

**М.Ф. Зиньковский<sup>1</sup>, Р.Р. Сейдаметов<sup>1</sup>, Б.В. Бацак<sup>1</sup>, А.М. Довгань<sup>2</sup>,  
М.Ю. Атаманюк<sup>1</sup>, J. Moll<sup>3</sup>, Е.М. Трембовецкая<sup>1</sup>, С.Е. Дыкуха<sup>1</sup>,  
К.Б. Бабаджанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ГУ «Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова НАМН Украины», Киев

<sup>2</sup> Киевская городская клиническая больница «Киевский городской центр сердца»

<sup>3</sup> Centrum zdrowia Matki Polski, Лодзь, Польша

## Оценка постнагрузки на единственный желудочек сердца с целью прогнозирования отдаленных результатов операции Fontan

Цель исследования – разработать метод количественной оценки постнагрузки функционально единственного желудочка сердца. С помощью компьютерной томографии с вентрикулографией сердца и специальных программ измеряли различные показатели у пациентов, перенесших операцию Fontan. На приведенном клиническом примере показано, что больше половины работы единственного желудочка сердца тратится на преодоление увеличенной постнагрузки.

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

**А**натомическая коррекция единственного желудочка сердца (ЕЖС) и функционально единственного желудочка сердца практически невозможна. Распространение получила коррекция гемодинамики по Fontan, которая предусматривает отведение венозной крови от правых отделов сердца непосредственно в легочную артерию. Этим достигается исключение смешивания артериальной и венозной крови, повышение артериальной сатурации до нормы и снижение объемной перегрузки системного желудочка. В цикле кровообращения по Fontan легочный кровоток является продолжением венозного, поэтому единственный желудочек должен затрачивать энергию на преодоление сопротивления не только системных сосудов, но и легочных. Следовательно, очень важно, чтобы сопротивление потоку венозной крови на ее пути от полых вен до левого желудочка в диастолу было минимальным [1, 3, 5].

Сформулированные А. Choussat и соавторами [6], принятые и дополненные Международным обществом кардиохирургов идеальные условия для операции Fontan предусматривают: отсутствие деформаций и сужений легочных артерий, отсутствие значимых аортолегочных коллатера-

лей, коэффициент Wood меньше 2 ед/м<sup>2</sup>, среднее давление в легочной артерии меньше 12 мм рт. ст., чрезлегочный градиент давления не более 5 мм рт. ст., фракция выброса функционально ЕЖС больше 50 %, конечнодиастолическое давление в ЕЖС менее 10 мм рт. ст., масса миокарда желудочка меньше 200 % нормы, отсутствие сопутствующей патологии [1, 7].

К сожалению, идеальные условия для создания полного кавапульмонального соединения имеют лишь не более 30 % больных с ЕЖС. Отклонения от этих условий являются факторами, определяющими риск операции, продолжительность жизни и ее качество. Однако даже при идеальных условиях для операции Fontan продолжительность жизни оперированных пациентов в лучших случаях ограничена 15–25 годами. Считается, что это обусловлено спецификой кровообращения по Fontan, далеко не соответствующего норме [4, 5].

В то же время, особенности строения самого ЕЖС и его функцию не рассматривали как фактор риска, несмотря на его анатомические и функциональные отличия от нормального левого желудочка. Основные отличия сводятся к неправильной конфигурации ЕЖС, увеличению

его объема (он в 2–3 раза больше нормального левого), наличию и выраженности доминирования основной камеры, характеру доминирующей камеры (левая, правая, неопределенная) [4, 7].

Систолическая функция сердца определяется взаимосвязью преднагрузки (диастолическое растяжение желудочков), постнагрузки (сумма сил, препятствующих выбросу крови из желудочков), сократимостью миокарда (свойство сердца развивать усилие), диастолической функцией (обеспечение свободного заполнения желудочка) и частотой сокращений сердца. В норме механическая работа, совершаемая левым желудочком за одно сокращение в покое, составляет 0,9–1,0 Дж, правого желудочка – 0,2 Дж, суммарная работа – 1,2 Дж [3]. То есть, при кровообращении по Fontan ЕЖС должен совершать работу, лишь на 20 % превышающую работу левого желудочка здорового человека. Теоретически с такой нагрузкой ЕЖС должен справляться на протяжении длительного периода. Но в действительности мы видим, что через несколько лет после коррекции по Fontan почти у всех пациентов развивается недостаточность системного желудочка, причиной которой является избыточная нагрузка на последний. Возникает вопрос: что является причиной высокой нагрузки на системный желудочек, для чего требуется его избыточная работа?

Очевидно, что значительно растет постнагрузка ЕЖС при нормальной или увеличенной преднагрузке, а коэффициент полезного действия в такой же степени снижен. Чтобы понимать, что происходит с ЕЖС и какую работу он выполняет в условиях кровообращения по Fontan, нужно определить числовое значение постнагрузки на этот желудочек.

**Цель исследования** – разработать метод количественного выражения постнагрузки функционально единственного желудочка сердца.

## Материалы и методы

Постнагрузка выражается систолическим напряжением (wall stress), которое испытывает стенка желудочка. Она может быть описана уравнением Лапласа:

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

где S – постнагрузка, P – систолическое давление в желудочке, R – радиус полости желудочка, h – толщина стенки желудочка.

Уравнение Лапласа описывает напряжение стенки трубы, имеющей правильную цилиндрическую форму. Перенос формулы Лапласа на желудочек сердца дает лишь принципиальное

представление о сути постнагрузки и не может быть использован в числовом выражении, так как левый желудочек и особенно общий желудочек имеют неправильную форму. Числовое выражение постнагрузки можно получить, заменив в уравнении радиус на площадь внутренней поверхности желудочка.

Для определения постнагрузки ЕЖС необходимы различные морфометрические показатели сердца: объем, площадь внутренней поверхности, толщина миокарда желудочка в систолу и диастолу.

Известный способ оценки морфометрических параметров сердца – трансторакальная или пищеводная эхокардиография. Недостатком этого метода является то, что из-за неправильной формы и сложного строения ЕЖС метод не дает полную картину анатомии последнего и достаточно часто вводит в заблуждение по поводу его размеров и объема в результате. А площадь поверхности такого желудочка с помощью эхокардиографии определить нельзя [2].

Компьютерная томография (КТ) с использованием специальных программ позволяет провести обработку изображений с последующей реконструкцией трехмерного объема.

Поставленная задача решается путем выполнения пациентам КТ с вентрикулографией сердца, а полученные изображения в формате Dicom экспортируются в программу пакетного анализа и обработки изображений Mimics или 3d Doctor. Выполняется сегментация полости ЕЖС 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 аналоги), проводят визуальный и метрический анализ, определяют объем полученных полостей. В результате получают пространственные модели миокарда желудочков, трабекулярно-папиллярного аппарата и полости в систолу и диастолу.

## Результаты и обсуждение

В 2011 г. была выполнена КТ сердца с контрастированием и кардиосинхронизацией у 4 пациентов с ЕЖС через 10–20 лет после операции Fontan и у 1 пациента в те же сроки, но после создания двунаправленного кавапальмонального анастомоза. Средний возраст – (15,0 ± 2,2) года. Для сравнения обследован молодой здоровый мужчина.

При помощи специализированных программ определяли:

1) конечнодиастолический и конечносистолический объемы ЕЖС;

Таблиця

**Анатомические и функциональные показатели единственного желудочка сердца и левого желудочка при атрезии трехстворчатого клапана по сравнению с нормой**

Показатель	Пациент 1 (ЕЖС)	Пациент 2 (ЕЖС)	Пациент 3 (ЕЖС)	Пациент 4 (АТК)	Норма
КДО, мл	236	194	197	131	81,0
КСО, мл	183	140	139	81	31,0
КДИ, мл/м <sup>2</sup>	152,3		123,1	157,8	41,2
Толщина стенки, мм	7,6	5,4	7,4	7,2	4,5
Фракция выброса, %	22	28	29,4	38	62
УО, мл	53	54	58	50	50
S в систолу, см <sup>2</sup>	253	208	193	159	61
S в диастолу, см <sup>2</sup>	295	226	231	193	103

АТК – атрезия трехстворчатого клапана.

2) площадь внутренней поверхности ЕЖС в систолу и диастолу;

3) объем трабекулярно-папиллярного аппарата ЕЖС.

На основе полученных данных были вычислены конечнодиастолический (КДО), конечно-систолический (КСО) и ударный (УО) объемы ЕЖС, конечнодиастолический индекс (КДИ), фракция выброса, площадь внутренней поверхности желудочка (S) в систолу и диастолу, средняя толщина стенки миокарда ЕЖС. Результаты представлены в *таблице*.

Фракция выброса функционально ЕЖС составляет всего 22–30 %, при атрезии трехстворчатого клапана фракция выброса левого желудочка также снижена, но в меньшей степени – 38 %. Объясняется это большими размерами желудочков – при ЕЖС он больше нормы в 2,86 раза, а при атрезии трехстворчатого клапана – в 1,9 раза. При практически одинаковом УО, обеспечивающем энергетические потребности организма, ЕЖС функционирует в неэкономном режиме.

На примере пациента 1 можно продемонстрировать, что внутренняя поверхность обще-

го желудочка больше необходимой на 112 см<sup>2</sup>. Таким образом, 47,5 % работы желудочка тратится не на сердечный выброс, а на преодоление значительно увеличенной постнагрузки. У пациента 2 ЕЖС работает более экономно, так как площадь внутренней поверхности желудочка меньше. Клинически это проявлялось лучшей физической работоспособностью, чем у пациента 1.

## Выводы

Компьютерная томография с использованием специальных программ позволяет измерить площадь внутренней поверхности желудочка, толщину его стенки и дать количественную оценку постнагрузке. Больше половины работы единственного желудочка сердца тратится на преодоление увеличенной постнагрузки. Увеличение постнагрузки единственного желудочка сердца свидетельствует о неэкономном режиме его работы и является одной из причин его декомпенсации и сокращения продолжительности жизни.

## Литература

1. Зінковський М.Ф. Врожденные пороки сердца. Руководство.– К.: Книга-плюс, 2010.– 1200 с.
2. Фейгенбаум Х. Эхокардиография / Пер. с англ. В.В. Миткова.– М.: Видар, 1999.– 511 с.
3. Jonas R. Comprehensive surgical management of congenital heart disease // Arnold, 2004.– P. 460.
4. 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.
5. Hosein R.B.M., Clarke A.J.B., McGuirk S.P. et al. Factors influencing early and late outcome following the Fontan procedure in the current era. The 'Two Commandments'? // Eur. J. Cardiothoracic Surg.– 2007.– N 31.– P. 344–353.
6. Choussat F., Fontan F., Besse P. et al. Selection criteria for Fontan's procedure // Pediatric. Cardiology / Eds. R.H. Anderson, E.A. Shinebourne.– Edinburg: Churchill Livingstone, 1978.– P. 559–566.
7. Setty S.P., Herrington C.S. Fontan procedure: old lessons and new frontiers // Expert Rev. Cardiovasc. Ther.– 2006.– Vol. 4 (4).– P. 515–521.

**M.F. Zinkovskii, R.R. Seidametov, B.V. Batsak, A.M. Dovgan, M.Yu. Atamaniuk, J. Moll,  
Ye.M. Trembovetskaya, S.Ye. Dykukha, K.B. Babadzhanov**

### The estimation of the afterload of a single ventricle for the prediction of the long-term results of the Fontan procedure

The aim of the research was to elaborate the method of quantitative estimation of a single ventricle afterload. Using computer tomography with ventriculography and special programmes we estimated different parameters in patients after Fontan operation. The clinical case shows that more than half of work of single ventricle is spent to overcome increased afterload.

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