

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ПОСЛЕДИПЛОМНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КАФЕДРА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

**ЭХОКАРДИОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТОЛИЧЕСКОЙ  
И ДИАСТОЛИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЛЕВОГО  
И ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКОВ**

Учебно-методическое пособие

Минск БелМАПО  
2015

УДК 616.124-073.43(075.9)

ББК 54.101я73

Ж 59

Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия  
УМС Белорусской медицинской академии последипломного образования  
протокол № 7 от 23.12. 2014

**Автор:**

к.м.н., доцент кафедры ультразвуковой диагностики *Жерко О.М.*

**Рецензенты:**

Кафедра лучевой диагностики и лучевой терапии БГМУ;  
заведующая отделением функциональной диагностики ГУ «Республиканский  
клинический центр» Управления делами Президента Республики Беларусь,  
к.м.н. Т.В. Каминская

**Жерко О.М.**

Ж 59

Эхокардиографическая оценка систолической и диастолической функции левого и правого желудочков: учеб.-метод. пособие /О.М. Жерко – Минск: БелМАПО, 2015. – 52 с.

ISBN 978-985-499-865-7

В пособии описаны современные эхокардиографические методики оценки систолической и диастолической функции левого и правого желудочков, методические подходы к их расчетам, оптимизации изображения, в том числе экспертные методики расчета массы миокарда левого желудочка в 2D-режиме, методики оценки систолической и диастолической функции желудочков в режиме импульсно-волновой тканевой доплерографии. Используются нормативные значения расчетных параметров, разработанные Американскими и Европейскими ассоциациями кардиологии и эхокардиографии.

Учебно-методическое пособие предназначено для врачей ультразвуковой и функциональной диагностики, студентов медицинских университетов.

УДК 616.124-073.43(075.9)

ББК 54.101я73

ISBN 978-985-499-865-7

© Жерко О.М., 2015

© Оформление БелМАПО, 2015

## ЭХОКАРДИОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТОЛИЧЕСКОЙ И ДИАСТОЛИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЛЕВОГО И ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКОВ

Желудочковое опорожнение и заполнение – комплекс взаимообусловленных процессов, однако для оценки функций желудочков сердечный цикл концептуально делится на систолу и диастолу.

### СИСТОЛИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА

*Систола* является фазой сердечного цикла от закрытия митрального клапана до закрытия аортального клапана. Начало систолы определяется по ЭКГ как желудочковая деполяризация (начало комплекса *QRS*), окончание – как реполяризация (конец *T*-волны). С точки зрения давления в желудочке и изменения объема систола начинается, когда давление в левом желудочке начинает превышать давление в левом предсердии, результатом чего является закрытие митрального клапана. Далее следует изоволюметрическое сокращение левого желудочка, в течение которого происходит деполяризация кардиомиоцитов, вхождение кальция в клетки, укорочение актин-миозинового комплекса, давление в левом желудочке быстро повышается при постоянном объеме желудочка, несмотря на изменения его формы. Когда давление в левом желудочке превышает давление в аорте, открывается аортальный клапан, в течение выброса объем левого желудочка резко уменьшается. Давление в левом желудочке превышает давление в аорте приблизительно первую половину систолы, в соответствии с быстрым нарастанием кровотока и малым градиентом давления между левым желудочком и аортой. В норме давление выравнивается в середине систолы, вторую половину систолы давление в аорте превышает давление в левом желудочке, в результате антеградный кровоток продолжается, однако скорость его прогрессивно падает (фаза замедления потока). Аортальный клапан закрывается, формируется дикротическая выемка на кривой давления в аорте сразу после окончания выброса. Таким образом, систола включает изоволюметрическое сокращение и фазу выброса (фазы ускорения и замедления потока) (рисунок 1).

Функция левого желудочка и насосная функция зависят от сократимости (способности кардиомиоцитов к сокращению), преднагрузки (начального желудочкового объема или давления по механизму Франка-Старлинга), постнагрузки (резистентности аорты или конечно-систолического напряжения стенки), желудочковой геометрии. Сократимость зависит от нагрузки и геометрии левого желудочка. Таким образом, оценка сократимости включает в себя оценку выброса при различных показателях нагрузок. Собственно нагрузка определяется увеличением или уменьшением желудочкового конечно-диастолического объема или изменением постнагрузки. Экспе-

риментально сократимость часто описывают как отношение конечно-систолического давления и объема. Снижение сократимости обуславливает падение ударного объема и увеличение объема левого желудочка. Сократимость зависит от ряда физиологических факторов: частоты сердечных сокращений (далее – ЧСС), метаболических факторов и пр., как и патологических факторов – заболеваний и фармакологических средств.

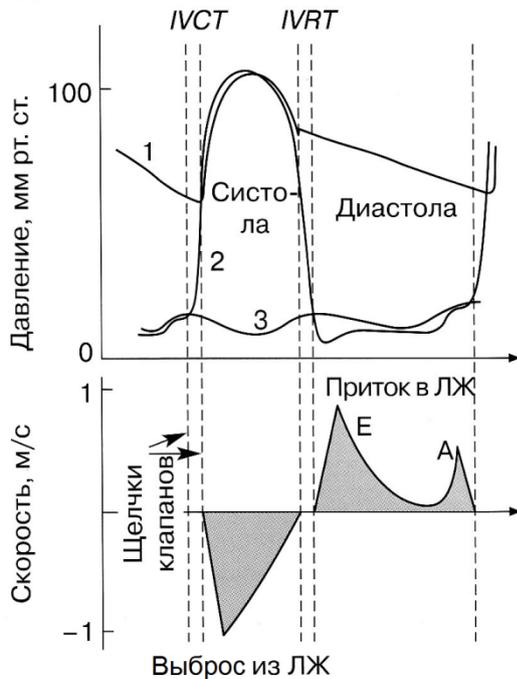


Рисунок 1. Сердечный цикл. 1 – давление в аорте; 2 – давление в левом желудочке; 3 – давление в левом предсердии. *IVCT* – время изоволюметрического сокращения длится от закрытия митрального клапана до открытия аортального клапана; *IVRT* – время изоволюметрической релаксации длится от закрытия аортального клапана до открытия митрального клапана [Otto С.М., 2010].

С клинической точки зрения функция желудочков может быть оценена путем расчета ударного объема, фракции выброса, конечно-систолического размера или объема.

При трансторакальной эхокардиографии оценка систолической функции левого желудочка производится полипозиционно из следующих доступов:

- парастернальная длинная ось левого желудочка;
- парастернальная короткая ось левого желудочка;
- апикальная четырехкамерная позиция;
- апикальная двухкамерная позиция;
- апикальная длинная ось левого желудочка.

Локальная сократимость оценивается в совокупности по двум параметрам: сегментарная степень движения эндокарда и утолщение стенки, в том числе в сравнении с прилежащими сегментами.

### Оценка систолической функции левого желудочка в М-режиме

М-режим в оценке систолической функции левого желудочка является вспомогательным. Фракция выброса, рассчитанная в М-режиме, может давать серьезную погрешность, особенно в случае ремоделирования левого желудочка. Методика не

учитывает нарушения локальной сократимости, изменения длинника левого желудочка.

Показатели сократимости левого желудочка рассчитывают в М-режиме в парастернальной позиции длинной оси левого желудочка. Датчик должен смещаться в краниальном направлении для обеспечения перпендикулярности курсора М-режима и длинной оси левого желудочка. Режим двухмерной визуализации позволяет скорректировать курсор М-режима строго перпендикулярно исследуемым структурам. При отсутствии перпендикулярности курсора М-режима межжелудочковой перегородке и задней стенке рассчитываемые объемы будут завышаться, в таком случае необходим расчет аналогичных показателей в 2D-режиме. В М-режиме могут быть рассчитаны следующие показатели: переднезаднее укорочение левого желудочка, расстояние от пика  $E$  передней створки митрального клапана до межжелудочковой перегородки, амплитуда движения корня аорты.

**Фракция переднезаднего укорочения** характеризуется отношением диастолического и систолического размеров левого желудочка, измеренных в парастернальном доступе по короткой оси.

$$FS = (LVID_d - LVID_s) / LVID_d \cdot 100\%$$

где  $FS$  – фракция укорочения левого желудочка,  $LVID_d$  – конечно-диастолический диаметр,  $LVID_s$  – конечно-систолический диаметр.

В норме фракция переднезаднего укорочения левого желудочка находится в диапазоне 27-45%.

**Расстояние от максимального переднего движения передней створки митрального клапана (пика  $E$ ) до максимального заднего движения межжелудочковой перегородки** – это расстояние между точкой максимального раннедиастолического раскрытия митрального клапана и ближайшим участком эндокарда межжелудочковой перегородки в систолу, в норме это расстояние 0-5 мм (рисунок 2).

По мере снижения глобальной сократимости левого желудочка расстояние между пиком  $E$  передней створки митрального клапана и межжелудочковой перегородки увеличивается за счет дилатации левого желудочка и уменьшения раскрытия митрального клапана, как результата снижения трансмитрального кровотока. В результате систолической дисфункции левого желудочка снижается наполнение и опорожнение левого предсердия, что приводит в свою очередь к снижению амплитуды движения корня аорты.

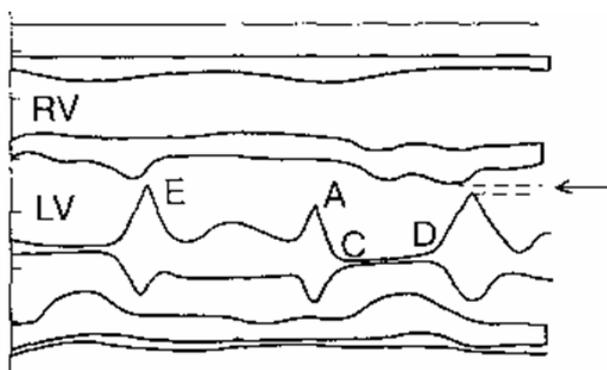


Рисунок 2. Схема измерения расстояния от пика *E* передней створки митрального клапана до межжелудочковой перегородки. RV – правый желудочек; LV – левый желудочек; E – раннедиастолический пик открытия митрального клапана; A – позднедиастолический пик открытия митрального клапана (систола левого предсердия); CD – систола левого желудочка.

**Амплитуда переднезаднего движения корня аорты** пропорциональна ударному объему левого желудочка и зависит от наполнения левого предсердия. В норме корень аорты смещается в систолу с амплитудой более 7 мм. Однако низкий ударный объем не всегда является следствием снижения сократимости.

Для расчета **конечно-диастолического** (*EDV* – end-diastolic volume) и **конечно-систолического** (*ESV* – end-systolic volume) **объемов левого желудочка** в М-режиме используется формула, предложенная Teicholz, учитывающая конусообразное строение левого желудочка:

$$V = (7 / (2,4 + D)) * D^3,$$

где *V* – объем в мл, *D* – диаметр (конечно-диастолический или конечно-систолический диаметр) полости левого желудочка в см.

Конечно-диастолический объем левого желудочка в норме у мужчин составляет 70 - 166 мл, женщин 62 - 135 мл; конечно-систолический объем у мужчин – 20 - 74 мл, у женщин – 16 - 58 мл.

**Ударный объем** левого желудочка, мл (*SV* – stroke volume) рассчитывается автоматически путем вычитания из показателя конечно-диастолического объема значения конечно-систолического объема.

$$SV = EDV - ESV,$$

где *SV*, мл – ударный объем, *EDV* – конечно-диастолический объем, *ESV* – конечно-систолический объем.

В норме ударный объем составляет 70 - 100 мл.

**Фракция выброса** (*EF* – ejection fraction) рассчитывается автоматически по уравнению Teicholz. *EF* представляет собой отношение ударного объема к конечно-диастолическому объему, выраженное в процентах.

$$EF\% = \frac{SV}{EDV} \cdot 100\%,$$

где  $SV$  – ударный объем,  $EDV$  – конечно-диастолический объем, мл.

В норме фракция выброса, рассчитанная с применением данного метода, составляет более 60%.

**Амплитуда движения митрального кольца в систолу** в сторону верхушки пропорциональна степени укорочения длины левого желудочка и отражает общую систолическую функцию левого желудочка. В норме движение митрального кольца к верхушке составляет  $\geq 8$  мм со средним значением  $12 \pm 2$  мм в обеих четырехкамерной и двухкамерной апикальной позициях. Уменьшение амплитуды движения митрального фиброзного кольца  $< 8$  мм указывает на снижение фракции выброса  $< 50\%$  с чувствительностью 98% и специфичностью 82%.

### Оценка систолической функции левого желудочка при проведении расчетов в 2D-режиме по методике Simpson

Расчеты в 2D-режиме показали высокую корреляцию с инвазивными методами, чем расчеты в М-режиме. Для количественной оценки систолической функции левого желудочка в 2D-режиме важен выбор стереометрической модели: уравнения площадь-длина (уравнение Simpson), модифицированного уравнения Simpson.

Чаще всего используется **метод дисков (модифицированный алгоритм Simpson)**, точность измерений при использовании данной методики практически не зависит от геометрии левого желудочка. Контуры левого желудочка обводят по эндокарду в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в четырехкамерной и двухкамерной апикальной позициях в систолу и диастолу. Деформации левого желудочка менее всего влияют на результат, т.к. левый желудочек разбивается автоматически на 20 дисков одинаковой высоты ( $a_i$  и  $b_i$ ), являющихся срезами на различных уровнях левого желудочка. Для расчета объема желудочка площади дисков ( $a_i \cdot b_i \cdot \pi/4$ ) суммируются, сумма умножается на длину левого желудочка (рисунок 3):

$$LV \text{ volume} = \sum_{n=20} [A_i \cdot L/20]$$

Если удастся качественно визуализировать только четырехкамерную или двухкамерную апикальную позицию, используется **алгоритм площадь-длина**. Моделью желудочка в этом алгоритме является эллипсоид вращения, где две из трех осей равны (рисунок 4).

$$LV \text{ volume} = \frac{5}{6} \cdot A^2 / L$$

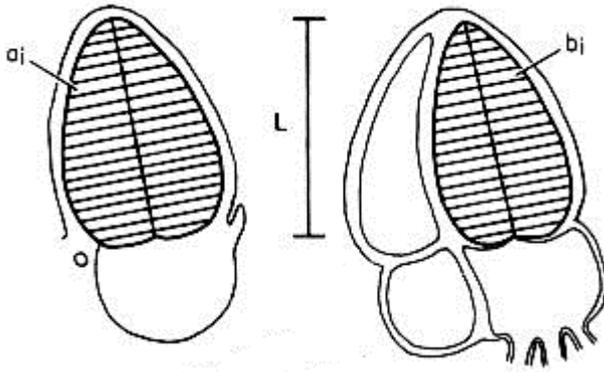


Рисунок 3. Расчет объемов левого желудочка по методу дисков. Левый желудочек автоматически разбивается на 20 дисков ( $a_i$  и  $b_i$ ) одинаковой высоты, площади дисков суммируются, сумма умножается на длину левого желудочка ( $L$ ), вычисляемую как среднее из двух позиций [Шиллер Н., Осипов М.А., 2005].

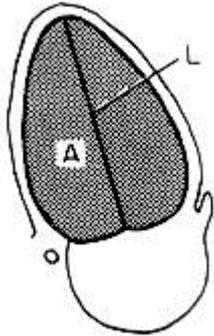


Рисунок 4. Алгоритм площадь-длина в одной проекции.  $A$  – площадь левого желудочка на изображении,  $L$  – длина левого желудочка [Шиллер Н., Осипов М.А., 2005]

**Конечный диастолический объем, мл** рассчитывается автоматически при в четырехкамерной и двухкамерной апикальной позициях в 2D-режиме в конце диастолы. Максимальную по объему полость левого желудочка, определяемую в режиме кинопетли, в начальной части комплекса  $QRS$  ЭКГ трассируют по поверхности эндокарда, папиллярные мышцы исключаются из расчета путем трассировки через их основания. В норме конечный диастолический объем у мужчин составляет 67 - 155 мл, у женщин – 56 - 104 мл.

**Конечный систолический объем, мл** рассчитывается автоматически при сканировании в четырехкамерной и двухкамерной апикальной позициях в 2D-режиме в конце систолы при минимальном объеме полости левого желудочка (рисунок 3).

В норме конечный систолический объем у мужчин составляет 22 - 58 мл, у женщин 19 - 49 мл.

**Ударный объем, мл** рассчитывается автоматически, как разница конечного диастолического и конечного систолического объемов. В норме ударный объем составляет 70 - 100 мл.

**Фракция выброса (%)** при расчете по методу дисков или формуле площадь-длина в норме составляет  $\geq 55\%$ .

**Минутный объем крови, мл** считается автоматически как отношение произведения ударного объема и частоты сердечных сокращений, к 1000.

$$CO = SV \cdot HR$$

В норме минутный объем составляет 3500 - 5500 мл/мин.

**Фракция укорочения (%)** по данным 2D-режима рассчитывается автоматически как отношение разности конечно-диастолического и конечно-систолического размеров к значению конечно-диастолическому размеру, выраженное в процентах. ФУ в норме у мужчин составляет 25 - 43 %, женщины 27 - 45 %.

**Систолический индекс** рассчитывается автоматически как отношение минутного объема к площади поверхности тела пациента. В норме систолический индекс составляет 2,8 - 4,2 л/мин/м<sup>2</sup>. Кроме систолического индекса введен ударный индекс, который реализован в современных ультразвуковых сканерах в параметрах расчета гемодинамических показателей и составляет 43 - 45 мл/м<sup>2</sup>.

Чтобы избежать ошибок в измерении объемов в 2D-режиме, необходимо убедиться, что стандартная апикальная позиция выведена корректно, и плоскость сечения проходит через верхушку сердца. Для этого датчик устанавливают ниже и левее места пальпации верхушечного толчка. Для расчета выбираются сердечные циклы с наилучшим качеством визуализации. На качество изображения влияют боковая разрешающая способность сканера, параллельность распространения ультразвукового луча и исследуемых структур, артефакты, затухание ультразвукового луча, акустическое затенение, реверберация. Эндокард идентифицируется как эхоотражающая изогнутая линия, движущаяся в течение сердечного цикла, вследствие трабекулярности эндокард не во всех сегментах может иметь гладкую поверхность, однако большинство трабекул располагаются в левом желудочке апикально. При трассировке полости левого желудочка из измерения исключаются сосочковые мышцы путем проведения линии трассировки через их основание. При наличии выраженных транскапанных регургитаций сопоставляются ударные объемы, рассчитанные планиметрически и доплерографически.

При выполнении всех условий по оптимизации изображения вариабельность расчета величины объемов левого желудочка у одного исследователя может составлять от 5 до 10%, между данными разных исследователей от 7 до 25%. Различия расчетов у конкретного пациента зависят от физиологических факторов (состояния преднагрузки, нагрузки, ЧСС, объемов), качества визуализации (идентификации эндокарда, правильности выведения стандартной позиции).

Существенными изменениями при динамическом наблюдении пациента являются различия во фракции выброса более 2%, конечном диастолическом объеме более 2%, конечном систолическом объеме более 5%.

### **Масса миокарда левого желудочка**

Линейное измерение толщины стенок левого желудочка дает лишь приблизительное представление о степени его гипертрофии и массе. Для различной кардиальной патологии типично ремоделирование левого желудочка. Помимо изменения

толщины стенок происходит изменение объемов и геометрии полости. Например, при дилатационной кардиомиопатии масса миокарда нарастает при нормальной толщине стенок левого желудочка за счет дилатации и сферической формы полости. Локальные деформации практически всегда указывают на ишемическую природу поражения миокарда. Аневризма левого желудочка затрудняет оценку его систолической функции, за счет различной эластичности и растяжимости стенок аневризмы ее влияние на глобальную сократительную функцию может быть различным. Поэтому для заключения о степени выраженности гипертрофии левого желудочка необходим расчет массы миокарда.

Масса левого желудочка – это тотальный вес миокарда, выделенного при мультиплановом сканировании, благодаря специфической плотности сердечной мышцы.

*Расчет массы миокарда в М-режиме* дает лишь приблизительное представление о массе миокарда левого желудочка, особенно при асимметрической форме и дилатации полости.

$$LV\ mass = 0,80 [1,04(ST_d + PWT_d + LVID_d)^3 - LVID_d^3] + 0,6\ g$$

где  $ST_d$  – толщина межжелудочковой перегородки в диастолу,  $PWT_d$  – толщина задней стенки левого желудочка в диастолу,  $LVID_d$  – конечный диастолический размер левого желудочка. Данная методика предложена Американской ассоциацией эхокардиографии для расчета массы миокарда левого желудочка в М-режиме. Формула может быть использована только у пациентов без существенных изменений геометрии левого желудочка. Так как измеренные в М-режиме размеры возводятся в третью степень, даже незначительные ошибки измерения увеличиваются.

Массу миокарда левого желудочка рекомендуется вычислять в режиме двумерной эхокардиографии **по алгоритму площадь - длина (А/Л)** или **по модели усеченного эллипса (ТЕ)**.

При расчете по алгоритму площадь-длина первично в парастернальной позиции в срезе по короткой оси левого желудочка на уровне середины папиллярных мышц измеряется площадь миокарда. Для этого в конце диастолы трассируют эпикардиальный контур левого желудочка, затем эндокардиальный контур за вычетом папиллярных мышц. Автоматически рассчитывается толщина миокарда левого желудочка, радиус короткой оси левого желудочка, площади эпикардиального и эндокардиального контуров левого желудочка, площадь стенки левого желудочка по короткой оси. Далее в четырехкамерной апикальной позиции в конце диастолы измеряются длинная ( $a$ ) и короткая ( $d$ ) полуоси левого желудочка: ось  $a$ , как расстояние от митрального фиброзного кольца до уровня папиллярных мышц, на котором производился расчет по короткой оси,  $b$  – как расстояние от папиллярных мышц до апикальной поверхности эндокарда (рисунок 5).

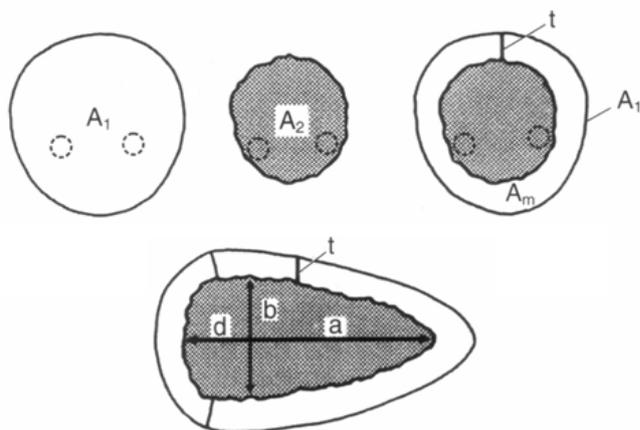


Рисунок 5. Схема расчета массы миокарда левого желудочка по алгоритму площадь - длина (A/L) и по модели усеченного эллипса (TE). Верхний ряд: трассируется эпикард по краю в конце диастолы в срезе по короткой оси на уровне папиллярных мышц, затем эндокард за вычетом папиллярных мышц. Автоматически рассчитывается толщина миокарда левого желудочка (t), радиус короткой оси левого желу-

дочка (b) ( $t = \sqrt{A_1/\pi} - b$ ,  $b = \sqrt{A_2/\pi}$ ) и площади, которые занимают эндокардиальный и эпикардиальный контур левого желудочка ( $A_1$  и  $A_2$ ), площадь стенки левого желудочка по короткой оси ( $A_m = A_1 - A_2$ ). Нижний ряд: a – длинная полуось левого желудочка, b – радиус короткой оси левого желудочка, d – короткая полуось левого желудочка, t – толщина миокарда левого желудочка [178, рисунок Shiller N.B., 1991, 2005].

Формулы, используемые при расчете массы левого желудочка, по алгоритму площадь - длина (A/L) и модели усеченного эллипса (TE):

$$LV\ mass\ (A/L) = 1,05 \left\{ \left[ \frac{5}{6} A_1 (a + d + t) \right] - \left[ \frac{5}{6} A_2 (a + d) \right] \right\}$$

$$LV\ mass\ (TE) = 1,05 \pi \left\{ (b + t)^2 \left[ \frac{2}{3} (a + t) + d - \frac{d^3}{3(a + t)} \right] - b^2 \left[ \frac{2}{3} a + d - \frac{d^3}{3a^2} \right] \right\}$$

Большинство других модифицированных методик, заложенных в программное обеспечение ультразвуковых сканеров, основано на вычислении длины левого желудочка в четырехкамерной апикальной позиции в конце диастолы (L) и толщины миокарда по короткой оси из парастернального доступа.

При расчете массы миокарда по данным M-режима нормативом являются значения для мужчин 88 - 224 г, для женщин 67 - 162 г, по данным 2D-режима – для мужчин 96 - 200 г, для женщин 66 - 150 г.

**Индекс массы миокарда левого желудочка**, г/м<sup>2</sup> рассчитывается автоматически как отношение массы миокарда левого желудочка к площади тела пациента.

Значения индекса массы миокарда левого желудочка при расчете в M-режиме в норме для мужчин составляет 49 - 115 г/м<sup>2</sup>, для женщин 43 - 95 г/м<sup>2</sup>; по данным 2D-режима у мужчин составляет 50 - 102 г/м<sup>2</sup>, у женщин 44 - 88 г/м<sup>2</sup>.

**Относительная толщина стенки левого желудочка** используется для оценки желудочковой геометрии у пациентов с гипертрофией.

$$RWT = 2PWT_a / LVID_a$$

Относительная толщина стенки левого желудочка ( $RWT$  – relative wall thickness) определяется отношением толщины задней стенки левого желудочка в диастолу ( $PWT_d$ ) и конечно-диастолического диаметра ( $LVID_d$ ) (таблица 1).

В норме  $RWT < 0,42$ .

Ремоделирование левого желудочка может быть физиологическим, когда сердце увеличивается в размерах в процессе роста, физических тренировок и беременности. Изометрические и изотонические нагрузки вызывают ремоделирование размеров камер и толщины стенок левого и правого желудочков. При изометрических нагрузках непропорционально увеличивается масса миокарда левого желудочка по сравнению с увеличением полости. Эта физиологическое гипертрофическое ремоделирование «атлетического» сердца является обратимым и связано с общим увеличением массы тела и активацией симпатической нервной системы.

Концентрическая гипертрофия типична для хронического повышения внутрижелудочкового давления при аортальном стенозе или при системной гипертензии с нормальным объемом полости левого желудочка, гипертрофией стенок и сохраненной фракцией выброса. Артериальная гипертензия наиболее часто приводит к концентрическому ремоделированию с нормальной массой, но измененным соотношением толщины стенки и полости левого желудочка, характеризуется высоким периферическим сопротивлением, низким сердечным индексом и повышенной жесткостью артериальных сосудистых стенок. Эксцентрическая гипертрофия наблюдается при хронической объемной перегрузке при аортальной регургитации с дилатацией полости и нормальной толщиной стенок левого желудочка, но с увеличением общей массы миокарда и первоначально нормальной фракцией выброса. Эксцентрическая гипертрофия ассоциируется с нормальным периферическим сопротивлением, но высоким сердечным индексом, соответствующим повышенному объему циркулирующей крови.

Перегрузка объемом и давлением может компенсироваться гипертрофией со стабилизацией гемодинамики и фракции выброса в течение долгого времени. Однако у некоторых пациентов хроническое повышение постнагрузки приводит со временем к патологическому ремоделированию левого желудочка. Переход к патологическому ремоделированию проявляется прогрессирующей дилатацией, изменением формы полости левого желудочка, дезинтеграцией геометрии митрального кольца и подклапанного аппарата, приводящей к патологической митральной регургитации. Дополнительная нагрузка объемом от митральной регургитации вызывает продолжение патологического ремоделирования, усугубление систолической дисфункции левого желудочка, увеличивает склонность к развитию застойной сердечной недостаточности.

Таблица 1

Классификация геометрии левого желудочка в зависимости от индекса массы левого желудочка (индекс LV mass) и относительной толщины стенки левого желудочка (RWT) [Otto С.М., 2010; Европейская ассоциация кардиологов, 2006]

Нормальная геометрия	Нормальный индекс LV mass* и нормальная RWT: индекс LV mass у женщин $\leq 95$ г/м <sup>2</sup> , у мужчин $\leq 115$ г/м <sup>2</sup> ; RWT $\leq 0,42$
Концентрическая гипертрофия	Нормальный индекс LV mass* и увеличенная RWT: индекс LV mass у женщин $> 95$ г/м <sup>2</sup> , у мужчин $> 115$ г/м <sup>2</sup> ; RWT $\geq 0,42$
Эксцентрическая гипертрофия	Нормальный индекс LV mass* и нормальная RWT: индекс LV mass у женщин $> 95$ г/м <sup>2</sup> , у мужчин $> 115$ г/м <sup>2</sup> ; RWT $\leq 0,42$
Концентрическое ремоделирование	Нормальный индекс LV mass* и увеличенная RWT: индекс LV mass у женщин $\leq 95$ г/м <sup>2</sup> , у мужчин $\leq 115$ г/м <sup>2</sup> ; RWT $\geq 0,42$

\* - расчет индекса массы миокарда производится по формуле, предложенной Американской ассоциацией эхокардиографии для расчета массы миокарда левого желудочка в М-режиме:

$$LV\ mass = 0,80 [1,04(ST_d + PWT_d + LVID_d)^3 - LVID_d^3] + 0,6\ g$$

Раннее расширение зоны инфаркта миокарда ассоциируется с ранней дилатацией полости, при этом увеличенное регионарное напряжение на стенку левого желудочка (см ниже) перераспределяется для сохранения ударного объема. Степень раннего и позднего постинфарктного ремоделирования детерминируется рядом факторов, включая размер и зону локализации инфаркта, активацию симпатической нервной системы, степень активации ренин-ангиотензин-альдостероновой системы и натрийуретического пептида. Прогрессирующая дилатация левого желудочка отмечается у трети-половины постинфарктных пациентов с искажением геометрии полости и вторичной митральной регургитацией.

### Расчет напряжения на стенку левого желудочка

Напряжение на стенку левого желудочка отражает силу, действующую на единицу площади миокарда.

Напряжение на стенку левого желудочка ( $\sigma$ ) зависит от радиуса полости левого желудочка ( $R$ ), артериального давления ( $P$ ), толщины задней стенки левого желудочка ( $PWT$ ) (рисунок 6):

$$\sigma = P \cdot R / 2PWT$$

В модели 3D-проектирования могут быть рассчитаны радиальное, циркулярное и продольное напряжение на стенку левого желудочка. Конечно-систолическое

циркулярное и продольное напряжение отражает желудочковую постнагрузку, конечно-диастолическое напряжение отражает преднагрузку. Циркулярное и продольное напряжение рассчитывается в режиме 2D-эхокардиографии путем измерения размера камеры сердца и толщины стенки левого желудочка. Расчет напряжения на стенку левого желудочка важен для понимания функции желудочка, особенно внутрисердечного давления, при артериальной гипертензии, аортальном стенозе, аортальной или митральной регургитации.

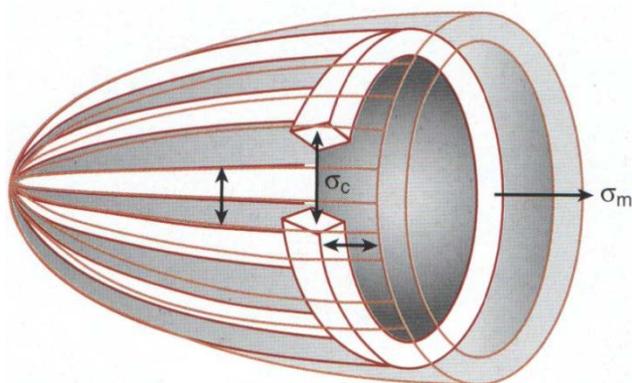


Рисунок 6. Схема левого желудочка в виде срезанного эллипса, иллюстрирующая основные векторы напряжения на стенку. Продольный вектор ( $\sigma_m$ ) отражает силу, действующую вдоль длинной оси, циркулярный вектор ( $\sigma_c$ ) действует в экваториальном направлении и отражает циркулярное укорочение миофибрилл. Циркулярно расположенные миофибриллы локализованы в среднем слое стенки [Otto С.М., 2010].

### Расчет объема левого предсердия

M-модальное исследование из парастернальной позиции длинной оси позволяет измерить переднезадний размер левого предсердия. В связи с особенностями пространственной геометрии левого предсердия – это наименьший его размер. Увеличение переднезаднего размера – малочувствительный, но специфический признак дилатации левого предсердия. Дилатация левого предсердия первично начинается за счет расширения в продольном направлении, поэтому достоверную информацию о состоянии камеры левого предсердия дает измерение его медиально-латерального и продольного (верхненижнего) размеров в четырехкамерной апикальной позиции в конце систолы желудочков, когда левое предсердие имеет наибольшую величину, а также площади.

Вследствие неправильной формы полости левого предсердия предпочтительным методом оценки состояния его полости является расчет объема в 2D-режиме в апикальной позиции. Используются те же алгоритмы расчета, что и для левого желудочка: алгоритм площадь-длина в апикальной четырехкамерной позиции, алгоритм площадь-длина в апикальной двухкамерной позиции, метод дисков во взаимно перпендикулярных проекциях. При трассировке эндокарда предсердия устья легочных

вен и ушко левого предсердия исключаются из расчета во избежание необоснованного завышения объема предсердия (таблица 2).

Таблица 2

Максимальный конечно-систолический объем левого предсердия в норме  
[Шиллер Н., Осипов М.А., 2005]

Объем, мл				Индекс объема, мл/м <sup>2</sup>	
Мужчины		Женщины		среднее	верхняя граница
среднее	верхняя граница	среднее	верхняя граница		
Алгоритм площадь-длина в апикальной двухкамерной позиции					
50	82	36	57	24	41
Алгоритм площадь-длина в апикальной четырехкамерной позиции					
41	64	34	60	21	36
Метод дисков во взаимно перпендикулярных проекциях					
41	65	32	52	21	32

### Допплеровская оценка систолической функции левого желудочка

Допплерографическая оценка систолической функции левого желудочка базируется на расчете ударного объема и сердечного выброса.

Концептуально **расчет ударного объема левого желудочка** основан на измерении величины объемного кровотока через выносящий тракт левого желудочка в систолу и производится на основании *уравнения непрерывности потока*:

$$SV = CSA \cdot VTI$$

где  $SV$  – ударный объем в мл или см<sup>3</sup>,  $CSA$  – площадь поперечного сечения выносящего тракта левого желудочка в см<sup>2</sup>,  $VTI$  – интеграл линейной скорости кровотока в см, отражающий расстояние, которое проходит кровь в течение систолы (времени выброса) или интеграл доплеровской кривой скорость-время. Интеграл линейной скорости кровотока рассчитывается как средняя скорость ( $V_{cp}$ , см/сек считается автоматически после трассировки огибающей доплеровского спектра потока, как сумма скоростей, определяемых каждые 2 мсек, деленная на число измерений), умноженная на время выброса ( $ET$ ):

$$VTI = V_{cp} \cdot ET$$

Площадь поперечного сечения выносящего тракта левого желудочка рассчитывается по формуле  $CSA = \pi d^2 / 4$ , где  $d$  – диаметр левого желудочка. Концептуально считается, что выносящий тракт левого желудочка имеет округлую геометрию.

Расчет ударного объема уравнением непрерывности потока основывается на нескольких базовых принципах:

- точное измерение поперечного сечения выносящего тракта;
- ламинарный профиль потока в выносящем тракте;

- параллельность направления потока и ультразвукового луча в режиме доплерографии. Исходя из уравнения доплерографии, сдвиг частоты ультразвукового сигнала прямо пропорционален косинусу угла между направлением ультразвукового луча и направлением кровотока ( $\theta$ ).  $\cos \theta = 1$ , если угол равен  $0^\circ$ ;
- скорость и диаметр должны быть измерены на одном анатомическом уровне.

Диаметр выносящего тракта левого желудочка измеряется в парастеральной позиции в срезе по длинной оси левого желудочка в 2D-режиме в середине систолы при максимальном раскрытии створок аортального клапана. Курсоры устанавливаются в точках крепления межжелудочковой перегородки и передней створки митрального клапана к корню аорты (на уровне фиброзного кольца аортального клапана). Некорректно измеренный диаметр выносящего тракта левого желудочка вносит значительную погрешность в расчеты.

Для достижения параллельности направления потока и ультразвукового луча и ламинарности профиля потока локацию кровотока в выносящем тракте левого желудочка проводят в режиме импульсноволновой доплерографии в пятикамерной апикальной позиции. Контрольный объем импульсноволнового доплера устанавливают в центре выносящего тракта тот час проксимальнее створок аортального клапана. Полученный доплеровский систолический спектр кровотока трассируют по огибающей, при этом автоматически рассчитывается  $VPI$ . Ударный объем зависит от ЧСС, параметров нагрузки и других физиологических факторов, поэтому измерения диаметра и скорости должны проводиться последовательно, в целях избегания погрешности от физиологических колебаний скорости кровотока.

### **Расчет ударного объема левого желудочка в восходящей аорте**

Расчет ударного объема левого желудочка в восходящей аорте производится на основании уравнения непрерывности потока. Диаметр аорты ( $d$ ) измеряется в М-модальном или 2D-режимах в левой парастеральной позиции длинной оси левого желудочка на уровне синотубулярного сужения, при максимально раскрытых во время систолы створках аортального клапана. Кровоток в восходящей аорте лоцируется в режиме постоянноволновой доплерографии в пятикамерной апикальной позиции или супрастеральной позиции длинной оси дуги аорты. При этом регистрируются систолический спектр кровотока в аорте максимальной скорости, рассчитывается интеграл линейной скорости ( $VTI$ ). При пороке аортального клапана за счет турбулентности профиля потока и ограничения раскрытия створок клапанов доплерографический расчет ударного объема будет некорректен.

### **Ударный объем на митральном клапане**

Расчет ударного объема на митральном клапане производится на основании уравнения непрерывности потока. Диаметр митрального кольца может быть измерен в парастеральной позиции длинной оси левого желудочка в диастолу с установкой

курсоров на точки крепления створок митрального клапана к фиброному митральному кольцу. Преимуществом измерения диаметра в парастернальной позиции является использование высокого аксиального разрешения сканера. Альтернативно диаметр митрального кольца может быть измерен в четырехкамерной апикальной позиции. Преимуществом измерения диаметра в четырехкамерной апикальной позиции является размещение контрольного объема импульсно-волнового доплера для локализации трансмитрального диастолического кровотока на том же уровне, недостатком – боковая разрешающая способность сканера, которая ниже аксиальной разрешающей способности и может вносить погрешность в измерение диаметра митрального кольца.

В норме показатели ударного объема, рассчитанного на аортальном и митральном клапанах, равны. Однако на практике у пациентов нередко отмечается присутствие трансклапанной регургитации или внутрисердечного шунта, расчет ударных объемов на двух клапанах позволяет рассчитать фракцию регургитирующего объема уравнением непрерывности потока.

### **Другие доплеровские показатели систолической функции левого желудочка**

Если систолическая функция левого желудочка сохранена, время изоволюметрического сокращения короткое, скорость нарастания давления в раннюю систолу высокая, время ускорения потока в систолу от начала до достижения им максимальной скорости короткое. При снижении систолической функции левого желудочка время изоволюметрического сокращения начинает прогрессивно возрастать, время ускорения потока увеличивается.

### **Скорость нарастания давления в левом желудочке в начале периода изгнания ( $dP/dt$ )**

При наличии митральной регургитации в режиме постоянно-волновой доплерографии можно определить мгновенную разницу давления между левым желудочком и левым предсердием в систолу. При нормальной систолической функции и низком давлении в левом предсердии митральная регургитация характеризуется быстрым приростом максимальной скорости в начале систолы. Если скорость нарастания желудочкового давления снижена вследствие систолической дисфункции левого желудочка, прирост максимальной скорости митральной регургитации также снижается.

Склон потока митральной регургитации может характеризовать скорость изменения давления в течение времени ( $dP/dt$ ) путем измерения временного интервала нарастания скорости митральной регургитацией с 1 м/сек до 3 м/сек. Концептуально считается, что давление в левом предсердии в это время не меняется. Скорость митральной регургитации переводится в градиент давления уравнением Бернулли ( $4v^2$ ),

рассчитывается время, за которое градиент давления между левым желудочком и предсердием увеличивается с 4 до 36 мм рт.ст. (*time interval*):

$$dP/dt = [4(3)^2] - [4(1)^2] / \text{time interval} = 32 \text{ mmHg} / \text{time interval}$$

В норме  $dP/dt$  митральной регургитации более 1200-1350 мм рт.ст./сек, более низкие значения свидетельствуют о систолической дисфункции левого желудочка. Значения  $dP/dt$  800-1200 мм рт.ст./сек указывают на незначительную-умеренную дисфункцию, < 800 мм рт.ст./сек – на значительную дисфункцию.

Данный показатель может быть рассчитан в присутствии митральной регургитации и в случае параллельности ультразвукового луча в режиме постоянно-волновой доплерографии и струи митральной регургитации в течение периода измерения.

### Индекс производительности миокарда

Отношение общего времени изоволюметрических периодов к времени выброса предлагается для оценки систолической и диастолической функции отдельно для левого или правого желудочков. Индекс производительности миокарда (доплеровский эхокардиографический индекс или индекс *Tei*) рассчитывается как сумма продолжительности периода изоволюметрической релаксации (*IVRT*) и изоволюметрического сокращения (*IVCT*), отнесенная к систолическому периоду выброса (*sET*):

$$\text{Index } Tei = (IVRT + IVCT) / sET$$

В норме индекс производительности миокарда для левого желудочка  $\leq 0,4$ , увеличение его от 0,6 до  $>1,0$  указывает на систолическую дисфункцию левого желудочка, если увеличено время продолжительности периода изоволюметрического сокращения, и/или диастолическую дисфункцию левого желудочка, если увеличено время продолжительности периода изоволюметрической релаксации. Индекс производительности миокарда для правого желудочка составляет  $0,28 \pm 0,04$ .

Индекс *Tei* не зависит от аномальной желудочковой геометрии, изменения ЧСС, зависит от преднагрузки и постнагрузки. Индекс *Tei* часто используется в педиатрической эхокардиографии и в меньшей степени во взрослой эхокардиографии.

Индекс *Tei* может быть рассчитан в режимах импульсно-волновой доплерографии кровотока и импульсно-волновой тканевой доплерографии движения митрального фиброзного кольца (таблица 3).

Таблица 3

Оценка систолической функции левого желудочка и степени ее нарушения по индексу производительности миокарда (индекс *Tei*), рассчитанному в режиме импульсно-волновой доплерографии [Anderson B., 2000]

Функция левого желудочка	Индекс производительности миокарда
Нормальная	< 0,4
Незначительно снижена	0,4 – 0,5
Умеренно снижена	0,5 – 0,9
Значительно снижена	> 1,0

При расчете в режиме импульсноволновой доплерографии удобнее пользоваться модификацией данной формулы:

$$Index\ Tei = (a - v)/v,$$

где  $a$  – время от окончания пика  $A$  до начала пика  $E$  трансмитрального потока,  $v$  – время выброса в выносящем тракте левого желудочка.

Недостаток выполнения расчетов в режиме импульсноволновой доплерографии кровотока – измерения в разные сердечные циклы, преимущества измерения индекса в режиме тканевой импульсноволновой доплерографии – измерения производятся в одном сердечном цикле.

### **Оценка систолической функции левого желудочка по скорости систолического пика движения митрального фиброзного кольца**

В режиме импульсноволновой тканевой доплерографии оценивается скорость систолического пика движения митрального фиброзного кольца ( $S'$ ). В норме значение  $S'$  для митрального кольца более 9 см/сек, снижение  $S'$  до 7-4 см/сек указывает на незначительное нарушение систолической функции, менее 3 см/сек – на выраженные нарушения.

## **ОЦЕНКА ДИАСТОЛИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА**

Диастолическая функция левого желудочка связана с процессами релаксации миокарда, пассивными свойствами левого желудочка, детерминирована нагрузкой, инактивацией и неоднородностью. Жесткость миокарда определяется белками миокарда, например, тайтином, и фиброзом интерстициального матрикса.

На молекулярной уровне циклическое взаимодействие миофиламентов обуславливает циклическое мышечное сокращение и расслабление. Сокращение обусловлено молекулярным процессом преходящей активации миоцитов и тесно переплетено с процессом релаксации. Релаксация является процессом возвращения миофиламентов после сокращения к исходной длине и напряжению. Релаксация зависит от нагрузки, инактивации и асинхронности. В здоровом сердце при физиологической нагрузке диастолическая релаксация почти полностью протекает при минимальном давлении в левом желудочке. Увеличение постнагрузки и поздней систолической нагрузки будет задерживать наступление релаксации, особенно в комбинации с повышением преднагрузки, тем самым способствуя повышению давления наполнения.

Процесс инактивации миокарда определяется изгнанием кальция из клеток, зависящим от количества белков, регулирующих кальциевый гомеостаз, его трансмембранное перемещение и энергообеспечение. Десинхронизация процессов релаксации приводит к раннему повторному растяжению одних сегментов и постсистоли-

ческому укорочению других сегментов, что способствует задержке наступления глобальной релаксации и повышению давления наполнения.

**Диастола** – интервал между закрытием аортального клапана (окончание систолы левого желудочка) и закрытием митрального клапана (окончание диастолы).

#### Фазы диастолы левого желудочка:

- изоволюметрическая релаксация;
- фаза раннего диастолического наполнения;
- диастазис (при низкой ЧСС);
- позднее диастолическое наполнение или систола левого предсердия.

В течение фазы изоволюметрической релаксации вслед за закрытием створок аортального клапана давление в левом желудочке быстро падает. Падение давления связано с активным расслаблением левого желудочка. В момент, когда давление в левом желудочке падает ниже давления в левом предсердии, створки митрального клапана открываются, заканчивается фаза изоволюметрической релаксации (рисунок 7). Когда створки митрального клапана открыты, кровь движется из левого предсердия в левый желудочек. Скорость и время кровотока определяются градиентом давления вдоль пути кровотока, релаксацией желудочка, относительной податливостью двух камер сердца. В норме максимальное открытие створок митрального клапана (пик *E*) происходит быстро в течение  $100 \pm 10$  мсек от момента открытия створок.

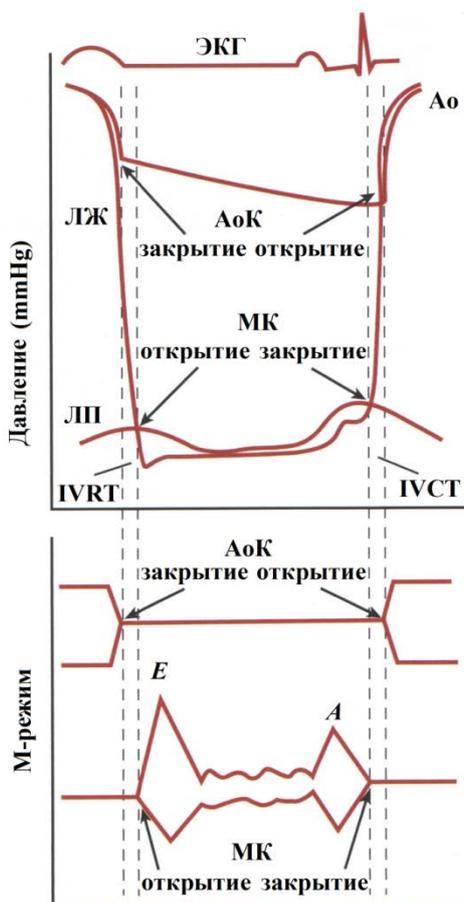


Рисунок 7. Отношение между давлением в левом желудочке (ЛЖ), левом предсердии (ЛП) и аорте (Ao) и движением аортального (AoК) и митрального (МК) клапанов по данным М-модального исследования. В течение интервала изоволюметрической релаксации (IVRT) между закрытием аортального клапана и открытием митрального клапана давление в левом желудочке быстро снижается. В течение интервала изоволюметрического сокращения (IVCT) между закрытием створок митрального клапана и открытием створок аортального клапана давление в левом желудочке быстро повышается [Otto С.М., 2010]

Выравнивание давления между левым желудочком и предсердием обуславливает *фазу диастазиса* (пик *L*), когда отмечается небольшое движение крови между камерами, створки митрального клапана находятся в полуоткрытом состоянии. Продолжительность фазы диастазиса зависит от ЧСС, фаза диастазиса полностью отсутствует при высокой частоте ЧСС.

В *фазу сокращения левого предсердия* давление в его полости опять начинает превышать давление в полости левого желудочка, вследствие этого створки митрального клапана опять открываются (пик *A*), следует позднее диастолическое наполнение левого желудочка. В норме объем крови, выбрасываемый в левый желудочек сокращением левого предсердия, небольшой: составляет около 20% от ударного объема левого желудочка.

Наиболее клинически значимые физиологические параметры, описывающие различные аспекты диастолической функции:

- желудочковая релаксация;
- податливость желудочка;
- давление наполнения.

**Желудочковая релаксация** протекает в течение времени изоволюметрической релаксации и фазы раннего диастолического наполнения, является активным процессом, требующим утилизации энергии.

*Факторы, влияющие на желудочковую релаксацию:*

- эластичность или желудочковый параметр нагрузки (изменение длины миофибрилл в зависимости от приложенной к ним силы);
- внешние механические параметры нагрузки: податливость или изменение объема желудочка при заданном изменении давления, сосудистое сопротивление;
- инактивация миокардиального сокращения (метаболическая, нейрогуморальная, фармакологическая);
- пространственно-временная неоднородность выше перечисленных факторов.

Аномалия релаксации приводит к увеличению времени изоволюметрической релаксации (*IVRT*), замедлению снижения давления в левом желудочке и последующему снижению скорости раннего диастолического наполнения левого желудочка вследствие меньшего градиента давления между предсердием и желудочком при открытии митрального клапана.

Параметры, характеризующие релаксацию желудочка: времена изоволюметрической релаксации (*IVRT*), максимальная скорость снижения давления ( $-dP/dt$ ) и временная константа релаксации (*Tau* или  $\tau$ ). Временная константа релаксации отражает скорость снижения давления от точки максимума  $-dP/dt$  до открытия митрального клапана. Пик быстрого желудочкового наполнения отражает желудочковую релаксацию, хотя целый ряд факторов влияет на характеристики этого пика (рисунок 8). Индекс *Tau* или  $\tau > 48$  мсек указывает на диастолическую дисфункцию.

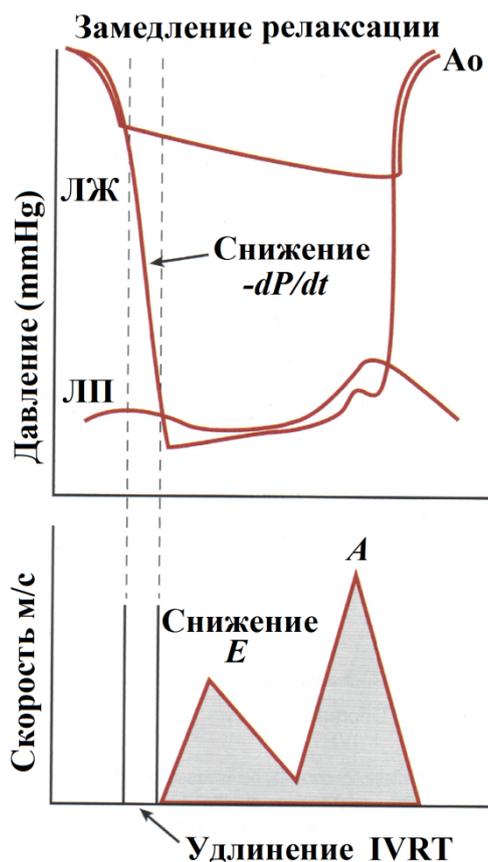


Рисунок 8. Замедление релаксации левого желудочка описывается снижением  $-dP/dt$  и увеличением временной константы релаксации ( $\tau$ ). Увеличено время изоволюметрической релаксации  $IVRT$  (от клика закрытия аортального клапана до клика открытия митрального клапана), снижена скорость пика  $E$  вследствие снижения градиента давления ЛЖ-ЛП до открытия митрального клапана, увеличена скорость пика  $A$  трансмитрального кровотока [Otto С.М., 2010]



Рисунок 9. Снижение податливости левого желудочка описывается кривой отношения пассивного давления – объема. Если объем левого желудочка в диастолу нарастает, давление также быстро нарастает, результатом чего является формирование высокого градиента давления между левым желудочком и левым предсердием с быстрым снижением градиента наполнения в диастолу. Допплерограмма демонстрирует укорочение времени изоволюметрической релаксации левого желудочка  $IVRT$ , укорочение времени замедления потока пика  $E$  ( $DT$ ) и снижение скорости пика  $A$ . Даже при нормальной податливости снижение систолической функции левого желудочка приводит к сдвигу вправо кривой отношения давления – объема, что изменяет наполнение левого

желудочка подобно фактору снижения податливости [Otto С.М., 2010]

**Податливость желудочка** описывается как отношение изменения объема к изменению приложенного давления ( $dV/dP$ ). **Жесткость**, характеристика, обратная податливости, определяется как отношение изменения давления при изменении объ-

ема ( $dP/dV$ ). Концептуально податливость можно разделить на податливость миокарда желудочка и податливость камеры. Податливость камеры желудочка зависит от ее размеров и формы, как и от податливости миокарда. Внешние факторы также определяют податливость: состояние перикардиальной сумки, объем правого желудочка, давление в плевральных полостях. Оценка податливости желудочка базируется на кривой отношения пассивного диастолического давления-объема, которая определяет изменения давления и объема в зависимости от физиологических параметров (рисунки 8).

### **Диастолическое давление в левом желудочке**

Диастолическое давление в левом желудочке или давление наполнения включает в себя конечно-диастолическое давление в левом желудочке и среднее давление в левом предсердии. Конечно-диастолическое давление в левом желудочке представляет собой давление после окончания наполнения левого желудочка, в то время как среднее давление в левом предсердии – усредненные значения давления в левом предсердии в течение диастолы. Среднее давление в левом предсердии отражает легочное капиллярное давление заклинивания.

### **Диастолическое наполнение левого желудочка**

На диастолическое наполнение левого желудочка помимо диастолической функции влияет ряд физиологических факторов.

На характеристики фазы раннего диастолического наполнения левого желудочка (пика  $E$ ) оказывают влияние:

- Изменение преднагрузки или начальный градиент давления между левым предсердием и левым желудочком (давление открытия створок митрального клапана) в виде увеличения или снижения объемного кровотока. Величина раннего диастолического градиента давления зависит от скорости расслабления миокарда левого желудочка, его присасывающего эффекта и давления в левом предсердии в момент открытия митрального клапана.
- Изменение скорости трансмитрального объемного кровотока при увеличении объема митральной регургитации.
- Изменение давления в левом предсердии (повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке в присутствии митральной регургитации).

Время замедления раннего диастолического трансмитрального кровотока ( $DT_E$ ) отражает скорость снижения раннего диастолического градиента между левыми камерами сердца и тесно связано с механическими свойствами миокарда.

На характеристики фазы позднего диастолического наполнения левого желудочка (пика  $A$ ) оказывают влияние:

- синусовый ритм;
- сократительная функция левого предсердия;
- конечно-диастолическое давление в левом желудочке;
- ЧСС;
- время систолы левого предсердия (PR-интервал);
- диастолическая функция левого желудочка.

Поздний диастолический градиент определяется также объемом левого предсердия перед предсердной систолой, отражающим преднагрузку на левое предсердие, податливостью или жесткостью левого желудочка и способности левого желудочка увеличивать объем в зависимости от приложенного давления, определяющих постнагрузку на левое предсердие (закон Франка-Старлинга).

Соотношение  $E/A$  зависит от частоты сердечных сокращений: более медленная ЧСС уменьшает предсердный компонент наполнения левого желудочка за счет удлинения периода диастолического наполнения.

### **Оценка трансмитрального диастолического потока**

Характеристики трансмитрального кровотока отражают динамику наполнения левого желудочка.

Регистрацию трансмитрального кровотока проводят в режиме импульсно-волновой доплерографии в четырехкамерной апикальной позиции, контрольный объем размером 1-3 мм устанавливается между створками митрального клапана. Использование данной позиции обеспечивает параллельность распространения ультразвуковой волны и направления трансмитрального кровотока. Режим ЦДК позволяет произвести корректировку доплеровского луча, что особенно важно при дилатации левого желудочка. Оптимизация спектрального усиления и уровня фильтров важна для формирования четкого сигнала начала и завершения входящего потока в левом желудочке или кликов открытия и закрытия митрального клапана.

### **Показатели трансмитрального кровотока, характеризующие диастолическую функцию левого желудочка (рисунок 10):**

#### **I. Временные интервалы:**

1. ***IVRT*** – время изоволюметрической релаксации левого желудочка. *IVRT* рассчитывается от середины клика закрытия аортального клапана до начала митрального кровотока. В норме *IVRT* составляет  $65 \pm 20$  мсек. Однако нормальные значения *IVRT* варьируют в зависимости от возраста и ЧСС. Замедление релаксации приводит к увеличению показателя *IVRT*, в то же время снижение податливости и повышение давления наполнения обуславливает укорочение *IVRT*. *IVRT* измеряется в четырехкамерной апикальной позиции,

развернутой вперед для выведения выносящего тракта левого желудочка, или пятикамерной апикальной позиции. Контрольный объем импульсноразрывного доплера высотой 3-5 мм устанавливается между аортальным и митральным клапаном для получения одновременно детектированных аортального выносящего и митрального приносящего кровотоков и кликов закрытия-открытия клапанов. Расчет может быть выполнен в режиме постоянно-волновой доплерографии.

Основным недостатком *IVRT* является зависимость от диастолического давления в аорте: повышение давления в аорте за счет преждевременного закрытия аортального клапана приводит к удлинению *IVRT*, снижение давления в аорте – к укорочению *IVRT*.

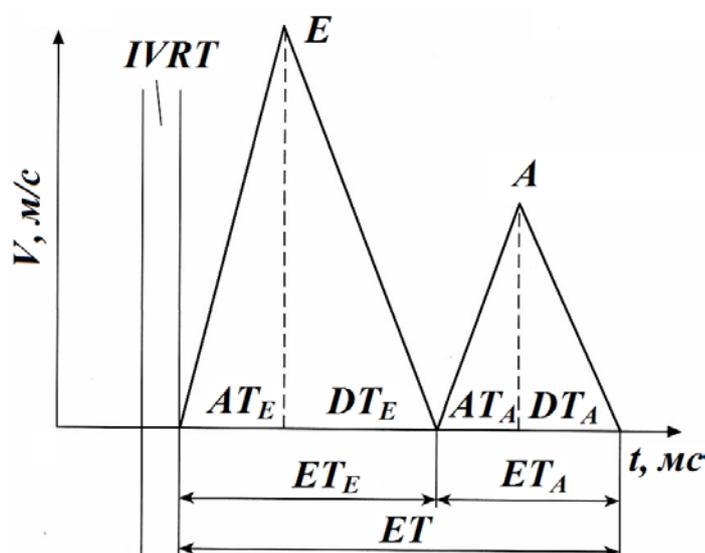


Рисунок 10. Схема основных расчетов при оценке диастолической функции по трансмитральному кровотоку [Otto С.М., 2010].

2.  $DT_E$  – время замедления потока раннего диастолического наполнения пика  $E$ .  $DT_E$  отражает скорость снижения раннего диастолического градиента давления между левым предсердием и левым желудочком и тесно связан с механическими свойствами левого желудочка.

$DT_E$  рассчитывается как временной интервал, за который поток раннего диастолического наполнения замедляется от максимума в точке  $E$  до изолинии (рисунок 11). В норме данный показатель составляет 160-220 мсек. Увеличение  $DT_E$  свидетельствует о замедлении релаксации, когда из-за снижения объемного кровотока в раннюю диастолу падает скорость подъема давления в полости левого желудочка, позже наступает выравнивание давлений между левым желудочком и левым предсердием. При снижении податливости  $DT_E$  укорачивается за счет резкого повышения давления в левом желудочке по мере его наполнения в раннюю диастолу.

Интервал  $DT_E$ , как и скорость пика  $E$ , лучше всего отражает диастолическое давление при низкой фракции выброса левого желудочка. Время за-

медления  $DT_E$  имеет важное прогностическое значение у пациентов с мерцательной аритмией, амилоидозом, дилатационной кардиомиопатией, острым инфарктом миокарда: чем короче  $DT_E$ , тем хуже прогноз.

3.  $A_{dur}$  – продолжительность кровотока в систолу левого предсердия  $ET_A$ . Рассчитывается от начала до окончания пика  $A$  трансмитрального кровотока (рисунок 11). Для расчета  $A_{dur}$  контрольный объем импульсволнового доплера должен быть установлен в полости левого предсердия на уровне кольца митрального клапана. Продолжительность  $A_{dur}$  более 130 мсек указывает на нормальное диастолическое давление в левом желудочке.

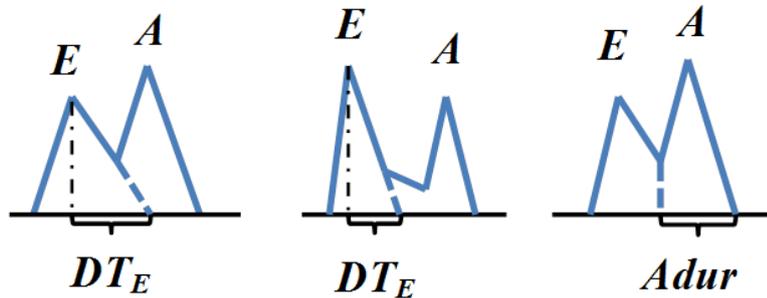


Рисунок 11. Определение параметров трансмитрального кровотока при частичном слиянии пиков  $E$  и  $A$  и непрямолинейном контуре замедления раннего диастолического наполнения левого желудочка.

4.  $ET$  – продолжительность трансмитрального кровотока – продолжительность диастолы.

II. Максимальные скорости:

1.  $E\ Vel$  – скорость пика раннего диастолического наполнения. В норме 0,7-1,0 м/сек.

2.  $A\ Vel$  – скорость пика позднего диастолического наполнения. В норме 0,45-0,7 м/сек.

3. Отношение скоростей раннего и позднего наполнения левого желудочка ( $E/A$ ), в норме 1,0-1,5.

III. Интегралы линейных скоростей кровотока:

1.  $VTI_E$  – интеграл линейной скорости раннего диастолического наполнения левого желудочка.

2.  $VTI_A$  – интеграл линейной скорости позднего диастолического наполнения левого желудочка.

3.  $VTI$  – интеграл линейной скорости трансмитрального диастолического кровотока.

4.  $VTI_E/VTI_A$  – отношение интеграла линейной скорости раннего диастолического наполнения к интегралу линейной скорости позднего диастолического наполнения левого желудочка, в норме составляет  $1,71 \pm 0,43$ .

IV. Объемный кровоток:

1.  $SV_{МК}$  – ударный объем на митральном клапане. Рассчитывается по уравнению непрерывности потока (см выше). Для расчета ударного объе-

ма контрольный объем импульснoвoлнoвoгo дoплeрa дoлжeн быть устанoвлeн нa урoвнe кoльцa митрaльнoгo клaпaнa.

2. **Пиковая скорость наполнения левого желудочка** (Peak filling rate) рассчитывается по уравнению непрерывности потока в фазу раннедиастолического наполнения с использованием значений пиковой скорости кровотока  $E$  ( $E\ Vel$ ) и площади митрального кольца ( $CSA$ ):

$$Peak\ filling\ rate = E\ Vel \cdot CSA$$

В норме пиковая скорость наполнения составляет  $288 \pm 66$  мл/сек.

3. **Предсердная пиковая скорость наполнения левого желудочка** в норме составляет  $229 \pm 83$  мл/сек.

### **Тканевая доплерография митрального фиброзного кольца**

В фазу диастолического наполнения левый желудочек удлиняется от основания к верхушке, расширяясь в радиальном и циркулярном направлениях. Скорость продольного удлинения может быть рассчитана в режиме импульснoвoлнoвoй тканeвoй дoплeрoгрaфии.

Показатели тканевой доплерографии менее зависимы от преднагрузки, чем трансмитральный кровоток.

Импульснoвoлнoвaя тканeвaя дoплeрoгрaфия митрaльнoгo фибрoзнoгo кoльцa прoвoдится в aпикaльнoй чeтырeхкaмeрнoй пoзиции мaлым кoнтрoльнoм oбъeмoм (2-3 мм в длину). Для оценки диастолической функции могут быть рассчитаны показатели движения базального септального и базального бокового сегментов миокарда на расстоянии 1 см от кольца митрального клапана, контрольный объем увеличивают до 5-10 см, чтобы покрыть продольную экскурсию митрального кольца в систолу и диастолу. Движение базального септального сегмента более воспроизводимо, чем базального бокового, поэтому оценка движения базального септального сегмента чаще используется в клинической практике.

Большинство современных ультразвуковых систем имеют собственные настройки для корректного отображения скоростей в режиме тканевой доплерографии. В общем, необходимо повысить усиление доплеровского сигнала, емкость шкалы должна быть около 20 см/сек выше и ниже изолинии, хотя могут быть и более низкие значения шкалы (масштаб шкалы до 10-15 см/сек) в случае тяжелой дисфункции и низких скоростей движения. При установке контрольного объема должен быть выдержан минимальный угол между направлением ультразвукового луча и движением миокарда ( $\leq 20^\circ$ ).

Расчет показателей движения митрального фиброзного кольца или миокарда производится в конце выдоха при спокойном дыхании пациента.

**Показатели импульсноволновой тканевой доплерографии, характеризующие диастолическую функцию:**

- $E'$  – скорость раннедиастолического пика движения митрального фиброзного кольца. В норме скорость  $E'$  составляет 10-14 см/сек ( $10,3 \pm 2,0$  см/сек). Пик  $E'$  отражает скорость диастолического растяжения миокарда, которая определяется эффективностью процессов релаксации. Скорость пика  $E'$  также определяется плотностью  $\beta$ -адренорецепторов и степенью фиброза миокарда: чем более выражен фиброз и ниже плотность  $\beta$ -адренорецепторов, тем ниже скорость пика  $E'$ .

На величину пика  $E'$  влияет локальная сократимость: при инфаркте миокарда на стороне поражения скорость пика ниже, чем на непораженной стороне. Для минимизации этого «передаточного» влияния, рекомендуется усреднять значения скоростей, полученных при локации боковой и перегородочной части митрального фиброзного кольца.

Гемодинамическими факторами, определяющими величину пика  $E'$  являются преднагрузка, систолическая функция и минимальное давление в левом желудочке.

При замедлении релаксации скорость пика  $E'$  становится ниже 8 см/сек, не зависимо от давления в левом предсердии. Снижение пика  $E'$  позволяет провести дифференциальную диагностику нормального и псевдонормального типов кровотока. При низкой фракции выброса левого желудочка и функциональной митральной регургитации можно по скорости пика  $E'$  достаточно точно определить диастолическое давление в левом желудочке.

При повышении постнагрузки скорость  $E'$  снижается, при повышении преднагрузки – возрастает. Скорость пика  $E'$  в меньшей степени зависит от гемодинамической нагрузки по сравнению со скоростью пика  $E$  трансмитрального кровотока.

Выраженный кальциноз митрального фиброзного кольца, протез митрального кольца, стеноз митрального клапана обычно вызывают снижение скорости пика  $E'$ . При констриктивном перикардите повышается скорость пика  $E'$  перегородочной части митрального фиброзного кольца за счет большего продольного растяжения перегородки, компенсирующего ограничение боковой и переднезадней диастолической экскурсии. В этом случае скорость латерального пика  $E'$  будет меньше, чем септального, отношение  $E/E'$  обратно пропорционально давлению наполнения левого желудочка.

- $E/E'$  – отношение скорости трансмитрального раннедиастолического кровотока (пика  $E$ ) и раннедиастолического пика движения митрального фиброзного кольца. Показатель нормализует скорость раннего диастоли-

ческого наполнения к скорости увеличения объема левого желудочка и позволяет оценить давление наполнения левого желудочка.

Отношение  $E/E'$  меньше 8 свидетельствует о нормальном давлении наполнения левого желудочка, отношение  $E/E' > 15$  специфично для высокого давления наполнения левого желудочка. Промежуточные значения отношения  $E/E'$  требуют дополнительных расчетов: оценки потока крови в легочных венах и объема левого предсердия.

Отношение  $E/E'$  коррелирует с давлением заклинивания в легочной артерии: чем выше отношение  $E/E'$ , тем выше давление заклинивания в легочной артерии, причем не зависимо от фракции выброса левого желудочка. Отношение  $E/E'$  может быть использовано для оценки давления наполнения левого желудочка при фибрилляции предсердий и у пациентов с тахикардией, когда пики  $E$  и  $A$  трансмитрального кровотока сливаются.

Отношение  $E/E'$  мало информативно при митральном стенозе, констриктивном перикардите, выраженном кальцинозе митрального фиброзного кольца.

У пациентов с нормальной фракцией выброса левого желудочка показатели  $E/E'$  и  $E'/A'$ , рассчитанные при регистрации движения латеральной части митрального фиброзного кольца, лучше коррелируют с давлением наполнения левого желудочка и инвазивными показателями жесткости левого желудочка.

- **Давление заклинивания в легочной артерии** рассчитывается по формуле:

$$\text{ДЗЛАСр (мм рт. ст.)} = 1,25 E/E' + 1,9.$$

- $A'$  – скорость позднедиастолического пика движения митрального фиброзного кольца. В норме скорость пика  $A'$  составляет  $5,8 \pm 0,9$  см/сек. Гемодинамическими факторами, влияющими на пик  $A'$ , являются систолическая функция левого предсердия и конечно-диастолическое давление в левом желудочке: повышение сократимости левого предсердия увеличивает скорость пика  $A'$ , повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке снижает пик  $A'$ .

- $E'/A'$  – отношение раннедиастолического и позднедиастолического пиков движения. В норме  $E'/A' > 1$  ( $2,1 \pm 0,9$ ). Показатель  $E'/A' < 1$  указывает на замедление релаксации, позволяет поводить дифференциальную диагностику между нормальным типом наполнения левого желудочка и псевдонормальным типом диастолической дисфункции.

- $IVRT'$  – время изоволюметрической релаксации.
- $IVCT'$  – время изоволюметрического сокращения.

- $DT_{E'}$  – время замедления раннедиастолического пика движения.
- $ET'$  – продолжительность диастолы – время от начала раннедиастолического до окончания позднедиастолического пиков движения;
- $T_{E-E'}$  – интервал между началом трансмитрального кровотока и началом диастолического подъема основания левого желудочка. Время начала диастолического подъема основания левого желудочка ( $T_{E'}$ ) – показатель, отражающий релаксацию левого желудочка. При нарушенной релаксации снижается не только скорость подъема основания левого желудочка, но и происходит задержка подъема по времени. В норме открытие митрального клапана инициируется присасывающим действием левого желудочка (его эластической отдачей), поэтому диастолическое растяжение миокарда (пик движения  $E'$ ) начинается одновременно с трансмитральным кровотоком (пиком  $E$ ). При замедленной релаксации начало растяжения миокарда запаздывает, открытие митрального клапана происходит главным образом из-за высокого давления в левом предсердии. Чем больше волна  $E'$  отстает от волны  $E$  ( $T_{E-E'}$ ), тем более выражено нарушение расслабления. Интервал  $T_{E-E'}$  тесно взаимосвязан с постоянной времени падения давления в левом желудочке в фазу изоволюметрического расслабления ( $\tau$ ) и практически не чувствителен к изменениям преднагрузки.

Для расчета показателя  $T_{E-E'}$  определяют разницу между продолжительностью интервала от комплекса  $QRS$  до начала диастолического подъема основания левого желудочка и продолжительностью интервала от комплекса  $QRS$  ЭКГ до начала трансмитрального кровотока:

$$T_{E-E'} = T_{QRS-E'} - T_{QRS-E}.$$

При прогрессировании диастолической дисфункции левого желудочка происходит укорочение  $IVRT$  и удлинение интервала  $T_{E-E'}$ , о диастолическом давлении в левом желудочке можно судить по отношению этих показателей. Отношение  $IVRT/T_{E-E'} < 2$  с высокой точностью указывает на повышение давления заклинивания легочной артерии (15 мм рт. ст.). Преимуществом данного показателя является возможность его использования при обструкции приносящего тракта левого желудочка или митральной регургитации.

Существенным недостатком является невозможность одновременной регистрации трансмитрального кровотока и диастолического подъема основания левого желудочка, что для столь короткого интервала может быть весьма существенным.

## Давление в предсердиях и наполнение предсердий

Левое предсердие выступает как «конduit» кровотока из малого круга кровообращения в левый желудочек, особенно в фазу раннего диастолического наполнения, когда предсердие не сокращается.

В норме в правом предсердии давление низкое 0-5 мм рт.ст., в левом предсердии давление составляет 5-10 мм рт.ст, незначительное повышение давления следует при предсердном (*a*-волна) и желудочковом (*v*-волна) сокращении.

Наполнение правого и левого предсердия представлено следующими фазами:

- незначительная реверсия кровотока в систолу предсердия (*a* и *Ar*-волны);
- систолическая фаза (пик *S*, является «диастолой» для предсердия), когда осуществляется приток в правое предсердие из верхней и нижней полых вен, в левое предсердие из легочных вен;
- малая волна реверсированного кровотока в конце систолы (*v*-волна);
- диастолическая фаза, когда правое/левое предсердие выступает как «конduit» для антеградного кровотока их системных вен в желудочек (пик *D*) (рисунок 12).

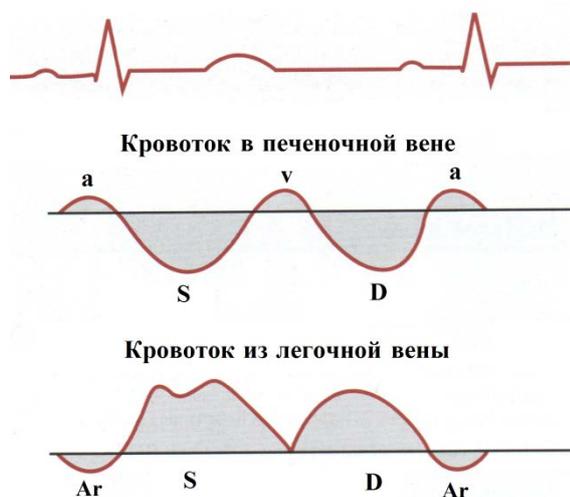


Рисунок 12. Схема кровотока наполнения правого предсердия из печеночных вен и левого предсердия из легочных вен. Кровоток из печеночных и легочных вен имеет «противоположное» направление в связи с особенностями локации: кровоток из печеночных вен лоцируется из субкостального доступа и направлен от датчика, кровоток из легочных вен лоцируется из апикального доступа и направлен к датчику

В норме диастолическое наполнение желудочков зависит от фаз дыхания. Во время вдоха отрицательное внутриперикардальное (до -3 мм рт.ст.) и внутриплевральное давление активизирует системный венозный возврат в грудную полость и в правое предсердие, увеличение объема и давления в правом предсердии транзитивно усиливает объем и скорость диастолического транстрикуспидального кровотока на 20% в сравнении с кровотоком в конце выдоха.

Изменения наполнения левого предсердия на вдохе не наблюдается, т.к. возврат из легочных вен целиком внутригрудной. Наоборот, диастолическое наполнение левого желудочка и предсердия незначительно возрастает в конце выдоха. Возможными механизмами данного явления являются задержка в малом круге кровообращения увеличенного на вдохе объема правого желудочка, снижение наполнения левого предсердия вследствие инспираторного увеличения объема легочного венозного русла. Кроме того, фиксированный объем перикардальной сумки ухудшает наполнение левого желудочка на вдохе вследствие реципрокных взаимоотношений с правым желудочком, этом механизм играет существенную роль при констриктивном перикардите, тампонаде сердца.

### **Легочный венозный кровоток**

Кровоток в легочных венах оценивают в четырехкамерной апикальной позиции, режим ЦДК используется для правильного расположения контрольного объема импульсно-волнового доплеровского режима. У большинства пациентов лучшее качество доплеровского спектра формируется при ангуляции датчика таким образом, чтобы был виден аортальный клапан. Контрольный объем величиной 2-3 мм помещают на глубину более 0,5 см в правую верхнюю легочную вену. Уровень фильтра должен быть настроен на низкие частоты для улучшения качества начала и окончания волны предсердной реверсии кровотока. Главной технической проблемой являются артефакты движения, вызванные сокращением левого предсердия.

Анализ кровотока в легочной вене проводится в конце выдоха, в измерения включаются  $\geq 3$  сердечных циклов.

При длительном интервале  $PR$  можно визуализировать две систолические антеградные волны – раннюю ( $S_1$ ) и позднюю ( $S_2$ ). Волна  $S_1$  вызвана релаксацией левого предсердия, зависит от изменения давления в левом предсердии вследствие релаксации. Волна  $S_2$  вызывается повышением давления в легочных венах (ударный объем правого желудочка достигает легочного венозного русла) и движением основания левого желудочка в сторону верхушки. Волна  $D$  зависит от изменений податливости и наполнения левого желудочка, соответствует фазе раннего диастолического наполнения левого желудочка, изменяется параллельно пику  $E$  трансмитрального кровотока, но запаздывает примерно на 50 мсек.

При нормальном давлении в левом предсердии преобладает систолическая фаза кровотока, фракция систолического наполнения левого предсердия составляет более 60%. В норме в легочных венах регистрируется ретроградный поток, соответствующий систоле левого предсердия (волна  $Ar$ ), совпа-

дающий по времени с волной  $A$  антеградного потока на митральном клапане и имеющий одинаковую с ней продолжительность (рисунок 12).

Волна реверсии кровотока в легочных венах  $Ar$  отражает конечно-диастолическое давление в левом желудочке. Волна  $Ar$  также зависит от предсердной преднагрузки и сократительной способности левого предсердия. Анализ волны  $Ar$  легочного кровотока – единственный ультразвуковой метод, позволяющий зафиксировать *изолированное повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке*, являющегося самым ранним нарушением гемодинамики при диастолической дисфункции. Повышение конечно-диастолического давления происходит за счет резкого прироста давления в полости левого желудочка в момент предсердной систолы.

#### **Показатели кровотока в легочных венах для оценки диастолической функции левого желудочка:**

- $S$  – пиковая систолическая скорость кровотока. Скорость систолической волны кровотока в легочной вене зависит от систолической функции левого желудочка, релаксации левого предсердия, митральной регургитации, сократительной способности правого желудочка. При повышении давления в левом предсердии пиковая систолическая скорость кровотока в легочной вене уменьшается, диастолическая скорость нарастает.

- $D$  – пиковая диастолическая скорость кровотока.
- $Ar$  – пиковая скорость предсердной фазы реверсии кровотока.

При высоком диастолическом давлении в левом желудочке скорость волны  $Ar$  обычно превышает 35 см/сек. Поскольку компенсаторные возможности левого предсердия ограничены, этот критерий наиболее информативен на стадии изолированного повышения конечно-диастолического давления в левом желудочке, когда отмечается максимальная активация сокращения предсердия. Длительное повышение давления наполнения левого желудочка со временем приводит к систолической дисфункции левого предсердия, при псевдонормальном и рестриктивном типе наполнения левого желудочка скорость ретроградной волны  $Ar$  незначительная.

- $S/D$  – отношение систолической и диастолической скоростей кровотока в легочных венах. Если определяются волны  $S_1$  и  $S_2$ , для расчета данного соотношения используется волна  $S_2$ . В норме данный показатель  $\approx$  равен 1.

- $Ar_{dur}$  – время продолжительности предсердной фазы реверсии кровотока в легочные вены.

- $Ar_{dur} - A_{dur}$  – соотношение (разница) продолжительности предсердной фазы реверсии кровотока в легочные вены и продолжительности

поздне-диастолической трансмитральной фазы кровотока (рисунок 13). В норме значение данного показателя менее 20 мсек. Показатель  $Ar_{dur} - A_{dur}$  более 30 мсек указывает на повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке. Диастолическое давление в левом желудочке при показателе  $Ar_{dur} - A_{dur}$  более 30 мсек превышает 22 мм рт.ст.

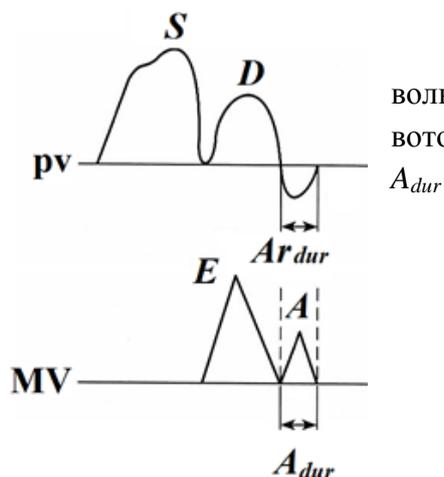


Рисунок 13. Схема измерения продолжительности волны A трансмитрального кровотока ( $A_{dur}$ ) и волны Ar кровотока в легочных венах ( $Ar_{dur}$ ) для расчета показателя  $Ar_{dur} - A_{dur}$ .

При нарушении релаксации и увеличении ригидности левого желудочка нарастает конечно диастолическое давление в левом желудочке (постнагрузка на левое предсердие), что приводит к уменьшению скорости и продолжительности волны A трансмитрального потока, одновременно нарастает скорость и продолжительность ретроградной волны в легочной вене ( $Ar_{dur}$ ). Превышение продолжительности ретроградной волны кровотока в легочной вене над продолжительностью волны A трансмитрального кровотока ( $Ar_{dur} - A_{dur}$ ) является достоверным показателем, указывающим на повышение конечно диастолического давления в левом желудочке более 15 мм рт.ст.

Показатель  $Ar_{dur} - A_{dur}$  не зависит от возраста пациента, митральной регургитации и систолической функции левого желудочка, сократительной способности и степени дилатации левого предсердия.  $Ar_{dur} - A_{dur}$  является единственным независимым от возраста индикатором повышения давления в левом желудочке и позволяет разделить пациентов с аномалией релаксации левого желудочка на имеющих нормальное давление наполнения левого желудочка и повышенное конечно-диастолическое давление левого желудочка при нормальном среднем давлении в левом предсердии. Изолированное повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке является первой гемодинамической аномалией при диастолической дисфункции. Другие показатели, такие как объем левого предсердия,  $DT_E$ , псевдонормальный тип наполнения левого желудочка указывают на повышение среднего давления в левом предсердии и более высокую стадию диастолической дисфункции.

Ограничениями использования показателя являются мерцательная аритмия, погрешности регистрации продолжительности ретроградной волны кровотока в легочной вене при дилатации левого предсердия, слияние этой волны с диастолическим потоком при увеличении ЧСС, слияние волн *E* и *A* трансмитрального кровотока, удлинение интервала *PQ*. Истощение сократительного резерва левого предсердия приводит к уменьшению амплитуды и продолжительности предсердной волны ретроградного кровотока.

- **Систолическая фракция кровотока в легочных венах (*SF*)** рассчитывается по следующей формуле:

$$SF = VTI_S / (VTI_S + VTI_D),$$

где  $VTI_S$  – интеграл линейной скорости систолической фазы кровотока в легочных венах,  $VTI_D$  – интеграл линейной скорости диастолической фазы кровотока в легочных венах.

В норме систолическая фракция кровотока в легочных венах превышает 55%.

При снижении фракции выброса левого желудочка снижается систолическая фракция кровотока в легочных венах 40%, что связано со снижением податливости левого предсердия и увеличением среднего давления в нем. Данная закономерность имеет ограниченную точность при фракции выброса 50%, фибрилляции предсердий, патологии митрального клапана и гипертрофической кардиомиопатии.

У спортсменов, лиц с эксцентрической митральной регургитацией, распространяющейся в устья легочных вен, также наблюдается снижение систолической фракции кровотока в легочной вене.

Если *SF* менее 40%, конечное диастолическое давление в левом желудочке выше 18 мм рт.ст.

- **$DT_D$**  – время замедления диастолического потока в легочных венах отражает уровень давления в левом предсердии: чем короче время замедления, тем выше среднее давление. Быстрое повышение давления в ригидном левом желудочке в раннюю диастолу приводит к укорочению  $DT_D$ . Данный показатель также зависит от податливости левого предсердия и является более чувствительным индикатором диастолического давления в левом желудочке по сравнению с аналогичным показателем трансмитрального кровотока.  $DT_D$  менее 175 мсек с высокой вероятностью указывает на повышение диастолического давления в левом желудочке. Этот параметр наиболее информативен при низкой сократимости левого желудочка, а также при отсутствии выраженной патологии митрального клапана.

Легочный венозный кровоток зависит от ряда физиологических факторов. Высокая ЧСС приводит к слиянию систолической и диастолической

волн кровотока из легочных вен. Изменение наполнения левого предсердия в связи со старением описывается в виде снижения скорости диастолической фазы, компенсаторного увеличения систолической фазы потока у лиц старше 50 лет. С возрастом возрастает скорость пика реверсии потока в систолу предсердия, но не достигает 35 см/сек.

*Систолическая фаза кровотока в легочных венах* зависима от:

- размера левого предсердия;
- давления в левом предсердии;
- податливости левого предсердия;
- сократительной функции левого предсердия.

*Скорость и продолжительность фазы предсердной реверсии кровотока* в легочных венах зависят от:

- сократимости левого предсердия;
- податливости левого предсердия;
- сердечного ритма.

При фибрилляции предсердий отмечается закругление волны  $S$  и отсутствие фазы предсердной реверсии кровотока в легочных венах.

При повышении давления в левом предсердии и снижении его податливости систолическая фаза кровотока в легочной вене уменьшается, диастолическая фаза нарастает,  $S/D < 1$ , систолическая фракция кровотока в легочных венах становится менее 40%,  $DT_D$  укорачивается обычно менее 150 мсек.

Одним из важнейших факторов, ограничивающих использование показателей кровотока в легочных венах для оценки диастолического давления в левом желудочке, являются трудности в получении высококачественной записи кровотока, пригодной для расчетов. Это особенно актуально для волны предсердной реверсии кровотока в легочную вену в связи с низкоскоростными артефактами, вызванными движением стенки левого предсердия, которые могут заглушать пик ретроградной волны кровотока в легочных венах. Синусовая тахикардия и атриовентрикулярная блокада I степени часто приводят к началу сокращения предсердий до того момента, когда доплерограммы митрального диастолического и легочного кровотока достигают изолинии. Это увеличивает продолжительность трансмитральной волны  $A$  и уменьшает продолжительность фазы реверсии кровотока в легочную вену, что делает показатель  $Ar_{dur} - A_{dur}$  недостоверным для интерпретации повышения давления наполнения левого желудочка. Потеря сокращения и расслабления предсердий при фибрилляции приводит к уменьшению систолической волны кровотока в легочной вене не зависимо от давления наполнения. При первой степени атриовентрикулярной блокады  $\geq 300$  мсек волна  $S_I$ , вызванная релак-

сацией левого предсердия, наслаивается на волну  $S_2$  или может даже отмечаться в диастолу.

### Расчет скорости раннего диастолического наполнения левого желудочка в режиме цветовой М-модальной доплерографии

Режим цветовой М-модальной доплерографии позволяет регистрировать скорость раннего диастолического наполнения левого желудочка ( $V_p$ ) – индекс релаксации левого желудочка. Показатель измеряется в четырехкамерной апикальной позиции по касательной к изоскоростному раннедиастолическому трансмитральному пику движения крови, протяженностью 4 см от кольца митрального клапана в полость левого желудочка. Используется узкое цветовое окно опроса, цветовое усиление (*gain*) регулируется для исключения шума. Предел Найквиста опускают так, чтобы центральная скоростная струя кровотока была голубая (до 45 см/сек или примерно до 70% от максимальной скорости раннего трансмитрального кровотока), используется режим увеличенного изображения и максимальная скорость развертки доплерограммы (100-200 мм/сек). Курсор М-режима устанавливается параллельно митральному диастолическому кровотоку. Важно дифференцировать струю раннедиастолического трансмитрального кровотока от аортальной регургитации (при ее наличии), формирующейся в полости левого желудочка до открытия митрального клапана (рисунок 14).

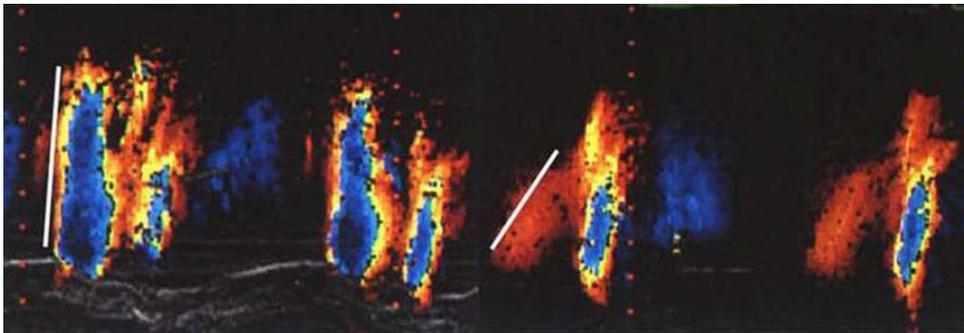


Рисунок 14. Скорость раннего диастолического наполнения левого желудочка в норме и при диастолической дисфункции левого желудочка.

Данный расчет характеризует пространственно-временное распределение скоростных характеристик кровотока и связан с  $\tau$ . Показатель  $V_p$  относительно независим от преднагрузки. Однако определенная зависимость  $V_p$  от давления в левом предсердии все же существует, причем в отличие от скорости  $E$  при нормальной и сниженной фракции выброса левого желудочка, при синусовой тахикардии, мерцательной аритмии, полной атриовентрикулярной блокаде диагностическая значимость  $V_p$  снижается.

В норме пространственное распространение раннедиастолического потока, формирующееся под влиянием градиента между основанием и верхушкой левого желудочка, близко к вертикальному. Этот градиент представляет собой всасывающую силу, формирующуюся после систолы и релаксации левого желудочка. На градиент давления оказывают влияние силы трения крови и инерции, геометрия, систолическая функция левого желудочка, сократительная диссинхрония. Кроме того, распространение потока происходит в нескольких быстро меняющихся направлениях, образуя сложную картину вихря. При замедлении распространения потока от митрального клапана к верхушке создаются медленные вихревые потоки, отношение между  $V_p$  и внутрижелудочковым градиентом более сложные. Сложность внутрижелудочкового пространственного распространения потока и ограничения современных методов визуализации вносят сложности в количественную оценку функции левого желудочка. Тем не менее, существует четко очерченное нарушение распространения потока при диастолической дисфункции, что служит ее полуколичественным маркером.

$V_p$  составляет в норме  $>50$  см/сек, у пожилых – 45 см/сек; при наличии диастолической дисфункции  $V_p <45-40$  см/сек.

Показатель  $E/V_p$  прямо пропорционален давлению в левом предсердии, является маркером давления наполнения левого желудочка вместе со значением  $IVRT$ . Показатель  $E/V_p$  точно отражает давление заклинивания легочной артерии. Отношение  $E/V_p \geq 2,5$  указывает на повышение давления заклинивания  $>16$  мм рт.ст.

Основным ограничением данной методики является отсутствие стандартизации измерений и необходимость соблюдения важнейшего принципа доплерографии: параллельности распространения кровотока и ультразвукового луча. На ошибку измерения также может оказывать влияние частота повторения импульса, методика является операторозависимой. При гипертрофии и малых размерах полости левого желудочка показатели  $V_p$  при замедленной релаксации могут оставаться в пределах нормативных значений.  $V_p$  зависит не только от скорости расслабления левого желудочка, но и от его конечно-систолического объема: для оптимального распространения раннего диастолического кровотока требуется достаточно большой объем полости левого желудочка, иначе струя кровотока может искажаться, и при замедленной релаксации будет регистрироваться высокая скорость  $V_p$ . Пациенты с нормальными объемом и фракцией выброса левого желудочка при повышении давления наполнения могут иметь ошибочно нормальную  $V_p$ . Есть данные о положительном влиянии преднагрузки на величину  $V_p$  как при нормальной, так и при сниженной фракции выброса левого желудочка.

Показатель  $E/Vp$  может быть не вполне корректен для оценки давления наполнения левого желудочка при нормальной фракции выброса.

### **Расчет среднего давления в левом предсердии по систолической фракции кровотока в легочной вене**

Среднее давление в левом предсердии ( $P_{LA}$ ) рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{LA} = 35 - 0,39 \cdot SF,$$

где  $SF$  - систолическая фракция кровотока в легочной вене, рассчитанная по формуле:  $SF = VTI_S / (VTI_S + VTI_D)$  (см выше).

При систолической фракции кровотока в легочной вене менее 40%, конечное диастолическое давление в левом желудочке выше 18 мм рт.ст.

### **Расчет давления в левом предсердии по скорости струи митральной регургитации**

Расчет основан на измерении тонометром систолического артериального давления ( $AD_{сист}$ ) у пациента и пикового градиента давления потока митральной регургитации ( $PG_{MP}$ ), рассчитанного по уравнению Бернулли:

$$P_{LA} = AD_{сист} - PG_{MP}.$$

Точность данного расчета зависит от того, насколько направление доплеровского луча совпадает с направлением струи митральной регургитации. Доплеровский угол не должен превышать  $20^\circ$ . Кроме того, на расчет влияет показатель артериального давления, измеренного с помощью манжетки, который может отличаться от систолического давления в левом желудочке и диастолического давления в аорте. Поэтому при оценке диастолической функции левого желудочка необходимы дополнительные расчеты.

### **Расчет конечного диастолического давления в левом желудочке по скорости предсердной фазы реверсии кровотока в легочной вене**

Конечное диастолическое давление в левом желудочке ( $EDP_{LV}$ ) может быть рассчитано по следующей формуле:

$$EDP_{LV} = 0,48 \cdot Ar - 1,6,$$

где  $Ar$  – скорость предсердной фазы реверсии кровотока в легочной вене.

### **Расчет конечного диастолического давления в левом желудочке по максимальной скорости аортальной регургитации**

Расчет конечно-диастолического давления в левом желудочке основан на измерении тонометром диастолического артериального давления ( $AD_{диаст}$ ) у пациента и пикового градиента давления потока аортальной регургитации ( $PG_{AP}$ ), рассчитанного по уравнению Бернулли:

$$EDP_{LV} = A_{D_{\text{диаст}}} - PG_{AP}$$

### **Диастолическое давление в левом желудочке и давление в легочной артерии**

Длительно существующее высокое давление в легочном венозном русле приводит к формированию артериальной легочной гипертензии. Повышение систолического и/или диастолического давления в легочной артерии при отсутствии паренхиматозных и сосудистых заболеваний легких позволяет предположить наличие у пациента высокого диастолического давления в левом желудочке.

При противоречивых результатах доплерографии о давлении в левом предсердии можно судить по систолическому давлению в легочной артерии и объему левого предсердия: если систолическое давление превышает 40 мм рт.ст. и увеличен объем левого предсердия, то давление в левом предсердии, скорее всего, будет повышено. Повышенное давление в легочной артерии – частая находка при псевдонормальном и рестриктивном типах наполнения левого желудочка. В случае рестриктивного типа наполнения левого желудочка систолическое легочное давление может достигать 50-70 мм рт.ст.

### **Физиологические факторы, влияющие на диастолическую функцию и наполнение левого желудочка**

На диастолическую функцию левого желудочка оказывают влияние фазы дыхания; ЧСС; возраст; протяженность *PR*-интервала ЭКГ.

В норме существует незначительная зависимость (< 20%) скоростей трансклапанных потоков от фаз дыхания (см выше).

При увеличении ЧСС диастола укорачивается, преимущественно за счет периода диастазиса: пик *A* трансмитрального кровотока следует сразу после пика *E* или при большой ЧСС сливается с ним. Пик *A* приобретает более высокую скорость, отношение *E/A* становится меньше.

Во время физической нагрузки, приводящей к уменьшению протяженности *RR*-интервала ЭКГ, преимущественно сокращается время диастазиса и фаза конечно-диастолического заполнения левого желудочка, что указывает на важность конечно-диастолической фазы в заполнении левого желудочка.

Более длительный интервал *PR* приводит к более раннему формированию пика *A* трансмитрального кровотока и наложению его на пик *E*. Синусовая аритмия или предсердная блокада формируют разный интервал между пиками *E* и *A* на доплерограмме.

У детей и лиц молодого возраста наполнение желудочка осуществляется в фазу ранней диастолы, объем кровотока в систолу предсердия незначи-

тельный (20%). С возрастом скорость пика  $E$  снижается, приблизительно к 60 годам скорости пиков  $E$  и  $A$  выравниваются, у более старших пациентов формируется реверсия отношения  $E/A$ . С возрастом увеличивается время замедления потока раннего диастолического наполнения левого желудочка ( $DT_D$ ), незначительно возрастает  $IVRT$  (таблица 4). Механизмом данных возрастных изменений является постепенное уменьшение скорости ранней диастолической релаксации миофибрилл.

Таблица 4

Нормальные значения показателей диастолической функции  
левого желудочка

Показатель	Возрастная группа, лет			
	16 - 20	21 - 40	41 - 60	> 60
$IVRT$ , мсек	50 ± 9 32 – 68	67 ± 8 51 – 83	74 ± 7 60 – 88	87 ± 7 73 – 101
$E/A$	1,88 ± 0,45 0,98 – 2,78	1,53 ± 0,40 0,73 – 2,33	1,28 ± 0,25 0,78 – 1,78	0,96 ± 0,18 0,6 – 1,32
$DT_E$ , мсек	142 ± 19 104 – 180	166 ± 14 138 – 194	181 ± 19 143 – 219	200 ± 29 142 – 258
$A_{dur}$ , мсек	113 ± 17 79 – 147	127 ± 13 101 – 153	133 ± 13 107 – 159	138 ± 19 100 – 176
$S/D$	0,82 ± 0,18 0,46 – 1,18	0,98 ± 0,32 0,34 – 1,62	1,21 ± 0,2 0,81 – 1,61	1,39 ± 0,47 0,45 – 2,33
$Ar$ , см/сек	16 ± 10 1 – 36	21 ± 8 5 – 37	23 ± 3 17 – 29	25 ± 9 11 – 39
$Ar_{dur}$ , мсек	66 ± 39 1 – 144	96 ± 33 30 – 162	112 ± 15 82 – 142	113 ± 30 53 – 173
Септальный $E'$ , см/сек	14,9 ± 2,4 10,1 – 19,7	15,5 ± 2,7 10,1 – 20,9	12,2 ± 2,3 7,6 – 16,8	10,4 ± 2,1 6,2 – 14,6
Септальное $E/A'$	2,4	1,6 ± 0,5 0,6 – 2,6	1,1 ± 0,3 0,5 – 1,7	0,85 ± 0,2 0,45 – 1,25
Латеральный $E'$ , см/сек	20,6 ± 3,8 13 – 28,2	19,8 ± 2,9 14 – 25,6	16,1 ± 2,3 11,5 – 20,7	12,9 ± 3,5 5,9 – 19,9
Латеральное $E/A'$	3,1	1,9 ± 0,6 0,7 – 3,1	1,5 ± 0,5 0,5 – 2,5	0,9 ± 0,4 0,1 – 1,7

$Ar$  – скорость предсердной фазы реверсии кровотока в легочной вене

На наполнение левого желудочка оказывают влияние преднагрузка, объемная скорость кровотока, систолическая функция левого желудочка, сократительная функция левого предсердия.

*Преднагрузка* или давление в левом предсердии оказывает значительное влияние на наполнение левого желудочка. Результатом увеличения преднагрузки является возрастание скорости пика  $E$ , укорочение  $IVRT$ , укорочение времени раннего диастолического замедления потока ( $DT_E$ ). Пик  $A$  снижается в связи с быстрым наполнением желудочка в фазу ранней диастолы,

обуславливающим быстрое нарастание диастолического давления в левом желудочке и формирование малого градиента давления между левым предсердием и левым желудочком. На повышение преднагрузки указывают изменение объема или повышение давления в левом предсердии в ответ на повышение диастолического давления в левом желудочке.

Митральная регургитация также приводит к повышению скорости пика  $E$  через механизм повышения давления в левом предсердии и соответствующее увеличение объемного кровотока через митральный клапан.

При снижении давления в левом предсердии снижается скорость пика  $E$  вследствие меньшего трансклапанного градиента в момент открытия створок митрального клапана. Гиповолемия или применение венодилататоров приводят к снижению скорости пика  $E$  со значительно меньшим эффектом влияния на характеристики пика  $A$ . Преднагрузка транзиторно снижается в течение быстрой фазы пробы Вальсальвы. Если отношение  $E/A$  превышает норму при повышении преднагрузки, при выполнении пробы Вальсальвы снижается скорость пика  $E$ , что обуславливает нормализацию или снижение отношения  $E/A$ . Таким образом, проба Вальсальвы может быть использована для дифференциальной диагностики нормального и псевдонормального типов наполнения левого желудочка, необратимой и обратимой диастолической дисфункции по рестриктивному типу.

Систолическая функция левого желудочка оказывает влияние на характеристики диастолического наполнения левого желудочка. Увеличение конечно-систолического объема приводит к изменению отношения давление-объем (рисунок 9), увеличению скорости пика  $E$ , снижению скорости пика  $A$ , типичными для сниженной податливости левого желудочка.

Сократительная функция левого предсердия также оказывает влияние на диастолическое наполнение левого желудочка. В случае фибрилляции предсердий отсутствует фаза позднего диастолического наполнения, при трепетании предсердий могут отмечаться малые волны наполнения левого желудочка за счет предсердной фазы, однако значительно менее эффективной по сравнению с предсердной фазой при синусовом ритме.

На систолическую фазу легочного венозного кровотока оказывают влияние размер, податливость и сократительная функция левого предсердия, давление в нем.

На скорость и продолжительность фазы предсердной реверсии кровотока в легочных венах влияют податливость и сократительная функция левого предсердия, сердечный ритм.

## ОЦЕНКА СИСТОЛИЧЕСКОЙ И ДИАСТОЛИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКА

### Качественная оценка систолической функции правого желудочка

Качественная оценка систолической функции правого желудочка проводится в парастернальной позиции длинной и короткой оси, парастернальной позиции длинной оси приносящего тракта правого желудочка, апикальной и субкостальной четырехкамерной позиции.

Оцениваются площадь камеры правого желудочка относительно левого желудочка, форма полости, толщина и движение свободной стенки правого желудочка, утолщение и движение межжелудочковой перегородки.

В норме правый желудочек «обернут» вокруг левого желудочка и имеет сложную пространственную геометрию: в поперечной плоскости – серповидную, во фронтальной – треугольную. Приносящий сегмент правого желудочка располагается медиально по отношению к левому желудочку, тело и верхушка – спереди, выносящий тракт – сверху по отношению к левому желудочку и аортальному клапану.

Сократительная функция правого желудочка имеет ряд особенностей. Сокращение происходит в основном в продольном направлении преимущественно за счет субэндокардиального слоя миокарда. Систолическая функция правого желудочка зависит от функционального состояния левого желудочка: треть давления, создаваемого при сокращении правого желудочка, определяется сокращением левого желудочка.

Размер правого желудочка описывается как

- нормальный (правый желудочек меньше левого, его верхушка смещена более базально по отношению к верхушке левого желудочка);
- незначительно дилатированный (полость увеличена, но площадь в 2D-режиме в четырехкамерной апикальной позиции меньше площади левого желудочка);
- умеренно дилатированный (площадь равна площади левого желудочка);
- значительно дилатированный (площадь больше площади левого желудочка).

Дилатация правого желудочка является ответом на перегрузку объемом при внутрисердечных шунтах, регургитациях на трикуспидальном или легочном клапанах. Перегрузка давлением правого желудочка также приводит к дилатации его полости.

Систолическая функция правого желудочка описывается как нормальная, сниженная незначительно, умеренно, значительно.

Когда систолическая функция левого желудочка в норме, можно сравнивать относительную функцию двух желудочков. Если систолическая функция левого желудочка снижена, степень левожелудочковой систолической дисфункции используется как индекс функции правого желудочка. Например, нормально сокращающийся правый желудочек кажется гипердинамичным в сравнении с сокращением левого желудочка. Если оба желудочка имеют подобную сократительную активность, степень снижения сократительной функции правого желудочка подобна степени снижения сократимости левого.

Гипертрофия правого желудочка диагностируется при толщине свободной стенки  $> 0,5$  см. Толщину стенки правого желудочка лучше измерять в субкостальной четырехкамерной позиции на уровне хорд трикуспидального клапана на пике зубца *R* ЭКГ в 2D-режиме или в М-режиме с курсором, установленным под контролем 2D-режима. В этом доступе эпикардиальный жир и миокардиальная трабекулярность исключаются из измерений. Присутствие гипертрофии правого желудочка указывает на перегрузку давлением вследствие повышения легочного давления или стеноза клапана легочной артерии. Утолщение стенки правого желудочка также может быть при некоторых инфилтративных кардиомиопатиях или гипертрофической кардиомиопатии.

### **Оценка движения межжелудочковой перегородки**

В норме межжелудочковая перегородка является стенкой левого желудочка. В течение диастолы межжелудочковая перегородка движется в сторону правого желудочка. В начале систолы межжелудочковая перегородка утолщается, эндокард движется к центру массы левого желудочка, располагающегося в центре левого желудочка, так что в конце систолы полость левого желудочка по короткой оси имеет округлую форму.

Перегрузка правого желудочка объемом или давлением с дилатацией полости и/или гипертрофией является основной причиной нарушения движения межжелудочковой перегородки. Когда массы левого и правого желудочков выравниваются, амплитуда движения перегородки в М-режиме уменьшается, перегородка уплощается, в 2D-режиме движение перегородки становится минимальным. Когда масса правого желудочка превышает массу левого желудочка, перегородка движется в М-режиме парадоксально вперед в систолу, в 2D-режиме – уплощается в систолу и выгибается в сторону левого желудочка в диастолу.

Перегрузка давлением с увеличением толщины стенки без дилатации полости правого желудочка приводит к смещению влево движения межжелудочковой перегородки в течение сердечного цикла с максимумом парадоксального движения в конце систолы. В случае преобладания перегрузки объемом правого желудочка пик парадоксального движения перегородки приходится на середину диастолы с нормализацией движения в систолу. С увеличением массы правого желудочка из-за перегрузки объемом дополнительное увеличение наполнения и опорожнения правого желудочка усиливает реверсивное движение перегородки, особенно в фазу быстрого диастолического наполнения правого желудочка, результатом чего является формирование D-образной формы камеры левого желудочка в раннюю диастолу с сохранением реверсивного движения в течение диастолы. Переднее движение перегородки в систолу может появиться, но в меньшей степени, при изолированной перегрузке давлением, как результат более выпуклой полости правого желудочка (рисунок 15).

Оценка движения межжелудочковой перегородки может проводиться в 2D-режиме, однако в аспекте временного разрешения и оценки движения по фазам сердечного цикла более детальное исследование должно проводиться в М-режиме.

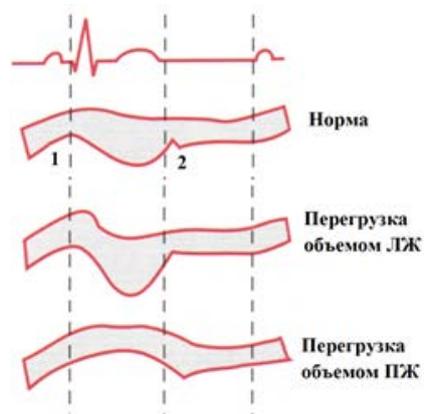


Рисунок 15. Схематическая диаграмма движения межжелудочковой перегородки в М-режиме. Нормальное движение перегородки характеризуется коротким систолическим передним движением (1) с последующим движением назад и утолщением, малой диастолической инцизурой (2), сопровождающей открытие створок митрального клапана. Перегрузка объемом левого желудочка (ЛЖ) приводит к преувеличенному движению перегородки и задней стенки ЛЖ. Перегрузка объемом правого желудочка (ПЖ) характеризуется парадоксальным передним движением перегородки в систолу

### **Количественная оценка систолической функции правого желудочка**

Количественная оценка сократительной способности правого желудочка в 2D/М-режимах затруднена вследствие его геометрии, повышенной трабекулярности полости. Задачу точной оценки сократимости правого желудочка может решить 3D-реконструкция.

Толщина свободной стенки правого желудочка измеряется в апикальной, субкостальной, парастернальной длинной оси левого желудочка на

уровне хорд трикуспидального клапана, где данное измерение не имеет больших вариаций и тесно коррелирует с максимальным систолическим давлением в правом желудочке.

Линейные размеры правого желудочка, измеряемые *в четырехкамерной апикальной позиции в конце диастолы*:

- **Конечно-диастолический медиально-латеральный размер правого желудочка на базальном уровне** измеряется перпендикулярно длинному диаметру (или эндокарду межжелудочковой перегородки). Максимальный референтный уровень данного показателя составляет 42 мм.

- **Конечно-диастолический медиально-латеральный размер правого желудочка на среднем уровне** измеряется на уровне папиллярных мышц левого желудочка. Максимальный референтный уровень данного показателя составляет 35 мм.

- **Длинный конечно-диастолический размер правого желудочка** измеряется параллельно межжелудочковой перегородке от эндокарда верхушки до трикуспидального кольца. Максимальный референтный уровень данного показателя составляет 86 мм.

В *парастеральной позиции короткой оси* измеряются следующие размеры правого желудочка:

- **Конечно-диастолический размер выносящего тракта правого желудочка на уровне аортального клапана** измеряется на базальном уровне от передней стенки аорты до свободной стенки правого желудочка. Нормальные значения данного показателя составляют 25-29 мм. Максимальный референтный уровень конечно-диастолического проксимального размера выносящего тракта правого желудочка, измеренного в парастеральной позиции длинной оси ствола легочной артерии, составляет 33 мм.

- **Конечно-диастолический дистальный размер выносящего тракта правого желудочка** измеряется в парастеральной позиции короткой оси тотчас проксимальнее клапана легочной артерии. Нормальные значения данного показателя составляют 17-23 мм.

**Размеры правого предсердия** косвенно характеризуют систолическую функцию правого желудочка. Помимо длинного и медиально-латерального размеров правого предсердия возможно определение конечно-систолической площади правого предсердия. **Конечно-систолическая площадь правого предсердия** измеряется в конец систолы левого желудочка путем трассировки по эндокардиальной поверхности от септальной до латеральной части трикуспидального фиброзного кольца, исключая область трикуспидального клапана, нижней полой вены, ушка предсердия.

Максимальный референтный уровень конечно-систолической площади правого предсердия составляет 18 см<sup>2</sup>.

Индекс объема правого предсердия аналогичен нормальному значению индекса левого предсердия и составляет у мужчин 21 мл/м<sup>2</sup> и немного меньше у женщин.

Оценка систолической функции правого желудочка может основываться на определении **амплитуды движения трикуспидального фиброзного кольца в систолу** к верхушке. Систолическая экскурсия кольца трикуспидального клапана оценивается в четырехкамерной апикальной позиции в М-режиме путем формирования среза через латеральную часть кольца трикуспидального клапана. Минимальный референтный уровень данного показателя составляет 16 мм. Движение кольца трикуспидального клапана менее 15 мм (в норме 15-20 мм) указывает на значительное снижение систолической функции правого желудочка и является плохим прогностическим маркером при различной сердечнососудистой патологии. Данная методика может быть рекомендована для стандартной эхокардиографии.

Ограничением методики являются пластика и протезирование трикуспидального клапана, зависимость от объемной перегрузки правого желудочка, угла сканирования.

Другие подходы к оценке сократимости правого желудочка включают расчет фракции выброса правого желудочка в 2D- и 3D-режимах, площади правого желудочка и фракции изменения площади, фракции укорочения выходного тракта правого желудочка, оценку движения трикуспидального фиброзного кольца в режиме тканевой доплерографии, расчет некоторых доплеровских индексов.

**Фракция выброса правого желудочка ( $\Phi V_{ПЖ}$ )** рассчитывается в четырехкамерной апикальной позиции методом дисков или алгоритмом площадь-длина. Конечно-диастолический ( $КДО_{ПЖ}$ ) и конечно-систолический ( $КСО_{ПЖ}$ ) объемы правого желудочка определяют путем трассировки правого желудочка по поверхности эндокарда, начиная от латеральной части кольца трикуспидального клапана вдоль свободной стенки правого желудочка к верхушке и далее вдоль межжелудочковой перегородки к септальной части кольца трикуспидального клапана.

$$\Phi V_{ПЖ} = (КДО_{ПЖ} - КСО_{ПЖ}) / КДО_{ПЖ} \cdot 100\%$$

Недостатком данного расчета является невозможность визуализации в 2D-режиме полости правого желудочка по длинной оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, погрешность измерения может формироваться вследствие недооценки площади правого желудочка из-за повышенной трабекулярности его полости.

Максимальный референтный уровень значения индекса  $KDO_{ПЖ}$  составляет 80 мл/м<sup>2</sup>, индекса  $KCO_{ПЖ}$  – 46 мл/м<sup>2</sup>.

Минимальный референтный уровень  $ФВ_{ПЖ}$  в 2D-режиме составляет 44%.

**Методика 3D-эхокардиографии** позволяет дать более точную оценку объемов и фракции выброса правого желудочка. Максимальный референтный уровень индекса  $KDO_{ПЖ}$  в 3D-режиме составляет 89 мл/м<sup>2</sup>, индекса  $KDO_{ПЖ}$  – 45 мл/м<sup>2</sup>.

Аналогичным методом является **расчет площади правого желудочка и фракции изменения площади (ФИП<sub>ПЖ</sub>)**. Расчеты конечно-диастолической ( $KДП_{ПЖ}$ ) и конечно-систолической ( $KСП_{ПЖ}$ ) площади проводятся в четырехкамерной апикальной позиции.

$$ФИП_{ПЖ} = (KДП_{ПЖ} - KСП_{ПЖ}) / KДП_{ПЖ} \cdot 100\%$$

Максимальный референтный уровень значения  $KДП_{ПЖ}$  составляет 25 см<sup>2</sup>,  $KСП_{ПЖ}$  – 14 см<sup>2</sup>.

Минимальным референтным уровнем  $ФИП_{ПЖ}$  является 35%.

$ФИП_{ПЖ}$  коррелирует с  $ФВ_{ПЖ}$ , измеренной при проведении магниторезонансной томографии.

Таблица 5

Размеры правого желудочка в четырехкамерной апикальной позиции в норме и при различных степенях их нарушений

	Референтные значения	Незначительное нарушение	Умеренное нарушение	Значительное нарушение
Диастолическая площадь, см <sup>2</sup>	11 - 28	29 - 32	33 - 37	≥ 38
Систолическая площадь, см <sup>2</sup>	7,5 - 16	17 - 19	20 - 22	≥ 23
Фракция изменения площади, %	32 - 60	25 - 31	18 - 24	≤ 17

Расчет **фракции укорочения выходного тракта правого желудочка** ( $ФУ_{RVOT RV}$ ) проводится в парастернальной позиции в срезе по короткой оси на уровне створок аортального клапана.

$$ФУ_{RVOT RV} = (KДР_{RVOT RV} - KСР_{RVOT RV}) / KДР_{RVOT RV} \cdot 100\%,$$

где  $KДР_{RVOT RV}$  – конечно-диастолический проксимальный размер выходного тракта правого желудочка;  $KСР_{RVOT RV}$  – конечно-систолический проксимальный размер выходного тракта правого желудочка.

Максимальный референтный уровень значения  $KДР_{RVOT RV}$  составляет 35 (31-39) мм.

Среднее значение  $\Phi U_{RVOT RV}$  составляет  $61 \pm 30\%$ .  $\Phi U_{RVOT RV}$  коррелирует с продольной сократимостью правого желудочка, давлением в правом предсердии и легочной артерии.

Расчет производится в парастернальной позиции короткой оси на уровне створок аортального клапана в М-режиме со срезом на уровне проксимального отдела выходного тракта правого желудочка. Ограничением данной методики являются дефект выведения стандартной позиции с формированием «косых» срезов выходного тракта правого желудочка, низкое качество визуализации эндокарда.

### **Допплерографические методики**

Расчет ударного объема в легочной артерии или через трикуспидальный клапан может быть выполнен методикой доплерографии. При трансторакальной эхокардиографии в расчет ударного объема основную погрешность вносит некорректное измерение диаметра легочной артерии в случае неадекватной визуализации легочной артерии в парастернальной позиции короткой оси левого желудочка. В норме ударный объем через все четыре клапана сердца одинаковый. Однако в присутствии трансклапанных регургитаций, интракардиального шунта расчет ударного объема правого и левого желудочков позволяет количественно определить степень регургитации или легочно-системного шунта.

### **Скорость нарастания давления в правом желудочке в начале периода изгнания ( $dP/dt$ )**

Данный параметр отражает увеличение давления в правом желудочке во время систолы правого желудочка. Прирост давления определяется сократительной функцией правого желудочка: чем быстрее нарастает давление, тем лучше сократительная функция правого желудочка.

Склон потока трикуспидальной регургитации характеризует скорость изменения давления в течение времени ( $dP/dt$ ), проводятся измерения временного интервала нарастания скорости регургитацией с 1 м/сек до 2 м/сек. Скорость трикуспидальной регургитации переводится в градиент давления уравнением Бернулли ( $4v^2$ ), рассчитывается время, за которое градиент давления между правым желудочком и предсердием увеличивается с 4 до 16 мм рт.ст. (*time interval*):

$$dP/dt = [4(2)^2] - [4(1)^2]/time\ interval = 12\ mmHg/time\ interval$$

Значения  $dP/dt$  трикуспидальной регургитации менее 400 мм рт.ст./сек свидетельствуют о систолической дисфункции правого желудочка.

Ограничением данной методики являются объемная перегрузка правого желудочка и выраженная трикуспидальная регургитация.

### **Индекс производительности миокарда (индекс $Tei$ )**

Отношение общего времени изоволюметрических периодов сокращения и релаксации к времени выброса предлагается для оценки систолической и диастолической функции правого желудочка. Методика расчета индекса  $Tei$  приводилась выше.

Максимальный референтный уровень индекса  $Tei$ , измеренного в режиме импульсноволновой доплерографии, составляет 0,4, в режиме импульсноволновой тканевой доплерографии – 0,55.

Индекс  $Tei$  имеет большое прогностическое значение при легочной гипертензии, врожденных пороках сердца, инфарктах правого желудочка, кардиомиопатиях и позволяет оценить функцию правого желудочка, несмотря на его сложную геометрию.

Ограничением данной методики является фибрилляция предсердий, перегрузка правого желудочка, высокое давление в легочной артерии.

Данная методика может быть использована для стандартной оценки функции правого желудочка, за исключением пациентов с фибрилляцией предсердий, в добавление к другим методикам оценки.

### **Методики тканевой доплерографии в оценке систолической функции правого желудочка**

**Скорость систолического движения миокарда правого желудочка ( $Sm_{RV}$ ) и кольца трикуспидального клапана ( $S'_{RV}$ )** определяется в режимах импульсноволновой тканевой доплерографии или цветовой тканевой доплерографии в четырехкамерной апикальной позиции. Контрольный объем помещают в центре базального сегмента свободной стенки правого желудочка или на латеральной части кольца трикуспидального клапана.

Показатель  $Sm_{RV}$  имеет большое прогностическое значение при дисфункции правого желудочка.

Минимальный референтный уровень показателя  $S'_{RV}$  и  $Sm_{RV}$  в режиме импульсноволновой тканевой доплерографии составляет 10 мм/сек.

Значения  $Sm_{RV}$  и  $S'_{RV} < 10$  см/сек, измеренные в режиме импульсноволновой тканевой доплерографии, указывают на большую вероятность систолической дисфункции правого желудочка.

Среднее значение  $S'_{RV}$  на уровне кольца трикуспидального клапана в режиме цветовой тканевой доплерографии составляет 8-10 мм/сек,  $Sm_{RV}$  на уровне базальных сегментов свободной стенки правого желудочка 9-11 мм/сек. Минимальный референтный уровень показателя  $S'_{RV}$  и  $Sm_{RV}$  в режиме цветовой тканевой доплерографии равен 6 мм/сек.

Ограничением данной методики является зависимость от угла сканирования, возрастная вариабельность, зависимость данных показателей от кинетики близлежащих сегментов и общего движения сердца. Данные показатель отражают только продольную сократимость правого желудочка.

Клинически одним из наиболее важных количественных параметров, характеризующих систолическую функцию правого желудочка, является **оценка кровотока и давления в легочной артерии**. Легочная гипертензия часто является ответом на хроническое заболевание левых отделов сердца, таких как стеноз митрального клапана, митральная регургитация, кардиомиопатия, ишемическая болезнь сердца.

### **Рекомендуемая литература:**

1. Otto, С.М. Textbook of clinical echocardiography / С.М. Otto. – Philadelphia: W.B. Saunders Elsevier. - 4th ed., 2010. - 519 с.
2. Шиллер Н., Осипов М.А. Клиническая эхокардиография, второе издание. – М., Практика, 2005. – 344 с.
3. Recommendations for Chamber Quantification: A Report from the American Society of Echocardiography's Guidelines and Standards Committee and the Chamber Quantification Writing Group, Developed in Conjunction with the European Association of Echocardiography, a Branch of the European Society of Cardiology / Lang [et al.] // J. Am. Soc. Echocardiography. – 2005. – Vol. 18, № 12. – P. 1440-1463.
4. Recommendations for chamber quantification. Guidelines of the European Society of Cardiology // R.M. Lang, M. Bierig, R.B. Devereux et al. /Eur J Echocardiography. – 2006. - Vol. 7. – P. 79-108.
5. Guidelines for the Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults: A Report from the American Society of Echocardiography, endorsed by European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography / L.G. Rudski [et al.] // J.Am. Soc. Echocardiogr. – 2010. – Vol. 23, №7. – P. 685-713.
6. Рыбакова, М.К. Практическое руководство по ультразвуковой диагностике. Эхокардиография / М.К. Рыбакова. – М., 2008. – 512 с.
7. Рыбакова, М.К. Эхокардиография в таблицах и схемах. Настольный справочник/ Рыбакова М.К., Митьков В.В. – М.: Видар-М, 2010. – 288 с.
8. Жерко О.М., Кушнеров А.И., Гуминский А.М. и др. Методика проведения комплексной эхокардиографии у взрослых пациентов / М-во здравоохранения Республики Беларусь. БелМАПО. К-ра ультразвуковой диагностики. – Мн., 2013. - 66 с.

9. Жерко О.М., Кушнеров А.И., Гуминский А.М. и др. Метод проведения комплексной эхокардиографии у взрослых пациентов / Инструкция по применению от 24.12.2012, регистрационный № 217-12-12. М-во здравоохранения Республики Беларусь. – Мн., 2012. – 36 с.

Учебное издание

**Жерко** Ольга Михайловна

ЭХОКАРДИОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТОЛИЧЕСКОЙ И  
ДИАСТОЛИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЛЕВОГО  
И ПРАВОГО ЖЕЛУДОЧКОВ

Учебно-методическое пособие

Ответственная за выпуск О.М. Жерко

Подписано в печать 23. 12. 2014. Формат 60x84/16. Бумага «Discovery».

Печать ризография. Гарнитура «Times New Roman».

Печ. л. 3,25. Уч.- изд. л. 2,43. Тираж 100 экз. Заказ 30.

Издатель и полиграфическое исполнение –

Белорусская медицинская академия последипломного образования.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/136 от 08.01.2014.

220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 3.