

НОВОЕ В ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЕ СЕРДЕЧНОГО ЦИКЛА

Фатенков В.Н., Щукин Ю.В., Фатенков О.В.

Самарский государственный медицинский университет

Существующая фазовая структура сердечного цикла была разработана С. Wiggers в 1921г [13,14]. Дальнейшее развитие она получила в трудах К. Blumberger [11], В.Л.Карпмана[3,4] и др.

В.Л.Карпман [5] подразделяет сердечный цикл на 12 фаз, объединенных в 4 периода. Периоды напряжения и изгнания составляют систолу желудочков, а периоды расслабления и наполнения - диастолу.

Систола желудочков начинается электромеханическим латентным интервалом или электрокинематической латентностью (20 мс), в которую распространяется возбуждение по миокарду без видимых механических проявлений деятельности сердца. Следующая фаза - асинхронное сокращение (35 мс) - характеризуется последовательным вовлечением в сократительный процесс миокарда желудочков без существенного повышения внутрижелудочкового давления (ВЖД) [2]. В конце этой фазы атриовентрикулярные клапаны закрываются. Очевидно противоречие: нет повышения ВЖД, между тем как клапаны закрываются только в результате его повышения. Затем начинается фаза изоволюмического сокращения (32 мс), в которую происходит быстрое повышение давления в желудочках до уровня давления в магистральных сосудах. Наконец, следует протосфигмический интервал (5 мс), завершающий период напряжения.

Протосфигмический интервал - время, затрачиваемое на открытие полулунных клапанов. Условность этого интервала также очевидна, так как открытие створок клапанов происходит при обязательном поступлении крови в аорту или легочную артерию, о чем упоминает В.Л.Карпман, но это поступление уже есть начало изгнания.

Фазы максимального и редуцированного изгнания (12 и 14 мс, соответственно) составляют период изгнания. Разделение этих фаз возможно лишь по ВЖД. Ориентировочно конец фазы максимального изгнания соответствует времени, когда приток крови из сердца в сосуды становится равным оттоку из них.

Гемодинамическая эффективность фазы редуцированного изгнания, по мнению большинства авторов, невелика, хотя ее продолжительность больше фазы максимального изгнания. Существует мнение, что редуцированное изгнание может происходить и при отрицательном градиенте в системе желудочек – сосуд [12]. Поступательное движение крови в этот момент обеспечивается силой инерции, приобретенной ударным объемом в фазе максимального изгнания.

Диастола - часть сердечного цикла, в которой происходит расслабление миокарда и наполнение желудочков кро-

вью. Начальная фаза периода расслабления называется протодиастолическим интервалом (34 мс), который соответствует времени закрытия створок полулунных клапанов и в который отсутствует кровоток. Но закрытие клапанов происходит в течение 0,5 мс, и трудно представить, что при открытых клапанах даже при минимальном перепаде давлений в сосудах и сердце кровоток прекращается.

Следующая фаза изоволюмического расслабления (76 мс) характеризуется быстрым снижением ВЖД при постоянном объеме желудочков. Многие исследователи отмечают существенную деталь: средняя скорость снижения ВЖД примерно равна скорости повышения давления в начале систолы. С момента открытия атриовентрикулярных клапанов начинается фаза быстрого наполнения (91 мс). Затем следует фаза медленного наполнения (диастазис, 26 мс), гемодинамическая значимость которой невелика и которая при тахикардии полностью исчезает. Заканчивается период наполнения систолой предсердий (10 мс), в течение которой происходит дозаполнение желудочков кровью. У ряда больных, у которых удлиняется интервал Р-Q, обнаруживается интерсистолический интервал (7 мс), характеризующийся полным отсутствием любой активности миокарда (предсердий и желудочков), т.е. своеобразная “мертвая” пауза.

Таким образом, в существующей концепции фазовой структуры сердечного цикла ряд фаз выделен неоправданно, в описании других есть неточности и противоречия, особенно в трактовке диастолических фаз. Основной недостаток изложенных представлений заключается в принятии авторами постулата, что систола - только сокращение миокарда, а диастола - только расслабление.

Для разрешения этих противоречий и с целью уточнения сущности отдельных фаз сердечного цикла мы провели 98 экспериментов на животных, а также поликардиографическое исследование 128 здоровых лиц в возрасте от 17 до 42 лет и 157 больных ИБС со стабильной стенокардией II функционального класса в возрасте от 39 до 56 лет. Методики включали барографию предсердий, желудочков, аорты, тензометрию миокарда, анализ перемещения рентгеноконтрастных методик, вводимых в различные слои миокарда, регистрацию электромиограмм сердца, электрокардио-, механокардиотопо-, сфигмо-, фонокардио-, электрокимографию, изотопную радиоциркулографию, что позволило по-новому представить фазовую структуру сердечного цикла.

В отличие от В.Л.Карпмана мы говорим о систоле и диастоле сердца (а не желудочков!) и выделяем 4 периода и 8 фаз. К систоле сердца относятся периоды повышения ВЖД и изгнания (см. рис.).



Рис. Схема фазовой структуры сердечного цикла

Первый из них начинается систолой предсердий (9-12 мс). По нашим данным, суть ее - в асинфазном сокращении мышечных слоев стенок предсердий, которое приводит к образованию единой полости - предсердие-желудочек. Ведущее значение имеют глубокие петлеобразные мышцы, образующие кольцевые утолщения - жомы в устьях вен, которые изолируют последние от полостей сердца и препятствуют ретроградному току крови из предсердий в вены [8].

Систола предсердий восполняет в среднем 18 - 20 % величины ударного выброса, и главная ее роль заключается в изменении конфигурации желудочков: происходит смещение верхушки вниз с одновременным латеральным смещением боковых стенок. В большей степени происходит увеличение длинника желудочков. Изменения размеров желудочков закономерно сопровождаются изменениями длин мышечных волокон (слоев), образующих стенки желудочков. Смещение верхушки вниз приводит к удлинению субэпикардального (наружная косая мышца) и субэндокардиального (внутренняя прямая мышца) слоев, латеральное смещение - к удлинению циркулярного слоя (циркулярной мышцы).

Удлинение мышечных слоев является пассивным процессом и обеспечивается активным сокращением предсердий. Степень удлинения имеет в последующем решающее значение при реализации в процессе сокращения механиз-

ма Франка-Старлинга. Особенно отчетливо выявляется этот механизм регуляции сокращения в условиях гипертрофии миокарда, повышения конечно-диастолического давления любого генеза, гиперфункции сердца, связанной с резким уменьшением или полным исчезновением фазы медленного наполнения.

Наконец, систола предсердий имеет большое значение в повышении ВЖД: систола правого предсердия повышает давление в желудочке до 9 - 12 мм рт. ст., а систола левого - до 11 - 15 мм. рт. ст.. Таким образом, систола предсердия оказывает большое влияние на функциональное состояние желудочков и должна рассматриваться не как заключительная фаза периода наполнения желудочков, а как начальная фаза систолы сердца периода повышения ВЖД.

Следующей фазой периода повышения ВЖД является фаза внутрижелудочкового перемещения крови. Она обеспечивается начальным сокращением субэндокардиального слоя, папиллярных мышц и субэпикардального слоя в области верхушки, изменяющим форму желудочков из эллипсоидной в шаровидную в результате укорочения максимальной оси с одновременным увеличением внешней окружности. Объем желудочков не меняется, но кровь смещается в направлении путей оттока. При этом сохраняется вращательное движение крови, приобретенное в диастолу при ее прохождении между створками митрального и трех-

створчатого клапанов и перемещении в пути притока по межтрабекулярным бороздам [1,6], что приводит к сохранению ударным объемом кинетической энергии, приобретенной в диастолу. Перемещение вращающейся крови в область артериального конуса облегчит в последующем процесс прироста ВЖД и изгнания.

Физиологическое значение этой фазы заключается также и в том, что происходит дополнительное растяжение циркулярного слоя. Тем самым, по механизму Франка-Старлинга, определится последующая сила сокращения указанной мышечной группы.

Для этой фазы являются характерными сокращение папиллярных мышц, натяжение хорд и атриовентрикулярных створок, т.е. полость - предсердие-желудочек - сохраняется. Но сближение трабекул и сосочковых мышц, как результат сокращения субэндокардиального слоя, сопровождается сближением и створок атриовентрикулярных клапанов. Именно этим можно объяснить невозможность существенной регургитации крови из желудочков в предсердия в период повышения ВЖД. Заканчивается эта фаза к началу сокращения циркулярного слоя. Продолжительность фазы внутрижелудочкового перемещения крови в норме составляет 0,03 - 0,05 с и полностью зависит от функционального состояния субэндокардиального слоя.

Начало сокращения циркулярного слоя по времени совпадает с зубцом R на ЭКГ и свидетельствует о возникновении следующей фазы - изоволюмического повышения ВЖД. Взаимодействие мышечных слоев, образующих стенки желудочков в эту фазу, определяется постоянством объема желудочков, быстрым приростом ВЖД, изменением геометрии сердца до оптимальной для изгнания формы.

Определяющим фактором фазы изоволюмического повышения ВЖД является сокращение циркулярного и растяжение субэндо- и субэпикардиального слоев. В этой фазе внутренние полости начинают удлиняться, причем происходит выпрямление пути оттока. Объем желудочков остается постоянным, поэтому, одновременно с удлинением, происходит некоторое сужение полостей, которое обусловлено сближением трабекул по окружности поперечного сечения сердца. Существенного движения боковых стенок внутрь в этой фазе не происходит, так как кровь практически несжимаема.

Сокращение циркулярных слоев сопровождается их укорочением и утолщением, результатом чего является выраженное изменение кривизны наружной поверхности, что приводит к ее растяжению. Увеличение кривизны с удлинением наружной поверхности сердца хорошо документируется при электрокимографии, эхокардиографии и обычной рентгенографии.

Основной механический эффект сокращения циркулярных слоев заключается в быстром повышении ВЖД, что связано с активным давлением стенок желудочков на несжимаемый и неизменяемый объем крови. Второй эффект заключается в создании благоприятных условий для изгнания, так как путь оттока в результате сокращения циркулярных слоев выпрямляется. Продолжительность этой фазы целиком зависит от функционального состояния глу-

боких сино- и бульбоспиральных мышц и составляет в норме 0,04 - 0,06 с.

С момента закрытия атриовентрикулярных клапанов создаются условия для начала заполнения предсердий. К этому времени предсердия активно удлиняются, и происходит открытие устьев магистральных вен, впадающих в предсердия.

Фаза изгнания начинается с открытия полулунных клапанов аорты и легочной артерии. Учитывая весьма быстрый прирост ВЖД, можно констатировать практически мгновенное возникновение градиентов давления у устьев магистральных сосудов и соответственно мгновенное открытие клапанов. Первые порции крови поступают в сосуды в результате изолированного сокращения циркулярных слоев. Эту фазу целесообразно обозначать как первую фазу максимального изгнания. Но уменьшение объема полостей в нормальных условиях сразу же сопровождается сокращением субэндо- и субэпикардиального слоев. В патологии это взаимодействие может нарушаться, особенно в тех случаях, когда имеет место значительное повышение давления в аорте или легочной артерии.

Таким образом, через 0,02-0,04 с от начала изгнания все три слоя сердечных мышц сокращаются, что отражается на уменьшении как внешнего, так и внутреннего объемов. Ударный выброс получает основную часть кинетической энергии. Характерно, что в начале этой фазы при быстром изгнании крови продолжается прирост ВЖД и силы сокращения мышц стенки желудочков. Реактивное смещение желудочков в результате систолического выброса сопровождается дополнительным удлинением предсердий и ускорением наполнения их кровью.

Промежуток времени от начала сокращения циркулярных мышц в фазе изоволюмического повышения ВЖД до начала сокращения субэндо- и субэпикардиального слоев характеризует асинфазность их работы.

Одновременное сокращение всех мышц, образующих стенку желудочков, продолжается до вершины зубца T на ЭКГ. Время от начала сокращения всех трех мышечных слоев до зубца T является второй фазой максимального изгнания. Именно в этой фазе достигается выраженное уменьшение внутренней полости желудочков.

От зубца T на ЭКГ до закрытия полулунных клапанов аорты и легочной артерии идет фаза редуцированного изгнания. Кровоток из желудочков уменьшается, ВЖД продолжает снижаться. Поступательное движение крови в сосуды обеспечивается градиентом давления между желудочками и сосудами и величиной потенциальной энергии, полученной ударным объемом за все предшествующие фазы.

В фазе редуцированного изгнания начинается растяжение циркулярных мышц, которые после реполяризации находятся в расслабленном состоянии. Тем не менее, толщина стенки желудочков может несколько увеличиться за счет сокращения и утолщения двух других слоев - субэндо- и субэпикардиального. Их сокращение приводит к умеренной ротации сердца по часовой стрелке, что может придавать току крови спиралевидный характер. Подобный ток крови физиологически оправдан, ибо значительно облег-

Таблица

Абсолютная и относительная продолжительность фаз у здоровых и больных ИБС

Сердечный цикл	Продолжительность фаз			
	у здоровых		у больных ИБС	
	абсолютная, мс	относительная, ед	абсолютная, мс	относительная, ед
Систола предсердий	120±1,2	165 ± 0,8	122 ± 1,4	165 ± 1,0
Фазы:				
внутрижелудочкового перемещения крови	47,6 ± 0,5	71,2 ± 0,7	52,6 ± 0,4*	64,6 ± 0,7*
изоволюмического повышения ВЖД	62,0 ± 1,5	80,0 ± 2,0	60,7 ± 1,3	78,6 ± 1,7
максимального изгнания:				
первая	23,0 ± 0,9	32,0 ± 1,4	29,5 ± 1,1*	42,4 ± 1,5*
вторая	193 ± 4,3	274 ± 6,0	211 ± 4,3*	279 ± 5,4
редуцированного изгнания	45,7 ± 2,4	61,2 ± 3,3	45,3 ± 2,4	63,2 ± 3,3
изоволюмического снижения ВЖД	123 ± 2,4	170 ± 3,4	130 ± 2,8*	175 ± 3,8
быстрого наполнения	102 ± 2,6	146 ± 3,4	104 ± 3,3	142 ± 4,2

Примечание: * - достоверное различие между больными и здоровыми.

чает движение ударного выброса по спирали при прохождении через устья сосудов.

Диастола сердца начинается фазой наполнения предсердий, что соответствует моменту закрытия атриовентрикулярных клапанов. С этого времени идет непрерывный ток крови в предсердия, что сопровождается значительным увеличением их объема. Одновременно наблюдается умеренное повышение внутрипредсердного давления - третья волна U. Заканчивается фаза наполнения предсердий в момент открытия атриовентрикулярных клапанов. К концу этой фазы выравнивается давление в венах и предсердиях.

Параллельно фазе наполнения предсердий от момента закрытия полулунных клапанов аорты и легочной артерии идет фаза изоволюмического снижения ВЖД. Этот активный процесс обеспечивается сокращением субэндо- и субэпикардального слоев. На кривой выявляется резкое и быстрое снижение ВЖД. Механизм этого снижения следующий: сокращающиеся субэндо- и субэпикардальный слои сдавливают расслабившиеся циркулярные мышцы. Таким образом, в этой фазе имеет место активное укорочение двух слоев и удлинение циркулярных, что происходит без изменения объема желудочков. Фаза изоволюмического снижения ВЖД сопровождается изменением формы желудочков, которая начинает приближаться к шаровидной. Известно, что при шаровидной конфигурации полость имеет меньшую поверхность, но больший объем по сравнению с эллипсоидной. В результате возникают

благоприятные условия для поступления основной части крови в последующую фазу быстрого наполнения.

За фазой изоволюмического снижения ВЖД начинается период наполнения желудочков, который подразделяется на фазы быстрого и медленного наполнения. Фаза быстрого наполнения начинается в момент открытия атриовентрикулярных клапанов, который определяется двумя факторами: градиентом давления между полостями предсердий и желудочков и сокращением папиллярных мышц, являющихся составной частью внутренней прямой мышцы. Поэтому открытие атриовентрикулярных клапанов возможно даже при отсутствии существенной разницы давлений в желудочках и предсердиях.

В фазе быстрого наполнения желудочков продолжается сокращение наружной косой и внутренней прямой мышц желудочков, что обеспечивает дальнейшее изменение формы и объема полостей желудочков, истончение стенки желудочков и развития их присасывающей силы. С момента открытия атриовентрикулярных клапанов идет быстрое наполнение желудочков.

Для фазы быстрого наполнения характерно, что открыты клапаны атриовентрикулярных отверстий и устья вен, впадающих в предсердия. Поэтому присасывающее действие желудочков распространяется на предсердия и вены. Идет непрерывный ток крови из вен в предсердия, из предсердий в желудочки. Заканчивается фаза быстрого наполнения через 0,05 - 0,07 с от момента открытия атриоvent-

рикулярных отверстий. Одновременно заканчивается сокращение субэндо- и субэпикардального слоев миокарда.

Сравнительный анализ продолжительности фаз сердечного цикла показал, что у больных ИБС со стенокардией II функционального класса достоверно увеличена, по сравнению со здоровыми, абсолютная продолжительность фазы внутрижелудочкового перемещения крови, первой и второй фаз максимального изгнания, фазы изоволюмического снижения ВЖД (табл.).

Но относительная продолжительность, рассчитанная к продолжительности сердечного цикла, имеет достоверную разницу только в фазе внутрижелудочкового перемещения крови и в первой фазе максимального изгнания. Вероятно, удлинение фаз как в систолу, так и в диастолу обусловлено нарушением сократительной способности мышечных слоев стенки желудочков в результате ишемии миокарда.

Резюмируя изложенное, отметим три принципиальных положения, послуживших основой для предложенной фазовой структуры сердечного цикла [7-10]: 1) явление асинфазности сокращения мышечных слоев, образующих стенки предсердий и желудочков. Циркулярные слои растягиваются в систолические фазы внутрижелудочкового перемещения крови и редуцированного изгнания: 1) субэндо- и субэпикардальный - в фазу изоволю-

мического повышения ВЖД и первую фазу максимального изгнания; 2) диастолические фазы изоволюмического снижения ВЖД и быстрого наполнения активны в результате сокращения субэндо- и субэпикардального слоев. Именно этим обусловлен присасывающий эффект желудочков в диастолу, что должно учитываться при изучении и оценке функции сердца; 3) необходимость цельного анализа сердечного цикла, включающего функцию предсердий и желудочков - единой в физиологическом и гидравлическом отношениях системы. Вместе с тем, деление на периоды и фазы в известной степени условно. Например, повышение ВЖД начинается в конце диастолы в фазе медленного наполнения и достигает максимальной величины в первой фазе максимального изгнания. Снижение ВЖД регистрируется в фазе редуцированного изгнания, что, по сути, и есть начало диастолы. В то же время, вызывает сомнение целесообразность выделения таких интервалов, как протосфигмический, протодиастолический и интерсистолический, в которые, по современным представлениям, нет движения стенок сердца и крови. Их просто не существует. Сердце - уникальный орган, находящийся в постоянном четко скоординированном и регулируемом движении, обеспечивающем оптимальную жизнь организма.

Литература

1. Бураковский В.И., Добровин Н.Б., Кузьмина Н.Б. и др. Характер потока крови в левом желудочке сердца // Экспер.хир. 1976; 3: 13 - 16.
2. Вольнский Ю.Д. Изменения внутрисердечной гемодинамики при заболеваниях сердца. - М., 1969.
3. Карпман В.Л. Фазовый анализ сердечной деятельности. - М., 1965.
4. Карпман В.Л. Фазовый анализ сердечной деятельности. / Справочник по функциональной диагностике. - М., 1970. - С.126-133.
5. Карпман В.Л. Фазовый анализ сердечной деятельности. / Руководство по кардиологии. - М., 1982; 2: 101 - 110.
6. Кузьмина Н.Б., Дрогайцев А.Л. Формирование потока крови в полости левого желудочка / Физиология кровообращения: Физиология сердца. - Л., 1980. - С. 212 - 215.
7. Фатенков В.Н. О механике диастолы сердца. // Физиол.-журн. СССР. 1983; 69(5): 666-671.
8. Фатенков В.Н. Биомеханика и физиологическая роль предсердий в сердечном цикле. // Физиол.журн. СССР. 1985; 71(4): 510 - 515.
9. Фатенков В.Н. Фазовая структура механического цикла сердца. Оценка производительности и анализ поцикловой работы сердца / Б.А. Константинов В.А., Сандриков, В.Ф. Яковлев. - Л., 1986. - С. 52 - 60.
10. Фатенков В.Н. Новое в биомеханике сердца. // Вестник Рос. Акад.мед.наук. 1999; 2: 44-50.
11. Blumberger K. Die Herddynamik in der klinische Diagnostik. Kreislaufmessungen. - Munchen, 1958.
12. Spencer M.P., Greiss F.G. Dynamic of ventricular ejection. // Circulat.Res. 1962; 10(3): P. 274 - 279.
13. Wiggers C. Studies on the consecutive phases of the cardiac cycle. // Amer.J.Physiol. 1921; 56(3): 415 - 438.
14. Wiggers C. Studies on the consecutive phases of the cardiac cycle. / Ibid. - P. 439 - 459.

Поступила 17/11-2000

* * *