

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТНАГРУЗКИ ЕДИНСТВЕННОГО ЖЕЛУДОЧКА СЕРДЦА

Зиньковский М.Ф., Бацак Б.В., Сейдаметов Р.Р.

*ГУ «Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии имени Н.М. Амосова НАМН»  
(Киев)*

В работе представлен новый метод количественной оценки постнагрузки единственного желудочка сердца при помощи компьютерной томографии с использованием специальных программ.

**Ключевые слова:** *единственный желудочек сердца, постнагрузка.*

Хирургическая модификация одножелудочкового кровообращения по Fontan предусматривает отведение венозной крови от правых отделов сердца непосредственно в легочную артерию. Поэтому важно, чтобы сопротивление потоку венозной крови на ее пути от полых вен до левого желудочка в диастолу было минимальным [1, 2, 3, 4]. Принятые международным сообществом кардиохирургов идеальные условия для операции Fontan не рассматривают анатомические и функциональные особенности единственного желудочка как фактор риска, их отличие от нормального сердца. Основные отличия сведены к внутренней конфигурации ЕЖС. Между тем известно, что единственный желудочек сердца существенно больше нормального и это является причиной увеличения его постнагрузки.

Постнагрузка, являющаяся ключевой детерминантой сердечного выброса, объединяет анатомические и функциональные показатели. Здесь целесообразно рассмотреть физиологические механизмы постнагрузки. Способность нагнетать кровь (систолическая функция сердца) определяется взаимосвязью преднагрузки (диастолическое растяжение желудочков), постнагрузки (сила, препятствующая выбросу крови из желудочков), сократимостью миокарда (свойство сердца развивать усилие), диастолической функцией (обеспечение свободного заполнения желудочка) и частотой сердечных сокращений.

В клинической практике постнагрузку часто ошибочно идентифицируют только как давление в аорте или стеноз аортального клапана. Однако физиологический и клинический смысл этого механизма гораздо более широкий.

Постнагрузка в интактной сердечно-сосудистой системе является суммой сил, которые препятствуют сердечному выбросу во время сокращения. С учетом трехмерной формы желудочков, постнагрузка выражается систолическим напряжением (wall stress), которое испытывает стенка желудочка. Если принять форму желудочка в виде цилиндра, напряжение стенки может быть описано уравнением Лапласа:

$$S = \frac{P \cdot R^2}{h}$$

где  $S$  – напряжение стенки в динах/см<sup>2</sup>,  $P$  – давление в полости желудочка в динах/см<sup>2</sup>,  $R$  – радиус кривизны в см<sup>2</sup>,  $h$  – толщина стенки в см.

В связи с неправильной формой полости желудочка уравнение не предусматривает количественное выражение постнагрузки сердца. Она отражает лишь пропорциональность его членов.

Поскольку геометрия обоих желудочков сложнее цилиндра, напряжение различных участков неравное. Однако напряжение стенки на единицу толщины можно считать универсальной в желудочке, несмотря на сложность его конфигурации.

Физический и физиологический смысл этого показателя состоит в следующем:

- 1) для данной толщины стенки напряжение возрастает при увеличении объема желудочка даже при неизменном давлении в его полости;
- 2) увеличение толщины стенки снижает нагрузку на каждый сократительный элемент благодаря распределению усилия среди большего числа мышечных волокон. Поэтому в гипертрофированном желудочке с нормальной или уменьшенной полостью (при стенозе устья аорты) постнагрузка меньше, чем в расширенном тонкостенном желудочке (при дилатационной кардиомиопатии).

Сердечный выброс – динамический процесс, и все три детерминанты wall stress постоянно изменяются во времени. Поэтому точным является мгновенный его показатель, который в клинических условиях получить трудно.

Другим подходом к характеристике постнагрузки является оценка артериального импеданса. Понятие импеданса применимо в пульсирующей системе, в которой происходят циклические изменения давления и потока. Внесердечными факторами, определяющими импеданс, являются физические свойства крови (плотность и вязкость), эластичность и диаметр сосудов, пульсирующий характер тока и отраженные волны давления и потока, генерируемые в дистальных частях сосудистой системы. Импеданс зависит от амплитуды, фазы угла и частоты синусоидальных колебаний.

В клинике приближенным эквивалентом постнагрузки является среднее артериальное давление или сосудистое сопротивление с учетом конечно-систолического и конечно-диастолического объемов (или линейных размеров) желудочка. Измерение сосудистого сопротивления согласно уравнению Пуазейля-Хагена дает неполную оценку изменений импеданса, так как сосудистое сопротивление выражает препятствие току в неппульсирующей стабильной системе. Поэтому импеданс и сопротивление не идентичны, хотя последнее доступно для измерения и хорошо иллюстрирует гемодинамическое состояние.

Изменение постнагрузки вызывает мгновенное изменение длины и скорости сокращения миофибриллы. Нервные, гуморальные и структурные изменения калибра артериального русла, а также пороки сердца существенно влияют на изменения постнагрузки, испытываемой желудочками.

Увеличение постнагрузки смещает кривую Франка-Старлинга вниз и вправо. Иными словами, увеличенная постнагрузка снижает скорость сокращения кардиомиоцитов и выброса крови. Поскольку время выброса ограничено (~200 мсек), в желудочке остается больше крови в конце систолы (увеличение конечно-систолического объема). Снижение же постнагрузки смещает кривую Франка-Старлинга вверх и влево. Постнагрузка сама по себе не влияет на преднагрузку, увеличение преднагрузки происходит вторично при изменении постнагрузки. Увеличенная постнагрузка не только снижает ударный объем, но и увеличивает конечно-диастолическое давление левого желудочка (то есть увеличивает преднагрузку). К повышенному конечно-систолическому объему прибавляется венозный возврат в желудочек, что приводит к дальнейшему увеличению конечно-диастолического объема. Активизируется механизм Франка-Старлинга, частично компенсирующий снижение ударного объема, обусловленного увеличением постнагрузки.

Механизм взаимного влияния преднагрузки и постнагрузки используется при лечении сердечной недостаточности, когда применяются вазодилататоры для увеличения ударного объема путем снижения постнагрузки и одновременного снижения преднагрузки

желудочка. При снижении артериального давления желудочек изгоняет кровь быстрее, способствуя увеличению ударного объема и снижению конечно-систолического объема.

Перенос формулы Лапласа на желудочек сердца не может быть использован в числовом выражении. Числовое выражение постнагрузки можно получить, заменив в уравнении радиус на площадь внутренней поверхности желудочка.

Такую возможность дает компьютерная томография с вентрикулографией. Полученные изображения в формате Dicom экспортируются в программу пакетного анализа и обработки изображений Mimics или 3-d Doctor. Выполняется сегментация полости единственного желудочка сердца в систолу и диастолу с последующей трехмерной реконструкцией и сохранением в формате \*.STL. После этого с помощью таких программ, как Rhino, 3d-max 9 (или их аналогов), проводятся визуальный и метрический анализ, определяется объем полученных полостей. Результатом проведенных действий были пространственные модели миокарда желудочков, трабекулярно-папиллярного аппарата и полости в систолу и диастолу.

В 2011–2013 годах нами была выполнена КТ сердца с контрастированием и кардиосинхронизацией у 5 пациентов с истинным ЕЖС, у 3 – с огромным дефектом межжелудочковой перегородки и гемодинамикой ЕЖС и у 4 – с атрезией трехстворчатого клапана. 11 пациентов за 15–23 года до настоящего исследования перенесли операцию создания тотального кавопальмонального анастомоза и 1 – двунаправленного кавопальмонального анастомоза. Средний возраст –  $15 \pm 2,2$  года. Для сравнения обследован молодой здоровый мужчина.

На основе полученных данных были вычислены: конечно-диастолический объем (КДО) ЕЖС, конечно-систолический объем (КСО), конечно-диастолический индекс (КДИ), фракция выброса (ФВ), ударный объем (УО), площадь внутренней поверхности желудочка в диастолу, толщина стенки миокарда ЕЖС, рассчитана постнагрузка.

Таблица 1

**Некоторые анатомические и функциональные показатели единственного желудочка сердца и левого желудочка при атрезии трехстворчатого клапана, отражающие постнагрузку**

Показатели	ЕЖС (5 пациентов)	Большой ДМЖП (3 пациента)	АТК (4 пациента)	Норма
КДО (мл)	181,8±26,1	222,3±21,9	127,3±12,2	105
КДИ (мл/м <sup>2</sup> )	<b>104,3±24,4</b>	<b>128,7±17,6</b>	<b>77,0±3,6</b>	<b>56</b>
Толщина стенки (мм)	7,76±0,8	8,5±1,7	7,8±0,6	6,8
ФВ (%)	41,9±12,9	29,3±7,5	57,7±3,2	64
Площадь в диас. (см <sup>2</sup> )	234±39,9	271,3±35,1	163,7±27,7	118
Индекс площ. (см <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> )	<b>127,1±30,7</b>	<b>157,3±26</b>	<b>98,8±10,8</b>	<b>64</b>
S (×10 <sup>5</sup> дин/см <sup>2</sup> )	<b>43,4±7,7</b>	<b>44,5±9,9</b>	<b>29,9±5,24</b>	<b>24,8</b>

*Примечания:* КДИ – конечно-диастолический индекс, мл/м<sup>2</sup>; h – толщина стенки миокарда, см; ФВ – фракция выброса, %; пл. диаст. – площадь внутренней поверхности системного желудочка в диастолу, см<sup>2</sup>; S – постнагрузка, дин/см<sup>2</sup>.

Как видно из приведенных в таблице данных, КДИ единственного желудочка был в среднем 104,3 мл/м<sup>2</sup>, что превышало норму в 1,9 раза. Фракция выброса при ЕЖС в среднем равнялась всего 41,9%. Этот показатель анатомически левого желудочка при атрезии трехстворчатого клапана соответствовал норме (57,7%).

Постнагрузка, рассчитанная исходя из показателей поверхности желудочка, толщины его стенки и среднего систолического артериального давления, при ЕЖС была в сред-

нем 43,4 дин/см<sup>2</sup>. Постнагрузка левого желудочка при АТК соответствовала норме (29,9 дин/см<sup>2</sup>) и была в 1,45 раза меньше, чем при ЕЖС, и в 1,49 раза меньше, чем при гемодинамически общем желудочке (огромном ДМЖП).

Таким образом, 42,9% работы единственного желудочка тратится не на сердечный выброс, а на преодоление сильно увеличенной постнагрузки. ЕЖС функционирует в неэкономном режиме.

У варианта ЕЖС – огромного ДМЖП – специфическая гемодинамика, существенно отличающаяся от ЕЖС как отдельной нозологической единицы: системный кровоток осуществляется двумя желудочками.

Клинический опыт показывает, что отдаленные результаты гемодинамической коррекции атрезии трехстворчатого клапана при анатомически нормальном левом желудочке и ЕЖС в варианте большого ДМЖП более благоприятные (об этом отдельная публикация).

### **Выводы**

1. Компьютерная томография с использованием специальных программ позволяет измерить площадь внутренней поверхности желудочка, толщину его стенки и дать количественную оценку постнагрузке.
2. Более 40% работы единственного желудочка сердца тратится на преодоление увеличенной постнагрузки.
3. Увеличенная постнагрузка единственного желудочка сердца свидетельствует о неэкономном режиме его работы и может быть одной из причин недостаточности одножелудочкового кровообращения в отдаленном послеоперационном периоде.

### **Литература**

1. Зиньковский М.Ф. Врожденные пороки сердца. Руководство. – К.: Книга-плюс, 2010. – 1200 с.
2. Khongphatthanayothin A., Rattanawilaisak K., Benjacholamas V. Clinical course and outcome of children with single ventricle physiology at King Chulalongkorn Memorial Hospital // J. Med. Assoc. Thai. – 2006. – Vol. 89 (9). – P. 1420–1426.
3. Riad B.M. Hosen, Andrew J.B. Clarke, Simon P. McGuirk et al. Factors influencing early and late outcome following the Fontan procedure in the current era. The ‘Two Commandments’? / European Journal of Cardio-thoracic Surgery. – 2007. – N 31. – P. 344–353.
4. Setty S.P., Herrington C.S. Fontan procedure: old lessons and new frontiers // Expert Rev. Cardiovasc. Ther. – 2006. – Vol. 4 (4). – P. 515–521.

## **МЕТОД КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ПІСЛЯНАВАНТАЖЕННЯ ЄДИНОГО ШЛУНОЧКА СЕРЦЯ**

**Зіньковський М.Ф., Бацак Б.В., Сейдаметов Р.Р.**

В роботі представлено новий метод кількісної оцінки постнавантаження єдиного шлуночка серця за допомогою комп'ютерної томографії з використанням спеціальних програм.

**Ключові слова:** *єдиний шлуночок серця, постнавантаження.*

## **METHOD OF QUANTITATIVE ESTIMATION OF A SINGLE VENTRICLE AFTERLOAD**

**Zinkovsky M.F., Batsak B.V., Seydametov R.R.**

Method of quantitative estimation of a single ventricle afterload with use a computer tomography and special programs is presented.

**Key words:** *single ventricle, afterload.*