

DOI: 10.15825/1995-1191-2025-2-89-99

## ДЛИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА КРОВООБРАЩЕНИЯ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ПУТЬ, СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Р.Ю. Бангаров<sup>2</sup>, Т.А. Халилулин<sup>1</sup>, В.М. Захаревич<sup>1</sup>, Ш.Р. Галеев<sup>2</sup>, Г.В. Набиев<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> Филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова» Минздрава России, Волжский, Российская Федерация

**Цель:** изучить исторический путь развития, современные достижения и перспективы устройств длительной механической поддержки кровообращения (ДМПК) в лечении терминальной сердечной недостаточности. **Материалы и методы.** Проведен анализ клинических исследований (MOMENTUM 3, INTERMACS, EUROMACS), исторических данных и технологических разработок в области ДМПК. Рассмотрены три поколения устройств: пульсирующие насосы (1-е поколение), аксиальные насосы (2-е поколение), центробежные насосы с магнитной левитацией (3-е поколение). Оценены показатели выживаемости, частота осложнений (тромбозы, инфекции, правожелудочковая недостаточность), а также отечественные разработки. **Результаты.** Устройства третьего поколения (HeartMate III) демонстрируют двухлетнюю выживаемость 82%, риск тромбоза насоса менее 1%. Осложнения включают инфекции кабеля (10–15%), правожелудочковую недостаточность (20–40%) и кровотечения (15–20%). Отечественные системы (СТРИМ КАРДИО) соответствуют второму поколению, но отстают в миниатюризации и клинических испытаниях. Беспроводные технологии (Leviticus FiVAD) и полностью имплантируемые системы (Carmat Aeson) открывают новые перспективы. **Заключение.** Современные ДМПК стали жизнеспособной альтернативой трансплантации сердца, особенно для пациентов, не являющихся кандидатами на пересадку. Ключевые направления развития – миниатюризация, беспроводные технологии и интеграция искусственного интеллекта. Преодоление системных ограничений, включая риск инфекций и правожелудочковой недостаточности, определит будущее ДМПК.

*Ключевые слова:* длительная механическая поддержка кровообращения, сердечная недостаточность, тромбоз, правожелудочковая недостаточность, миниатюризация, искусственный интеллект.

## LONG-TERM MECHANICAL CIRCULATORY SUPPORT: EVOLUTION, PRESENT MILESTONES, AND FUTURE DIRECTIONS

*R. Yu. Bangarov<sup>2</sup>, T. A. Khalilulin<sup>1</sup>, V. M. Zakharevich<sup>1</sup>, Sh. R. Galeev<sup>2</sup>, G. V. Nabiev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Volzhsky Branch of Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Volzhsky, Russian Federation

**Objective:** to examine the historical evolution, current advancements, and future prospects of long-term mechanical circulatory support (LT-MCS) devices in the management of end-stage heart failure. **Materials and methods.** An analysis was conducted on clinical studies (MOMENTUM 3, INTERMACS, EUROMACS), historical records, and technological progress in the field of LT-MCS. The review covered three generations of devices:

**Для корреспонденции:** Бангаров Ризван Юннадиевич. Адрес: 404120, Волжский, ул. Генерала Карбышева, д. 86. Тел. (999) 625-87-50. E-mail: rizvan.bangarov@yandex.ru

**Corresponding author:** Rizvan Bangarov. Address: 86, Generala Karbysheva str., Volzhsky, 404120, Russian Federation. Phone: (999) 625-87-50. E-mail: rizvan.bangarov@yandex.ru

pulsatile pumps (first generation), axial-flow pumps (second generation), and centrifugal pumps with magnetic levitation (third generation). Key outcomes evaluated included survival rates, complication rates (thrombosis, infections, right ventricular failure), and developments within national technology. **Results.** The HeartMate III third-generation device has a 2-year survival rate of 82% with a pump thrombosis risk of less than 1%. However, complications remain, including driveline infections (10–15%), right ventricular failure (20–40%), and bleeding events (15–20%). Domestic systems (Stream Cardio) are comparable to second-generation devices but lag in terms of miniaturization and clinical trials. Emerging technologies like the Leviticus FiVAD wireless energy transfer system and the Carmat Aeson fully implantable artificial heart are opening up promising new directions for the future of mechanical circulatory support. **Conclusion.** Modern LT-MCS systems have emerged as a viable alternative to heart transplantation (HT), particularly for patients who are not candidates for HT. Key areas of ongoing development include device miniaturization, wireless energy transfer technologies, and integration of artificial intelligence. The future of LT-MCS will largely depend on overcoming current system limitations, notably the risks of infection and right ventricular failure.

*Keywords: long-term mechanical circulatory support, heart failure, thrombosis, right ventricular failure, miniaturization, artificial intelligence.*

## ВВЕДЕНИЕ

Сердечная недостаточность (СН) остается одной из наиболее значимых глобальных медицинских проблем. По данным ВОЗ, более 26 миллионов человек во всем мире страдают от этого заболевания, а пятилетняя смертность превышает 50%, что сопоставимо с показателями онкологических патологий [1, 2]. Трансплантация сердца, являясь «золотым стандартом» лечения терминальной хронической сердечной недостаточности (ХСН), ограничена критическим дефицитом донорских органов: ежегодно в мире выполняется немногим более 5000 операций [2, 3]. В таких условиях механическая поддержка кровообращения (МПК) становится не просто альтернативой, а жизненно важным инструментом, особенно для пациентов с рефрактерной сердечной недостаточностью и кардиогенным шоком.

Современные устройства длительной механической поддержки кровообращения (ДМПК), такие как HeartMate III и HeartWare HVAD, демонстрируют революционные результаты. По данным исследования MOMENTUM 3, 1- и 2-летняя выживаемость после имплантации LVAD составляет 86,6 и 79% соответственно [4], а в регистре ELEVATE показатель 2-летней выживаемости был еще выше – 83,4% [5], что сопоставимо с результатами при трансплантации сердца [6, 7].

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Уже в первой половине XX века стало очевидно, что даже с учетом прорыва в кардиохирургии, связанного с внедрением аппарата искусственного кровообращения, консервативные терапевтические подходы и традиционные хирургические вмешательства не всегда способны обеспечить адекватное восстановление насосной функции сердца. Это понимание стимулировало активный поиск механизмов для

временной или постоянной механической поддержки кровообращения.

В 1952 году Майкл Дебеики предложил концепцию вспомогательного кровообращения, а уже в 1963 году совместно с Доминго Лиотой имплантировал первый механический насос для временной поддержки функции левого желудочка. Этот прорыв стал ключевым моментом в развитии технологий устройств ДМПК [8]. Спустя шесть лет в 1969 году американский кардиохирург и ученый Дентон Кули впервые имплантировал полностью искусственное сердце (total artificial heart, ТАХ) [8]. Успехи этих выдающихся ученых и хирургов, а также повсеместная нехватка донорских органов дали старт для развития такому очень перспективному и высокотехнологичному направлению в лечении сердечной недостаточности, как имплантация устройств вспомогательного кровообращения (УВК). На сегодняшний день разработано огромное количество аппаратов, протезирующих функцию как всего сердца сразу, так и отдельно правого и левого желудочков. В эволюции устройств ДМПК можно выделить три основных поколения, в каждом из которых устройства претерпевали революционные модернизации, что позволило на сегодняшний день достичь позитивных результатов использования УВК в лечении терминальной ХСН, сопоставимых с трансплантацией сердца.

## Первое поколение: пульсирующие насосы

Разработка устройств первого поколения началась в 60-х годах прошлого столетия, и они представляли собой сначала экстракорпоральные (Novacor, HeartMate XVE и др.), а затем и полностью имплантируемые устройства (Jarvik 7, SynCardia ТАХ и др.) с мембранными камерами, в которых с помощью внешнего пневматического или гидравлического привода создавались перепады давления для перекачки крови [9, 10]. Это имитировало естественный

сердечный цикл, создавая пульсирующий поток. Основным назначением таких устройств было осуществление «моста к трансплантации», и наиболее поздние устройства справлялись с этой задачей удовлетворительно на протяжении нескольких недель и месяцев. Их применение было сопряжено с рядом ограничений. Большой вес и зависимость от внешних приводов, несмотря на высокую производительность (до 10 л/мин), ограничивали мобильность пациентов. Габариты устройств требовали формирования относительно большой полости, что увеличивало площадь контакта чужеродной поверхности с окружающими тканями и повышало частоту инфекционных осложнений. Кроме того, большой диаметр чрескожного кабеля (6–10 мм) также существенно повышал риск инфекции. Наличие механических клапанов в составе конструкции и застойных зон в насосе приводили к очень высокой (10–15%) частоте тромбозмембральных событий. Износ мембран и приводных механизмов также снижал эффективность таких насосов, ограничивая срок их службы до 12–18 месяцев [10–12].

### **Второе поколение: аксиальные насосы**

В ответ на эти ограничения был совершен прорыв в сфере механической поддержки кровообращения. В ходе многочисленных исследований было доказано, что в большинстве случаев для обеспечения эффективного сердечного выброса достаточно протезировать лишь функцию левого желудочка. Устройства второго поколения – полностью имплантируемые обходы левого желудочка (ОЛЖ), разработанные в период с 1990-х по 2000-е годы (DeBakey VAD, HeartMate II, Jarvik 2000 и др.), основанные на принципе непрерывного аксиального потока, имеют значительно меньший размер и вес в отличие от своих предшественников [11–14]. Их вес варьируется в диапазоне от 150 до 300 г, а длина не превышает 10 см. Осевой ротор в конструкции разгружает желудочек, обеспечивает непрерывный ток крови с высокой производительностью до 10 л/мин, что обеспечивает непрерывную перфузию всех внутренних органов, существенно снижает риск тромбообразования и тем самым делает эти устройства применимыми для большинства пациентов [7, 11–16].

В исследовании Miller et al. (2007) демонстрируется выживаемость 75% пациентов с HeartMate II через 6 месяцев. Также отмечалось улучшение функционального статуса и качества жизни, что подтвердило эффективность аксиальных насосов [17].

Благодаря ряду принципиальных преимуществ над первым поколением, среди которых больший срок службы (в среднем 5–7 лет), насосы второго поколения позволили расширить направления терапии устройствами ДМПК с «моста к трансплантации» (Bridge to transplantation – ВТТ) к категориям «мост к

выздоровлению» (Bridge to recovery – ВТR) и «терапия конечного назначения» (Destination therapy – ДТ). Так, HeartMate II в 2010 году стал первым имплантируемым ОЛЖ, одобренным для пожизненной имплантации, а не только как «мост к трансплантации» (ВТТ), и в настоящий момент является самым имплантируемым устройством ДМПК в мире [7, 17–19].

Непрерывный поток обеспечивает перфузию внутренних органов, однако такой поток не физиологичен для сосудистой стенки, он вызывает эндотелиальную дисфункцию, приводя к нарушению работы барорецепторов и затрудняя регуляцию артериального давления (АД), а также приводит к артериовенозным мальформациям и кровотечениям, особенно в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) [20].

Присутствие в конструкции механических подшипников, характер осевого потока крови, а также высокая скорость ротора приводят к тромбозам в 10–14% случаев в течение 2 лет после имплантации [21]. Развитие правожелудочковой недостаточности также является одним из характерных осложнений применения устройств второго поколения. Ввиду исходно неправильного позиционирования или смещения межжелудочковой перегородки (МЖП) вправо на высокой производительности насоса формируется отрицательное влияние на вклад межжелудочковой перегородки в ударный объем правого желудочка (ПЖ), что приводит к дисфункции последнего и может потребовать либо имплантации обхода правого желудочка (ОПЖ), либо проведения трансплантации сердца [13, 20–23, 36].

### **Третье поколение: центробежные насосы с магнитной левитацией**

Несмотря на явное преимущество устройств второго поколения перед их предшественниками, такие осложнения, как тромбозы насосов и неврологические осложнения, требовали продолжения исследований, направленных на совершенствование ОЛЖ. Испытание насосов третьего поколения началось в 2012 г. и включало около 10 различных разработок. Итогом этих испытаний стал прорыв в терапии терминальной сердечной недостаточности благодаря внедрению технологий, исключающих механический контакт в насосе. Пионером среди них стал HeartMate (Abbott) III, одобренный в 2017 году [21, 24]. Его ключевая инновация – полностью магнитная левитация (Fully Magnetically Levitated, FML), при которой ротор удерживается в подвешенном состоянии магнитными полями, что устраняет трение и минимизирует повреждение клеток крови [4, 21]. Это достижение подтвердилось в клиническом испытании MOMENTUM 3, где устройство продемонстрировало беспрецедентную безопасность [4, 21, 25, 26].

К третьему поколению также относили Medtronic HVAD, использовавший гидродинамические подшипники. Несмотря на центробежный поток и компактный дизайн, его классификация вызвала споры: хотя HVAD разрабатывался в 2010-х годах как усовершенствованная модель, сохранение жидкостных подшипников (с микроконтактами) привело к риску тромбозов (12%) и инсультов (15%), что в 2021 году стало причиной отзыва устройства [4, 21, 24, 28]. Это подтвердило, что «золотым стандартом» третьего поколения является именно полная магнитная левитация.

Современные ОЛЖ третьего поколения, такие как HeartMate III, работают на основе центробежного потока и магнитной левитации. Ротор, подвешенный в магнитном поле, вращается со скоростью 5500–6000 об/мин, создавая поток крови до 10 л/мин. Отсутствие механического контакта между компонентами насоса предотвращает гемолиз и тромбообразование, а срок службы устройства потенциально может достигать 10 лет [4, 21, 27]. Для сравнения: HVAD использовал гибридную систему – пассивный магнитный подвес сочетался с гидродинамическими подшипниками, где тонкий слой крови снижал трение, но не исключал его полностью [7, 28, 30].

По данным регистра INTERMACS 2023 года, устройства третьего поколения доминируют в клинической практике: на долю HeartMate III приходится 85% имплантаций в США. Двухлетняя выживаемость пациентов с этим устройством достигает 82%, что на 6% выше, чем у предыдущих технологий, и сопоставимо с таковыми результатами при трансплантации сердца [31–33]. В Европе, согласно отчету EUROMACS 2022 года, годовая выживаемость превышает 80%, а частота тромбоэмболий снижена до 1–2% [34].

Среди очевидных преимуществ HeartMate III можно выделить безопасность. Так, благодаря FML-технологии риск тромбоза насоса у HeartMate III составляет менее 1%. Высокая долговечность устройства, обусловленная минимальным износом комплектующих, также ставит устройства третьего поколения на уровень выше предыдущих моделей [4, 21, 26, 27, 32, 35]. По данным M.R. Mehra, устройство не требует замены в течение 5 лет, что дает серьезные основания рассматривать HeartMate III в качестве главного ключа развития такого направления, как «терапия конечного назначения» [37, 40].

Улучшение качества жизни пациентов также вышло на новый уровень. Исследования показали, что после имплантации этих устройств пациенты демонстрируют устойчивое повышение функциональной способности и общего самочувствия. А снижение уровня шума с 40 дБ (HeartMate II) до 25–30 дБ и компактность устройства и внешних комплектующих

позволяют пациентам вести активный образ жизни и улучшают их социальную адаптацию [4, 21, 40].

Несмотря на явные преимущества LVAD третьего поколения, эти устройства не лишены недостатков. Хотя пациенты отмечают значительное улучшение физической активности, уменьшение одышки и общее повышение функционального статуса, они также сталкиваются с рядом проблем, связанных с длительным использованием LVAD. Во-первых, необходимость постоянного ношения внешнего контроллера и источника питания может вызывать дискомфорт и ограничивать подвижность, особенно у активных пациентов. Во-вторых, несмотря на снижение риска тромбообразования по сравнению с устройствами второго поколения, угроза ишемических и геморрагических осложнений, таких как инсульт или желудочно-кишечные кровотечения, все еще остается значимой [4, 21, 26, 29, 35, 40]. В исследовании ENDURANCE, например, было показано, что частота инсультов у пациентов с HVAD составила 29,7%, что выше, чем у пациентов с HeartMate II [41].

Дополнительной проблемой является инфекция в месте выхода внешнего кабеля (drive-line). Хотя новые материалы и антимикробные покрытия снижают этот риск, он по-прежнему остается одной из ведущих причин госпитализаций пациентов с LVAD (10–15%) [40, 43–45]. Кроме того, антикоагулянтная терапия, необходимая для предотвращения тромбозов, повышает риск серьезных кровотечений (15–20%), что требует постоянного мониторинга [21, 27, 40]. Таким образом, несмотря на значительное совершенствование технологий, LVAD третьего поколения остаются не окончательным решением проблемы терминальной сердечной недостаточности, а лишь важным этапом на пути к трансплантации или длительной поддержке пациента.

### **Перспективы устройств ДМПК в качестве «моста к восстановлению» (BTR)**

Обратное ремоделирование миокарда, наблюдаемое у пациентов с терминальной сердечной недостаточностью после имплантации ОЛЖ, стало ключевым аргументом в пользу стратегии «мост к восстановлению». При механической разгрузке левого желудочка происходит уменьшение его объемов: конечно-диастолический объем (КДО) сокращается на 20–30%, а толщина стенок миокарда снижается на 15–20%, что частично восстанавливает геометрию сердца [46, 47]. Например, у пациентов с HeartMate III фракция выброса ЛЖ увеличивается с 15% до 35–40% у 30% больных, что связывают с улучшением гемодинамики и снижением нейрогормональной нагрузки [21, 27, 40, 45].

Эффективность этого процесса напрямую зависит от поколения LVAD. Устройства первого поко-

ления (например, HeartMate XVE), использующие пульсирующий поток, демонстрировали обратное ремоделирование лишь у 10–15% пациентов, при этом осложнения в виде тромбозов сводили на нет потенциальные преимущества [46, 48–50]. Ситуация улучшилась с появлением осевых насосов второго поколения, где непрерывный поток повысил частоту обратного ремоделирования до 25–30%, однако у 40% пациентов развивалась аортальная регургитация, нарушавшая устойчивость восстановления [7, 15–20, 47]. Прорыв произошел с LVAD третьего поколения: центробежный поток и магнитная левитация HeartMate III обеспечили снижение КДО на 28–32% у 35–40% пациентов, а риск тромбозов упал до 1%, что сделало ремоделирование более стабильным [7, 21, 27].

Несмотря на прогресс, долгосрочное восстановление функции сердца остается редкостью. Только 15–20% пациентов после удаления LVAD сохраняют улучшения в течение 1–2 лет. Частота успешного удаления LVAD при использовании устройства HeartMate II была низкой (примерно 12%), в то время как более современные данные по устройству HeartMate III демонстрируют более высокие показатели восстановления миокарда и последующего удаления устройства – от 18 до 22% [4, 7, 21, 27, 40, 50].

Важным является тот факт, что наибольшие шансы на успешное восстановление функции миокарда имеют молодые пациенты без выраженного фиброза миокарда [32–34, 41–43, 45].

Таким образом, устройства ДМПК третьего поколения не только продлевают жизнь, но и создают условия для восстановления миокарда. Однако переход от «моста к трансплантации» к «мосту к восстановлению» требует решения проблем долгосрочной устойчивости ремоделирования и доступности технологий.

### **Перспективы развития: от миниатюризации до биоискусственных систем**

Ведущими направлениями инноваций в области МПК являются: миниатюризация устройств, включая педиатрические решения, внедрение беспроводных технологий передачи энергии, направленных на снижение риска инфекционных осложнений, а также создание полностью имплантируемых систем, обеспечивающих максимально возможную автономность и безопасность пациента [51].

Прежде всего необходимо отметить тенденцию к миниатюризации насосов, которая особенно значима в педиатрической практике. Использование громоздких систем у новорожденных и детей раннего возраста сопряжено с анатомическими ограничениями

и высоким риском осложнений. В связи с этим в последние годы получили распространение устройства с минимальными габаритами и адаптированными гидродинамическими характеристиками. Наиболее известным примером является система Berlin Heart EXCOR Pediatric – пневматическое внекорпоральное устройство с камерами объемом от 10 до 60 мл, широко применяемое у пациентов с массой тела менее 20 кг. Вместе с тем разрабатываются и имплантируемые решения: в частности, Jarvik Infant 2015 VAD и Penn State Infant VAD, ориентированные на использование у детей с массой тела от 4 кг. Эти насосы характеризуются непрерывным кровотоком, высокой надежностью и сниженным тромбогенным потенциалом. Особое внимание привлекает также система PediaFlow VAD – магнитогидродинамический мини-насос толщиной менее 1 см, обеспечивающий эффективную поддержку у новорожденных при минимальном гемолизе. Таким образом, развитие миниатюрных VAD способствует расширению показаний к длительной МПК у данной категории пациентов [54–56].

В настоящее время наблюдается активное внедрение технологий беспроводной передачи энергии (wireless energy transfer), основным назначением которых является устранение чрескожных кабелей, что способствует существенному снижению риска инфицирования, а также обеспечивает более благоприятные функциональные и эстетические исходы терапии.

Среди таких систем особого внимания заслуживает Leviticus FiVAD, использующая принцип копланарной передачи энергии (coplanar energy transfer, CET), при котором питание передается электромагнитным путем через кожу, без физического контакта с внешней средой. Аналогичную концепцию реализует экспериментальная система FREE-D. Примером интеграции беспроводного питания с интеллектуальным управлением является система ICOMS Flowmaker (FineHeart, Франция) – полностью внутрижелудочковый беспроводной ОЛЖ, синхронизирующийся с сердечными сокращениями, в котором реализована чрескожная передача энергии (transcutaneous energy transmission, TET) в сочетании с адаптацией кровотока под физиологическую нагрузку [57–59, 60, 61].

Следующим этапом развития устройств ДМПК стало создание полностью имплантируемых систем механической поддержки. Ярким примером подобного подхода является все та же система ICOMS Flowmaker, все элементы которой, включая контроллер, аккумулятор и насос, размещены внутри организма. Система Leviticus FiVAD также может функционировать в полностью имплантируемом режиме при наличии внутреннего аккумулятора.

Особого упоминания заслуживают системы полностью искусственных сердец (total artificial

heart, TAH), среди которых наиболее инновационной является CARMAT Aeson – биопротез сердца, имитирующий работу обоих желудочков с пульсативным выбросом и биосовместимыми материалами. Устройство полностью имплантируется в грудную полость пациента и использует систему чрескожной передачи энергии (TET), что позволяет отказаться от внешних компонентов. Помимо высокотехнологичного насоса CARMAT оснащен системой автономной адаптации кровотока, реагирующей на изменение физической активности пациента. Клинические исследования, проведенные в рамках европейской программы EFICAS, показали улучшение выживаемости и качества жизни у пациентов, не подлежащих срочной трансплантации [62–66]. По итогам 2024 года компания достигла 100 имплантаций своего устройства. Всего за год количество операций удвоилось, демонстрируя растущее доверие врачей и надежду для тысяч пациентов, ожидающих трансплантацию, в условиях острого дефицита донорских органов [67].

Современное развитие МПК носит многосторонний характер, сочетающий достижения биоинженерии, электроники и материаловедения. Миниатюризация устройств позволяет расширять показания у педиатрических пациентов, беспроводные технологии обеспечивают безопасность и мобильность, а полностью имплантируемые системы выводят поддержку кровообращения на качественно новый уровень автономии. В совокупности эти направления формируют основу для следующих поколений устройств, способных эффективно заменить или поддерживать сердечную функцию при минимальном вмешательстве в образ жизни пациента.

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Параллельно с глобальной эволюцией устройств механической поддержки кровообращения (МПК) в России формировалась собственная научно-техническая база, отражающая как исторические достижения, так и современные тенденции. Отечественные разработки, начиная с советского периода, демонстрируют прогресс в миниатюризации, цифровизации и функциональности, однако сталкиваются с системными ограничениями, связанными с финансированием и интеграцией в международный контекст [7, 15, 16, 70–74].

### Исторический фундамент: «Поиск-10М»

Первым значимым прорывом в данной области стало создание в 1980-х годах полностью искусственного сердца «Поиск-10М» – первой отечественной модели, разработанной под руководством В.И. Шумакова. Это пульсирующее устройство пневмати-

ческого типа, весом около 900 г и объемом камер 60–80 мл, предназначалось для временной замены сердца в ожидании трансплантации. Его клиническое применение включало 17 случаев, в том числе четыре операции в Польше, что подчеркивает международное признание разработки. Эксперименты на телятах показали выживаемость до 102 дней, подтвердив жизнеспособность концепции. Однако крупные габариты, ограниченный ресурс из-за механического износа и экономический кризис 1990-х годов привели к приостановке проекта. Несмотря на это, «Поиск-10М» заложил основы для дальнейших исследований, доказав возможность реализации двухэтапной трансплантации сердца [68, 69, 76–79].

### Эволюция технологий: переход к осевым насосам

Следующим этапом стали разработки осевых насосов, соответствующих второму-третьему поколению устройств МПК. Началом возвращения отечественных разработок в клиническую практику стало проведение с 2012 года серии клинических апробаций нового осевого насоса второго поколения АВК-Н, ориентированного на длительную поддержку левого желудочка. По характеристикам он был сопоставим с зарубежными аналогами, такими как HeartMate II, но отличался совместимостью с отечественными материалами. АВК-Н успешно применялся в клинической практике как «мост к трансплантации» и «терапия конечного назначения» и показал результаты, сопоставимые с зарубежными аналогами своего поколения [70, 74–76, 80].

Наиболее технологически совершенной отечественной разработкой можно считать универсальный комплекс МПК «СТРИМ КАРДИО». Этот осевой насос способен обеспечивать поддержку обоих желудочков с рабочим диапазоном 3–7 л/мин для левого желудочка и 20–60 мм рт. ст. для правого, что делает его универсальным решением для пациентов с минимальной площадью поверхности тела (ППТ) от 0,9 м<sup>2</sup>. Инновационность устройства проявляется в интеграции цифровых технологий: беспроводное управление через мобильный блок, автономное питание до 12–14 часов, онлайн-мониторинг с графическим интерфейсом и AI-алгоритмами для прогнозирования осложнений. Кроме того, система включает мультимедийное руководство с видеоархивом операций, что упрощает обучение хирургов. Несмотря на прогрессивность, «СТРИМ КАРДИО» имеет ограничения – высокую стоимость одноразовых модулей и неприменимость для детей с ППТ менее 0,9 м<sup>2</sup> [81–83].

### Системные проблемы и перспективы

Анализ отечественных разработок выявляет ряд структурных вызовов. Во-первых, зависимость от импорта критически важных компонентов, таких

как редкоземельные магниты и высокоточные сенсоры, ограничивает автономность производства. Во-вторых, недостаток масштабных клинических испытаний замедляет выход устройств на рынок: если «СТРИМ КАРДИО» уже внедряется в кардиохирургические отделения, то «ДОН-3» остается в экспериментальной фазе. В-третьих, сохраняется разрыв с мировыми лидерами: зарубежные аналоги (HeartMate III, Carmat) демонстрируют более высокую надежность и миниатюризацию, соответствуя 3–5-му поколениям МПК.

Тем не менее российские проекты обладают значительным потенциалом. Акцент на бивентрикулярную поддержку в «СТРИМ КАРДИО» соответствует глобальному тренду к универсализации систем МПК. Цифровизация, включая AI-интеграцию и телемедицинские функции, открывает возможности для персонализированного подхода и снижения риска осложнений. Для реализации этого потенциала требуются стратегические инвестиции в клинические исследования, локализацию производства критических компонентов и международную сертификацию.

Отечественные разработки в области МПК прошли путь от громоздких пульсирующих систем до компактных цифровых решений, демонстрируя постепенную конвергенцию с мировыми трендами. Однако их дальнейшее развитие зависит от преодоления системных барьеров – финансовых, технологических и регуляторных. Успешная реализация проектов, подобных «СТРИМ КАРДИО», способна не только укрепить позиции России на внутреннем рынке, но и создать предпосылки для экспорта технологий, что особенно актуально в условиях глобальной конкуренции в области медицинских инноваций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возрастающая тенденция имплантации устройств длительной механической поддержки кровообращения (ДМПК) в качестве терапии конечного назначения (destination therapy) отражает глобальный сдвиг в кардиологии, связанный с дефицитом донорских сердец и улучшением надежности устройств. Современные системы, такие как HeartMate III и отечественные разработки, демонстрируют повышенную выживаемость пациентов (более 5 лет), что позволяет рассматривать их как альтернативу трансплантации для не-кандидатов на пересадку. Расширение показаний, миниатюризация технологий и снижение риска осложнений (ПЖН, тромбоз, инфекции) укрепляют роль ДМПК как постоянного решения при терминальной сердечной недостаточности.

Эти достижения, однако, лишь начало новой эволюционной волны. Перспективы отрасли связаны с персонализацией терапии, интеграцией искусственного интеллекта и разработкой гибридных систем, сочетающих механическую поддержку с регенера-

цией миокарда. Как отметил М.Р. Мехра, ведущий исследователь MOMENTUM 3, «мы находимся на пороге эры, когда LVAD станет не просто мостом, а конечным пунктом лечения для миллионов пациентов». Этот прогноз подчеркивает трансформационный потенциал современных и будущих технологий МПК в борьбе с глобальным бременем сердечной недостаточности.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Virani SS, Alonso A, Benjamin EJ, Bittencourt MS, Calaway CW, Carson AP et al. Heart Disease and Stroke Statistics-2020 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation*. 2020 Mar 3; 141 (9): e139–e596. doi: 10.1161/CIR.0000000000000757.
2. Lippi G, Sanchis-Gomar F. Global epidemiology and future trends of heart failure. *AME Med J*. 2020; 5: 15. doi: 10.21037/amj.2020.03.03.
3. Khush KK, Cherikh WS, Chambers DC, Harhay MO, Hayes D Jr, Hsich E et al. The International Thoracic Organ Transplant Registry of the International Society for Heart and Lung Transplantation: thirty-sixth adult heart transplantation report – 2019; focus theme: donor and recipient size match. *J Heart Lung Transplant*. 2019 Oct; 38 (10): 1056–1066. doi: 10.1016/j.healun.2019.08.004.
4. Goldstein DJ, Naka Y, Horstmanshof D, Ravichandran AK, Schroder J, Ransom J et al. Association of clinical outcomes with left ventricular assist device use by bridge to transplant or destination therapy intent: the multicenter study of MagLev technology in patients undergoing mechanical circulatory support therapy with HeartMate 3 (MOMENTUM 3) randomized clinical trial. *JAMA Cardiol*. 2020 Apr 1; 5 (4): 411–419. doi: 10.1001/jamacardio.2019.5323.
5. Pettit SJ. HeartMate 3: real-world performance matches pivotal trial. *Eur Heart J*. 2020 Oct 14; 41 (39): 3810–3812. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa642.
6. Lund LH, Khush KK, Cherikh WS, Goldfarb S, Kucheryavaya AY, Levvey BJ et al. The Registry of the International Society for Heart and Lung Transplantation: Thirty-fourth Adult Heart Transplantation Report-2017; Focus Theme: Allograft ischemic time. *J Heart Lung Transplant*. 2017 Oct; 36 (10): 1037–1046. doi: 10.1016/j.healun.2017.07.019.
7. Халилулин ТА. Длительная механическая поддержка кровообращения в лечении потенциальных реципиентов донорского сердца с критической сердечной недостаточностью (клинико-экспериментальное исследование): Дис. ... д-ра мед. наук. М., 2019; 212. Khalilulin TA. Dlitel'naya mekhanicheskaya podderzhka krovoobrashcheniya v lechenii potentsial'nykh retsi-pientov donorskogo serdtsa s kriticheskoy serdechnoy nedostatochnost'yu (kliniko-eksperimental'noe issledovanie): Dis. ... d-ra med. nauk. M., 2019; 212.

8. DeBakey ME. Left ventricular bypass pump for cardiac assistance: clinical experience. *Am J Cardiol.* 1971 Jan; 27 (1): 3–11. doi: 10.1016/0002-9149(71)90076-2.
9. Frazier OH, Rose EA, Macmanus Q, Burton NA, LeFrak EA, Poirier VL, Dasse KA. Multicenter clinical evaluation of the HeartMate 1000 IP left ventricular assist device. *Ann Thorac Surg.* 1992 Jun; 53 (6): 1080–1090. doi: 10.1016/0003-4975(92)90393-i.
10. Rose EA, Gelijns AC, Moskowitz AJ, Heitjan DF, Stevenson LW, Dembitsky W et al. Long-term use of a left ventricular assist device for end-stage heart failure. *N Engl J Med.* 2001 Nov 15; 345 (20): 1435–1443. doi: 10.1056/NEJMoa012175.
11. Rigatelli G, Santini F, Faggian G. Past and present of cardiocirculatory assist devices: a comprehensive critical review. *J Geriatr Cardiol.* 2012 Dec; 9 (4): 389–400. doi: 10.3724/SP.J.1263.2012.05281.
12. Иткин ГП. Устройства для вспомогательного кровообращения: прошлое, настоящее и будущее непulsирующих насосов. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2009; 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>.
13. Pagani FD, Miller LW, Russell SD, Aaronson KD, John R, Boyle AJ et al. Extended mechanical circulatory support with a continuous-flow rotary left ventricular assist device. *J Am Coll Cardiol.* 2009 Jul 21; 54 (4): 312–321. doi: 10.1016/j.jacc.2009.03.055.
14. Mankad AK, Tang DG, Clark WB, Flattery M, Harton S, Katlaps GJ et al. Persistent anemia after implantation of the total artificial heart. *J Card Fail.* 2012 Jun; 18 (6): 433–438. doi: 10.1016/j.cardfail.2012.03.003.
15. Иткин ГП, Шохина ЕГ, Шемакин СЮ, Попцов ВН, Шумаков ДВ, Готье СВ. Особенности длительной механической поддержки кровообращения с помощью насосов непрерывного потока. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2012; 14 (2): 110–115. Itkin GP, Shokhina EG, Shemakin SYu, Poptsov VN, Shumakov DV, Gautier SV. Features of long-term mechanical circulatory support with continuous-flow pump. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2012; 14 (2): 110–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2012-2-110-115>.
16. Иткин ГП, Селищев СВ. Роторные насосы для искусственного и вспомогательного кровообращения. *Медицинская техника.* 2010; 264 (6): 39–45. Itkin GP, Selishchev SV. Rotornye nasosy dlya iskusstvennogo i vspomogatel'nogo krovoobrashcheniya. *Meditsinskaya tekhnika.* 2010; 264 (6): 39–45.
17. Miller LW, Pagani FD, Russell SD, John R, Boyle AJ, Aaronson KD et al. Use of a continuous-flow device in patients awaiting heart transplantation. *N Engl J Med.* 2007 Aug 30; 357 (9): 885–896. doi: 10.1056/NEJMoa067758.
18. Giridharan GA, Lee TJ, Ising M, Sobieski MA, Koenig SC, Gray LA, Slaughter MS. Miniaturization of mechanical circulatory support systems. *Artif Organs.* 2012 Aug; 36 (8): 731–739. doi: 10.1111/j.1525-1594.2012.01523.x.
19. Maher TR, Butler KC, Poirier VL, Gernes DB. HeartMate left ventricular assist devices. A multigeneration of implanted blood pumps. *Artif Organs.* 2001 May; 25 (5): 422–426. doi: 10.1046/j.1525-1594.2001.06756.x.
20. Williams ML, Trivedi JR, McCants KC, Prabhu SD, Birks EJ, Oliver L, Slaughter MS. Heart transplant vs left ventricular assist device in heart transplant-eligible patients. *Ann Thorac Surg.* 2011 May; 91 (5): 1330–1333; discussion 1333–1334. doi: 10.1016/j.athoracsur.2011.01.062.
21. Mehra MR, Uriel N, Naka Y, Cleveland JC Jr, Yuzeffolkaya M, Salerno CT et al. A Fully Magnetically Levitated Left Ventricular Assist Device – Final Report. *N Engl J Med.* 2019 Apr 25; 380 (17): 1618–1627. doi: 10.1056/NEJMoa1900486.
22. John R. Current axial-flow devices – the HeartMate II and Jarvik 2000 left ventricular assist devices. *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* 2008 Fall; 20 (3): 264–272. doi: 10.1053/j.semtcvs.2008.08.001.
23. Slaughter MS, Rogers JG, Milano CA, Russell SD, Conte JV, Feldman D et al. Advanced heart failure treated with continuous-flow left ventricular assist device. *N Engl J Med.* 2009 Dec 3; 361 (23): 2241–2251. doi: 10.1056/NEJMoa0909938.
24. Rogers JG, Aaronson KD, Boyle AJ, Russell SD, Milano CA, Pagani FD et al. Continuous flow left ventricular assist device improves functional capacity and quality of life of advanced heart failure patients. *J Am Coll Cardiol.* 2010 Apr 27; 55 (17): 1826–1834. doi: 10.1016/j.jacc.2009.12.052.
25. Strueber M, O'Driscoll G, Jansz P, Khaghani A, Levy WC, Wieselthaler GM. Multicenter evaluation of an intrapericardial left ventricular assist system. *J Am Coll Cardiol.* 2011 Mar 22; 57 (12): 1375–1382. doi: 10.1016/j.jacc.2010.10.040.
26. Netuka I, Kvasnička T, Kvasnička J, Hrachovinová I, Ivák P, Mareček F et al. Evaluation of von Willebrand factor with a fully magnetically levitated centrifugal continuous-flow left ventricular assist device in advanced heart failure. *J Heart Lung Transplant.* 2016 Jul; 35 (7): 860–867. doi: 10.1016/j.healun.2016.05.019.
27. Mehra MR, Goldstein DJ, Cleveland JC, Cowger JA, Hall S, Salerno CT et al. Five-Year Outcomes in Patients With Fully Magnetically Levitated vs Axial-Flow Left Ventricular Assist Devices in the MOMENTUM 3 Randomized Trial. *JAMA.* 2022 Sep 27; 328 (12): 1233–1242. doi: 10.1001/jama.2022.16197.
28. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 22.04.2025. FDA alerts health care providers to stop new implants of certain ventricular assist device system. [Electronic resource]. Access mode: free. Date of access: 22.04.2025. <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-alerts-health-care-providers-stop-new-implants-certain-ventricular-assist-device-system>.
29. Gustafsson F, Shaw S, Lavee J, Saeed D, Pya Y, Krabatsch T et al. Six-month outcomes after treatment of advanced heart failure with a full magnetically levita-

- ted continuous flow left ventricular assist device: report from the ELEVATE registry. *Eur Heart J*. 2018 Oct 1; 39 (37): 3454–3460. doi: 10.1093/eurheartj/ehy513.
30. Teuteberg JJ, Slaughter MS, Rogers JG, McGee EC, Pagani FD, Gordon R et al. The HVAD Left Ventricular Assist Device: Risk Factors for Neurological Events and Risk Mitigation Strategies. *JACC Heart Fail*. 2015 Oct; 3 (10): 818–828. doi: 10.1016/j.jchf.2015.05.011.
  31. Tedford RJ, Leacche M, Lorts A, Drakos SG, Pagani FD, Cowger J. Durable Mechanical Circulatory Support: JACC Scientific Statement. *J Am Coll Cardiol*. 2023 Oct 3; 82 (14): 1464–1481. doi: 10.1016/j.jacc.2023.07.019.
  32. Chamogeorgakis T, Toumpoulis I, Bonios MJ, Lanfear D, Williams C, Koliopoulou A, Cowger J. Treatment Strategies and Outcomes of Right Ventricular Failure Post Left Ventricular Assist Device Implantation: An INTERMACS Analysis. *ASAIO J*. 2024 Apr 1; 70 (4): 264–271. doi: 10.1097/MAT.0000000000002105.
  33. Jorde UP, Saeed O, Koehl D, Morris AA, Wood KL, Meyer DM et al. The Society of Thoracic Surgeons Intermacs 2023 Annual Report: Focus on Magnetically Levitated Devices. *Ann Thorac Surg*. 2024 Jan; 117 (1): 33–44. doi: 10.1016/j.athoracsur.2023.11.004.
  34. De By TMMH, Schoenrath F, Veen KM, Mohacsi P, Stein J, Alkhamees KMM et al. The European Registry for Patients with Mechanical Circulatory Support of the European Association for Cardio-Thoracic Surgery: third report. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2022 Jun 15; 62 (1): ezac032. doi: 10.1093/ejcts/ezac032.
  35. Narang N, Raikhelkar J, Sayer G, Uriel N. Hemodynamic Pump–Patient Interactions and Left Ventricular Assist Device Imaging. *Cardiol Clin*. 2018 Nov; 36 (4): 561–569. doi: 10.1016/j.ccl.2018.06.013.
  36. Alvarez J, Rao V. HeartMate 3 – a «Step» in the right direction. *J Thorac Dis*. 2017 May; 9 (5): E457–E460. doi: 10.21037/jtd.2017.04.39.
  37. Melendo-Viu M, Dobarro D, Raposeiras Roubin S, Llamas Pernas C, Moliz Cordon C, Vazquez Lamas M et al. Left Ventricular Assist Device as a Destination Therapy: Current Situation and the Importance of Patient Selection. *Life (Basel)*. 2023 Apr 21; 13 (4): 1065. doi: 10.3390/life13041065.
  38. Fernandez Valledor A, Rubinstein G, Moeller CM, Lorenzatti D, Rahman S, Lee C et al. Durable left ventricular assist devices as a bridge to transplantation in The Old and The New World. *J Heart Lung Transplant*. 2024 Jun; 43 (6): 1010–1020. doi: 10.1016/j.healun.2024.01.019.
  39. Fernandez Valledor A, Moeller CM, Rubinstein G, Oren D, Rahman S, Baranowska J et al. Durable left ventricular assist devices as a bridge to transplantation: what to expect along the way? *Expert Rev Med Devices*. 2024 Sep; 21 (9): 829–840. doi: 10.1080/17434440.2024.2393344.
  40. Jakovljevic DG, Yacoub MH, Schueler S, MacGowan GA, Velicki L, Seferovic PM et al. Left Ventricular Assist Device as a Bridge to Recovery for Patients With Advanced Heart Failure. *J Am Coll Cardiol*. 2017 Apr 18; 69 (15): 1924–1933.
  41. Malone G, Abdelsayed G, Bligh F, Al Qattan F, Syed S, Varatharajulu P et al. Advancements in left ventricular assist devices to prevent pump thrombosis and blood coagulopathy. *J Anat*. 2023 Jan; 242 (1): 29–49. doi: 10.1111/joa.13675.
  42. Meyer DM, Nayak A, Wood KL, Blumer V, Schettle S, Salerno C et al. The Society of Thoracic Surgeons Intermacs 2024 Annual Report: Focus on Outcomes in Younger Patients. *Ann Thorac Surg*. 2025 Jan; 119 (1): 34–58. doi: 10.1016/j.athoracsur.2024.10.003.
  43. Aslam S, Cowger J, Shah P, Stosor V, Copeland H, Reed A et al. The International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT): 2024 infection definitions for durable and acute mechanical circulatory support devices. *J Heart Lung Transplant*. 2024 Jul; 43 (7): 1039–1050. doi: 10.1016/j.healun.2024.03.004.
  44. Chu VH, Bielick CG, Arnold CJ. Cardiovascular Implantable Electronic Device Infections: A Contemporary Review. *Infect Dis Clin North Am*. 2024; 38 (2): 693–712.
  45. Kormos RL, Antonides CFJ, Goldstein DJ, Cowger JA, Starling RC, Kirklin JK et al. Updated definitions of adverse events for trials and registries of mechanical circulatory support: A consensus statement of the mechanical circulatory support academic research consortium. *J Heart Lung Transplant*. 2020 Aug; 39 (8): 735–750. doi: 10.1016/j.healun.2020.03.010.
  46. Mancini DM, Beniaminovitz A, Levin H, Catanese K, Flannery M, DiTullio M et al. Low incidence of myocardial recovery after left ventricular assist device implantation in patients with chronic heart failure. *Circulation*. 1998 Dec 1; 98 (22): 2383–2389. doi: 10.1161/01.cir.98.22.2383.
  47. Birks EJ, George RS, Firouzi A, Wright G, Bahrami T, Yacoub MH, Khaghani A. Long-term outcomes of patients bridged to recovery versus patients bridged to transplantation. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2012 Jul; 144 (1): 190–196. doi: 10.1016/j.jtcvs.2012.03.021.
  48. Dandel M, Weng Y, Siniawski H, Potapov E, Drews T, Lehmkühl HB et al. Prediction of cardiac stability after weaning from left ventricular assist devices in patients with idiopathic dilated cardiomyopathy. *Circulation*. 2008 Sep 30; 118 (14 Suppl): S94–S105. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.755983.
  49. Simon MA, Kormos RL, Murali S, Nair P, Heffernan M, Gorcsan J et al. Myocardial recovery using ventricular assist devices: prevalence, clinical characteristics, and outcome. *Circulation*. 2005 Aug 30; 112 (9 Suppl): I32–I36. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.524124.
  50. Wever-Pinzon O, Drakos SG, McKellar SH, Horne BD, Caine WT, Kfoury AG et al. Cardiac Recovery During Long-Term Left Ventricular Assist Device Support. *J Am Coll Cardiol*. 2016 Oct 4; 68 (14): 1540–1553. doi: 10.1016/j.jacc.2016.07.743.
  51. Lodge AJ, Antunez AG, Jaquiss RDB. Pediatric ventricular assist devices. *Progress in Pediatric Cardiology*. 2012; 33 (2): 169–176.
  52. Huber CH, Tozzi P, Hurni M, von Segesser LK. No drive line, no seal, no bearing and no wear: magnetics for impeller suspension and flow assessment in a new VAD. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2004 Jun; 3 (2): 336–340. doi: 10.1016/j.icvts.2004.01.014.
  53. Lucke L, Bhavshtein V. Safety considerations for wireless delivery of continuous power to implanted medical

- devices. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2014; 2014: 286–289. doi: 10.1109/EMBC.2014.6943585.
54. Adachi I, Jaquiss RD. Mechanical Circulatory Support in Children. *Curr Cardiol Rev.* 2016; 12 (2): 132–140. doi: 10.2174/1573403X12666151119165841.
  55. Greenberg JW, Perry T, Morales DLS. Management of Mechanical Circulatory Support in Pediatric Heart Failure. *Management of Acute and Chronic Severe Heart Failure: Advances in Mechanical Circulatory Support.* Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 371–385. doi: 10.1007/978-3-031-74963-6\_23.
  56. Amdani S, Conway J, George K, Martinez HR, Asante-Korang A, Goldberg CS et al. Evaluation and Management of Chronic Heart Failure in Children and Adolescents With Congenital Heart Disease: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation.* 2024 Jul 9; 150 (2): e33–e50. doi: 10.1161/CIR.0000000000001245.
  57. Campi T, Cruciani S, Maradei F, Montalto A, Feliziani M. Wireless Power Transmission for Left Ventricular Assist Devices: Advancements, Challenges, and Future Directions. *2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE).* 2024: 505–508. doi: 10.1109/WPTCE59894.2024.10557316.
  58. Moore J, Castellanos S, Xu S, Wood B, Ren H, Tse ZTH. Applications of Wireless Power Transfer in Medicine: State-of-the-Art Reviews. *Ann Biomed Eng.* 2019 Jan; 47 (1): 22–38. doi: 10.1007/s10439-018-02142-8.
  59. Alabsi A, Hawbani A, Wang X, Al-Dubai A, Hu J, Aziz SA et al. Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: A review. *IEEE Transactions on Sustainable Computing.* 2025 Jan-Feb; 10 (1): 1–17. doi: 10.1109/TSUSC.2024.3380607.
  60. Khalili HF, Kirchner J, Bartunik M, Werner S, Ebel N, Schubert DW et al. Transcutaneous energy transfer system for cardiac-assist devices by use of inhomogeneous biocompatible core material. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2021; 57 (12): 1–12.
  61. Knecht OM. Transcutaneous Energy and Information Transfer for Left Ventricular Assist Devices: Diss. ETH No. 24719. Zurich, 2017; 363.
  62. Campi T, Cruciani S, Maradei F, Montalto A, Musumeci F, Feliziani M. Thermal analysis of a transcutaneous energy transfer system for a left ventricular assist device. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology.* 2021; 6 (2): 253–259.
  63. Jordan A, Tchanchaleishvili V. Recent progress in the field of artificial organs. *Artif Organs.* 2020 Dec; 44 (12): 1318–1319. doi: 10.1111/aor.13855.
  64. Han JJ. Aeson – The Carmat total artificial heart is approved for enrollment in the United States. *Artif Organs.* 2021 May; 45 (5): 445–446. doi: 10.1111/aor.13959.
  65. Recent progress in the field of Artificial Organs. *Artif Organs.* 2023; 47 (12): 1805–1806. doi: 10.1111/aor.14663.
  66. Peronino C. Caractérisation de l'hémocompatibilité acquise du coeur artificiel total Aeson (Carmat, A-TAH): Thèse de doctorat. Discipline: Hématologie. Université Paris Cité, 2023; 227.
  67. CARMAT franchit le cap des 100 implantations de son coeur artificiel total Aeson® / CARMAT – 10 février 2025. <https://www.carmat.com/communique-de-presse/carmat-franchit-le-cap-des-100-implantations-de-son-coeur-artificiel-total-aeson/> (Date of access: 23.04.2025).
  68. Иткин ГП. Разработка методики экспериментальной и клинической апробации имплантируемых осевых насосов. *Трансплантология: итоги и перспективы.* Том VI. 2014 год / Под ред. С.В. Готье. М.–Тверь: Триада, 2015: 170–179. 138–143. Itkin GP. Development of experimental and clinical approbation methodology of implantable axial pumps. *Transplantology: results and prospects.* Vol. VI. 2014 / Ed. by S.V. Gautier. М.–Тверь: Triada, 2015: 138–143.
  69. Шумаков ДВ, Шемакин СЮ, Козлов ИЛ, Понцов ВН, Кормер АЯ, Романов ОВ и др. Первый в Российской Федерации опыт применения в клинике имплантируемого осевого насоса INCOR для левожелудочкового обхода. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2007; 10 (1): 19–27. Shumakov DV, She-makun SYu, Kozlov IL, Popzov VN, Kormer AYa, Romanov OV et al. The first experience of clinic application the implanting pump INCOR for the round about way of left ventricular in Russia. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2007; 10 (1): 19–27.
  70. Готье СВ, Кулешов АП, Ефимов АЕ, Агапов ИИ, Иткин ГП. Оптимизация имплантируемого осевого насоса для повышения эффективности механической поддержки кровообращения. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2017; 19 (2): 61–68. Gautier SV, Kuleshov AP, Efimov AE, Agapov II, Itkin GP. Optimization of Implantable Axial Pump to Increase Efficiency of Mechanical Circulatory Support. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2017; 19 (2): 61–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2017-2-61-68>.
  71. Иткин ГП, Дмитриева ОЮ, Бучнев АС, Дробышев АА, Кулешов АП, Волкова ЕА, Халилулин ТА. Результаты экспериментальных исследований детского осевого насоса «ДОН-3». *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2018; 20 (2): 61–68. Itkin GP, Dmitrieva OYu, Buchnev AS, Drobyshev AA, Kuleshov AP, Volkova AV, Halilulin TA. Results of experimental studies of the children's axial pump «DON-3». *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2018; 20 (2): 61–68. <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2018-2-61-68>.
  72. Дмитриева ОЮ, Бучнев АС, Кулешов АП, Дробышев АА, Волкова ЕА, Иткин ГП. Первый опыт применения детского осевого насоса в эксперименте. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2017; 19 (S): 172. Dmitrieva OYu, Buchnev AS, Kuleshov AP, Drobyshev AA, Volkova EA, Itkin GP. First experience of using a children's axial pump in an experiment. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2017; 19 (S): 172.
  73. Готье СВ, Иткин ГП, Шемакин СЮ, Саитгареев РШ, Понцов ВН, Захаревич ВМ 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; 15 (3): 92–101. *Gautier SV, Itkin GP, Shemakin SYu, Saitgareev RSh, Poptsov VN, Zakharevich VM et al.* The first experience in clinical application of domestic circulatory support device on basis of implantable axial pump for two stage heart transplantation. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2013; 15 (3): 92–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2013-3-92-101>.
74. *Готье СВ, Иткин ГП, Шевченко АО, Халилулин ТА, Козлов ВА.* Длительная механическая поддержка кровообращения как альтернатива трансплантации сердца. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2016; 18 (3): 128–136. *Gautier SV, Itkin GP, Shevchenko AO, Khalilulin TA, Kozlov VA.* Durable mechanical circulation support as an alternative to heart transplantation. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2016; 18 (3): 128–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2016-3-128-136>.
75. *Халилулин ТА, Захаревич ВМ, Попоцов ВН, Иткин ГП, Шевченко АО, Сaitгareев РШ и др.* Особенности имплантации системы поддержки насосной функции сердца АВК-Н в качестве «моста» к трансплантации сердца. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2018; 20 (1): 13–22. *Khalilulin TA, Zacharevich VM, Poptsov VN, Itkin GP, Shevchenko AO, Saitgareev RSh et al.* Special aspects of implantation of a heart pump support system AVK-N as a «bridge» to heart transplantation. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2018; 20 (1): 13–22. <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2018-1-13-22>.
76. *Иткин ГП.* Механическая поддержка кровообращения: проблемы, решения и новые технологии. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2014; 16 (3): 76–84. *Itkin GP.* Mechanical circulatory support: problems, solutions and new directions. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2014; 16 (3): 76–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2014-3-76-84>.
77. *Хубутия МШ, Казаков ЭН, Кормер АЯ.* Осложнения после трансплантации сердца. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2005; 7 (3): 9–10. *Hubutiya MSh, Kasakov EN, Kormer AYu.* Complications after heart transplantation. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2005; 7 (3): 9–10.
78. *Шумаков ВИ.* Достижения и перспективы развития трансплантологии и искусственных органов в России. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2006; 8 (4): 6–10. *Shumakov VI.* Current status and advances in the field of transplantology and artificial organs in Russia. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2006; 8 (4): 6–10.
79. *Толпекин ВЕ, Куласев НБ, Игнатова НВ.* Современные проблемы искусственного сердца и обхода желудочков сердца насосами объемного типа. *Трансплантология*. 2012; (1–2): 43–47. *Tolpekin VE, Kilasev NB, Ignatova NV.* Current issues of artificial heart and ventricular bypass using blood pumps of membrane type. *Transplantologiya. The Russian Journal of Transplantation*. 2012; (1–2): 43–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2012-0-1-2-43-47>.
80. *Чернявский АМ, Доронин ДВ, Фомичев АВ, Караськов АМ.* Первый опыт использования системы механической поддержки левого желудочка «АВК-Н» в кардиохирургической клинике. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2019; 23 (1): 26–32. *Chermyavskiy AM, Doronin DV, Fomichev AV, Karaskov AM.* The initial experience of implantation of the left ventricular assist device «Sputnik» at a cardiac surgery center. *Circulation pathology and cardiac surgery*. 2019; 23 (1): 26–32.
81. *Невзоров АМ, Хаустов АИ, Иткин ГП.* Опыт применения отечественных насосов для вспомогательного кровообращения. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2022; 24 (S): 150. *Nevzorov AM, Khaustov AI, Itkin GP.* Experience of using domestic pumps for auxiliary blood circulation. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2022; 24 (S): 150.
82. *Хубутия МШ, Шемакин СЮ, Филатов ИА, Невзоров АМ.* Комплекс универсальный для механической поддержки насосной функции левого и правого желудочков сердца – «СТРИМ КАРДИО». *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2019; 21 (S): 135–135. *Khubutiya MS, Shemakin SY, Filatov IA, Nevzorov AM.* Universal complex for mechanical support of the pumping function of the left and right ventricles of the heart – «STREAM CARDIO». *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs*. 2019; 21 (S): 135–135.
83. БИОСОФТ-М. СТРИМ КАРДИО. [Электронный ресурс]. Дата обращения: 23.04.2025. BIOSOFT-M. STREAM CARDIO. [Electronic resource]. Date of access: 23.04.2025. <https://biosoft-m.ru/produkty/strim-kardio/>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025 г.  
The article was submitted to the journal on 23.04.2025