

Оценка изменений в работе правого желудочка сердца при наличии аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца

Аннотация

В статье представлены результаты, показывающие изменения в гемодинамике, отражающие последствия нарушения функции правого желудочка (ПЖ), при наличии аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца. Было обнаружено, что с увеличением скорости насоса центральное венозное давление (ЦВД) становится больше давления заклинивания в легочных капиллярах (ДЗЛК), что сопровождается увеличением отношения ЦВД/ДЗЛК и является первым признаком нарушения работы ПЖ.

Анализ изменений в гемодинамике до и после имплантации АВК показал, что наиболее зависимыми от изменения сократительной способности правого желудочка являются отношение ЦВД/ДЗЛК, ЦВД, ДЗЛК и индекс ударной работы ПЖ. При этом отношение ЦВД/ДЗЛК рассматривается в качестве основного показателя нарушения функции ПЖ.

После подключения насоса к правому желудочку с уменьшенной сократительной способностью был проведен анализ бивентрикулярной поддержки кровообращения, позволивший установить допустимый рабочий диапазон насосов, при котором скорость насоса левого желудочка должна быть примерно в 1,5 раза выше скорости насоса правого желудочка сердца.

Введение

Нарушение функции правого желудочка (ПЖ) остается одной из основных проблем после имплантации аппарата вспомогательного кровообращения (АВК) левого желудочка сердца [1]. Так, например, послеоперационная смертность увеличивается до 43 %, и пациенты имеют худшую выживаемость после трансплантации сердца [2].

Определение дисфункции ПЖ (Right Ventricular Failure, RVF) было стандартизировано INTERMACS (Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support) как симптомы и признаки постоянного нарушения, требующего имплантации АВК ПЖ, или инотропной терапии, или ингаляционных сосудорасширяющих средств более чем через одну неделю после операции. Непосредственно дисфункция свидетельствует о том, что правый желудочек не обеспечивает потока крови, достаточного для наполнения левого желудочка (ЛЖ) и соответственно корректной работы АВК.

Целью рассматриваемой работы являлось моделирование изменений в гемодинамике после имплантации АВК и выявление факторов, связанных с нарушениями в работе ПЖ. Ранее уже предпринимались попытки понять механизмы, приводящие к дисфункции, на основе анализа гемодинамических показателей. Так, в работе [1] отмечено, что повышенные значения легочного сосудистого сопротивления (ЛСС) и транспульмонального градиента давления (ТГД) перед операцией наблюдаются у пациентов с дисфункцией ПЖ. В работе [2] показано, что пониженные значения ударного объема (УО) и среднего давления в легочной артерии (СДЛА) связаны с развитием дисфункции, а центральное венозное давление (ЦВД), ЛСС и ТГД – нет. Повышенное ЛСС и пониженное значение УО ассоциируются с дисфункцией, в то время как ЦВД не связано с ней [3]. Пониженное СДЛА связано с нарушением функции ПЖ [4], а повышенное ЛСС – нет. Следует отметить, что данные клинические исследования, помимо демонстрации противоречивых результатов, акцентируют внимание на гемодинамике в дооперационный период и не учитывают влияния работающего насоса. Они также не рассматривают пациентов с механической поддержкой кровообращения обоих желудочков сердца.

В то же время работы, использующие моделирование для изучения взаимодействия сердечно-сосудистой системы и АВК, акцентируют внимание либо на функции ЛЖ, либо на работе насоса.

Таким образом, рассматриваемая работа является результатом использования математического моделирования для изучения изменений в гемодинамике, отражающих последствия улучшения или ухудшения в работе правого желудочка, при наличии АВК левого желудочка сердца.

Методы моделирования

В рассматриваемой работе используется адаптированная математическая модель сердечно-сосудистой системы, опубликованная в работе [5]. Большой и малый круги кровообращения состоят из артериального, периферического и венозного сегментов, в которых гемодинамика описывается по аналогии с электрически-эквивалентной схемой [6].

Сердце, представленное левым и правым желудочками, основывается на модели «единичного волокна» («one fiber»), описанной в работах [7] и [8]. Модель устанавливает зависимость давления от объема крови в желудочке, исходя из предположения о пространственной однородности натяжения всех волокон сердечной мышцы.

В качестве АВК используется регрессионная модель насоса «HeartMate II», опубликованная в [9], в которой расход насоса определяется его скоростью вращения и перепадом давлений. Данная модель построена на основе расходных характеристик, полученных в статическом режиме, т. е. не учитывает вклад сердца в насосную функцию, когда кровь перекачивается не только насосом, но и ЛЖ, и аортальный клапан (АК) соответственно открыт. Поэтому все зависимости, полученные с работающим насосом, приводятся для скорости более 8000 об/мин, когда АК закрыт.

Исходные параметры для этих моделей основаны на литературных источниках [5], [9]. Насос подключен к левому желудочку. Все результаты получены при частоте сердцебиения 80 уд/мин. Интегрирование системы дифференциальных уравнений производилось методом BDF шестого порядка. Состояние сердечно-сосудистой системы было воспроизведено согласно работе [5]. Для

этого была разработана процедура оптимизации, использующая алгоритм Левенберга – Марквардта. При этом значение центрального венозного давления было увеличено до 2,5 мм рт. ст., а давление заклинивания в легочных капиллярах понижено до 13 мм рт. ст.

В табл. 1 приведены все гемодинамические показатели, используемые в данной статье, их сокращения, единицы измерения и формулы для расчета.

Таблица 1

Используемые гемодинамические показатели и формулы для их расчета

КСО	Конечно-систолический объем	мл	–
КДО	Конечно-диастолический объем	мл	–
СД	Систолическое давление	мм рт. ст.	–
ДД	Диастолическое давление	мм рт. ст.	–
ЦВД	Центральное венозное давление	мм рт. ст.	–
ДЗЛК	Давление заклинивания в легочных капиллярах	мм рт. ст.	–
УО	Ударный объем	мл	$УО = КДО - КСО$
ФИ	Фракция изгнания	%	$ФИ = (КДО - КСО) / КДО$
СДЛА	Среднее давление в легочной артерии	мм рт. ст.	$СДЛА = (СД + 2 \cdot ДД) / 3$
ТГД	Транспульмональный градиент давления	мм рт. ст.	$ТГД = СДЛА - ДЗЛК$
ЛСС	Легочное сосудистое сопротивление	ед. Вуда	$ЛСС = ТГД / (УО \cdot ПЖ)$
ИУР ПЖ	Индекс ударной работы правого желудочка	г/м ²	$(СДЛА - ЦВД) \times (УО \cdot ПЖ / 1,8) \cdot 0,0136$

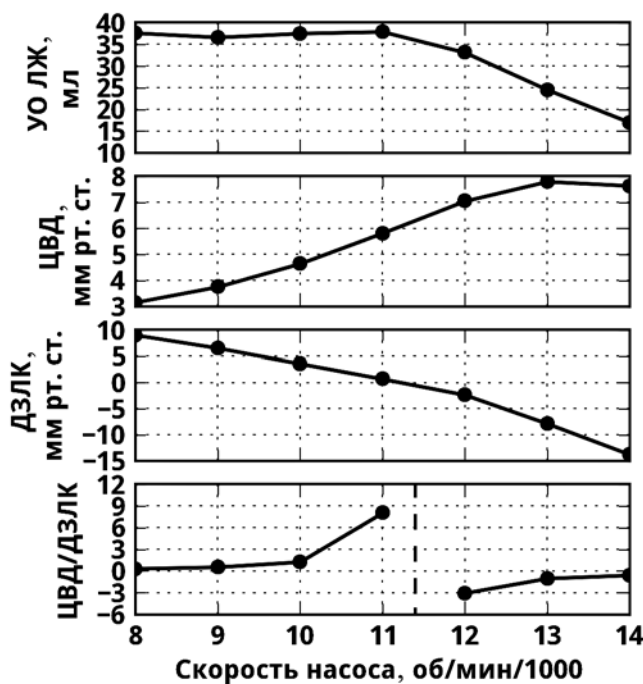


Рис. 1. Зависимость УО левого желудочка, ЦВД, ДЗЛК и отношения ЦВД/ДЗЛК от скорости насоса

Результаты

Влияние скорости насоса на изменения в гемодинамике

На рис. 1 показано изменение ударного объема левого желудочка (УО ЛЖ), центрального венозного давления (ЦВД) и давления заклинивания в легочных капиллярах (ДЗЛК) при вариации скорости насоса. Следует отметить, что в данной статье ЦВД рассматривается как аппроксимация давления в правом предсердии, а давление заклинивания в легочных капиллярах – как приближенное значение давления в левом предсердии.

После 10 000 об/мин ЦВД становится больше ДЗЛК, что иллюстрируется повышением отношения ЦВД/ДЗЛК. После 11 000 об/мин ДЗЛК становится равным нулю, что отмечено разрывом в зависимости ЦВД/ДЗЛК от скорости насоса. При 12 000 об/мин ДЗЛК падает ниже нуля; это сопровождается уменьшением УО левого желудочка, при этом отношение ЦВД/ДЗЛК становится отрицательным.

Влияние сократительной способности ПЖ на изменения в гемодинамике до и после имплантации АВК

Анализ изменений в гемодинамике до имплантации АВК производился, когда насос не был подключен к левому желудочку. Сократительная способность ПЖ варьировалась от –20 до +20 % с шагом 10 % относительно исходного значения (параметр $C_v = 0,5$ в модели сердца). Помимо рассмотренных ранее ЦВД, ДЗЛК и отношения ЦВД/ДЗЛК было добавлено еще несколько гемодинамических показателей, часто используемых для анализа сердечно-сосудистой системы при наличии АВК: ударный объем правого желудочка (УО ПЖ), фракция изгнания правого желудочка (ФИ ПЖ), индекс ударной работы правого желудочка (ИУР ПЖ), среднее давление в легочной артерии (СДЛА), транспульмональный градиент давления (ТГД) и легочное сосудистое сопротивление (ЛСС).

Результат представлен в виде диаграмм на рис. 2. Диаграммы, направленные вверх относительно нуля, связаны с повышением сократительной способности ПЖ, направленные вниз – с понижением. Подписи к диаграммам показывают, на сколько процентов относительно исходного значения, полученного при неизменной сократительной способности ПЖ, увеличилось (положительная величина) или уменьшилось (отрицательная величина) значение данного гемодинамического показателя.

С уменьшением сократительной способности ПЖ связано уменьшение всех гемодинамических показателей, кроме ЦВД и ЦВД/ДЗЛК, которые возрастают более чем на 30 % при изменении сократительной способности ПЖ на –20 %. Максимальное изменение УО ПЖ, ФИ ПЖ, СДЛА и ТГД не превышает 11 %, поэтому они считаются не связанными с нарушением работы ПЖ. Изменение ЛСС не превышает 1 % и фактически говорит о независимости от функции ПЖ.

Следует отметить, что изменение всех рассмотренных гемодинамических показателей в большей степени зависит от уменьшения сократительной способности ПЖ: так, например, при ее уменьшении на 20 % изменение ЦВД составляет 38 %, при увеличении на ту же величину – 22 %.

Анализ изменений в гемодинамике после имплантации АВК производился при подключенном насосе со скоростями 8 000 и 10 000 об/мин. Результат представлен на рис. 3.

В данном случае максимальное изменение УО ПЖ, ФИ ПЖ, СДЛА и ТГД также не превышает 11 %. Изменение ЛСС составляет не более 1 %, что говорит о независимости от функции ПЖ и скорости насоса.

Следует отметить уменьшение зависимости всех гемодинамических показателей, кроме ДЗЛК и отношения ЦВД/ДЗЛК, от вариации сократительной способности ПЖ при увеличении скорости насоса. Так, например, максимальное изменение ЦВД при 10 000 об/мин составляет 27 %, что на 5 % меньше аналогичного изменения при 8 000 об/мин.

В то же время изменению сократительной способности ПЖ на -20 % при 10 000 об/мин соответствует уменьшение ДЗЛК на 45 %, что на 26 % больше, чем при 8 000 об/мин; отношение ЦВД/ДЗЛК в этом случае увеличивается почти в два раза – до 133 %.

Влияние бивентрикулярной поддержки кровообращения на изменения в гемодинамике

На рис. 4 показаны зависимости центрального венозного давления и давления заклинивания в легочных капиллярах от скоростей насосов, подключенных к левому и правому желудочкам. Параметр, характеризующий сократительную способность, уменьшен на 20 % для ПЖ, для ЛЖ он оставлен неизменным. Диапазон скоро-

стей выбран таким образом, чтобы не допустить открытия полулунных клапанов.

При повышении скорости насоса ПЖ до значения более 7000 об/мин наблюдается падение ЦВД ниже нуля. В то же время с увеличением скорости насоса ЛЖ ЦВД начинает медленно увеличиваться. Так, например, повышение скорости насоса ЛЖ до 13 000 об/мин позволяет увеличить скорость насоса ПЖ до 8 000 об/мин при сохранении положительного значения ЦВД.

Увеличение скорости насоса ПЖ приводит к росту ДЗЛК, которое продолжает увеличиваться до 30 мм рт. ст. с уменьшением скорости насоса ЛЖ. В то же время при малых скоростях насоса ПЖ (6000...8000 об/мин) и высоких скоростях насоса ЛЖ (12000...14000 об/мин) ДЗЛК падает ниже нуля.

Обсуждение результатов

В рассматриваемой работе исследовались изменения в гемодинамике, отражающие последствия нарушения функции правого желудочка, при наличии аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка в сердце с дилатационной кардиомиопатией, воспроизведенного согласно работе [5].

Было показано, каким образом работа насоса влияет на изменение гемодинамических показателей, связанных с функцией ПЖ. С увеличением скорости насоса происходит изменение соотношения между центральным венозным давлением и давлением заклинивания в легочных капиллярах. Так, при 11 000 об/мин ЦВД становится больше давления заклинивания, что сопровождается

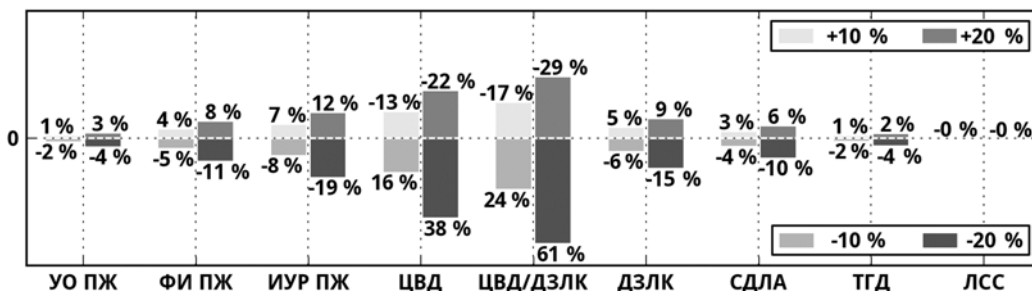


Рис. 2. Изменение гемодинамических показателей при вариации сократительной способности правого желудочка сердца

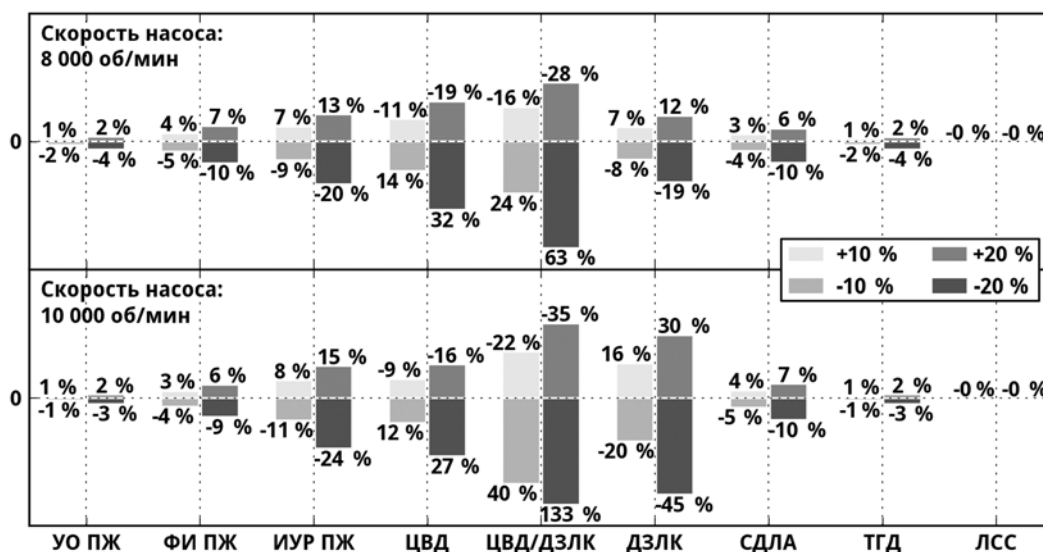


Рис. 3. Изменение гемодинамических показателей при вариации сократительной способности правого желудочка сердца и скоростях насоса 8 000 и 10 000 об/мин

увеличением отношения ЦВД/ДЗЛК и является первым признаком нарушения функции ПЖ. Поскольку в рассматриваемой работе ДЗЛК используется в качестве приближенного значения давления в левом предсердии, его падение ниже нуля при 12 000 об/мин можно объяснить недостаточностью объема крови, перекачиваемого правым желудочком и имеющегося в ЛЖ, для данного режима работы АВК. При этом ударный объем левого желудочка уменьшается, а отношение ЦВД/ДЗЛК становится отрицательным.

При анализе изменений в гемодинамике до и после имплантации АВК гемодинамические показатели, изменение которых не превышало 15 % при вариации сократительной способности ПЖ на $\pm 20\%$, считались не связанными с нарушением работы ПЖ и исключались из рассмотрения.

Пониженные значения индекса ударной работы ПЖ (ИУР ПЖ) и давления заклинивания (ДЗЛК), а также повышенные значения центрального венозного давления и отношения ЦВД/ДЗЛК связаны с уменьшением сократительной способности и соответственно нарушением функции правого желудочка до имплантации АВК. Анализ изменений этих показателей при уменьшении сократительной способности ПЖ на 20 % позволяет упорядочить их по степени уменьшения зависимости от функции ПЖ: отношение ЦВД/ДЗЛК (увеличилось на 61 %), ЦВД (увеличилось на 38 %), ИУР ПЖ (уменьшилось на 19 %) и ДЗЛК (уменьшилось на 15 %).

После имплантации АВК с дисфункцией ПЖ связаны пониженные значения ИУР ПЖ и ДЗЛК, а также повышенное ЦВД и отношение ЦВД/ДЗЛК. Однако теперь увеличение скорости насоса приводит к увеличению зависимости ДЗЛК от вариации сократительной способности ПЖ. Так, например, уменьшению сократительной способности ПЖ на 20 % соответствует уменьшение ДЗЛК на 45 % при 10 000 об/мин, что на 26 % меньше, чем при 8 000 об/мин. В этом случае упорядочивание гемодинамических показателей по степени уменьшения их зависимости от функции ПЖ выглядит следующим образом: отношение ЦВД/ДЗЛК, ДЗЛК, ЦВД и ИУР ПЖ.

Таким образом, анализ изменений в гемодинамике до и после имплантации АВК позволяет сделать следующие выводы. Отношение ЦВД/ДЗЛК можно считать универсальным показателем, увеличение которого является ранним признаком нарушений в работе ПЖ, что согласуется

с данными работы [10]. При этом повышенное ЦВД в большей степени связано с нарушением функции ПЖ до имплантации АВК. Однако после имплантации и с увеличением скорости насоса в большей степени с дисфункцией ПЖ связано пониженное значение ДЗЛК.

Следует отметить, что в рассматриваемой работе легочное сосудистое сопротивление не зависит от функции ПЖ и не является показателем нарушения его работы, что согласуется с работами [4], [10], но находится в противоречии с [1], [3].

Анализ бивентрикулярной поддержки кровообращения с уменьшенной на 20 % сократительной способностью ПЖ показал, что основной проблемой является возникновение отрицательных давлений в правом и левом предсердиях, которые представлены ЦВД и ДЗЛК соответственно. В этом случае допустимым рабочим диапазоном является следующее соотношение скоростей: 10 000...12 000 об/мин для насоса ЛЖ и 6 000...8 000 об/мин для насоса ПЖ, т. е. скорость насоса ЛЖ должна быть примерно в 1,5 раза больше скорости насоса ПЖ.

Ограничения в рассматриваемой работе прежде всего связаны с моделью насоса, которая действительна только при закрытом аортальном клапане. Это сильно уменьшает рабочий диапазон насоса и не позволяет провести полноценный анализ изменений в гемодинамике и бивентрикулярной поддержки кровообращения.

Заключение

Результаты, представленные в рассматриваемой работе, показывают изменения в гемодинамике, отражающие последствия нарушений в работе правого желудочка, при наличии аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца.

Было продемонстрировано влияние скорости насоса на изменения в гемодинамике. Первым признаком нарушения функции ПЖ оказалось изменение соотношения между ЦВД и ДЗЛК, которое сопровождалось увеличением отношения ЦВД/ДЗЛК.

Анализ изменений в гемодинамике до и после имплантации АВК позволил выявить гемодинамические показатели, наиболее зависимые от изменения сократительной способности ПЖ, и упорядочить их по степени уменьшения этой зависимости. Было установлено, что отношение ЦВД/ДЗЛК является универсальным и основным

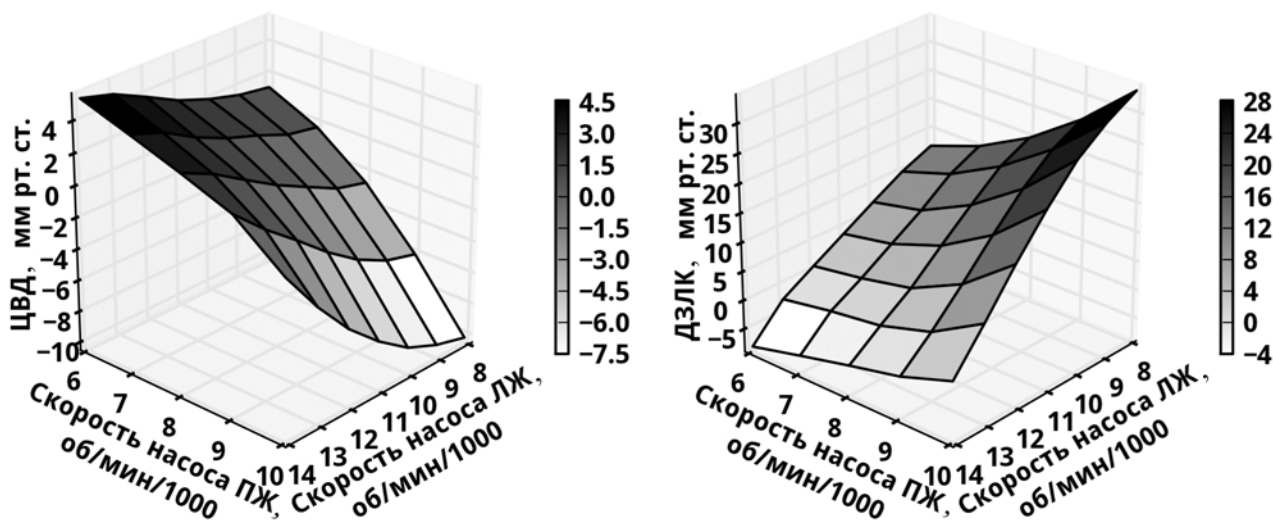


Рис. 4. Зависимость ЦВД и ДЗЛК от скоростей насосов левого и правого желудочков сердца

показателем нарушений в работе правого желудочка. При этом повышенное ЦВД в большей степени связано с нарушением функции ПЖ до имплантации АВК. Однако после имплантации и с увеличением скорости насоса в большей степени с дисфункцией ПЖ связано пониженное значение ДЗЛК.

После подключения второго насоса к правому желудочку с уменьшенной сократительной способностью был проведен анализ бивентрикулярной поддержки кровообращения. Показано, что в этом случае основной проблемой является возникновение отрицательных давлений. Был установлен допустимый рабочий диапазон насосов, при котором скорость насоса ЛЖ должна быть примерно в 1,5 раза выше скорости насоса ПЖ.

Список литературы:

1. Kato T.S., Jiang J., Schulze P.C. et al. Serial Echocardiography Using Tissue Doppler and Speckle Tracking Imaging to Monitor Right Ventricular Failure Before and After Left Ventricular Assist Device Surgery // JACC: Heart Failure. 2013. Vol. 1. № 3. PP. 216-222.
2. Matthews J.C., Koelling T.M., Pagani F.D., Aaronson K.D. The Right Ventricular Failure Risk Score: A Pre-Operative Tool for Assessing the Risk of Right Ventricular Failure in Left Ventricular Assist Device Candidates // Journal of the American College of Cardiology. 2008. Vol. 51. № 22. PP. 2163-2172.
3. Grant A.D., Smedira N.G., Starling R.C., Marwick T.H. Independent and Incremental Role of Quantitative Right Ventricular Evaluation for the Prediction of Right Ventricular Failure After Left Ventricular Assist Device Implantation // Journal of the American College of Cardiology. 2012. Vol. 60. № 6. PP. 521-528.
4. Ochiai Y., McCarthy P.M., Smedira N.G. et al. Predictors of Severe Right Ventricular Failure After Implantable Left Ventricular Assist Device Insertion: Analysis of 245 Patients // Circulation. 2002. Vol. 106. № 12. Suppl. 1. PP. 198-202.
5. Martina J.R., Bovendeerd P.H., de Jonge N. et al. Simulation of Changes in Myocardial Tissue Properties during Left Ventricular Assistance with a Rotary Blood Pump // Artificial Organs. 2013. Vol. 37. № 6. PP. 531-540.
6. Kokalari I., Karaja T., Guerrisi M. Review on lumped parameter method for modeling the blood flow in systemic arteries // Journal of Biomedical Science & Engineering. 2013. Vol. 6. № 1.
7. Arts T., Bovendeerd P., Prinzen F., Reneman R. Relation between left ventricular cavity pressure and volume and systolic fiber stress and strain in the wall // Biophysical Journal. 1991. Vol. 59. № 1. PP. 93-102.
8. Bovendeerd P.H., Borsje P., Arts T., Vosse F.N. Dependence of Intramyocardial Pressure and Coronary Flow on Ventricular Loading and Contractility: A Model Study // Annals of Biomedical Engineering. 2006. Vol. 34. № 12. PP. 1833-1845.
9. Cox L.G., Loerakker S., Rutten M.C. et al. A Mathematical Model to Evaluate Control Strategies for Mechanical Circulatory Support // Artificial Organs. 2009. Vol. 33. № 8. PP. 593-603.
10. Kormos R.L., Teuteberg J.J., Pagani F.D. et al. Right ventricular failure in patients with the HeartMate II continuous-flow left ventricular assist device: Incidence, risk factors, and effect on outcomes // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2010. Vol. 139. № 5. PP. 1316-1324.

Дмитрий Сергеевич Петухов,
аспирант,

Сергей Васильевич Селищев,

д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой,
кафедра биомедицинских систем (БМС),

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва,

e-mail: dmitry.spetukhov@gmail.com

Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов (МНТО ПМ) – издатель журнала «ПРИБОРЫ»

Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов издает отраслевой научно-технический и производственный журнал «ПРИБОРЫ», отражающий состояние современного российского рынка приборостроительной продукции, интересы предприятий и потребителей, результаты деятельности разработчиков новых изделий и систем автоматизации, аналитические обзоры состояния этой сферы науки, техники и производства. Журнал ориентирован на широкий круг специалистов промышленности, предпринимателей, работников фирм и вузов, заинтересованных в систематическом получении актуальной и достоверной информации о выпускаемых в России и странах СНГ приборах и средствах автоматизации, о новых изделиях, предлагаемых потребителям, а также о действующих нормативных документах и рекомендациях. Журнал публикует материалы о новых методах измерений, сбора и представления измерительной и контрольной информации, новых конструкторских и технологических решениях, новых технологиях и материалах, составляющих основу создания новой конкурентоспособной продукции, осуществляет систематические публикации материалов по созданию и эксплуатации систем автоматизации различного назначения для отраслей промышленности, науки, по информационным технологиям, программно-техническим комплексам. Публикуется информация о профиле и продукции отдельных приборостроительных предприятий, их новых разработках, производственных и технологических возможностях и интересах. Тесные связи нашего Общества и редакции с Международной конфедерацией по измерениям (ИМЕКО) позволяют постоянно знакомить наших читателей с материалами этой весьма авторитетной международной профессиональной организации.

Журнал зарегистрирован в ВАК РФ как научное издание.

Журнал выходит 12 раз в год и распространяется по подписке.
Индекс журнала в каталоге Агентства «Роспечать» – 79727.

В редакции можно оформить льготную подписку на 2014 год.
Стоимость годовой подписки (12 экз.) – 11400 руб.

Заявки принимаются по тел./факсу: (495) 695-10-71
или по e-mail: kavalerov@mail.ru.

Более подробная информация о журнале «Приборы» – на сайте: www.pribory-smi.ru.