

DOI: 10.15825/1995-1191-2018-3-40-44

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЕТСКОГО ОСЕВОГО НАСОСА ДОН-3 В ГРУДНОЙ ПОЛОСТИ РЕБЕНКА (ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ)

В.А. Козлов^{1, 2}, О.Ю. Дмитриева¹, Г.П. Иткин^{1, 2}, А.С. Иванов¹, А.П. Кулешов¹,
Е.А. Волкова¹, Т.Н. Говорова¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

² Московский физико-технический институт (государственный университет), кафедра физики живых систем, Москва, Российская Федерация

Нами была разработана компьютерная программа построения 3D-моделей грудной клетки детей с целью оптимизации размещения в ней осевого насоса ДОН-3. Благодаря полученным результатам математическую модель успешно использовали в разработке классификации вариантов размещений имплантируемых систем вспомогательного кровообращения, а также для построения 3D-моделей для других целей. В частности, была получена градация пациентов по вариантам размещения детского осевого насоса ДОН-3 внутри грудной полости пациента. На основании данных была проведена первая примерка насоса ДОН-3 у пациента возрастом 7 лет.

Ключевые слова: детский осевой насос, математическое моделирование, компьютерная томография, размещение осевого насоса.

THE OPTIMIZATION OF AN ACCOMODATION IN THE THORACIC CAVITY CHILD THE AXIAL PUMP DON-3 (THE MATHEMATICAL MODEL RESEARCH)

V.A. Kozlov^{1, 2}, O.Yu. Dmitrieva¹, G.P. Itkin^{1, 2}, A.S. Ivanov¹, E.A. Volkova¹, T.N. Govorova¹

¹ V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Department of physics of living systems, Moscow, Russian Federation

We have developed and tested a technique for constructing 3D models of the chest and thoracic cavity organs. Due to the obtained results, the mathematical model was successfully used in the development of classification of variants of placement of implantable auxiliary circulation systems, and also for building 3D models for other purposes. In particular, the patients were graded according to the variants of placing the children's axial pump DON-3 inside the patient's chest cavity. Based on the data, the first fitting of the DON-3 pump was performed on a patient aged 7 years.

Key words: children's axial pump, mathematical modeling, CT scan, location of the axial pump.

ВВЕДЕНИЕ

В России болезни системы кровообращения ежегодно уносят жизни более миллиона людей, лидируя на протяжении последних двух десятилетий среди причин смерти.

При этом несмотря на то что в последние десятилетия современная клиническая детская кардиология поднялась на качественно высокий уровень, терминальная сердечная недостаточность (ТСН) с летальным исходом достаточно часто наблюдается

Для корреспонденции: Иткин Георгий Пинкусович. Адрес: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 1.
Тел. (499) 190-60-34. E-mail: georgeitkin@mail.ru

For correspondence: Itkin George Pinkusovich. Address: 1, Shchukinskaya st., Moscow, 123182, Russian Federation.
Tel. (499) 190-60-34. E-mail: georgeitkin@mail.ru

у детей младшего возраста с врожденными и приобретенными пороками сердца [1, 2].

В последние десятилетия для лечения взрослых больных в клинической практике стали успешно применяться методы механической поддержки кровообращения (МПК) с применением имплантируемых насосов [3–5].

Сложность создания подобных систем для маленьких пациентов объясняется прежде всего ограничениями, связанными с размещением этих насосов в грудной или абдоминальной области.

При отсутствии в клинической практике имплантируемых систем для лечения детей с ТСН в клинической практике применяют две системы МПК: экстракорпоральная мембранная оксигенации (ЭКМО) для кратковременной поддержки системы кровообращения и паракорпоральная система искусственных желудочков сердца с пневмоприводом длительного применения Excor (BerlinHeart, США) [6–9]. Недавно проведенный ретроспективный анализ применения систем МПК у детей показал значительное снижение смертности пациентов (в 2 раза), находящихся в листе ожидания ТС [10–14]. Тем не менее создание имплантируемых насосов МПК для детей младшего возраста остается достаточно актуальной задачей [15].

На базе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов им. ак. В.И. Шумакова» Минздрава РФ была создана система МПК на основе имплантируемого детского осевого насоса ДОН-3, которая успешно прошла стендовые испытания, и на сегодняшний день завершена первая серия хронических испытаний на животных, которая также показала положительные результаты.

Учитывая проблемы, связанные с малыми размерами грудной клетки у детей младшего возраста, перед нами была поставлена задача оптимизации размещения в ней насоса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На базе кардиохирургического отделения № 4 ФГБУ «НМИЦ ТИО им. ак. В.И. Шумакова» Минздрава России были проведены сердечно-сосудистые исследования 10 педиатрических пациентов с различными патологиями сердца в возрасте от 3 до 10 лет. Для этого были получены КТ-изображения на 64-срезовом томографе Siemens Somatom Sensation (Siemens Medical Solution, Germany) со скоростью вращения 0,37 с на полный 360° оборот гентри. Изотропное разрешение составляло 0,4 мм, а толщина срезов находилась в диапазоне от 0,4 до 0,8 мм. В исследование также включали данные о возрасте, массе, росте и площади поверхности тела (ППТ) пациента.

Чтобы получить экранную трехмерную визуализацию КТ-изображений, файлы цифровых изображений были загружены на персональный компьютер.

В данном исследовании для визуализации файлов 3D-изображений с томографа и построения моделей использовалась система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks 2017. Первым шагом в проектировании стало улучшение качества изображений томографических срезов. Выбранные изображения оптимизировались по контрасту для улучшения визуализации органов грудной полости и самой грудной клетки. Пример полученного КТ-изображения представлен на рис. 1, а.

Далее изображение загружалось в SolidWorks, где проводилось 2-мерное построение сечения очередного органа, например, правого легкого (рис. 1, б).

На следующем этапе проводилась послойная 3-мерная генерация необходимой анатомической структуры, по полученному диапазону 2-мерных сечений, относящихся к конкретному органу (рис. 1, в). Процедура несет в себе смысл заполнения пространства между сечениями по направляющей линии и проводилась в строгом порядке следования сечений. Пример получения 3D-модели ребра показан на рис. 1, г.

Данный метод был применен для построения правого и левого легких, сердца, верхней и нижней полых вен, восходящей и нисходящей аорт, диафрагмы, ребер, грудины, позвоночника, ключиц. Все размеры также соответствуют реальным размерам благодаря возможности измерения истинных размеров между точками на томографе и последующему масштабированию изображений при импортировании их в программное обеспечение перед заданием контура.

Сборка полученных моделей органов и костей осуществлялась соответственно их взаимному расположению в грудной клетке ребенка по КТ-изображению.

Данный подход позволяет производить параметрические манипуляции, связанные с изменением размеров органа, чего невозможно добиться при прямой конвертации файлов программного обеспечения томографа. К тому же программное обеспечение SolidWorks позволило подготовить полученные 3D-модели к прототипированию. Эта же программа использовалась и для отображения и перемещения модели детского осевого насоса ДОН-3 относительно полученного каркаса грудной клетки.

После проведения моделирования грудной клетки ребенка был проведен анализ анатомических и физиологических ограничений размещения ДОН-3 у детей в возрасте от 3 до 10 лет.

Главное отличие ребенка от взрослого человека – процесс постоянного роста, что связано с увеличением объемов органов, и соответственно, их смещением. Поэтому одно из важных условий имплантации

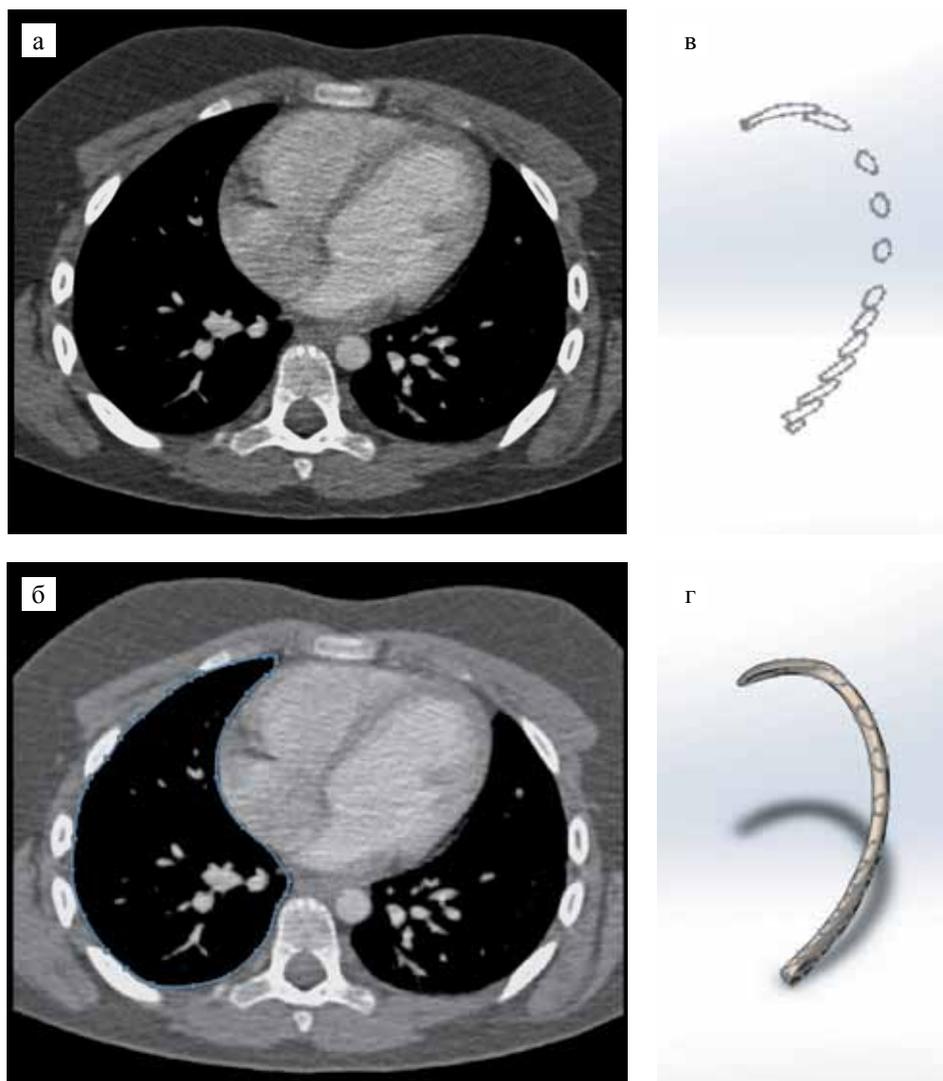


Рис. 1. Процесс создания 3D-моделей органов: а – томографический срез; б – создание контура органов; в – построение сечения ребра; г – трехмерная модель ребра

Fig. 1. The process of creating a 3D models: а – the tomographic section; б – create a circuit of organs; в – cross-section edge; г – 3D model of the edge

насоса детям – создание «пространства для маневра». Необходимо учитывать, что плотное прижатие насоса к неподвижному органу или мышцам вызовет нарушение кровоснабжения, воспаление и некроз места прижатия и впоследствии всей окружающей ткани.

Условием правильной постановки насоса является также возможность крепления насоса к костному скелету грудной клетки. Есть ряд причин, объясняющих необходимость данного ограничения. Во-первых, крепление насоса позволит точно определить его синтопию, и таким образом, учесть будущий рост ребенка, а также обезопасить от сдавливания внутренних органов. Во-вторых, это позволит перенести основной вес системы МПК на костный скелет, и соответственно, избежать давления на нижележащие образования.

Соответственно, насос должен располагаться перед диафрагмой за передней грудной стенкой.

Последним условием является удобное расположение насоса относительно сердца и аорты. Имеется в виду такое размещение, при котором было бы возможно максимально сократить расстояние между входной и выходной магистралями насоса и местами закрепления сосуда к сердцу и аорте.

Данные условия исключают возможность установки насоса стандартным способом, то есть размещение его над грудинной частью диафрагмы, как это происходит при установке систем МПК взрослым пациентам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Создана 3D-модель грудной клетки ребенка, которая включает в себя 2 легких, сердце с сосудами, ребра, грудину, позвоночник и ключицы.

Были рассмотрены варианты размещения детского осевого насоса ДОН-3 в области легких, в левой и правой стороне грудной полости.

Из-за специфики строения детского сердца, которая заключается в расположении левого желудочка не слева, как у взрослых, а позади правого, было решено считать приоритетным размещение в левой половине грудной полости из-за сложности соединения входной магистрали насоса с верхушкой левого желудочка сердца.

В соответствии с анатомическими и физиологическими ограничениями были определены условия имплантации ДОН:

- 1) расположение в передней части области левого легкого;
- 2) прижатие к внутренней стороне левых ребер для обеспечения возможности закрепления насоса;
- 3) отсутствие плотного соприкосновения поверхности насоса с сердцем во избежание осложнений, связанных с возможностью воспаления и некроза мышечной стенки камер сердца;

- 4) минимизация длины входной и выходной магистралей насоса.

С учетом расположения насоса и консультации с детским кардиохирургом было решено соединять выход насоса с нисходящей аортой по причине удобного доступа к ней из области размещения.

По предварительным расчетам группы пациентов из 10 детей выделили три основных варианта размещения детского осевого насоса ДОН в зависимости от возраста пациента:

- 1) вертикальное (возраст пациента 1–2 года);
- 2) косое (возраст пациента 3–4 года);
- 3) горизонтальное (возраст пациента 5 и более лет).

В качестве примера на рис. 2 показаны варианты размещения насоса у ребенка в возрасте 3 лет.

После проведенного математического моделирования была проведена первая примерка макета детского осевого насоса ДОН-3 у пациента возрастом 7 лет. При этом было найдено оптимальное размещение насоса ДОН-3, как было рассчитано на компьютерной модели (рис. 3).

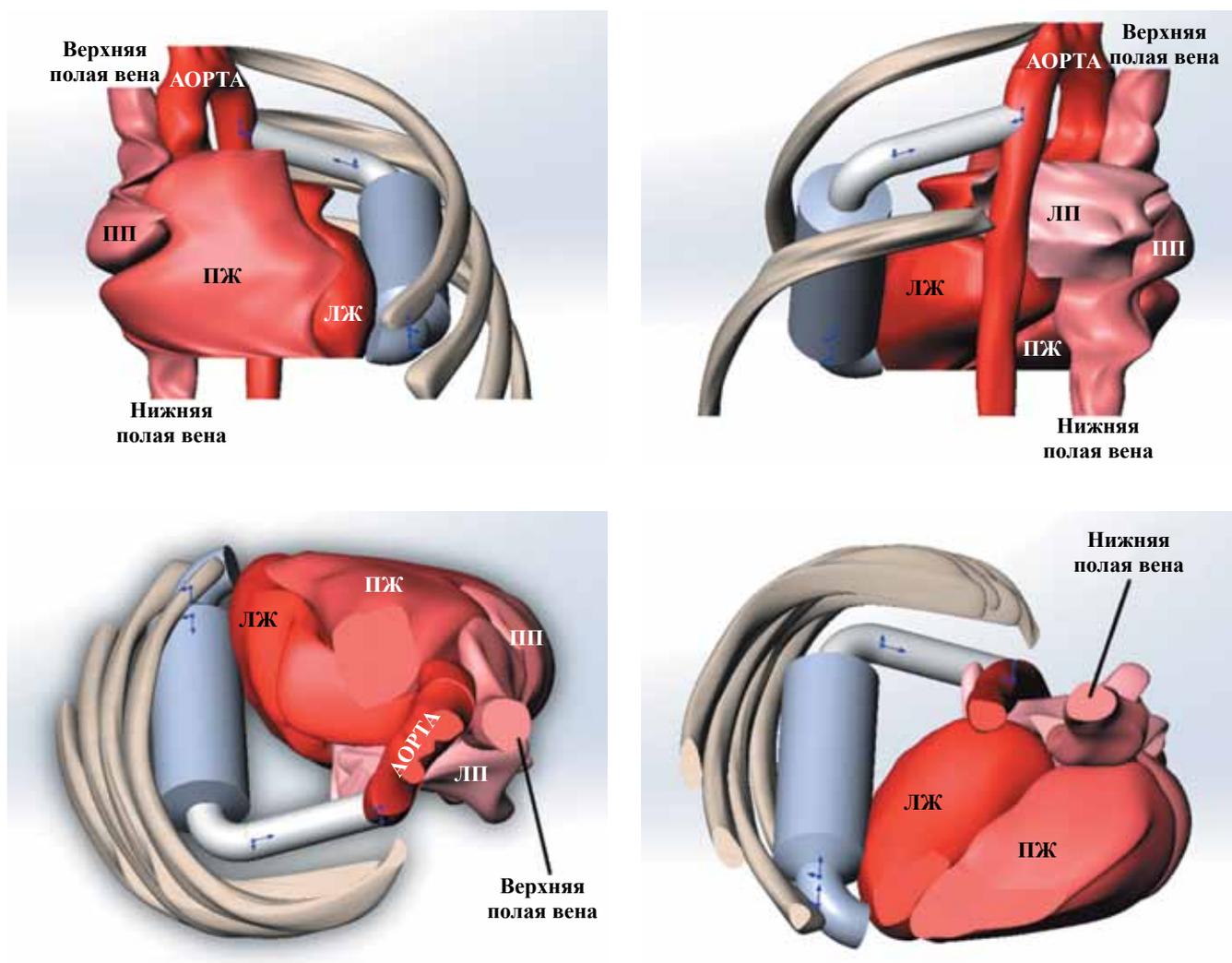


Рис. 2. Варианты размещения насоса в грудной полости ребенка возрастом 3 года

Fig. 2. Variants of placing the pump in the chest cavity of a child of 3 years old

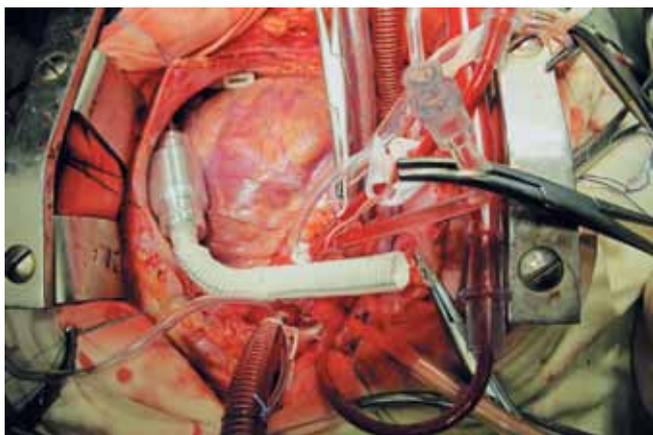


Рис. 3. Размещение детского осевого насоса ДОН-3 в грудной полости ребенка возрастом 7 лет

Fig. 3. Placement of a children's axial pump DON-3 in the chest cavity of a child of 7 years of age

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная модель грудной клетки пациента возрастной группы до 10 лет дала возможность оценить параметры органов в грудной клетке до и после имплантации детского осевого насоса ДОН-3. К данным параметрам можно отнести пространственное расположение, объемы прилегающих органов и объемы свободного жизненного пространства для оптимального размещения насоса, а также геометрию грудной полости конкретного пациента. Перспективным подходом является прогнозирование правильного места установки насоса с учетом последующего роста организма ребенка.

Для создания более подробной классификации размещений необходимо, используя предложенную методику, построить большее количество моделей и вариантов размещения ДОН-3, чтобы еще более точно определить градацию пациентов.

Также дополнительно будет рассчитана программная оценка взаимодействия органов с позиции трения и их деформации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16-15-00283ю17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Haines NM, Rycus PT, Zwischenberger JB et al. Extracorporeal Life Support Registry Report 2008: neonatal and pediatric cardiac cases. *ASAIO Journal*. 2009; 55: 111–116. DOI: 10.1097/MAT.0b013e318190b6f7.
- Кардиология: национальное руководство [Электронный ресурс] / Ю.Н. Беленкова, Р.Г. Оганова // ГЭОТАР-Медиа, 2011. Серия «Национальные руководства». Режим доступа: <http://nmo.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970427675.html>. Cardiology: national leadership [Electronic resource] / Yu.N. Belenkova, R.G. Oganova // GEOTAR-Media, 2011. Series «National guidelines». Access mode: <http://nmo.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970427675.html>.
- Brancaccio G, Filippelli S, Michielon G et al. Ventricular assist devices as a bridge to heart transplantation or as destination therapy in pediatric patients. *Transplant. Proc.* 2012; 44: 2007–2012. DOI: 10.1016/j.transproceed.2012.06.034.
- Chen JM, Richmond ME, Charette K et al. A decade of pediatric mechanical circulatory support before and after cardiac transplantation. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2012; 143: 344–351. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2011.10.072.
- Karimova A, Van Doorn C, Brown K et al. Mechanical bridging to orthotopic heart transplantation in children weighing less than 10 kg: feasibility and limitations. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2011; 39: 304–309. DOI: 10.1016/j.ejcts.2010.05.015.
- Roland H, Vladimir A-M, Yuguo W et al. Mechanical Cardiac Support in the Young with the Berlin Heart EXCOR Pulsatile Ventricular Assist Device: 15 Years Experience. *Thorac. Cardiovasc. Surg. Pediatr. Card. Surg. Ann.* 2006; 9: 99–108. DOI: 10.1053/j.pcsu.2006.02.012.
- Hetzer R, Potapov E, Stiller B et al. Improvement in survival after mechanical circulatory support with pneumatic pulsatile ventricular assist devices in pediatric patients. *Ann. Thorac. Surg.* 2006; 82: 917–924. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2006.03.065.
- Morales DL, Almond CS, Jaquiss RD et al. Bridging children of all sizes to cardiac transplantation: the initial multicenter North American experience with the Berlin Heart EXCOR ventricular assist device. *J. Heart Lung Transplant.* 2011; 30: 1–8. DOI: 10.1016/j.healun.2010.08.033.
- Humpl T, Furness S, Gruenwald C. The Berlin Heart EXCOR Pediatrics – The SickKids Experience 2004–2008. *Artif. Organs.* 2010; 34: 1082–1086. DOI: 10.1111/j.1525-1594.2009.00990.x.
- Zafar F, Castleberry C, Khan MS, Mehta V et al. Pediatric heart transplant waiting list mortality in the era of ventricular devices assist. *J. Heart Lung Transplant.* 2015; 34 (1): 82–88. DOI: 10.1016/j.healun.2014.09.018.
- Coskun O, Parsa A, Coskun T et al. Outcome of heart transplantation in pediatric recipients; experience in 128 patients. *ASAIO J.* 2007; 53 (1): 107–110. DOI: 10.1097/01.mat.0000250958.36170.b6.
- Death on the pediatric waiting list: scope of the problem. Paper presented at: Summit on Organ Donation and Transplantation; March 2007; San Antonio, Tex.
- Mital S, Addonizio LJ, Lamour JM et al. Outcome of children with end-stage congenital heart disease waiting for cardiac transplantation. *J. Heart Lung Transplant.* 2003; 22: 147–153. PMID: 12581762.
- Almond CS, Thiagarajan RR, Piercey GE et al. Waiting list mortality among children listed for heart transplantation in the United States. *Circulation.* 2009; 119: 717–727. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.108.815712.
- Baldwin JT, Adachi I, Teal J et al. Closing in on the PumpKIN Trial of the Jarvik 2015 Ventricular Assist Device. *Semin. Thorac. Cardiovasc. Surg. Pediatr. Card. Surg. Annu.* 2017; 20: 9–15. DOI: 10.1053/j.pcsu.2016.09.003.

*Статья поступила в редакцию 6.06.2018 г.
The article was submitted to the journal on 6.06.2018*