

13. Selishchev S., Telyshev D. Ventricular assist device Sputnik: Description, technical features and characteristics // Trends in Biomaterials and Artificial Organs. 2015. Vol. 29. № 3. PP. 207-210.
14. Selishchev S.V., Telyshev D.V. Optimisation of the Sputnik-VAD design // The International Journal of Artificial Organs. 2016 (в печати).
15. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1994. Vol. 32. № 8. PP. 1598-1605.
16. <https://uiuc-cse.github.io/me498cm-fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>.
17. Fraser K.H., Zhang T., Taskin M.E. et al. A quantitative comparison of mechanical blood damage parameters in rotary ventricular assist devices: Shear stress, exposure time and hemolysis index // Journal of Biomechanical Engineering. 2012. Vol. 134. № 8.
18. Thamsen B., Blumel B., Schaller J. et al. Numerical analysis of blood damage potential of the HeartMate II and HeartWare HVAD rotary blood pumps // Artificial Organs. 2015. Vol. 39. № 8. PP. 651-659.

Дмитрий Викторович Тельшев,
 канд. техн. наук, доцент,
 Максим Валерьевич Денисов,
 инженер,
 Сергей Васильевич Селищев,
 д-р физ.-мат. наук, профессор,
 зав. кафедрой,
 кафедра биомедицинских систем,
 Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
 г. Москва, г. Зеленоград,
 e-mail: telyshev@bms.zone

Д.В. Тельшев

Исследование чувствительности роторных насосов крови к нагрузке в статических условиях

Аннотация

Представлено исследование статических расходно-напорных характеристик шести роторных насосов крови: «Incoг» («BerlinHeart», Германия), «HeartMate II» («Thoratec Corporation», США), «Спутник» и «Спутник 2» (АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр», Россия), «Heartware HVAD» («Heartware International, Inc.», США) и «Duraheart» («Terumo», Япония). Получены результаты расчета чувствительности к пред- и постнагрузке для каждого из шести насосов. Показано, что чувствительность к преднагрузке для роторных насосов крови снижается при переходе в область максимального кровотока. Отмечается, что чувствительность к преднагрузке определяется не столько типом насоса (центробежный, осевой), сколько геометрией его проточной части.

Введение

Имплантируемые роторные насосы крови (РНК), предназначенные для частичного или полного замещения функции левого желудочка, помимо конструктивных особенностей [1], обладают уникальными расходно-напорными характеристиками. В литературных источниках приводятся различные варианты сравнения насосов с целью определения их влияния на эффективность разгрузки желудочка сердца и «физиологичность» поддержки кровообращения [2], [3]. Одним из вариантов такого сравнения является исследование формы расходно-напорных кривых и чувствительности к изменениям в пред- и постнагрузке [2], [3].

Понятие чувствительности к преднагрузке применительно к аппаратам вспомогательного кровообращения происходит от взаимосвязи между давлением и ударным объемом желудочка сердца. Эту взаимосвязь называют законом Франка-Старлинга [4], согласно которому по мере уменьшения преднагрузки ударный объем сердца также уменьшается. Для РНК снижение преднагрузки приводит к возрастанию перепада давлений между входом и выходом насоса, что, в свою очередь, снижает скорость кровотока через РНК. Эффективность данного вида регуляции определяется таким параметром, как чувствительность РНК к нагрузке.

Увеличение чувствительности к преднагрузке играет важную роль в разгрузке желудочка. Если насос имеет высокую чувствительность к преднагрузке, он также имеет высокую эффективность снижения расхода при уменьшении давления в желудочке. В свою очередь, это снижает риск возникновения коллапса желудочка и необходимость в регуляции скорости [5], [6].

Целью представленного исследования является анализ работы РНК посредством определения их реакции на изменения в преднагрузке и сравнение этих насосов в статических условиях.

Методы

Четыре разновидности осевых насосов: «Incoг» («BerlinHeart», Берлин, Германия) [7], «HeartMate II» [8] («Thoratec Corporation», Плезантон, Калифорния, США), «Спутник» [9], [10] и «Спутник 2» [10] (АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр», Москва, Россия) – были отобраны вместе с двумя центробежными насосами, такими как «Heartware HVAD» («Heartware International, Inc.», Фрамингем, Массачусетс, США) [11] и «Duraheart» («Terumo», Токио, Япония) [12].

Информация о чувствительности РНК к пред- и постнагрузке содержится в расходно-напорных характеристиках насосов. Выражения расходно-напорных характеристик для «Duraheart», «HeartMate II», «Heartware HVAD» и «Incoг» были получены из [13]. Для РНК «Спутник» и «Спутник 2» расходно-напорные характеристики были получены при помощи гидродинамического стенда [10], далее применялась процедура полиномиальной интерполяции для получения зависимости перепада давления от расхода. В *табл. 1* приведены полиномиальные уравнения, определяющие расходно-напорные характеристики исследуемых РНК.

Для РНК «Duraheart», «Heartware HVAD», «Incoг» и «HeartMate II» скорости вращения роторов составляли 2000, 3000, 8000 и 10000 об/мин соответственно. Для РНК «Спутник» и «Спутник 2» была взята скорость, равная 8000 об/мин (*рис. 1*). Перепады давлений, полученные из расходно-напор-

ных характеристик на интервале 0...7 л/мин, были перенесены в полиномиальные уравнения, рассчитанные с использованием Microsoft Excel 2010. В табл. 1 приведены полиномиальные уравнения с точностью по R^2 не ниже 0,995. Данные уравнения использовались для расчета значений пред- и постнагрузки согласно [13].

Результаты

В рассматриваемой работе были получены зависимости расхода от преднагрузки и чувствительности к преднагрузке от расхода для всех шести РНК. В работе использовались два значения постнагрузки: 60 и 100 мм рт. ст. Значения преднагрузки выбирались в диапазоне от -5 до 30 мм рт. ст. Разность давлений определялась согласно формуле [13]

Постнагрузка = Разность давлений + Преднагрузка.

Зная разность давлений из полиномиального выражения (табл. 1), строили зависимость расхода от преднагрузки (рис. 2).

Для построения зависимости чувствительности к преднагрузке от расхода (рис. 3) вычислялись значения чувствительности к преднагрузке на всем интервале расходов [13]

$$PS = \frac{Q_{pul} - Q_{pl}}{P_{ul} - P_{ll}},$$

где PS – чувствительность к преднагрузке, л·мин⁻¹·мм рт. ст.⁻¹; Q – расход, л/мин; P – преднагрузка, мм рт. ст.; ul – верхний предел; ll – нижний предел.

Полученные результаты показывают, что насосы «Спутник» и «Спутник 2» демонстрируют лучшую чувствительность к преднагрузке по сравнению с другими РНК при постнагрузках 60 и 100 мм рт. ст. Насос «Incor» имеет самую низкую чувствительность к преднагрузке (около 0,04 л·мин⁻¹·мм рт. ст.⁻¹), т. е. его расход в наименьшей степени зависит от изменения преднагрузки. Это объясняется крутизной его расходно-напорной характеристики (рис. 1).

Максимальное значение чувствительности к преднагрузке показал насос «Спутник 2»: $PS = 0,34$ л·мин⁻¹·мм рт. ст.⁻¹, что

Таблица 1

Полиномиальные уравнения, определяющие расходно-напорные характеристики исследуемых насосов

Наименование	Скорость, об/мин	Полином	R^2
Duraheart	2000	$y = -0,018x^3 - 0,698x^2 - 0,373x + 124,42$	0,999
Heartmate II	10000	$y = 0,035x^4 - 0,75x^3 + 5,613x^2 - 26,08x + 139,63$	0,998
HVAD	3000	$y = 0,014x^4 - 0,145x^3 - 0,747x^2 + 1,2x + 122,29$	0,999
Incor	8000	$y = 0,03x^3 - 1,733x^2 - 12,079x + 158,81$	0,999
Спутник	8000	$y = 0,024x^3 - 0,041x^2 - 7,558x + 117,567$	0,999
Спутник 2	8000	$y = 0,0067x^4 + 0,085x^3 - 1,39x^2 - 2,79x + 118,37$	0,999

y – перепад давления, мм рт. ст.; x – расход, л/мин; R^2 – коэффициент детерминации ($R^2 = 1$ – идеальная точность).

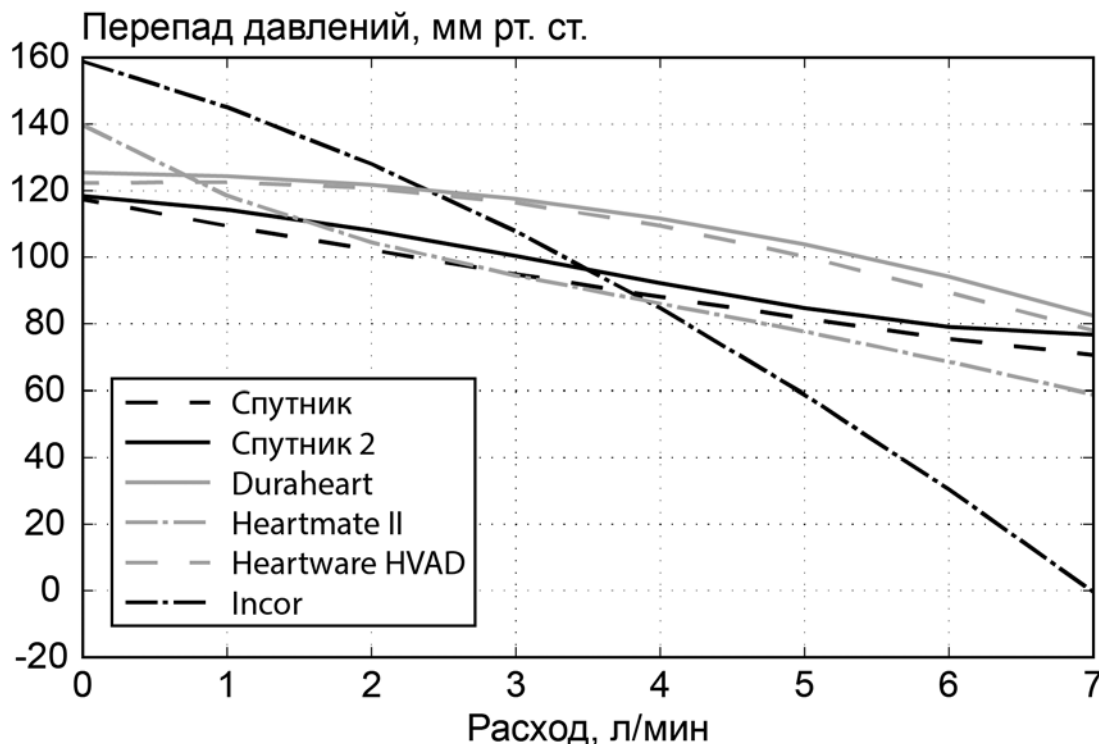


Рис. 1. Расходно-напорные характеристики для насосов: «Duraheart» – при 2000 об/мин (сплошная серая линия); «Incor» – при 8000 об/мин (штрих-пунктирная черная линия); «Heartware HVAD» – при 3000 об/мин (пунктирная серая линия); «Спутник» – при 8000 об/мин (пунктирная черная линия); «Спутник 2» – при 8000 об/мин (сплошная черная линия); «Heartmate II» – при 10 000 об/мин (штрих-пунктирная серая линия)

объясняется пологостью его расходно-напорной характеристики в области кровотока выше 6 л/мин. Среднее значение чувствительности всех насосов составило $0,13 \text{ л}\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{мм рт. ст.}^{-1}$, что ниже среднего значения для сердца ($0,241 \pm 0,04$) [13], [14].

Как можно видеть из рис. 3, чувствительность к преднагрузке при постнагрузке 60 мм рт. ст. убывает при возрастании кровотока для всех исследуемых РНК, что связано с потерями в РНК, вызванными такими эффектами, как трение жидкости, образование обратных токов, низкая эффективность гидравлической машины.

Так, чувствительность к преднагрузке для центробежных насосов «DuraHeart» и «Heartware HVAD» при переходе от постнагрузки 60 мм рт. ст. к постнагрузке 100 мм рт. ст. значительно уменьшается (от 0,09 до $0,05 \text{ л}\cdot\text{мин}^{-1}\cdot\text{мм рт. ст.}^{-1}$), что связано с особенностью расходно-напорных характеристик центробежных насосов, показывающих значительно более пологую форму в зонах низких расходов по сравнению с областями высоких расходов [15].

Также следует отметить, что центробежные РНК «DuraHeart» и «Heartware HVAD» обладают схожей реакцией на изменение пред- и постнагрузки, что объясняется незначительными расхождениями в форме их расходно-напорных характеристик.

Осевые РНК «Incor», «HeartMate II», «Спутник» и «Спутник 2» показали значительные расхождения в реакции на изменение пред- и постнагрузки, позволяющие сделать вывод о том, что весомый вклад в форму расходно-напорной характеристики и чувствительность РНК к нагрузке оказывает геометрия проточной части.

Заключение

Несмотря на то что современные РНК являются эффективными средствами борьбы с острой формой сердечной недостаточности, их чувствительность к преднагрузке в несколько раз ниже по сравнению с сердцем.

Расходно-напорные характеристики содержат всю необходимую информацию для оценки чувствительности РНК к пред- и постнагрузке, поэтому при проектировании и разработке новых РНК необходимо уделять особое внимание форме их расходно-напорных характеристик.

Оптимизация чувствительности к пред- и постнагрузке позволит повысить «физиологичность» течения крови через РНК и снизить риск коллапса желудочка сердца.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00044).

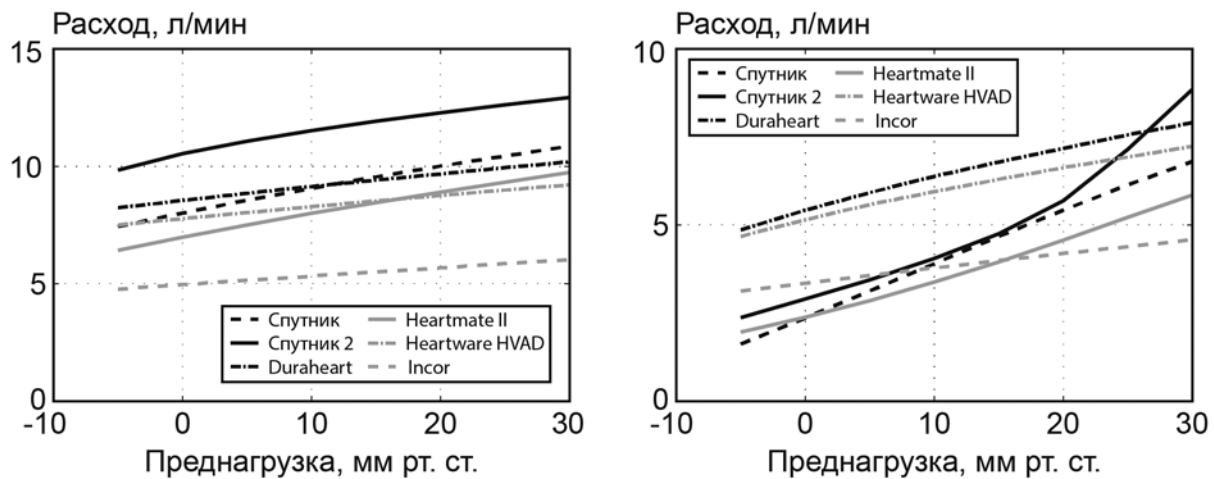


Рис. 2. Зависимость расхода от преднагрузки для шести исследуемых насосов при постнагрузке 60 мм рт. ст. (слева) и 100 мм рт. ст. (справа)

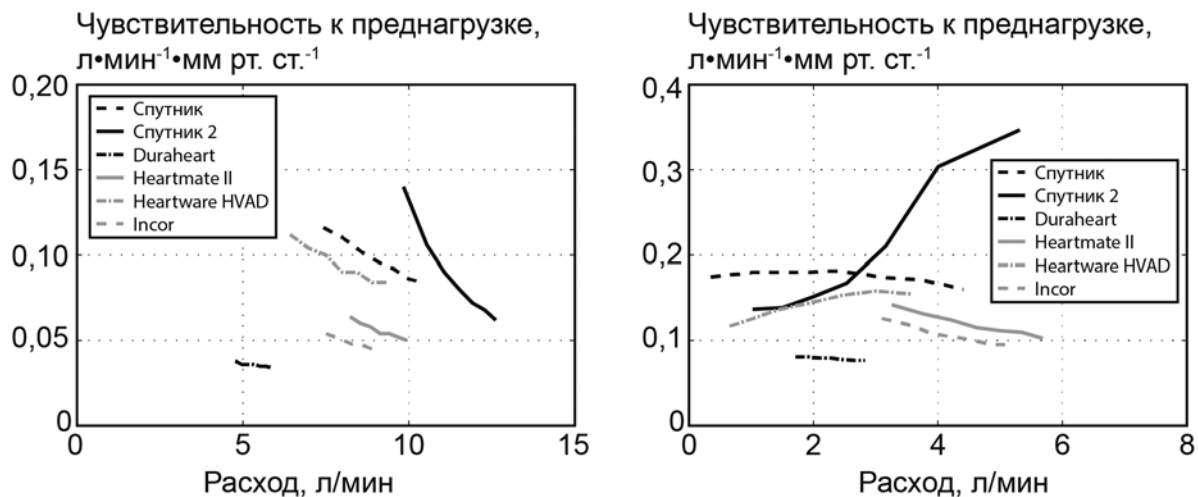


Рис. 3. Зависимость чувствительности к преднагрузке от расхода для шести исследуемых насосов при постнагрузке 60 мм рт. ст. (слева) и 100 мм рт. ст. (справа)

Список литературы:

1. Moazami N., Fukamachi K., Kobayashi M. et al. Axial and centrifugal continuous-flow rotary pumps: A translation from pump mechanics to clinical practice // The Journal of Heart and Lung Transplantation. 2013. Vol. 32. № 1. PP. 1-11.
2. Salamonsen R.F., Mason D.G., Ayre P.J. Response of rotary blood pumps to changes in preload and afterload at a fixed speed setting are unphysiological when compared with the natural heart // Artificial Organs. 2011. Vol. 35. № 3. PP. 47-53.
3. Fukamachi K., Shiose A., Massiello A. et al. Preload sensitivity in cardiac assist devices // The Annals of Thoracic Surgery. 2013. Vol. 95. № 1. PP. 373-380.
4. Gregory S.D., Stevens M., Timms D., Pearcy M. Replication of the Frank-Starling response in a mock circulation loop / IEEE EMBS Conference proceedings. 2011. P. 6825.
5. Khalil H.A., Cohn W.E., Metcalfe R.W., Frazier O.H. Preload sensitivity of the Jarvik 2000 and HeartMate II left ventricular assist devices // American Society for Artificial Internal Organs Journal. 2008. Vol. 54. № 3. PP. 245-248.
6. Petukhov D.S., Telyshev D.V. Analysis of the preload and afterload sensitivity of the Sputnik rotary blood pump // Biomedical Engineering. 2016. Vol. 49. № 6. PP. 362-365.
7. Camboni D., Zerditzki M., Hirt S. et al. Reduction of INCOR® driveline infection rate with silicone at the driveline exit site // Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery. 2016 (в печати).
8. Frazier O.H., Gemmato C., Myers T.J. et al. Initial clinical experience with the HeartMate® II Axial-Flow left ventricular assist device // Texas Heart Institute Journal. 2007. Vol. 34. PP. 275-281.
9. Selishchev S., Telyshev D. Ventricular assist device Sputnik: Description, technical features and characteristics // Trends in Biomaterials and Artificial Organs. 2015. Vol. 29. № 3. PP. 207-210.
10. Selishchev S.V., Telyshev D.V. Optimisation of the Sputnik-VAD design // The International Journal of Artificial Organs. 2016 (в печати).
11. Larose J.A., Tamez D., Ashenuga M., Reyes C. Design Concepts and Principle of Operation of the HeartWare Ventricular Assist System // American Society for Artificial Organs Journal. 2010. Vol. 56. № 4. PP. 285-289.
12. Nojiri C., Kijima T., Maekawa J. et al. Recent progress in the development of Terumo implantable left ventricular assist system // American Society for Artificial Organs Journal. 1999. Vol. 45. PP. 199-203.
13. Salamonsen R.F., Mason D.G., Ayre P.J. Response of rotary blood pumps to changes in preload and afterload at a fixed speed setting are unphysiological when compared with the natural heart // Artificial Organs. 2011. Vol. 35. № 3. PP. 47-53.
14. Fukamachi K., Shiose A., Massiello A. et al. Preload sensitivity in cardiac assist devices // The Annals of Thoracic Surgery. 2013. Vol. 95. № 1. PP. 373-380.
15. Moazami N., Fukamachi K., Kobayashi M. et al. Axial and centrifugal continuous-flow rotary pumps: A translation from pump mechanics to clinical practice // The Journal of Heart and Lung Transplantation. 2013. Vol. 32. № 1. PP. 1-11.

Дмитрий Викторович Тельшев,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра биомедицинских систем,
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, г. Зеленоград,
e-mail: telyshev@bms.zone

Д.С. Петухов

Моделирование и управление расходно-напорными характеристиками имплантируемого насоса крови АВК-Н «Спутник»

Аннотация

В рассматриваемой работе проводится верификация ранее предложенного подхода к определению режимов работы роторного насоса крови. Для этого используются статические расходно-напорные характеристики аппарата вспомогательного кровообращения «Спутник», полученные на гидродинамическом стенде в статических условиях. Продемонстрирована возможность использования полученных результатов для реализации стратегии управления роторным насосом, нацеленной на поддержание требуемого уровня расхода и определение сопутствующих режимов работы.

Введение

В ранее опубликованной работе [1] был предложен подход к оценке изменений в динамике течения крови через роторный насос, который позволяет определить физиологически значимые режимы работы насоса: обратное течение крови через насос (PBF), частичная разгрузка (PPA) и полная разгрузка желудочка сердца (PFA), частичный коллапс (PVC) и полный коллапс (FVC) желудочка во время сердечного цикла [2]. Динамика течения крови через насос оценивалась с помощью теоретической модели роторного насоса [1].

Цель рассматриваемой работы заключается в экспериментальной проверке данного подхода с использованием статических расходно-напорных характеристик (РНХ) аппарата вспомогательного кровообращения (АВК) «Спутник» [3].

Методы

Предложенная ранее теоретическая модель роторного насоса крови (РНК) основывается на опубликованных в литературе статических расходно-напорных характеристиках аппарата вспомогательного кровообращения «HeartMate II» и записывается в следующем виде [1]:

$$L \frac{dQ}{dt} = aQ + bQ^2 + cQ^3 + d\omega^2 + eQ\omega^2 + fQ^2\omega + g - H, \quad (1)$$

где L – параметр, характеризующий влияние инерционности крови в данном насосе и равный 0,2 мм рт. ст. · мин² · л⁻¹; Q – расход насоса, л/мин; ω – скорость насоса, мин⁻¹; H – перепад давлений на насосе, мм рт. ст. Коэффициенты уравнения $a - g$