

Исследование роторного насоса для поддержки кровообращения правого желудочка сердца при механической поддержке кровообращения обоих желудочков сердца

Аннотация

Проведено исследование роторного насоса для поддержки кровообращения правого желудочка сердца на модели сердечно-сосудистой системы для случая механической поддержки кровообращения обоих желудочков сердца. Предложены три варианта расходно-напорных характеристик, определяющих производительность насоса для поддержки правого желудочка сердца. Продемонстрировано, что нормальные уровни давления и разгрузка правого желудочка без возникновения коллапса достигаются в случае использования насосов, расходно-напорные кривые которых масштабированы по перепаду давления, характерному для малого круга кровообращения.

Введение

Применение аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца (АВК ЛЖС) в клинической практике примерно в 10..40 % случаев приводит к возникновению правожелудочковой недостаточности, связанной с увеличением смертности после имплантации АВК ЛЖС, увеличением времени пребывания в больнице и плохой выживаемостью после трансплантации сердца [1]-[3].

Это требует механической поддержки кровообращения обоих желудочков сердца [4]-[7], что реализуется с помощью АВК, спроектированных для поддержки кровообращения ЛЖС. Таким образом, на данный момент существует потребность в разработке насосов для поддержки кровообращения правого желудочка сердца (ПЖС), которые могут использоваться в том числе и при поддержке кровообращения обоих желудочков сердца [6], [7].

Цель рассматриваемой работы заключается в исследовании влияния формы статических расходно-напорных характеристик (РНХ) роторного насоса на разгрузку правого желудочка сердца при механической поддержке кровообращения обоих желудочков сердца. Исследование проведено на математической модели сердечно-сосудистой системы [8].

Методы

Исходная гемодинамика в сердечно-сосудистой системе без насосов для поддержки кровообращения обоих желудочков сердца представлена на рис. 1.

Производительность роторного насоса АВК «Спутник»,

спроектированного для поддержки кровообращения ЛЖС, определяется расходно-напорными характеристиками, которые можно описать следующим уравнением [9]:

$$a_1Q + b_1H + c_1\omega^2 + d_1\omega Q + e_1Q^2 + f_1Q^3 = 0, \quad (1)$$

где Q – расход насоса, л/мин; H – перепад давлений на насосе, мм рт. ст.; ω – скорость насоса, мин⁻¹; $a_1..f_1$ – коэффициенты уравнения, значения которых получены с помощью процедуры оптимизации на основе метода Левенберга-Марквардта.

Расходно-напорные характеристики данного насоса были масштабированы путем уменьшения перепада давления на 50 мм рт. ст. при сохранении того же уровня расхода. С целью описания новой формы РНХ в уравнении (1) член ω^2 заменен на ω^3 , а член ωQ исключен, поскольку его добавление не влияет на точность описания РНХ. Итоговое уравнение записывается в следующем виде:

$$a_2Q + b_2H + c_2\omega^3 + d_2Q^2 + e_2Q^3 = 0. \quad (2)$$

После этого наклон данных РНХ был изменен таким образом, чтобы сделать характеристики более пологими. В результате оптимизации уравнения (2) для новой формы РНХ получено следующее уравнение:

$$a_3Q + b_3H + c_3\omega^3 + d_3Q^2 + e_3Q^3 = 0. \quad (3)$$

Итоговые коэффициенты для всех трех уравнений приведены в табл. 1. Расходно-напорные характеристики, описываемые данными уравнениями, представлены на рис. 2. Маркерами отмечены точки, по которым проводилась оптимизация.

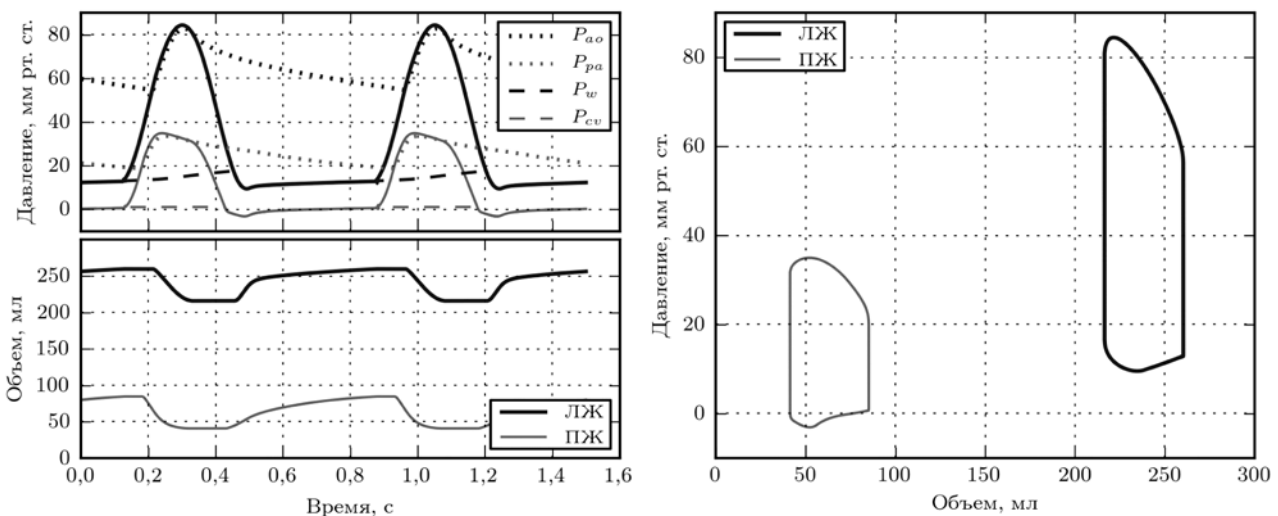


Рис. 1. Исходная гемодинамика в сердечно-сосудистой системе: P_{ao} – давление в аорте; P_{pa} – давление в легочной артерии; P_w – давление заклинивания в легочных капиллярах; P_{cv} – центральное венозное давление; ЛЖ – левый желудочек; ПЖ – правый желудочек сердца

Таблица 1

Значения коэффициентов для уравнений, описывающих расходно-напорные характеристики насосов

Уравнение (1)	Уравнение (2)	Уравнение (3)
$a_1 = 0,275172$	$a_2 = 21070,543476$	$a_3 = 19118,855684$
$b_1 = 0,083073$	$b_2 = 2418,974565$	$b_3 = 3486,751917$
$c_1 = -1,490610e-07$	$c_2 = -3,004940e-07$	$c_3 = -3,893037e-07$
$d_1 = 5,862931e-05$	$d_2 = 94,381510$	$d_3 = -344,361773$
$e_1 = -0,008190$	$e_2 = -8,305004$	$e_3 = 60,303511$
$f_1 = 0,000812$	-	-

Результаты

Полученные уравнения исследованы на модели сердечно-сосудистой системы. Работа насоса для поддержки кровообращения ЛЖС описывается уравнением (1). В качестве насоса для поддержки кровообращения ПЖС последовательно используются насосы 1, 2 и 3, работа которых описывается уравнениями (1), (2) и (3) соответственно.

На рис. 3 представлено изменение гемодинамики в сердечно-сосудистой системе для случая, когда скорость насосов для поддержки кровообращения обоих желудочков сердца одновременно увеличивается от 6000 до 9000 об/мин.

Видно, что насос 1 даже при малых величинах скорости создает отрицательное центральное венозное давление и увеличивает ДЗЛК более чем в два раза сверх нормальных значений (6...12 мм рт. ст.). При этом среднее артериальное давление в легочной артерии также сильно завышено относительно нормальных значений (10...20 мм рт. ст.).

Таким образом, насос, спроектированный для поддержки кровообращения ЛЖС, неприемлем для разгрузки ПЖС, поскольку приводит к отрицательному ЦВД, т. е. коллапсу правого желудочка, и к ненормальному распределению давлений.

В то же время насосы 2 и 3 обеспечивают близкие к нормальным величины давлений и небольшую величину расхода, что может использоваться для частичной разгрузки ПЖС. При этом между данными насосами не обнаружено существенной разницы в разгрузке ПЖС и влиянии на гемодинамику в малом круге кровообращения.

Для насосов 1, 2 и 3 была рассчитана чувствительность к преднагрузке при постоянной преднагрузке (30 мм рт. ст.) ана-

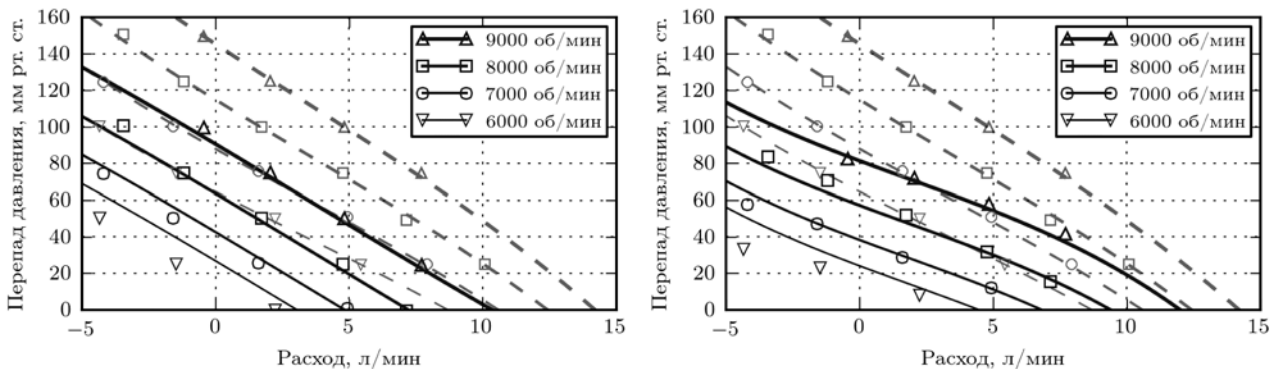


Рис. 2. Расходно-напорные характеристики насоса для поддержки кровообращения ЛЖС (серая пунктирная линия) и масштабированные РНХ насоса для поддержки кровообращения ПЖС (черная линия) без изменения наклона (слева) и с изменением наклона (справа)

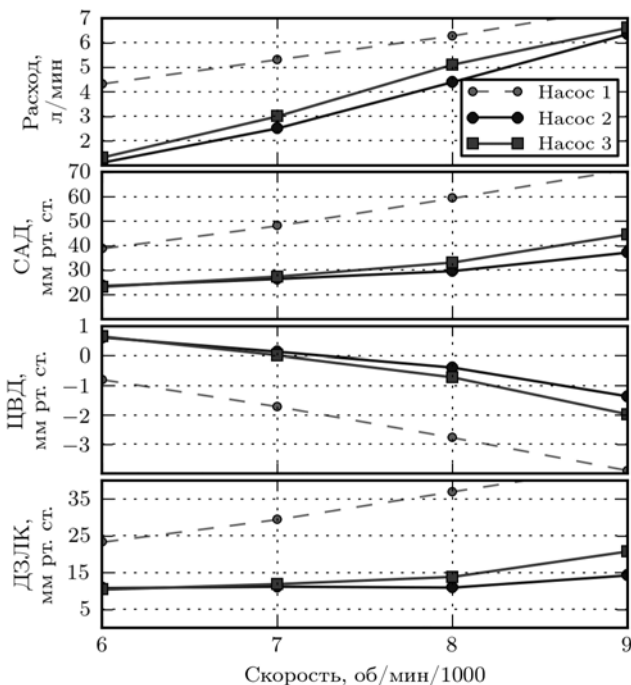


Рис. 3. Изменения в гемодинамике при механической поддержке кровообращения обоих желудочков сердца для случая одновременного увеличения скоростей от 6000 до 9000 об/мин: САД – среднее артериальное давление в легочной артерии; ЦВД – центральное венозное давление; ДЗЛК – давление заклинивания в легочных капиллярах

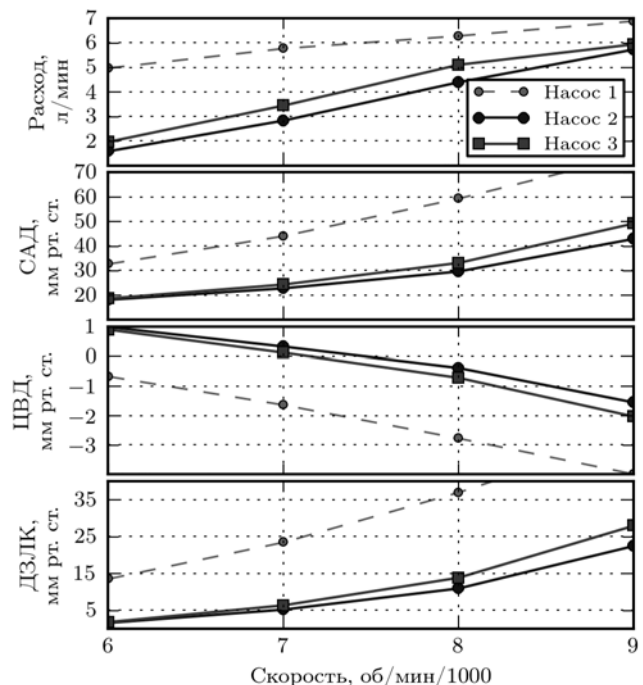


Рис. 4. Изменения в гемодинамике при механической поддержке кровообращения обоих желудочков сердца в случае постоянной скорости насоса (8000 об/мин) для поддержки левого желудочка сердца

логично [9]. Результаты расчета приведены в табл. 2. Несмотря на существенное отличие данного параметра у насосов 2 и 3, они оказывают примерно одинаковое влияние на гемодинамику. Предполагается, что увеличение чувствительности к преднагрузке также должно уменьшать риск возникновения коллапса желудочка сердца [9].

Таблица 2

Чувствительность к преднагрузке ($л \cdot мин^{-1} \cdot мм рт. ст.^{-1}$) для роторных насосов при величинах расхода насоса 1 и 5 л/мин

Скорость, об/мин	Насос 1		Насос 2		Насос 3	
	1 л/мин	5 л/мин	1 л/мин	5 л/мин	1 л/мин	5 л/мин
6000	–	0,1372	0,1140	–	0,1868	–
7000	–	–	0,1140	–	0,1869	0,1731
8000	–	–	–	0,1131	–	0,1734

Кроме того, рассмотрена ситуация, когда скорость насоса для поддержки ЛЖС остается равной 8000 об/мин при увеличении скорости насоса для поддержки ПЖС от 6000 до 9000 об/мин (рис. 4). В этом случае между насосами 2 и 3 также не обнаружено значительной разницы в разгрузке правого желудочка сердца. Тем не менее среднее артериальное давление, ЦВД и ДЗЛК оказались в диапазоне давлений, близком к нормальному, при скоростях 6000 и 7000 об/мин.

Заключение

В рассматриваемой работе проведено исследование расходно-напорных характеристик насоса для поддержки кровообращения ПЖС при механической поддержке обоих желудочков сердца.

Продемонстрировано, что использование АВК ЛЖС для поддержки кровообращения ПЖС приводит к значительному увеличению преднагрузки ЛЖ и коллапсу правого желудочка сердца. Приемлемая разгрузка ПЖС и давления, близкие к нормальным значениям, обеспечиваются в случае использования роторных насосов, РНХ которых масштабированы по перепаду давления.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что более желательным является масштабирование расходно-напорных кривых насоса по перепаду давления, характерному для малого круга кровообращения. Соответствие между наклоном РНХ насосов для поддержки кровообращения ЛЖС и ПЖС не является обязательным, поскольку оба насоса, описываемые уравнениями (2) и (3), обеспечивают примерно одинаковый уровень разгрузки ПЖС.

Кроме того, необходима разработка системы регулирования скорости насосов, которая обеспечила бы правильное соотношение ЦВД/ДЗЛК [8], не приводя к коллапсу желудочков сердца, что в итоге может повлиять на клинический исход.

К ограничениям работы следует отнести математическую модель сердца, которая не учитывает желудочковое взаимодействие.

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

Список литературы:

1. Lampert B.C., Teuteberg J.J. Right ventricular failure after left ventricular assist devices // The Journal of Heart and Lung Transplantation. 2015. Vol. 34. № 9. PP. 1123-1130.
2. Argiriou M., Kolokotron S.-M., Sakellariadis T. et al. Right heart failure post left ventricular assist device implantation // Journal of Thoracic Disease. 2014. Vol. 6. № 1. PP. 52-59.
3. Lo C., Murphy D., Summerhayes R. et al. Right ventricular failure after implantation of continuous flow left ventricular assist device: Analysis of predictors and outcomes // Clinical Transplantation. 2015. Vol. 29. № 9. PP. 763-770.
4. Loforte A., Stepanenko A., Potapov E.V. et al. Temporary Right Ventricular Mechanical Support in High-Risk Left Ventricular Assist Device Recipients Versus Permanent Biventricular or Total Artificial Heart Support // Artificial Organs. 2013. Vol. 37. № 6. PP. 523-530.
5. Aissaoui N., Morshuis M., Paluszkiwicz L. et al. Comparison of biventricular and left ventricular assist devices for the management of severe right ventricular dysfunction in patients with end-stage heart failure // ASAIO journal. 2014. Vol. 60. № 4. PP. 400-406.
6. Potapov E.V., Kukucka M., Falk V., Krabatsch T. Biventricular support using 2 HeartMate 3 pumps // The Journal of Heart and Lung Transplantation. 2016. Vol. 35. № 10. PP. 1268-1270.
7. Karimov J.H., Sunagawa G., Horvath D. et al. Limitations to Chronic Right Ventricular Assist Device Support // The Annals of Thoracic Surgery. 2016. Vol. 102. № 2. PP. 651-658.
8. Петухов Д.С., Селищев С.В. Оценка изменений в работе правого желудочка сердца при наличии аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца // Медицинская техника. 2014. № 4. С. 28-32.
9. Петухов Д., Тельшиев Д. Исследование чувствительности роторного насоса к преднагрузке и постнагрузке // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 27-30.

*Дмитрий Сергеевич Петухов,
стажер-исследователь,*

Дмитрий Викторович Тельшиев,

канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,

кафедра биомедицинских систем,

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Москва, г. Зеленоград,

e-mail: petuhov@bms.zone

* * * * *