

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ КАНЮЛИ ОСЕВОГО НАСОСА НА ОБРАЗОВАНИЕ ЗОН СТАГНАЦИИ И РЕЦИРКУЛЯЦИИ В ЛЕВОМ ЖЕЛУДОЧКЕ СЕРДЦА

М.С. Носов^{1, 2}, Г.П. Иткин^{1, 2}, В.М. Заико^{1, 2}, В.А. Мальгичев³

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

² ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация

³ ООО «ДОНА-М», Москва, Российская Федерация

Цель: Провести анализ входной канюли имплантируемого осевого насоса системы длительного обхода левого желудочка сердца с целью минимизации осложнений, связанных с тромбообразованием. **Материалы и методы.** Рассматривалась гемодинамика для 4 различных вариантов конструкции входной канюли, длиной от 0 до 25 мм. Наибольшее внимание было уделено зонам у основания канюли. Анализ проводился средствами пакета OpenFOAM. **Результаты.** В работе показано, что зоны стагнации и рециркуляции прямо зависят от длины канюли при размещении в левом желудочке, и соответственно, повышается вероятность тромбообразования. **Заключение.** Полученные результаты показывают влияние конструкции входной канюли на вероятность тромбообразования в ней. При этом увеличение длины входной канюли приводит к увеличению зон застоя и рециркуляции, что дает основание для поиска других возможных ее модификаций.

Ключевые слова: терминальная сердечная недостаточность, система вспомогательного кровообращения, обход левого желудочка, входная канюля, тромбоэмболические осложнения.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE DESIGN OF AXIAL-FLOW PUMP CANNULA TIP ON STAGNATION AND RECIRCULATION ZONES IN THE LEFT VENTRICLE

M.S. Nosov^{1, 2}, G.P. Itkin^{1, 2}, V.M. Zaiko^{1, 2}, V.A. Malgichev³

¹ Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

³ DONA-M Ltd, Moscow, Russian Federation

Objective: to analyze the inflow cannula of an implantable axial-flow blood pump for a long-term left ventricular assist system in order to minimize thromboembolic complications. **Materials and methods.** Hemodynamics was considered for 4 different designs of the inflow cannula, from 0 mm to 25 mm long. Areas at the base of the cannula received the most attention. Analysis was performed using the *OpenFOAM* software. **Results.** It was revealed that sizes of stagnation and recirculation zones directly depended on the length of the cannula when placed in the left ventricle. Accordingly, longer cannula increases the risk of thrombosis. **Conclusion.** The design of an inflow cannula determines the likelihood of thrombosis in the cannula. Longer inflow cannula increases stagnation and recirculation zones. This provides a basis for a search for other possible modifications.

Keywords: end-stage heart failure, artificial circulatory support, left ventricular bypass, inflow cannula, thromboembolic complications.

Для корреспонденции: Носов Михаил Сергеевич. Адрес: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 1.
Тел. (903) 265-92-50. E-mail: nosovmi@yandex.ru

Corresponding author: Mikhail Nosov. Address: 1, Shchukinskaya str., Moscow, 123182, Russian Federation.
Tel. (903) 265-92-50. E-mail: nosovmi@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных причин смертности в развитых странах являются сердечно-сосудистые заболевания. По данным из различных источников, в России и США от заболеваний такой патологии ежегодно умирает более 1 млн жителей. И если большинство болезней сердца поддается медикаментозному лечению, то в условиях терминальной сердечной недостаточности (ТСН) единственной возможностью помочь больным является трансплантация сердца. Однако дефицит донорских органов ограничивает возможности лечения таких больных. В этой связи в последние десятилетия появилась новая технология лечения больных ТСН методом длительной механической поддержки кровообращения (МПК) с применением имплантируемых роторных центробежных и осевых насосов. Несмотря на успешное применение таких систем в клинической практике, одной из основных проблем остаются тромботические осложнения, которые являются следствием совокупного действия напряжения сдвига, а также наличия застойных зон и зон рециркуляции крови. При этом наиболее критичным местом тромбообразования является область входной канюли [1–4]. Причины возникновения тромбов до конца не известны, однако можно выделить несколько факторов, влияющих на гемодинамику в желудочке и безопасность работы канюли:

- 1) положение канюли относительно сердца, в том числе угол наклона [2, 5–7];
- 2) форма и размер канюли [8–11];
- 3) покрытие поверхности канюли [1, 12].

В данной работе методом численного анализа исследуется влияние длины вылета входной канюли на образование зон застоя и рециркуляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В большинстве зарубежных систем длительной МПК на основе роторных насосов вспомогательного кровообращения (Heart Mate II, Heart Mate III, Jarvik 2000), а также в российской системе вспомогательного кровообращения (СВК) АВК-Н используются канюли забора крови прямого типа. На рис. 1 представлена канюля АВК-Н (Россия).

Такая конструкция является достаточно простой, симметричной и хорошо выполняет свою функцию. Тем не менее клинический опыт применения данной канюли показал высокую вероятность тромбообразования на входе насоса (рис. 2) [1, 13].

Предварительный анализ литературы, проведенный нами, показал, что несовершенная конструкция канюли с точки зрения локальной гемодинамики может приводить к негативным последствиям:

- 1) затруднение течения потока крови из-за тромботических масс и соединительной ткани [14];
- 2) присасывание просвета канюли к стенке желудочка [15];
- 3) образование тромбов в месте контакта канюли с миокардом [16].

В данной работе мы провели исследования по оценке влияния длины входной канюли осевого насоса на внутрижелудочковую гемодинамику. На рис. 3 изображены модели исследуемых в данной работе канюль.

Моделируется поток крови через левый желудочек (ЛЖ) с размещенной внутри него канюлей при отсутствии движения стенок, в условиях ТСН, когда ЛЖ практически не сокращается, а аортальный клапан закрыт.

Геометрия ЛЖ изображена на рис. 4. Каждая модель канюли размещается в ЛЖ, образуя необходи-



Рис. 1. Входная канюля системы АВК-Н

Fig 1. AVK-N input cannula



Рис. 2. Тромб на входе насоса

Fig 2. Pump inlet thrombosis

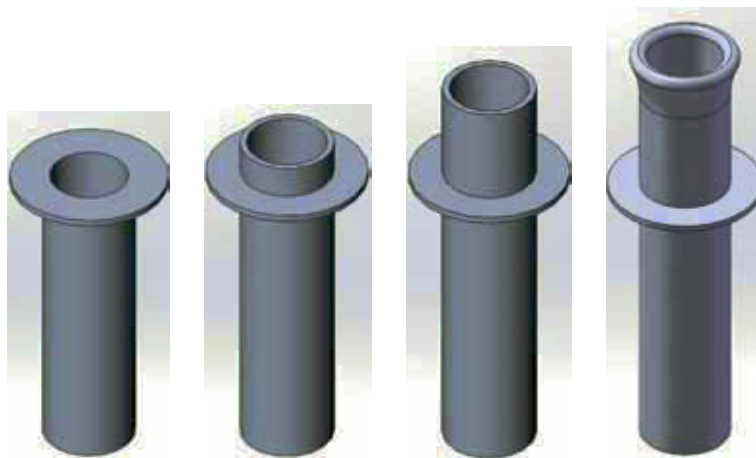


Рис. 3. Канюли с различной длиной вылета (слева направо) 0 мм, 5 мм, 15 мм и 25 мм АВК-Н

Fig 3. Cannulas with different tip length (from left to right) 0 mm, 5 mm, 15 mm and 25 mm AVK-N

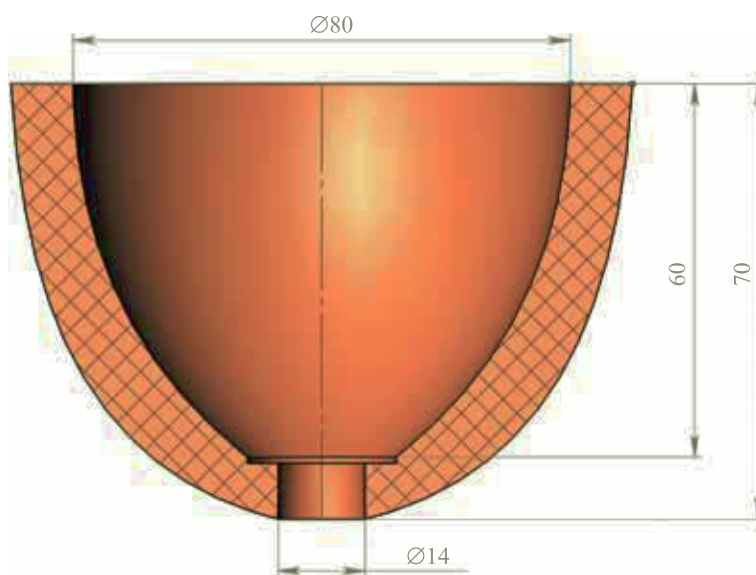


Рис. 4. Геометрия модели желудочка

Fig 4. The geometry of the ventricle model

мый объем для проведения численного моделирования. Исследовались наличие и размер зон застоя и рециркуляции при различных длинах канюли в полости ЛЖ. Критерием таких зон является нулевая

скорость движения потока крови, а также замкнутость траекторий движения.

Моделирование проводится средствами программы OpenFOAM. Параметры крови задаются уравне-

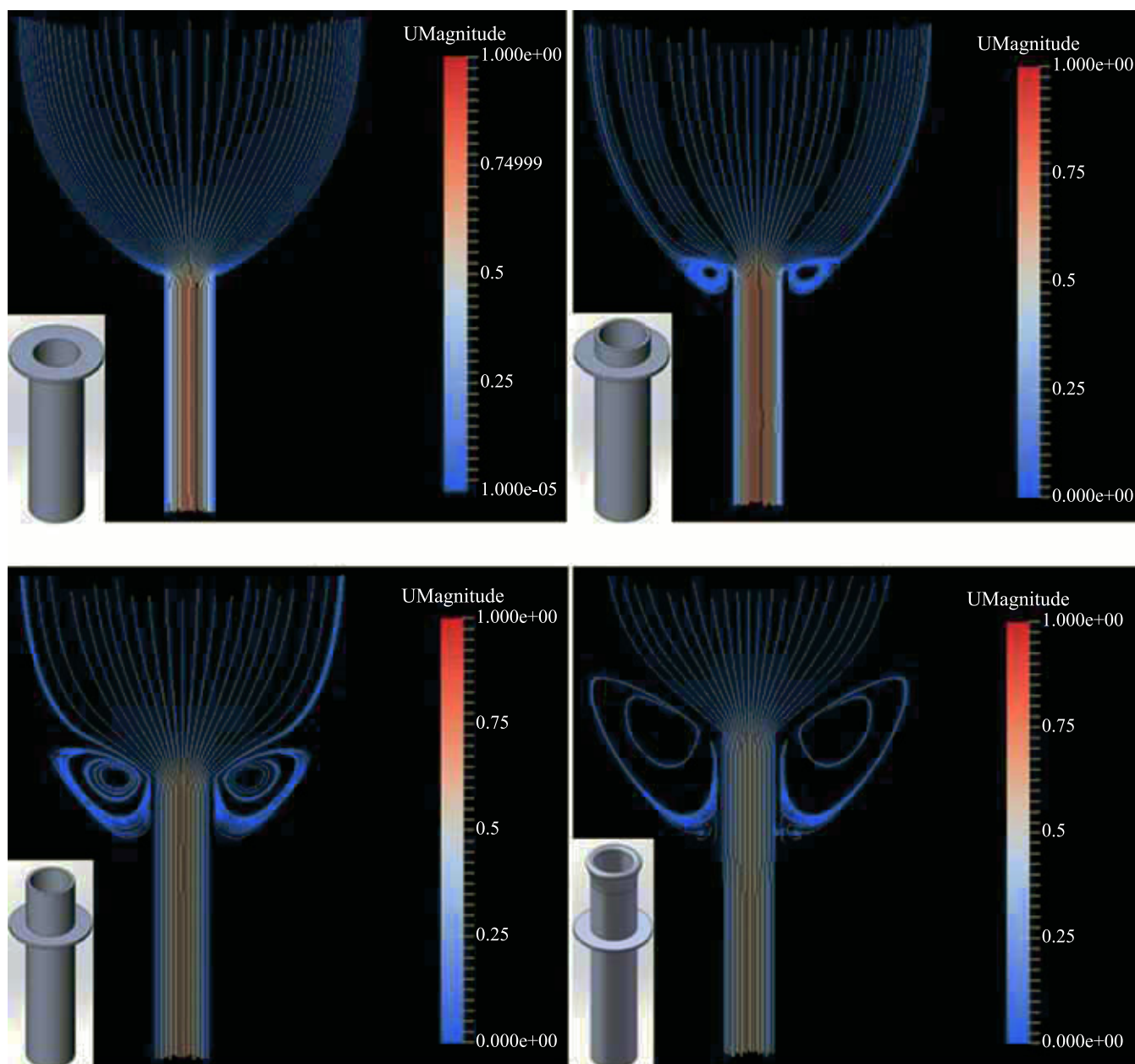


Рис. 5. Результаты моделирования прямых канюль

Fig 5. Results of modeling blunt tip cannulas

нием Навье–Стокса для вязкой жидкости (утилита *icoFoam*, входящая в состав *OpenFOAM*). На выходе модели задается давление 120 мм рт. ст., далее запускается вычислительный процесс до установки стационарного режима течения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования для прямых канюль изображены на рис. 5. Линии на рисунке – линии тока жидкости, цвет которых соответствует локальной скорости по шкале от 0 м/с (синий) до 1 м/с (красный).

Хорошо заметна тенденция увеличения размера зон рециркуляции в зависимости от длины входной

части канюли. У канюли с вылетом 0 мм она отсутствует, а для канюли в 25 мм (АВК-Н) она максимальна. Профили и изолинии скоростей изображены на рис. 6. Здесь можно заметить аналогичную зависимость с зонами стагнации. Чем больше вылет канюли – тем больше зона стагнации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прямая канюля с нулевым вылетом позволяет добиться минимальных зон застоя и рециркуляции. При этом вылет канюли, отличный от нулевого, является источником возникновения зон стагнаций и рециркуляций внутри ЛЖ, причем размер этих зон пропорционален длине вылета. Кроме того, увели-

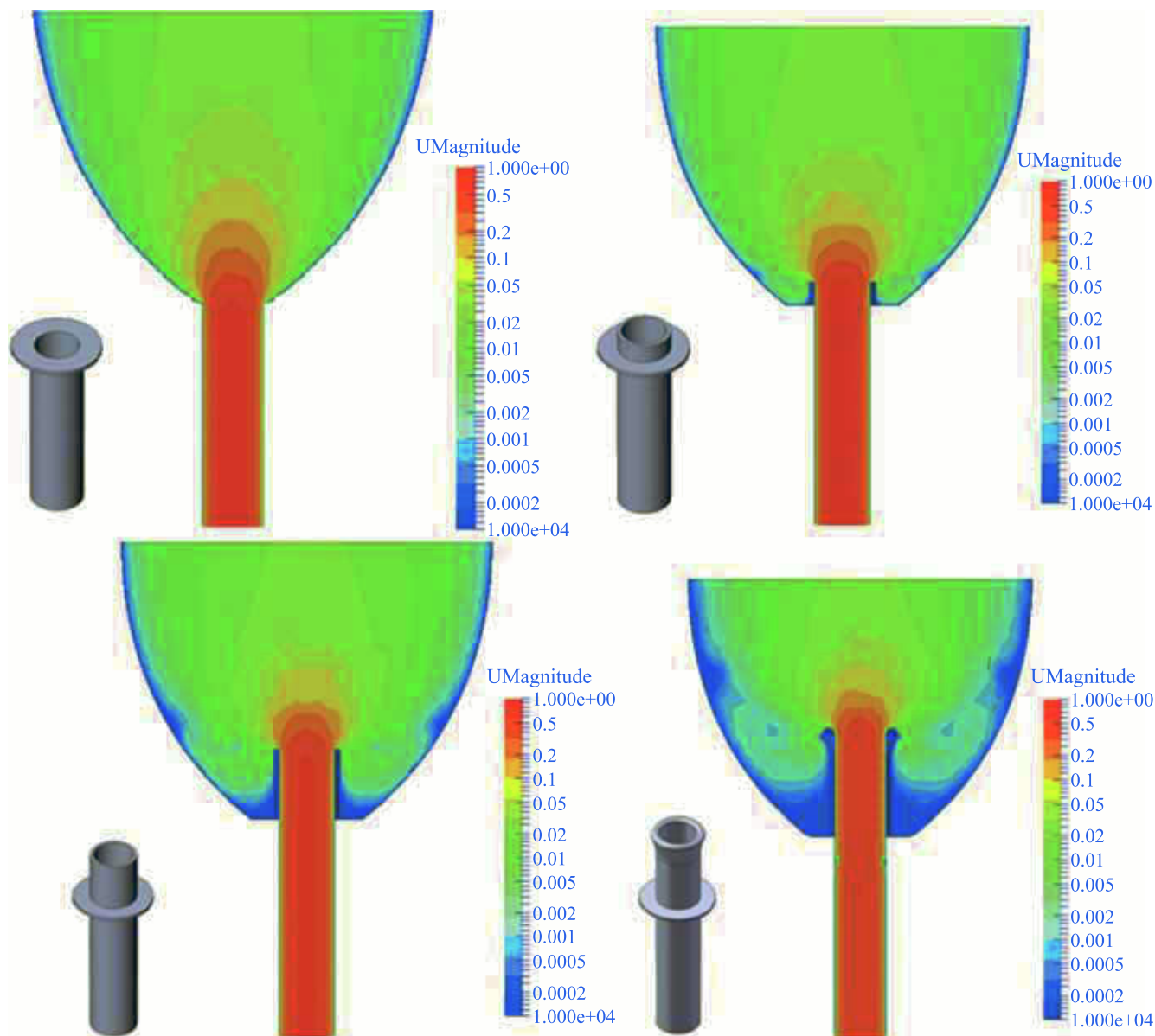


Рис. 6. Результаты моделирования прямых канюль. Модуль скорости

Fig. 6. Results of modeling blunt tip cannulas. Absolute speed

ченный вылет канюли приводит к росту гидравлического сопротивления системы. Несмотря на это, канюля с нулевым вылетом в типовых условиях со временем может зарастать соединительной тканью [14]. Данный процесс возможно блокировать за счет применения систем усиленной генерации пульсирующего потока [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают прямое влияние конструкции входной канюли на вероятность тромбообразования в ней. Явно прослеживаемая тенденция к увеличению зон застоя и рециркуляции при увеличении длины канюли дает основание для поиска других возможных конфигураций входной канюли. С другой стороны, при очень хороших гемоди-

намических показателях канюли с нулевым вылетом реализация такой конструкции требует дальнейших исследований для минимизации фактора зарастания просвета канюли соединительной тканью.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Arie Blitz. Pump thrombosis – A riddle wrapped in a mystery inside an enigma. *Ann Cardiothorac Surg.* 2014; 3 (5): 450–471. doi: 10.3978/j.issn.2225-319X.2014.09.10.
2. Bachman TN, Bhama JK, Verkaik J, Vandenberghe S, Kormos RL, Antaki JF. In vitro Evaluation of Ventricular

- Cannulation for Rotodynamic Cardiac Assist Devices. *Cardiovasc Eng Technol*. 2011 Sep; 2 (3): 203–211. doi: 10.1007/s13239-011-0050-x. PMID: 22563363; PMCID: PMC3343032.
3. Frazier OH, Forrester MD, Gemmato C, Gregoric ID. Urgent pump exchange for stroke resulting from a distorted HeartMate XVE inflow conduit. *J Heart Lung Transplant*. 2007 Jun; 26 (6): 646–648. doi: 10.1016/j.healun.2007.03.012. Epub 2007 Apr 16. PMID: 17543792.
4. Uriel N, Han J, Morrison KA, Nahumi N, Yuzefpolskaya M, Garan AR et al. Device thrombosis in HeartMate II continuous-flow left ventricular assist devices: a multifactorial phenomenon. *J Heart Lung Transplant*. 2014 Jan; 33 (1): 51–59. doi: 10.1016/j.healun.2013.10.005. Epub 2013 Nov 28. PMID: 24290832.
5. Imamura T, Adatya S, Chung B, Nguyen A, Rodgers D, Sayer G et al. Cannula and Pump Positions Are Associated With Left Ventricular Unloading and Clinical Outcome in Patients With HeartWare Left Ventricular Assist Device. *J Card Fail*. 2018 Mar; 24 (3): 159–166. doi: 10.1016/j.cardfail.2017.09.013. Epub 2017 Oct 2. PMID: 28982636; PMCID: PMC5856593.
6. Imamura T, Nguyen A, Chung B, Rodgers D, Sarawat N, Kim G et al. Association of Inflow Cannula Position with Left Ventricular Unloading and Clinical Outcomes in Patients with HeartMate II Left Ventricular Assist Device. *ASAIO J*. 2019 May/June; 65 (4): 331–335. doi: 10.1097/MAT.0000000000000823. PMID: 29933250; PMCID: PMC6342671.
7. Shiose A, Kim HI, Takaseya T, Kobayashi M, Fujiki M, Chen JF et al. Performance of extracorporeally adjustable ventricular assist device inflow cannula. *Ann Thorac Surg*. 2010 Nov; 90 (5): 1682–1687. doi: 10.1016/j.athoracsur.2010.06.081. PMID: 20971290.
8. Ong C, Dokos S, Chan B, Lim E, Al Abed A, Bin Abu Osman NA et al. Numerical investigation of the effect of cannula placement on thrombosis. *Theor Biol Med Model*. 2013 May 16; 10: 35. doi: 10.1186/1742-4682-10-35. PMID: 23680359; PMCID: PMC3673905.
9. Gregory SD, Zwischenberger J, Wang D, Liao S, Slaughter M. Cannula design. *Mechanical Circulatory and Respiratory Support*. S.D. Gregory, M.C. Stevens, J.F. Fraser (Eds.). London UK: Academic Press, 2017: 567–596. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810491-0.00018-7>.
10. Wong KC, Büsen M, Benzinger C, Gäng R, Bezema M, Greatrex N et al. Thoughts and Progress. *Artificial Organs*. 2014; 38: 810–817. doi: 10.1111/aor.12369.
11. Liu G, Zhou J, Hu S, Sun H, Chen H, Zhang Y et al. Numerical simulation of LVAD inflow cannulas with different tip. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*. 2013 Feb; 30 (1): 141–148. Chinese. PMID: 23488155.
12. Yamada Y, Nishinaka T, Mizuno T, Taenaka Y, Tatsumi E, Yamazaki K. Neointima-inducing inflow cannula with titanium mesh for left ventricular assist device. *J Artif Organs*. 2011 Dec; 14 (4): 269–275. doi: 10.1007/s10047-011-0586-4. Epub 2011 Jul 7. PMID: 21735150.
13. Saito S, Sakaguchi T, Miyagawa S et al. Jarvik 2000 bi-ventricular assist device conversion from old pin-shaped bearing pumps to new conical bearing pumps. *J Artif Organs*. 2013; 16: 105–109.
14. Ootaki Y, Saeed D, Ootaki C, Akiyama M, Fumoto H, Horai T et al. Development of the DexAide Right Ventricular Assist Device Inflow Cannula. *ASAIO Journal*. 2008 Jan-Feb; 54 (Issue 1): 31–36.
15. Akira Shiose, Hyun-Il Kim, Tohru Takaseya, Mariko Kobayashi, Masako Fujiki, Ji-Feng Chen et al. Performance of Extracorporeally Adjustable Ventricular Assist Device Inflow Cannula. *Ann Thorac Surg*. 2010; 90: 1682–1687. doi: 10.1016/j.athoracsur.2010.06.081.
16. Chitaru Kurihara, Minoru Ono, Takashi Nishimura, Aya Saito, Tsuyoshi Taketani, Motoyuki Hisagi et al. Use of DuraHeart support for more than 1 year as the first successful bridge to heart transplantation in Japan. *J Artif Organs*. 2011; 14: 67–69. doi: 10.1007/s10047-010-0524-x.
17. Бучнев АС, Кулешов АП, Дробышев АА, Иткин ГП. Гемодинамическая оценка нового метода генерации пульсирующего потока в системах сердечно-легочного обхода. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2019; 21 (3): 69–75. Buchnev AS, Kuleshov AP, Drobyshev AA, Itkin GP. Hemodynamic evaluation of a new pulsatile flow generation method in cardiopulmonary bypass system. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2019; 21 (3): 69–75. [In Russ, English abstract]. <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2019-3-69-75>.

Статья поступила в редакцию 24.04.2020 г.
The article was submitted to the journal on 24.04.2020