldt P., Engvall J. et al. Quantification of presystolic blood flow organization and energetics in the human left ventricle. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2011 Jun; 300(6): H2135–2141. <http://doi.org/10.1152/ajpheart.00993.2010>
4. Dweck M.R., Joshi S., Murigu T. et al. Left ventricular remodeling and hypertrophy in patients with aortic stenosis: insights from cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2012; 14(1): 50. <http://doi.org/10.1186/1532-429X-14-50>
5. Сандриков В.А., Кулагина Т.Ю. Эхокардиография в кардиохирургии. Векторный анализ и внутривентрикулярные потоки крови. М.: Наш мир, 2022. 607 с. ISBN: 978-5-907549-17-3
Sandrikov V.A., Kulagina T.Yu. Echocardiography in cardiac surgery. Vector analysis and intraventricular blood flows. Moscow: Our World, 2022. 607 p. ISBN: 978-5-907549-17-3 (In Russian)
6. Pedrizzetti G., La Canna G., Alfieri O., Tonti G. The vortex – an early predictor of cardiovascular outcome? *Nat. Rev. Cardiol.* 2014; 11(9): 545–553. <http://doi.org/10.1038/nrcardio.2014.75>
7. Crandon S., Westenberg J.J.M., Swoboda P.P. et al. Impact of Age and Diastolic Function on Novel, 4D flow CMR Biomarkers of Left Ventricular Blood Flow Kinetic Energy. *Sci. Rep.* 2018; 8(1): 14436. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-32707-5>
8. Dweck M.R., Joshi S., Murigu T. et al. Left ventricular remodeling and hypertrophy in patients with aortic stenosis: insights from cardiovascular magnetic resonance. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2012; 14(1): 50. <http://doi.org/10.1186/1532-429X-14-50>
9. Arvidsson P.M., Töger J., Pedrizzetti G. et al. Hemodynamic forces using four-dimensional flow MRI: an independent biomarker of cardiac function in heart failure with left ventricular dyssynchrony? *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2018; 315(6): H1627–H1639. <http://doi.org/10.1152/ajpheart.00112.2018>
10. Eriksson J., Dyverfeldt P., Engvall J. et al. Quantification of presystolic blood flow organization and energetics in the human left ventricle. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2011; 300(6): H2135–2141. <http://doi.org/10.1152/ajpheart.00993.2010>
11. Lund O., Flø C., Jensen F.T. et al. Left ventricular systolic and diastolic function in aortic stenosis. Prognostic value after valve replacement and underlying mechanisms. *Eur. Heart J.* 1997; 18(12): 1977–1987. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a015209>



Для корреспонденции*: Кулагина Татьяна Юрьевна – тел.: +7-903-135-48-54. E-mail: takula@list.ru

Сандриков Валерий Александрович – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, руководитель отдела клинической физиологии инструментальной и лучевой диагностики ФГБНУ “РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

Кулагина Татьяна Юрьевна – доктор мед. наук, заведующая лабораторией нагрузочных тестов отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики ФГБНУ “РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-6165-6474>

Максимова Анастасия Юрьевна – врач лаборатории нагрузочных тестов отдела клинической физиологии инструментальной и лучевой диагностики ФГБНУ “РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского”, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4716-4814>

Кузнецова Людмила Митрофановна – доктор мед. наук, главный научный сотрудник лаборатории нагрузочных тестов отдела клинической физиологии инструментальной и лучевой диагностики ФГБНУ “РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-0143-9053>

Попов Сергей Олегович – канд. мед. наук, врач сердечно-сосудистой хирургии ФГБНУ “РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4488-1597>

Contact*: Tatiana Yu. Kulagina – phone: +7-903-135-48-54. E-mail: takula@list.ru

Valery A. Sandrikov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Clinical Physiology of Instrumental and Radiation Diagnostics, Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

Tatiana Yu. Kulagina – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Laboratory of Stress Tests of the Department of Clinical Physiology of Instrumental and Radiation Diagnostics, Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-6165-6474>

Anastasia Yu. Maksimova – doctor of the laboratory of stress tests of the Clinical Physiology of Instrumental and Radiation Diagnostics, Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4716-4814>

Lyudmila M. Kuznetsova – Doct. of Sci. (Med.), Chief Researcher of the Laboratory of Stress Tests of the Department of Clinical Physiology of Instrumental and Radiation Diagnostics, Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0143-9053>

Sergey O. Popov – Cand. of Sci. (Med.), Doctor of Cardiovascular Surgery, Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4488-1597>