

6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Скрипаль А.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 1. С. 86-94.
8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Метод измерения внутриглазного давления с помощью полупроводникового лазерного автодина // Письма в ЖТФ. 2012. № 3. С. 69-74.
9. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Исследование упругих свойств глаза на модели и in vivo с помощью полупроводникового лазерного автодина // Российский журнал биомеханики. 2012. № 4 (58). С. 8-21.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю. Исследование упругих свойств сферической оболочки с помощью полупроводникового лазерного автодина // ЖТФ. 2012. № 6. С. 156-159.

Дмитрий Александрович Усанов,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой физики твердого тела,
Анатолий Владимирович Скрипаль,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой медицинской физики,
Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского,
Татьяна Борисовна Усанова,
канд. мед. наук, врач детского отделения
клиники глазных болезней,
ГОУ ВПО «Саратовский ГМУ
им. В.И. Разумовского» Росздрава,
Сергей Юрьевич Добдин,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского,
г. Саратов,
e-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

А.А. Пуговкин, С.В. Селищев, Д.В. Тельшев

Стенд моделирования сердечно-сосудистой системы для испытаний аппаратов вспомогательного кровообращения

Аннотация

Описывается стенд сердечно-сосудистой системы человека, предназначенный для проведения испытаний аппаратов вспомогательного кровообращения. Стенд представляет собой гидравлический контур, моделирующий работу большого и малого кругов кровообращения. Стенд состоит из 2 искусственных желудочков, 4 закрытых резервуаров, пневматической системы управления, 1 датчика расхода жидкости, 10 датчиков давления, 2 дросселей для обеспечения сосудистого сопротивления. Разработанный стенд позволяет добиться гидродинамических характеристик, сопоставимых с работой сердца человека. Данный стенд может быть использован для проведения доклинических испытаний аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца, правого желудочка сердца, обоих желудочков сердца и полностью искусственного сердца.

Введение

На терминальных стадиях развития сердечной недостаточности медикаментозные и терапевтические методы не приносят должного результата и единственным способом сохранить жизнь пациента становится трансплантация сердца либо имплантация устройства, призванного заместить или полностью взять на себя функцию сердца. К устройствам частичного замещения функции сердца относятся аппараты вспомогательного кровообращения (АВК). На сегодняшний день наибольшее распространение получили АВК, в основе работы которых используются осевые или центробежные насосы неппульсирующего типа [1], [2]. Использование данных систем в 2009 году превысило количество трансплантаций сердца в США [3]. С целью проведения доклинических испытаний АВК используют специальные стенды сердечно-сосудистой системы [4], [5]. В России в последние годы активно ведутся исследования в области АВК [6]-[9]. Для разработки, совершенствования и проведения испытаний АВК был спроектирован и изготовлен стенд сердечно-сосудистой системы, позволяющий воспроизводить различные состояния физиологической сердечно-сосудистой системы.

Основная часть

Стенд сердечно-сосудистой системы состоит из гидравлического контура, пневматической системы управления и измерительной системы, фиксирующей показани

ния датчиков давления и потока. На рис. 1 и 2 представлены схема и фотоизображение гидравлического контура. Гидравлический контур состоит из двух искусственных желудочков и четырех закрытых резервуаров. Все составляющие гидравлического контура последовательно соединены магистралями гибких лабораторных трубок из поливинилхлорида (TYGON E-3603; «Compagnie de Saint-Gobain», Курбева, Иль-де-Франс, Франция), имеющих внутренний диаметр 12,7 мм. Левый (80 мл) и правый (72 мл) искусственные желудочки («Medos VAD»; «Medos Medizintechnik AG», Штольберг, Германия) являются мембранными насосами, имитирующими сократительную деятельность сердца с помощью пневматической системы управления. Каждый искусственный желудочек имеет входной и выходной клапаны, необходимые для предотвращения изменения направления потока жидкости в контуре.

Пневматическая система управления состоит из пневматической станции и пневматического привода. Пневматическая станция имеет шкалу давления, тумблер переключения режимов работы и ручки регулирования уровня давления и разрежения. В процессе работы пневматическая станция одновременно создает давление в 0,5 атм и разрежение в –0,15 атм, необходимые для работы пневматического привода. Пневматический привод распределяет давление и разрежение со своих входов на выходы, предназначенные для левого желудочка и правого желудочка, таким образом заставляя мембрану искусственных желудочков колебаться с определенными ампли-

тудой и частотой. Пневматический привод позволяет задавать следующие параметры левого и правого желудочков: давление в течение систолы, давление в течение диастолы, продолжительность систолы, частота колебаний мембраны. Параметры пневматического привода для моделирования здорового состояния сердечно-сосудистой системы приведены в *табл. 1*.

Закрытые резервуары воспроизводят сконцентрированные параметры аорты, полых вен, легочной артерии и легочных вен. Каждый закрытый резервуар имеет номинальный объем 2000 мл и снабжен дополнительным

выходом для регулирования давления воздуха внутри резервуара. Давление регулируется нагнетанием и разрежением воздуха с помощью медицинского шприца (BD Perfusion 50 ml syringe; «Becton, Dickinson and Company», Франклин Лейкс, Нью-Джерси, США) и измеряется с помощью 4 датчиков давления (MPX5050GP; «Freescale Semiconductor», Остин, Техас, США). Параметры закрытых резервуаров для моделирования здорового состояния сердечно-сосудистой системы приведены в *табл. 2*. В качестве жидкости в гидравлическом контуре используется вода, общий объем которой составляет 5140 мл.

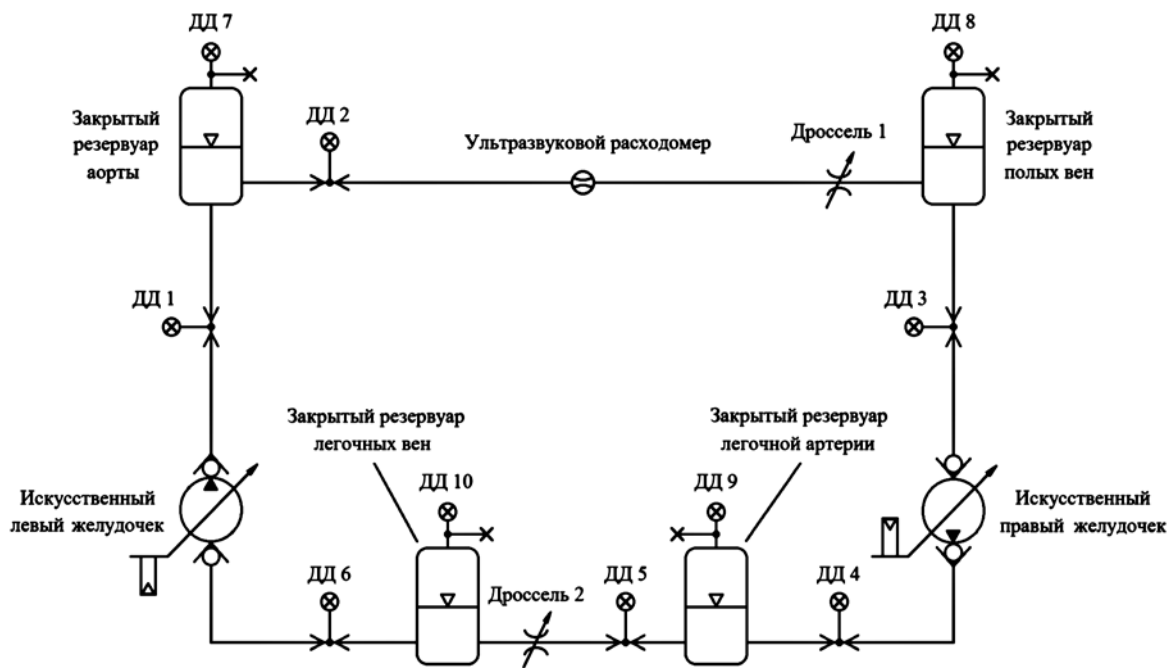


Рис. 1. Схема гидравлического контура стенда сердечно-сосудистой системы человека, где ДД – датчик давления

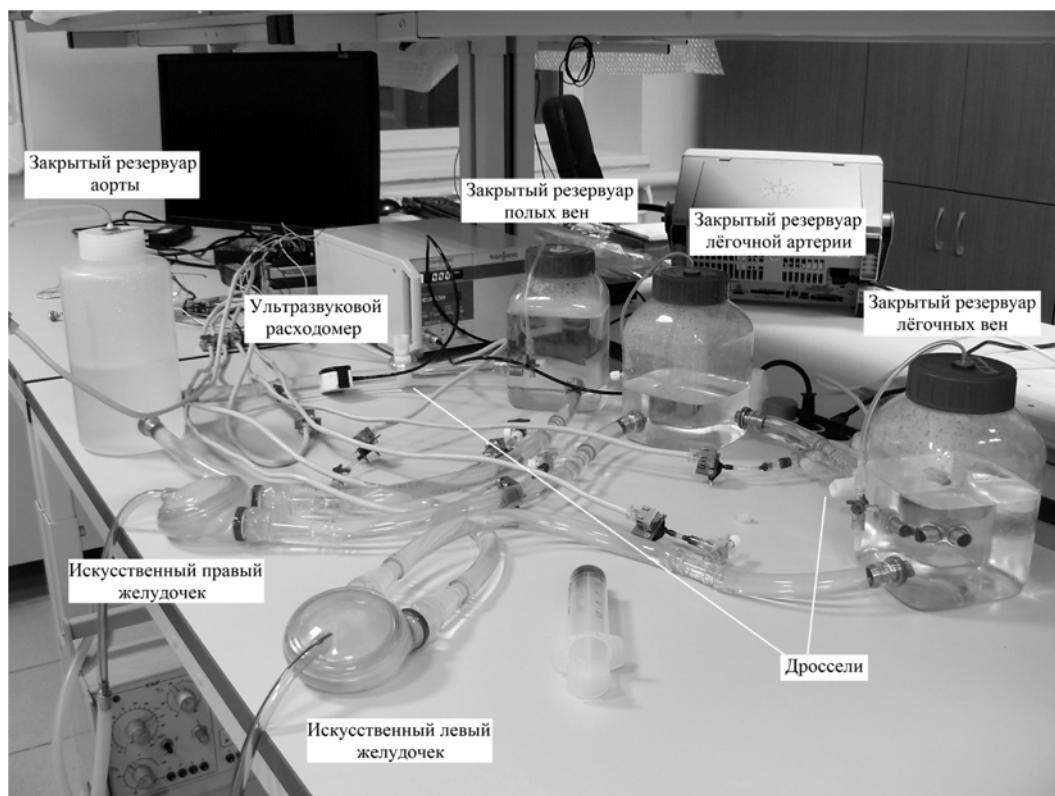


Рис. 2. Фотоизображение гидравлического контура стенда сердечно-сосудистой системы человека

Таблица 1

Параметры пневматического привода

Желудочек	Параметры			
	P_c , мм рт. ст.	P_d , мм рт. ст.	τ_c , % от T	f , уд/мин
Левый	200	-7	30	60
Правый	80	-5	35	

В таблице приняты следующие обозначения: P_c – давление в течение систолы; P_d – давление в течение диастолы; τ_c – продолжительность систолы; f – частота колебаний мембраны; T – длительность сердечного цикла.

Таблица 2

Параметры закрытых резервуаров

Резервуар	Параметры			
	V_* , мл	V_b , мл	p_b , мм рт. ст.	C , мл/мм рт. ст.
Аорта	790	1210	775,7	1,56
Полые вены	1415	585	772,7	0,76
Легочная артерия	965	1035	775,1	1,33
Легочные вены	1550	450	771,8	0,58

В таблице приняты следующие обозначения: V_* – объем жидкости в резервуаре; V_b – объем воздуха в резервуаре; p_b – абсолютное давление воздуха в резервуаре; C – гидродинамическая емкость резервуара.

Таким образом, левый искусственный желудочек, закрытый резервуар аорты и закрытый резервуар полых вен воспроизводят большой круг кровообращения, а правый искусственный желудочек, закрытый резервуар легочной артерии и закрытый резервуар легочных вен – малый круг кровообращения.

Сосудистое сопротивление большого и малого кругов кровообращения моделируется с помощью двух пла-

стмассовых дросселей, принцип действия которых заключается в пережатии гибкой трубки, посредством чего достигается требуемое гидравлическое сопротивление. Как видно из рис. 1, дроссель, моделирующий сопротивление большого круга кровообращения, располагается между закрытым резервуаром аорты и закрытым резервуаром полых вен, а дроссель, моделирующий сопротивление малого круга кровообращения, – между закрытым резервуаром легочной артерии и закрытым резервуаром легочных вен.

Измерительная система включает в себя систему измерения давления, систему измерения расхода и систему обработки данных. Система измерения давления состоит из 10 датчиков давления (MPX5050GP; «Freescale Semiconductor», Остин, Техас, США) и платы-концентратора, к которой подключаются датчики. Давление жидкости в гидравлическом контуре измеряется с помощью 6 датчиков, подключаемых к переходникам (1/2"×1/2" LL connector; «Terumo Corporation», Токио, Япония). Датчики измеряют давление на входах и выходах левого и правого искусственных желудочков, а также на выходах закрытого резервуара аорты и закрытого резервуара легочной артерии. Система измерения расхода представляет собой ультразвуковой расходомер, состоящий из датчика расхода (ME-11PXL Clamp-on Tubing Flowsensors; «Transonic Systems Inc.», Итака, Нью-Йорк, США), многоканального терминала (T402 Multi-Channel Research Console; «Transonic Systems Inc.», Итака, Нью-Йорк, США), к которому подключается модуль для регистрации потока через трубки (TS410 Tubing Flow Module; «Transonic Systems Inc.», Итака, Нью-Йорк, США).

Выходные сигналы систем измерения, полученные с датчиков, поступают в систему обработки данных, которая включает в себя аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер (ПК). Аналого-цифровой преобразователь состоит из шасси (NI 9174; «National Instruments Corporation», Остин, Техас, США)

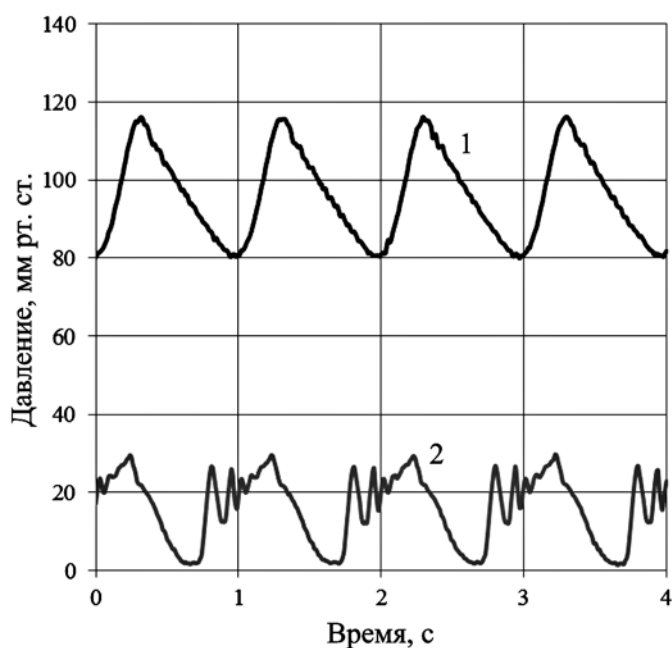


Рис. 3. Распределение давлений большого круга кровообращения: 1 – давление в аорте; 2 – давление на входе ИГЖ

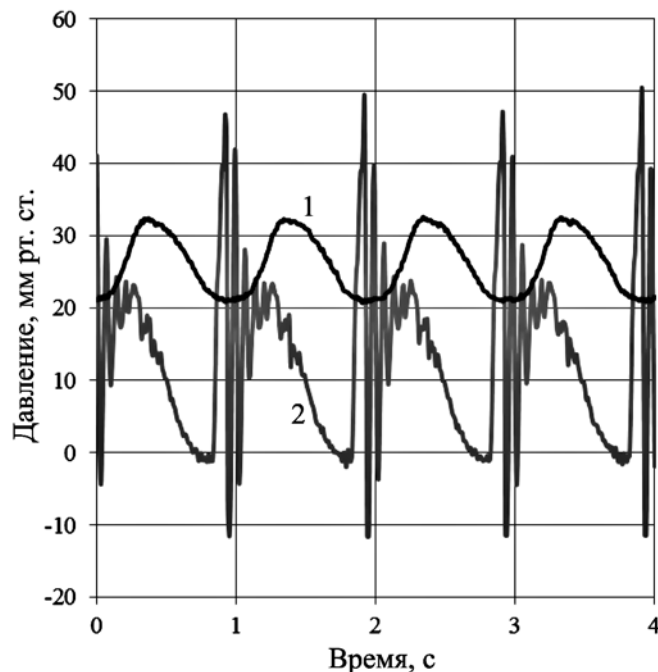


Рис. 4. Распределение давлений в малом круге кровообращения: 1 – давление в легочной артерии; 2 – давление на входе ИЛЖ

и подключаемого к нему модуля аналоговых входов (NI 9205; «National Instruments Corporation», Остин, Техас, США). Через последовательный интерфейс USB данные с АЦП поступают на ПК, где происходит их дальнейшая программная обработка. Частота дискретизации АЦП составляет 100 Гц.

На рис. 3 и 4 представлены графики распределения давлений в стенде сердечно-сосудистой системы. Аортальное давление составляет 117...80 мм рт. ст., давление в легочной артерии составляет 32...21 мм рт. ст. Среднее венозное давление большого и малого кругов кровообращения, соответствующее давлению на входах искусственных правого и левого желудочков, составляет 16 и 12 мм рт. ст. соответственно. Скорость потока в системе при данном распределении давлений составляла 4,5 л/мин.

Дребезжание встроенных в искусственные желудочки клапанов вызывает неконтролируемые скачки давления, что обуславливает повышение среднего уровня венозного давления большого и малого кругов кровообращения. Полученные данные коррелируют с распределением давления в сердечно-сосудистой системе взрослого человека [10].

Заключение

Разработанный стенд позволяет моделировать работу сердечно-сосудистой системы и довольно точно описывает распределение давлений в сердечно-сосудистой системе, что позволяет использовать его для проведения доклинических испытаний АВК.

Полученные в ходе работы результаты будут являться основой для проведения дальнейших исследований в области проектирования стендов сердечно-сосудистой системы и проведения испытаний АВК. На следующих стадиях работы планируется моделирование сердечной недостаточности, проведение исследований при интеграции в систему АВК левого/правого желудочков, АВК правого и левого желудочков сердца одновременно, полностью искусственного сердца.

Коллектив авторов выражает благодарность Г.П. Иткину за неоценимую помощь при проведении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»). Соглашение № 14.578.21.0057 от 23 сентября 2014 г.

Список литературы:

1. Miller L.W., Guglin M., Rogers J. Cost of Ventricular Assist Devices: Can We Afford The Progress? // Circulation. 2013 Feb 12. Vol. 127 (6). PP. 743-748.
2. Garbade J., Bittner H.B., Barten M.J., Mohr F.-W. Current Trends in Implantable Left Ventricular Assist Devices // Cardiology Research and Practice. Vol. 2011. Article ID 290561.
3. Mulloy D.P. et al. Orthotopic heart transplant versus left ventricular assist device: A national comparison of cost and survival // J. Thorac. Cardiovasc. Surg. 2013 Feb. Vol. 145 (2). PP. 566-573.
4. Nestler F., Bradley A.P., Wilson S.J., Timms D.L., Frazier O.H., Cohn W.E. A Hybrid Mock Circulation Loop for a Total Artificial Heart // Artificial Organs. 2014. Vol. 38. PP. 775-782.
5. Gräf F., Finocchiaro T., Laumen M., Mager I., Steinseifer U. Mock Circulation Loop to Investigate Hemolysis in a Pulsatile Total Artificial Heart // Artificial Organs. 2015.
6. Иткин Г.П., Шемакин С.Ю., Шохина Е.Г. и др. Результаты экспериментальных исследований на телятах первого отечественного имплантируемого осевого насоса // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2013. № 3. С. 49-58.
7. Гомье С.В., Иткин Г.П., Шемакин С.Ю. и др. Первый опыт клинического применения отечественного аппарата вспомогательного кровообращения на базе имплантируемого осевого насоса для двухэтапной трансплантации сердца // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2013. № 3. С. 92-101.
8. Петухов Д.С., Тельшиев Д.В. Моделирование изменений в динамике течения крови через имплантируемый осевой насос // Медицинская техника. 2014. № 6. С. 44-47.
9. Данилов А.А., Миндубаев Э.А. Влияние частотных характеристик колебательных контуров и источника питания на эффективность беспроводной передачи энергии при помощи индуктивной связи // Медицинская техника. 2014. № 6. С. 27-29.
10. Klabunde R.E. Cardiovascular Physiology Concepts. – Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

*Александр Анатольевич Пуговкин,
инженер,*

*Сергей Васильевич Селищев,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой,*

кафедра биомедицинских систем,

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Дмитрий Викторович Тельшиев,

канд. техн. наук, руководитель,

отдел высокотехнологичных медицинских изделий,

ОАО «Зеленоградский

инновационно-технологический центр» (ЗИТЦ),

г. Зеленоград,

email: dmitry.spetukhov@gmail.com

* * * * *