

DOI: 10.15825/1995-1191-2025-4-103-109

РАЗВИТИЕ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

А.И. Сырбу¹, А.О. Шевченко^{1, 2}, Н.В. Грудинин¹, А.С. Бучнев¹

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

² ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Российская Федерация

Цель работы: обоснование путей улучшения классического гемодинамического стенда, широко применяемого для моделирования подключения систем механической поддержки кровообращения (МПК). **Материалы и методы.** Гемодинамический стенд состоит из нескольких емкостей и сопротивлений, имитирующих большой и малый круги кровообращения, для исследования физиологических состояний при сердечной недостаточности (СН). В состав стенда включены насос вспомогательного кровообращения и генератор пульсирующего потока. **Результаты.** На разработанной математической модели сердечно-сосудистой системы воспроизведены физиологические состояния с подключением насоса и генератор пульсирующего потока. Проведена сравнительная оценка получаемых результатов, определены достоинства и недостатки различных методов моделирования. Сформулированы и обоснованы пути развития гемодинамического стенда с целью улучшения моделирования влияния МПК на основные гемодинамические параметры пациента.

Ключевые слова: система механической поддержки кровообращения, гемодинамический стенд, математическая модель.

HYBRID HEMODYNAMIC MODELING FOR OPTIMIZATION OF MECHANICAL CIRCULATORY SUPPORT SYSTEMS

A.I. Syrbu¹, A.O. Shevchenko^{1, 2}, N.V. Grudinin¹, A.S. Buchnev¹

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

² Sechenov University, Moscow, Russian Federation

Objective: to propose and justify approaches for improving the classical hemodynamic test bench, widely used to model the integration of mechanical circulatory support (MCS) systems. **Materials and methods.** The hemodynamic test bench consisted of multiple containers and resistors simulating systemic and pulmonary circulation, enabling the study of physiological conditions in heart failure (HF). The setup also included an auxiliary circulatory support pump and a pulsatile flow generator. **Results.** A mathematical model of the cardiovascular system was developed, capable of reproducing physiological states under conditions of pump-assisted circulation and pulsatile flow. Comparative evaluation of experimental and modeling results highlighted the advantages and limitations of different modeling methods. **Conclusion.** Based on these findings, strategies for further development of the hemodynamic test bench, aimed at enhancing its ability to simulate the impact of mechanical circulatory support on key hemodynamic parameters, were formulated and justified.

Keywords: mechanical circulatory support, hemodynamic test bench, mathematical modeling.

Для корреспонденции: Сырбу Арсений Иванович. Адрес: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 1. Тел. (915) 453-98-55. E-mail: s_arseniy@outlook.com

Corresponding author: Arseniy Syrbu. Address: 1, Shchukinskaya str., Moscow, 123182, Russian Federation. Phone: (915) 453-98-55. E-mail: s_arseniy@outlook.com

ВВЕДЕНИЕ

Современная трансплантология все в большей степени опирается на инженерные решения, обеспечивающие поддержку функций жизненно важных органов, в том числе сердца [1, 2]. Одной из наиболее быстро развивающихся областей является создание и оптимизация систем механической поддержки кровообращения (МПК), таких как экстракорпоральные и имплантируемые насосы пульсирующего и непрерывного потока, дополнительные устройства получения пульсирующего потока крови [2–6].

Несмотря на значительные успехи в данной сфере, одним из ключевых этапов при разработке и внедрении систем МПК остается этап предварительного моделирования и испытаний. Необходимость воспроизведения физиологических условий, в которых будет функционировать устройство, требует высокой степени достоверности, как с точки зрения гидродинамики, так и с точки зрения системной физиологии [7, 8]. Это определяет целесообразность непрерывного совершенствования существующих моделирующих стендов не только с учетом особенностей новых технических устройств, но и с привлечением современных технологий математического моделирования.

Целью настоящей работы является обоснование предложений по развитию моделирующих комп-

лексов на примере гемодинамического стенда, созданного и применяемого в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова» [4, 5], с учетом полученных авторами результатов моделирования, валидации и оптимизации параметров МПК, включая новое техническое устройство генерации пульсирующего потока [9–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гемодинамический стенд включает в себя имитатор аорты (легочной артерии), системного и легочного гидравлического сопротивления, предсердных резервуаров, осевого насоса, имитирующего работу левого (правого) желудочков сердца, имитатора искусственного желудочка сердца с пневматическим приводом и системой датчиков давления и расхода. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 1.

Физическая часть моделирующего комплекса – гемодинамического стенда позволяет воспроизводить ключевые режимы работы сердечно-сосудистой системы с использованием механических и гидравлических компонентов. Для более гибкой настройки, учета индивидуальных физиологических характеристик и реализации сложных сценариев взаимодействия с устройствами МПК разработана математическая модель (ММ), которая дополнительно позволяет

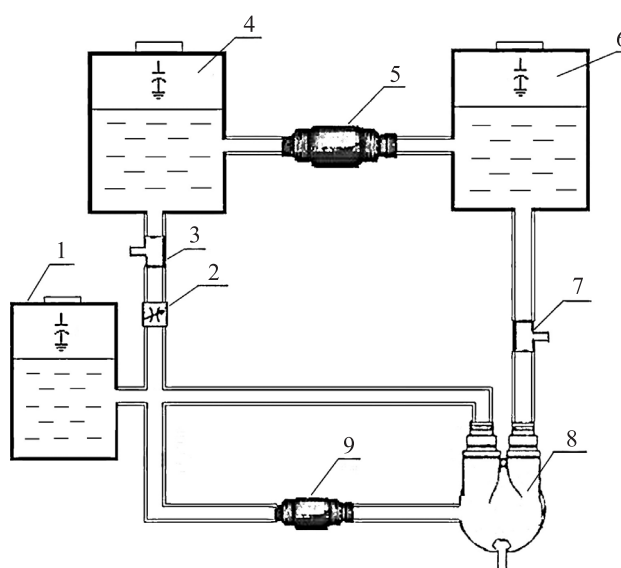


Рис. 1. Принципиальная схема гемодинамического стенда: 1 – артериальная емкость; 2 – системное гидравлическое сопротивление; 3 – датчик измерения артериального или легочного давления; 4 – венозный резервуар; 5 – насос непрерывного потока, имитирующий большой или малый круг кровообращения; 6 – резервуар, имитирующий систему «легочные вены – левое предсердие»; 7 – датчик измерения давления в предсердии; 8 – искусственный желудочек сердца; 9 – испытуемый насос

Fig. 1. Schematic diagram of the hemodynamic test bench: 1 – arterial reservoir; 2 – systemic hydraulic resistance; 3 – arterial or pulmonary pressure sensor; 4 – venous reservoir; 5 – continuous-flow pump simulating systemic or pulmonary circulation; 6 – reservoir simulating the pulmonary vein – left atrium system; 7 – atrial pressure sensor; 8 – artificial heart ventricle; 9 – test VAD pump

обеспечить возможность прогнозирования изменений в гемодинамике при варьировании параметров устройств, таких как насос и генератор пульсирующего потока (ГПП) [9, 10].

Структура разработанной ММ (рис. 2) состоит из следующих элементов: имитатора левого желудочка сердца, левого предсердия, аортальной, периферической и венозной секций, а также коронарных сосудов и барорецепторной регуляции, контуров регуляции кислородного долга и регуляции частоты сердечных сокращений, а также аортального и митрального клапанов. Кроме того, пунктиром выделены блоки, описывающие работу насоса непрерывного потока и генератора пульсирующего потока [11].

На схеме штриховыми линиями выделены добавленные элементы: насос непрерывного потока, устройства генерации пульсирующего потока и элемент, моделирующий возникновение разрежения в

левом желудочке сердца. Включение рассмотренных элементов, описывающих особенности устройств механической поддержки, в разработанную выше ММ сердечно-сосудистой системы, позволяет учесть влияние их параметров на основные гемодинамические характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования потока через систему механической поддержки кровообращения, полученные на гемодинамическом стенде, представлены на рис. 3.

Результаты моделирования, полученные на математической модели при моделировании тех же состояний, представлены на рис. 4.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что хотя зависимости качественно и количественно близки, есть гидродинамические особенности,

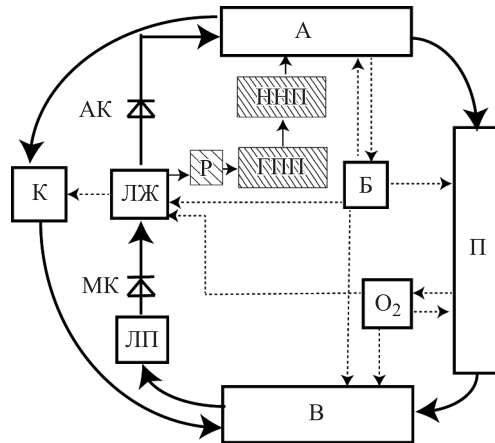


Рис. 2. Структурная схема математической модели сердечно-сосудистой системы с механической поддержкой кровообращения. ЛЖ – левый желудочек; ЛП – левое предсердие; АО – аортальная секция; П – периферическая секция; В – венозная секция; К – коронарные сосуды; Б – барорецепторная регуляция; O_2 – контур регуляции кислородного долга; АК – аортальный клапан; МК – митральный клапан; ННП – насос непрерывного потока; ГПП – генератор пульсирующего потока

Fig. 2. Structural diagram of the mathematical model of the cardiovascular system with mechanical circulatory support. ЛЖ – left ventricle; ЛП – left atrium; АО – aortic section; П – peripheral circulation; В – venous section; К – coronary vessels; Б – baroreceptor regulation; O_2 – oxygen debt regulation circuit; АК – aortic valve; МК – mitral valve; ННП – continuous-flow pump; ГПП – pulsatile-flow generator

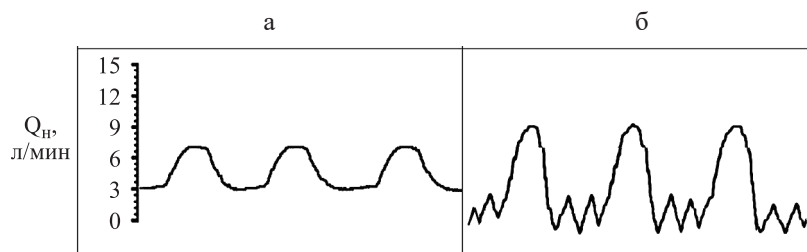


Рис. 3. Зависимость потока через насос в условиях непрерывного (а) и при подключении пульсатора (б), полученная на гемодинамическом стенде. Интервал равен 1 с. Q_n – производительность насоса (л/мин)

Fig. 3. Dependence of flow through the pump under continuous conditions (а) and with a pulsator connected (б), obtained on a hemodynamic stand. The interval is 1 s. Q_n is the pump capacity (L/min)

которые не учитываются моделью. В частности, модель с сосредоточенными параметрами не может учесть турбулентные потоки, возникающие при переходе от систолы к диастоле, не учитывает реологические свойства крови.

С другой стороны, построенный гемодинамический стенд в текущем виде не позволит воспроизводить отдельные физиологические эффекты, например, переход из состояния покоя в состояние физической нагрузки. Указанные ограничения характерны для всех гемодинамических стендов подобного вида.

В связи с этим в последние годы в мировой практике усиливается интерес к гибридным моделирующим стендам, которые объединяют в себе как гемодинамический стенд, так и математическую модель с системой управления [12–18].

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать ряд предложений по совершенствованию гемодинамического стенда, разработанного в лаборатории биотехнических систем ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова», а также повышения эффективности применения систем механической поддержки кровообращения.

Целью совершенствования стенда является создание симуляционной стендовой системы, обеспечивающей возможность моделирования состояний сердечно-сосудистой системы с учетом сердечной недостаточности, других патологий, уровня физической нагрузки, наличия систем МПК, их характеристик и режимов функционирования. При этом, как показывают результаты математического моделирования, обязательным является учет механизмов нейрогуморальной и барорецепторной регуляции.

Прежде всего целесообразно провести замену аналогового модуля, управляющего имитатором сердца, на цифровой, перепрограммируемый с возможностью управления в реальном масштабе времени. При этом множество алгоритмов управления имитатором сердца может быть предварительно сформировано и апробировано на разработанной в настоящей работе ММ сердечно-сосудистой системы.

Дополнительно в состав стенда необходимо включить управляемые гидродинамические сопротивления и датчики давления, что позволит сформировать цепи обратной связи для учета механизмов нейрогуморальной и барорецепторной регуляции, аналогично тому, как это было реализовано в разработанной ММ сердечно-сосудистой системы.

Кроме того, целесообразны разработка и создание макета генератора пульсирующего потока с переменным управляемым давлением внутри камеры. Это позволит осуществлять оперативную настройку параметров генератора для формирования потока крови с физиологическими характеристиками, соответствующими состоянию пациента. При этом параметры управляющих сигналов предварительно определяются на ММ устройства.

Разработанная математическая модель может явиться основой при создании перспективного стенда гибридного (полунатурного) моделирования. При этом описывающая сердечно-сосудистая система реализуется в виде гемодинамического стенда, а моделирование регуляторных механизмов будет осуществляться с применением математической модели, на вход которой будут подаваться текущие значения давления, потока и др. Обработка этих значений в режиме реального времени позволит формировать управляющие сигналы с последующей корректировкой параметров (сопротивлений, давлений) элементов стенда.

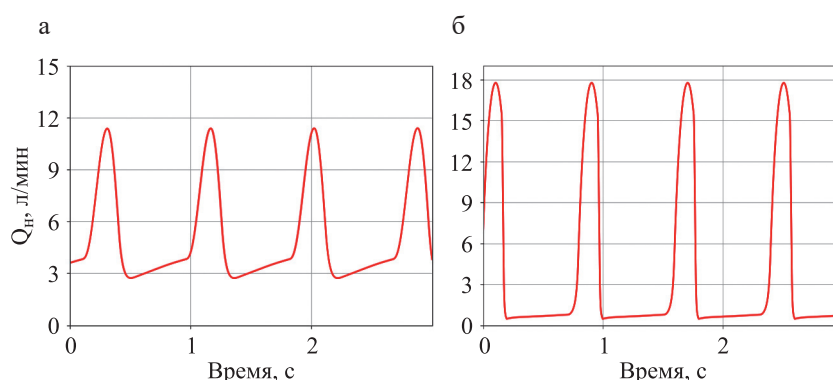


Рис. 4. Зависимость потока через насос в условиях непрерывного (а) и при подключении пульсатора (б), полученная на математической модели. Интервал равен 1 с. Q_n – производительность насоса (л/мин)

Fig. 4. Dependence of the flow through the pump under continuous conditions (a) and with a pulsator connected (б), obtained using a mathematical model. The interval is 1 s. Q_n is the pump capacity (L/min)

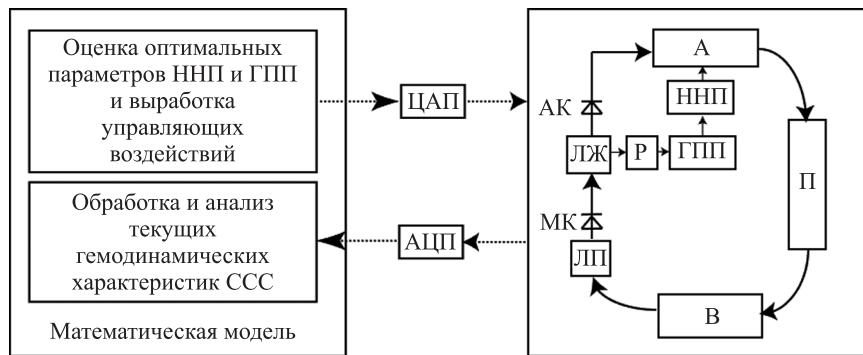


Рис. 5. Структурная схема перспективного стенда гибридного (полунатурного) моделирования

Fig. 5. Structural diagram of the proposed hybrid (semi-natural) simulation test bench

Общее описание предлагаемого подхода представлено на рис. 5, где сплошными линиями изображены потоки жидкости, а пунктирными – управляющие сигналы от компьютерной части и обратно. Схожий подход был рассмотрен в работе [19].

Разработан алгоритм работы на таком стенде:

- 1) параметры модели и стенда приводятся в режим воспроизведения СН;
- 2) расходно-напорная характеристика исследуемого МПК вводится в модель;
- 3) параметры стенда подстраиваются таким образом, чтобы давления и потоки соответствовали клиническим данным;
- 4) подключается к генератору пульсирующего потока;
- 5) проводятся серии экспериментов, при которых изменяются параметры генератора пульсирующего потока – давление открытия/закрытия и сопротивление;
- 6) полученные результаты аппроксимируются, и проводится поиск оптимальных значений параметров давления в камере генератора пульсирующего потока и максимального сопротивления генератора и др.;
- 7) параметры стенда приводятся в соответствие с полученными оптимальными значениями;
- 8) выполняется серия проверок полученных значений.

Важнейшим элементом перспективной компьютерной модели, входящей в состав стенда гибридного (полунатурного) моделирования, должна стать модель автоматического анализа гемодинамических характеристик, распознавания на этой основе состояний сердечно-сосудистой системы и адаптивного управления параметрами систем МПК в режиме реального времени. Построение такой компьютерной модели возможно на основе, например, многослойных нейросетей и реализации алгоритмов машинного обучения.

В качестве первоочередных исследовательских задач, для решения которых может быть использован предложенный стенд гибридного моделирования, целесообразно рассмотреть следующие:

- 1) исследование алгоритмов модуляции ЧВР для повышения пульсового давления;
- 2) исследование алгоритмов модуляции ЧВР для адаптации к физической нагрузке и другим состояниям;
- 3) исследование параметров устройств формирования пульсирующего потока типа ГПП и их оптимизация.

Таким образом, математическое моделирование сердечно-сосудистой системы с учетом особенностей применяемых систем МПК позволяет проводить исследования различных существующих и перспективных моделей насосов непрерывного потока и генератора пульсирующего потока, а также изучать влияние различных режимов работы таких устройств на сердечно-сосудистую систему в различных состояниях. Это дает возможность создания и анализа алгоритмов управления системами МПК, адаптивных к нагрузке, что будет способствовать повышению качества устройств.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов моделирования на гемодинамическом стенде и на математической модели показывают, что для более точного описания взаимодействия систем МПК и сердечно-сосудистой системы необходим гибридный подход, который, с одной стороны, позволит учесть эффекты в реальном устройстве, а с другой стороны, внесет необходимые обратные связи в гидродинамическую систему. Совместное использование компонентов в рамках единого гибридного комплекса позволит реализовать замкнутый контур управления, в котором данные, полученные с реального стенда, поступают в математическую модель, обрабатываются и используются

для генерации управляющих воздействий в режиме реального времени. Такой подход существенно расширяет функциональные возможности стенда и обеспечивает высокий уровень физиологической достоверности экспериментов.

Проведенный анализ литературных источников также подтверждает возрастающий интерес исследователей к созданию подобных гибридных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие гибридных моделирующих комплексов представляет собой значительный шаг вперед в области инженерной поддержки систем вспомогательного кровообращения. Интеграция физического стенда с адаптивной математической моделью позволяет достичь нового уровня точности и гибкости при тестировании, настройке и валидации систем МПК.

Особый интерес представляет внедрение интеллектуального управления и подбор персонифицированных параметров систем МПК. Кроме того, подобные системы способны упростить и ускорить процесс тестирования новых систем вспомогательного кровообращения.

Гибридные моделирующие комплексы формируют основу для нового поколения инструментов в инженерной медицине – интеллектуальных, адаптивных и ориентированных на пациента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Готье СВ. Приоритетные направления научных исследований в области трансплантологии и искусственных органов. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2025; 27 (1): 6–7. Gautier SV. Priority areas of scientific research in the field of transplantology and artificial organs. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. (In Russ.). 2025; 27 (1): 6–7.
2. Cameli M, Pastore MC, Campora A, Lisi M, Mandoli GE. Donor shortage in heart transplantation: How can we overcome this challenge? *Front Cardiovasc Med*. 2022 Oct 17; 9: 1001002. doi: 10.3389/fcvm.2022.1001002.
3. Kyriakopoulos CP, Kapelios CJ, Stauder EL, Taleb I, Hamouche R, Sideris K et al. LVAD as a bridge to remission from advanced heart failure: current data and opportunities for improvement. *J Clin Med*. 2022 Jun 20; 11 (12): 3542. doi: 10.3390/jcm11123542.
4. Itkin GP, Bychnev AS, Kuleshov AP, Drobyshev AA. Hemodynamic evaluation of the new pulsatile-flow generation method *in vitro*. *Int J Artif Organs*. 2020 Mar; 43 (3): 157–164. doi: 10.1177/0391398819879939.
5. Бучнев АС, Кулешов АП, Есипова ОЮ, Дробышев АА, Грудинин НВ. Гемодинамическая оценка устройства генерации пульсирующего потока в системах обхода левого желудочка сердца. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2023; 25 (1): 106–112. Buchnev AS, Kuleshov AP, Esipova OYu, Drobyshev AA, Grudin N. Hemodynamic evaluation of pulsatile-flow generating device in left ventricular assist devices. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2023; 25 (1): 106–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2023-1-106-112>.
6. Иткин ГП. Устройства для вспомогательного кровообращения: прошлое, настоящее и будущее непulsирующих насосов. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2014; 11 (3): 81–87. Itkin GP. Ventricle assist device: past, present, and future nonpulsatile pumps. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2009; 11 (3): 81–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2009-3-81-87>.
7. Fresiello L, Muthiah K, Goetschalckx K, Hayward C, Rocchi M, Bezy M et al. Initial clinical validation of a hybrid *in silico–in vitro* cardiorespiratory simulator for comprehensive testing of mechanical circulatory support systems. *Front Physiol*. 2022 Oct 13; 13: 967449. doi: 10.3389/fphys.2022.967449.
8. Pugovkin AA, Markov AG, Selishchev SV, Korn L, Walter M, Leonhardt S et al. Advances in hemodynamic analysis in cardiovascular diseases investigation of energetic characteristics of adult and pediatric sputnik left ventricular assist devices during mock circulation support. *Cardiol Res Pract*. 2019 Nov 15; 2019: 4593174. doi: 10.1155/2019/4593174.
9. Иткин ГП, Носов МС, Кулешов АП, Дробышев АА, Бучнев АС. Устройство управления потоком крови в имплантируемых системах вспомогательного кровообращения. Патент на полезную модель. № RU 201911 U1. Патентообладатель ФГБУ «НМИЦ ТИО им. ак. В.И. Шумакова» Минздрава России. 2020. Itkin GP, Nosov MS, Kuleshov AP, Drobyshev AA, Buchnev AS. Blood flow control device in implantable extracorporeal circulation systems. Patent for a utility model. No. RU 201911 U1. Patent holder: Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs. 2020.
10. Сырбу АИ, Иткин ГП, Кулешов АП, Гайдай НА. Математическая модель нейрогуморальной регуляции системы кровообращения. *Медицинская техника*. 2021; 55 (4): 41–44. Syrbu AI, Itkin GP, Kuleshov AP, Gaidai NA. A mathematical model of neurohumoral regulation of the circulatory system. *Biomedical Engineering*. 2021; 55 (4): 41–44.
11. Иткин ГП, Сырбу АИ, Кулешов АП, Бучнев АС, Дробышев АА. Оценка эффективности новой системы генерации пульсирующего потока в роторных насосах вспомогательного кровообращения. Исследование на математической модели. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2021; 23 (4): 73–78. Itkin GP, Syrbu AI, Kuleshov AP, Buchnev AS, Drobyshev AA. Evaluation of the efficiency of a new pulsatile flow-generating circulatory-assist system in rotary blood

- pumps. Research on a mathematical model. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2021; 23 (4): 73–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2021-4-73-78>.
12. Cappon F, Wu T, Papaioannou T, Du X, Hsu PL, Khir AW. Mock circulatory loops used for testing cardiac assist devices: A review of computational and experimental models. *Int J Artif Organs*. 2021 Nov; 44 (11): 793–806. doi: 10.1177/03913988211045405.
13. Gregory SD, Pauls JP, Wu EL, Stephens A, Steinseifer U, Tansley G, Fraser JF. An advanced mock circulation loop for *in vitro* cardiovascular device evaluation. *Artif organs*. 2020 Jun; 44 (6): E238–E250. doi: 10.1111/aor.13636.
14. Rapp ES, Pawar SR, Longoria RG. Hybrid mock circulatory loop simulation of extreme cardiac events. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2022 Sep; 69 (9): 2883–2892. doi: 10.1109/TBME.2022.3156963.
15. Ochsner G, Amacher R, Amstutz A, Plass A, Daners MS, Tevaearai H et al. A novel interface for hybrid mock circulations to evaluate ventricular assist devices. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2013 Feb; 60 (2): 507–516. doi: 10.1109/TBME.2012.2230000. Epub 2012 Nov 27.
16. Petrou A, Granegger M, Meboldt M, Daners MS. A versatile hybrid mock circulation for hydraulic investigations of active and passive cardiovascular implants. *ASAIO J*. 2019 Jul; 65 (5): 495–502. doi: 10.1097/MAT.0000000000000851.
17. Ślęzak M, Kopernik M, Szawiraacz K, Milewski G. Assessment of blood flow parameters in a hybrid-digital model of the cardiovascular system applying recurrent neural networks. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2024 Dec; 98: 106680. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106680>.
18. Сырбу АИ, Иткин ГП. Оптимизация параметров устройств вспомогательного кровообращения с применением компьютерной математической модели сердечно-сосудистой системы. *Медицинская техника*. 2022; 56 (2): 23–26. Syrбу AI, Itkin GP. Optimization of the parameters of ventricular assist devices using computerized mathematical modeling of the cardiovascular system. *Biomedical Engineering*. 2022; 56 (2): 23–26.
19. Jansen-Park SH, Mahmood MN, Müller I, Turnhoff LK, Schmitz-Rode T, Steinseifer U, Sonntag SJ. Effects of interaction between ventricular assist device assistance and autoregulated mock circulation including Frank–Starling mechanism and baroreflex. *Artif Organs*. 2016 Oct; 40 (10): 981–991. doi: 10.1111/aor.12635.

Статья поступила в редакцию 25.07.2025 г.
The article was submitted to the journal on 25.07.2025