

УДК 621.3.04

© Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, Р. А. Нургалиева, 2019

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АППАРАТОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ (ОБЗОР)

Данная статья посвящена обзору аппаратов вспомогательного кровообращения третьего поколения, которые показаны при тяжелых формах сердечной недостаточности. Эти аппараты применяются при отсутствии донорского органа или при восстановлении ослабленного миокарда собственного сердца. Острый дефицит донорских органов требует незамедлительных решений по усовершенствованию существующих, проектированию и изготовлению новых аппаратов вспомогательного кровообращения, которые позволят продлить жизнь людям с сердечной недостаточностью. Несомненно, к таким аппаратам предъявляются высокие требования по надежности, безопасности и биосовместимости. Развитие подшипников и подшипниковых узлов для медицинских аппаратов вспомогательного кровообращения является актуальной задачей, анализ решений которой приводится здесь.

Кл. сл.: аппараты вспомогательного кровообращения, подшипники, магнитный подвес, ротор, статор

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Аппарат вспомогательного кровообращения — аппарат временной помощи ослабленному миокарду по восстановлению нарушенных функций в организме, основанный на применении специальных механических устройств [1].

Электромагнитный подвес ротора — это управляемое электромагнитное устройство, удерживающее ротор в заданном положении относительно статора.

Пассивный магнитный подшипник — это подшипник с постоянными магнитами.

Активный магнитный подшипник — это подшипник с переменным магнитным полем, т.е. с полем, создаваемым сердечником и обмоткой.

Гидродинамические подшипники — это подшипники, в которых непосредственную нагрузку от вала воспринимает тонкий слой жидкости. В гидродинамическом подшипнике при вращении вала на больших скоростях жидкость увлекается валом в пространство между поверхностями трения, и таким образом осуществляется самосмазывание [2].

Экстракорпоральное устройство — устройство, располагающееся и работающее вне тела человека.

Диффузор — профилированная часть канала (трубы), в которой происходит замедление потока [3].

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире проблемы сердечно-сосудистых заболеваний занимают первое место среди причин смерти, а именно терминальная стадия сердечной недостаточности. Оптимальным методом лечения пациентов с таким диагнозом является трансплантация сердца. Альтернативой для лечения таких пациентов становится временная замена функций сердца на период восстановления или полной замены донорским органом.

Как известно, сейчас существуют три поколения аппаратов вспомогательного кровообращения (АВК), которые способны стать альтернативой трансплантации и спасти жизни людей.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКОЛЕНИЙ АВК

Первое поколение АВК включает в себя насос объемного типа или пульсирующий насос, который осуществляет перемещение крови в сердце за счет ее вытеснения с помощью специальных клапанов и перегородок, имитируя работу настоящего сердца. Это устройство откачивает кровь из левого предсердия или левого желудочка и направляет ее в восходящую аорту. Такие устройства могут быть имплантированы внутри и снаружи тела человека. Движение клапанов происходит благодаря пневматическому или электрическому приводу.

АВК второго и третьего поколения отличаются тем, что поддерживают или заменяют функцию желудочка, а не имитируют работу родного желудочка. АВК второго поколения представляются двумя видами насосов: роторные и центробежные. Движение крови осуществляется в процессе вращения турбины. Рабочее колесо, турбина, или по-другому ротор, приводятся в движение электрическим приводом. При этом рабочее колесо в устройствах второго поколения закрепляется с помощью одного или двух подшипников в корпусе устройства. Механические подшипники в устройствах второго поколения используют кровь как жидкость, омывающую подшипниковые узлы, и травмируя при этом состав крови, что приводит к угрозе выхода из строя самого устройства и нарушению работы организма. Все роторные насосы крови относятся к устройствам второго поколения, третье поколение отличается лишь левитацией рабочего колеса в условиях эксплуатации насоса.

На сегодняшний день развитие современных технологий позволило использовать в сердечных насосах третьего поколения электромагнитный подвес ротора, в которых отсутствует или частично отсутствует механический контакт основного движущегося элемента — ротора (рис. 1) Эта задача решается благодаря использованию магнитного подвеса ротора с помощью гидродинамических и электромагнитных подшипников. Подвес ротора осуществляется за счет магнитных сил отталкивания или притяжения. Этот способ работы сердечного насоса позволяет продлить срок службы таких аппаратов, исключить физиологическое повреждение состава крови, ограничить тромбообразование. Ранее такая технология успешно

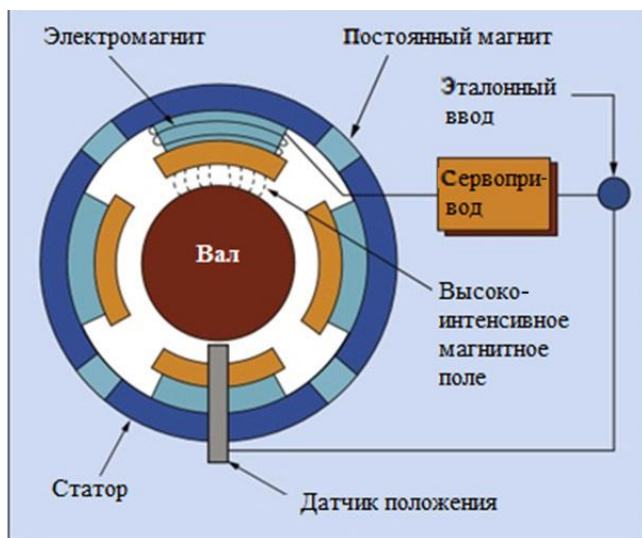


Рис. 1. Компоновка насосов третьего поколения

применялась и применяется для создания электрических машин с магнитным подвесом ротора в высокоскоростных машинах авиакосмической, железнодорожной и других промышленных отраслях.

Ключевая функция ложится на подшипники и подшипниковый узел, который является основным элементом системы магнитного подвеса. За последнее время были сделаны большие разработки и усовершенствования подшипников. Произошел переход от механических подшипников к электромагнитным. В настоящее время существуют три перспективных подхода к осуществлению левитации ротора сердечного насоса. Это — использование гидродинамических подшипников, электромагнитных и их комбинации. Магнитные подшипники используются для поддержки и управления ротором с помощью бесконтактных электромагнитных сил, которые минимизируют механические трения и износы частей электрических машин и устройств. Преимущества бесконтактных магнитных подшипников над механическими заключаются в отсутствии трущихся частей, в отсутствии контакта рабочего тела и машины, в малой температуре нагрева частей, в отсутствии шумов и контроле вибраций. Благодаря этим преимуществам и стало возможным применение магнитных подшипников и непосредственно магнитного подвеса ротора в самых современных насосах аппаратов вспомогательного кровообращения.

РЕТРОСПЕКТИВА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАЗРАБОТОК СЕРДЕЧНЫХ НАСОСОВ

В России применение технологии магнитного подвеса ротора в сердечных насосах стало известно в первом отечественном аппарате вспомогательного кровообращения АВК-Н "Спутник" (рис. 2) на основе имплантируемого насоса крови. АВК-Н "Спутник" был разработан сотрудниками кафедры биомедицинских систем Национального исследовательского университета МИЭТ совместно с Федеральным научным центром трансплантологии и искусственных органов им. акад. В.И. Шумакова, ОАО "Зеленоградский инновационно-технологический центр", ООО "БИОСОФТ-М" и ООО "ДОНА-М".

В статье 2015 г. авторов В.М. Гринвальда и др. "Первый отечественный аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н "Спутник" на основе имплантируемого насоса крови" говорится о применении магнитного подвеса ротора, обеспечивающего стабилизацию положения задней части ротора в процессе вращения, при этом передняя его часть располагается на опорах скольжения [4]. Совмещение этих двух решений является отличием и преимуществом данной конструкции.

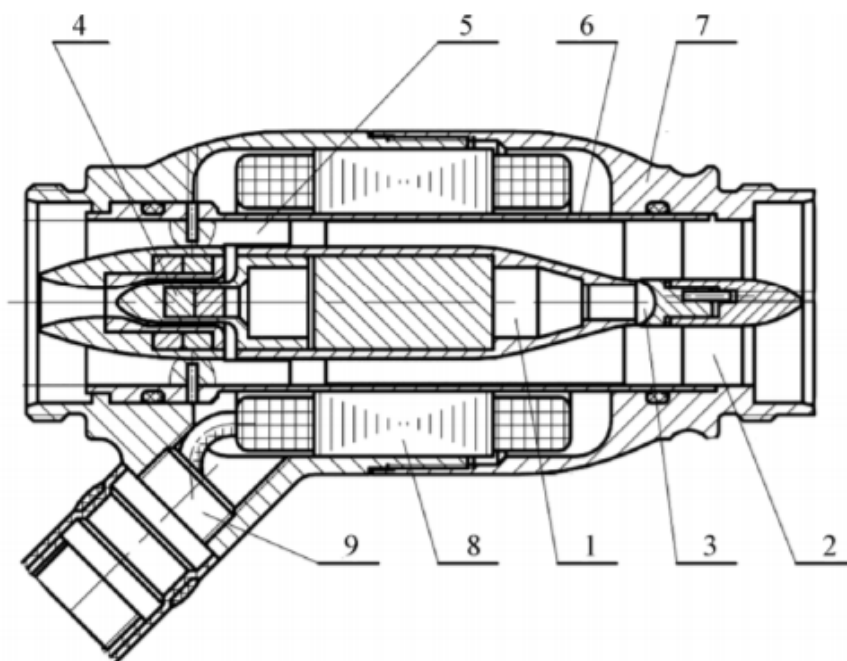


Рис. 2. Конструкция насоса аппарата АВК-Н "Спутник".
 1 — ротор насоса; 2 — направляющий аппарат; 3 — опора скольжения ротора; 4 — магнитный подвес ротора; 5 — спрямляющий аппарат; 6 — изолирующая втулка; 7 — корпус насоса; 8 — статор электрической машины; 9 — узел ввода кабеля питания и управления [4]

Магнитный подвес ротора состоит из двух частей: подвижная часть магнитного подвеса располагается на роторе, а неподвижная на спрямляющем аппарате. Конструкция магнитного подвеса выполнена на основе постоянных магнитов из сплава железо-неодим-бор. Элементы конструкции магнитного подвеса, выполненные из титанового сплава, предохраняют кровь от непосредственного контакта с магнитами. Габаритные размеры данного насоса — 85 мм в длину и 35 мм в диаметре, при массе аппарата 180 г.

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ НАСОСОВ АВК

Китай

В 2013 г. был отмечен опыт китайских исследователей, занимающихся разработкой искусственного сердца. Исследование проводилось учеными из Китайского исследовательского института ракетной техники и медиками из больницы сердечно-сосудистых заболеваний "TEDA International Cardiovascular Hospital" в городе Тяньцзинь. Им

удалось спроектировать и протестировать вспомогательное устройство для поддержки кровообращения третьего поколения, используя космические технологии магнитной подвески ротора и гидродинамических подшипников. Устройство было успешно протестировано экспериментально на животном [5].

Германия

Немецкая компания BerlinHeart в своей имплантируемой системе INCOR LVAD (рис. 3) также использует уникальную систему подвески импеллера, работающую без механического контакта и отсутствия износа компонентов, обеспечивая длительную поддержку кровообращения у пациентов с терминальной сердечной недостаточностью. При этом скорость вращения составляет 7500 об./мин, которая контролируется автоматически. Потребляемая мощность 4 Вт. Преимуществом является долговечность эксплуатации этого устройства, т.к. отсутствует нагрев и износ движущихся частей. Насос выполнен из титана, а вращающиеся части покрыты биоактивным покрытием Carmeda [6].

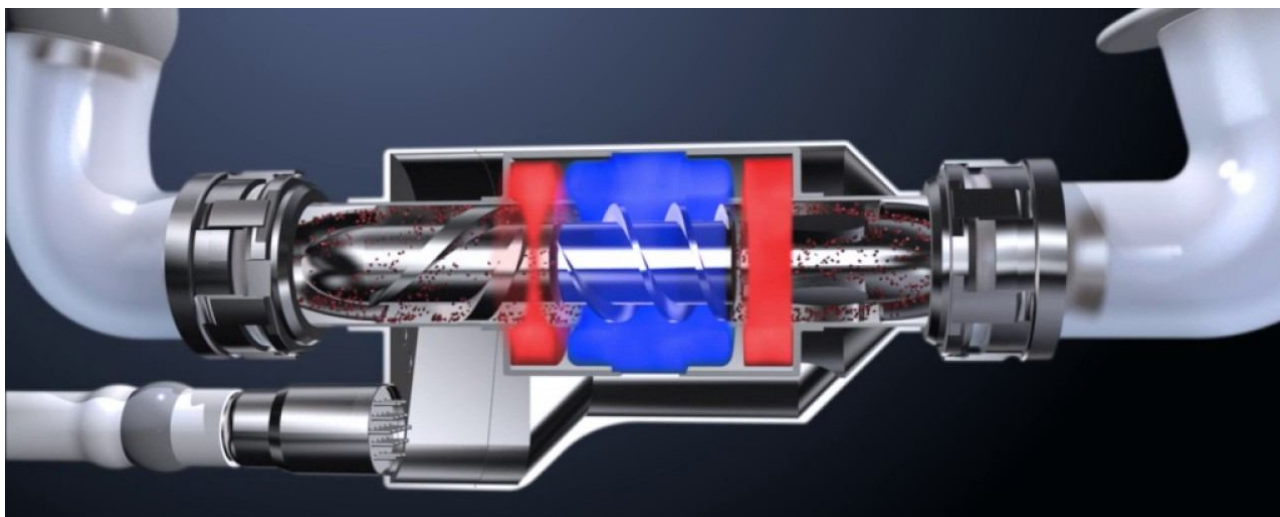


Рис. 3. Имплантируемая система INCOR LVAD (Германия)

США

Американская корпорация Thoratec Corporation представила в линейке своей продукции два экстракорпоральных устройства поддержки кровообращения, которые обеспечивают гемодинамическую стабилизацию у пациентов, нуждающихся в сердечно-легочной поддержке. Это CentriMag и PediMag, которые используют также технологию магнитного подвеса ротора сердечного насоса. Они предназначены для кратковременной поддержки кровообращения: у взрослых пациентов с помощью CentriMag, а для педиатрии — PediMag [7].

Американская корпорация Medtronic также представила насос третьего поколения HeartWare HVAD (рис. 4), левитация ротора в котором осуществляется благодаря использованию гибридного пассивного магнитного подшипника и гидродинамической системы подшипников. Пассивные магниты располагаются внутри лезвий центробежной турбины, а осевые грани турбины подвержены действию гидродинамической силы. Так, при работе осевая магнитная сила противодействует гидродинамической подъемной силе и происходит левитация ротора сердечного насоса. Мощность при работе данного устройства составляет порядка 5 Вт.

Американский насос Abbott HeartMate 3 (рис. 5) корпорации Abbott Laboratories является имплантируемым насосом, имеющим магнитный подвес ротора. Ротор этого насоса представляет собой центробежную турбинку, в которой магниты располагаются по оси, а в центре турбины располагаются отверстия, позволяющие направлять

а



б

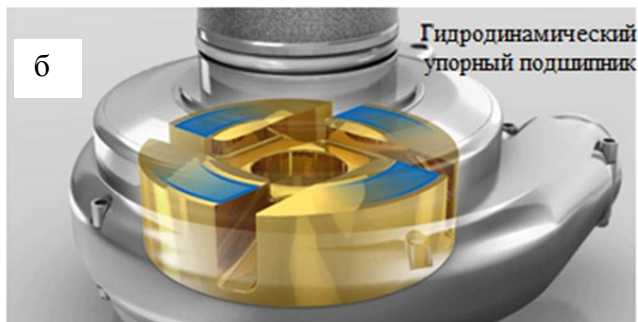


Рис. 4. Насос HeartWare HVAD [8].
Общий вид (а), с вырезом (б)

поток к центру. Ротор левитирует благодаря сочетанию сил пассивных и активных магнитных подшипников. Сила притяжения между магнитами ротора и статора удерживают ротор по центру в осевом положении [9].

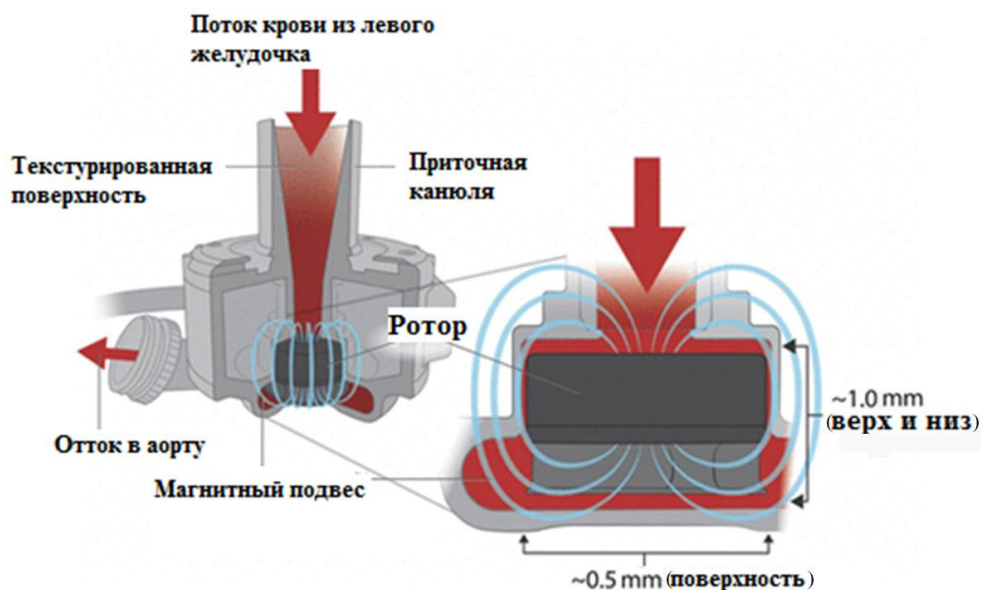


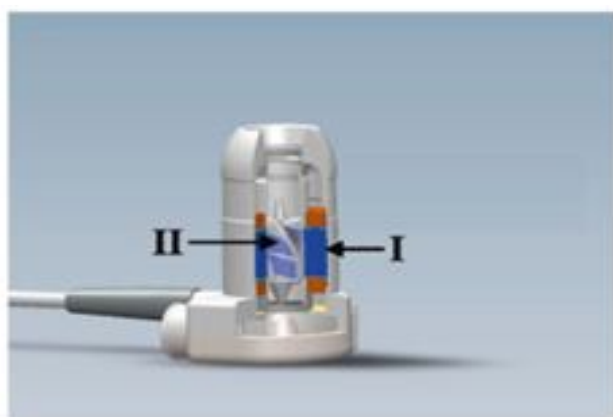
Рис. 5. Конструкция насоса HeartMate 3 (США) [9]



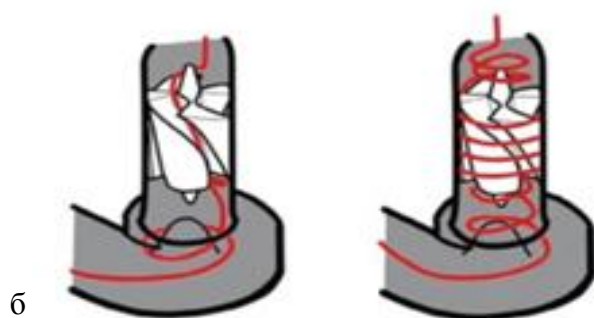
Рис. 6. Основные узлы (а) и конструкция (б) устройства вспомогательного кровообращения TerumoDuraHeart (США)

TerumoDuraHeart (рис. 6) является имплантируемым устройством вспомогательного кровообращения с центробежным ротором. Рабочее колесо вращается с помощью магнитной муфты, расположенной между постоянным магнитом, встроенным в двигатель снаружи камеры крови, и пассивным магнитным подшипником, встроенным в кольцо двигателя. Если система магнитной левитации выходит из строя, рабочее колесо может продолжать вращаться от динамического давления, создаваемого корпусом насоса, в качестве резервной меры безопасности. Для балансировки используется гидродинамическая поддержка ротора, приводимого в движение гидродинамической силой. Скорость вращения варьируется от 1200 до 2400 об./мин, при этом возможный рабочий объем перекачиваемой крови до 10 л/мин [10].

HeartWare (рис. 7) — самый малый насос третьего поколения, который имплантируется непосредственно в сердце человека, прилегая к нему. Единственной вращающейся частью является ротор, или рабочее колесо, которое поддерживает вращение в устройстве благодаря сочетанию гибридных подшипников и пассивных магнитов. Диапазон скорости в таких насосах от 2400 до 3200 об./мин. Комбинированная гибридная система пассивных магнитных подшипников и гидродинамических подшипников подвешивает крыльчатку в титано-керамическом корпусе для повышения долговечности устройства, в то время как надежность устройства повышается за счет ис-



а



б

Рис. 7. Общий вид (а) и схема расположения в организме (б) насоса HeartWare (США).

I — ротор, II — турбина

пользования двухмоторных статоров с независимым приводом. Каждый статор двигателя имеет отдельный кабель, который подключается к внешнему контроллеру и источнику питания. Питание подается от источника переменного тока, источника 12 В постоянного тока или от двух перезаряжаемых батарей, которые могут обеспечить до 12 ч работы [7].

Разработанные в клинике Кливленда насосы CorAide и DexAide представляют собой имплантируемые центробежные устройства вспомогательного кровообращения третьего поколения, которые используют гидродинамические и магнитные силы для поддержки ротора. Оба устройства характеризуются своей инвертированной конфигурацией двигателя, каждая из которых состоит из рабочего колеса, установленного на "полюс" ротор, окружающий статор цилиндрического двигателя. Устройства разработаны простыми, надежными и позволяют уменьшить контакт крови с движущимися частями насоса, а это в свою очередь предотвращает износ частей насоса и потенциальное образование тромба. CorAide LVAD потребляет менее 6 Вт мощности при 2850 об./мин. DexAide может работать на скоростях от 1800 до 3600 об./мин. При скорости устройства 2500 об./мин потребляемая мощность составляет 2.6 Вт [11]. Сравнительные характеристики рассматриваемых аппаратов представлены в таблице.

Характеристики существующих АВК третьего поколения

Марка	Тип подшипникового узла	Расход крови, л/мин	Скорость вращения, об./мин	Потребляемая мощность, Вт	Масса, г
АВК-Н "Спутник"	Магнитный подвес	5	5000–10000	8	180
HeartWare HVAD	Магнитный подвес	10	1800–4000	3–7	145
INCOR LVAD	Магнитный подвес	6	7500	4	200
HeartMate 3	Магнитный подвес		5400	5	200
DuraHeart	Магнитный подвес	2–10	1200–2600	5	540
HeartWare MVAD	Гибридные магнитные и гидродинамические подшипники	До 7		5–6	58

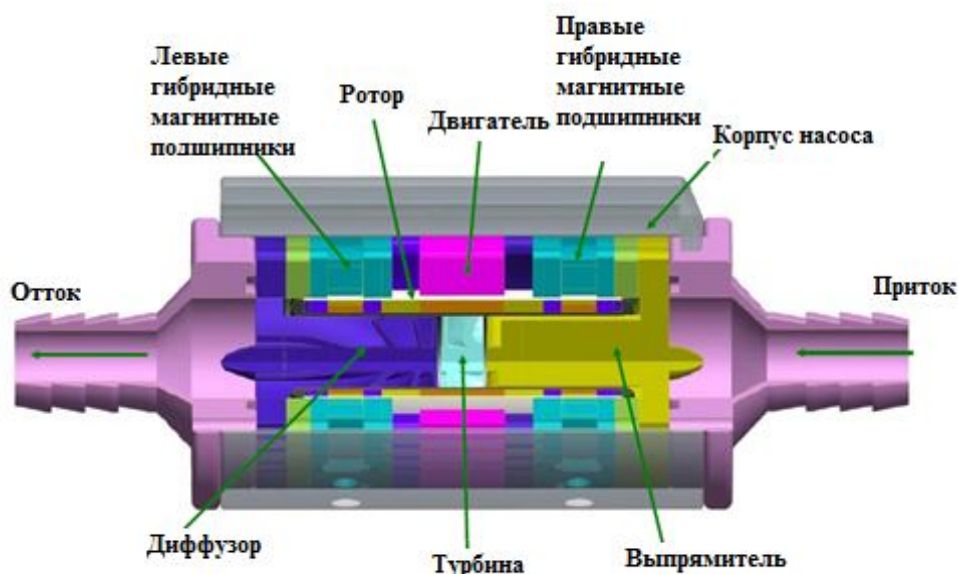


Рис. 8. Сердечный насос с гибридными магнитными подшипниками [12]

О ПРИНЦИПАХ РЕАЛИЗАЦИИ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

Для общего понимания системы магнитного подвеса ротора в насосах для искусственного сердца рассмотрена работа авторов Сингапурской школы машиностроения и аэрокосмической техники Наньянского технологического университета TauMeng Lim и др. [12]. В работе описывается компактная система сердечного насоса, состоящая из двух гибридных магнитных подшипников для подъема ротора и одного трехфазного двигателя с постоянными магнитами, а также бесщеточного двигателя постоянного тока для привода ротора осевого насоса.

Так, на рис. 8 представлено поперечное сечение осевого сердечного насоса [12]. Турбина заключена в ротор (масса 52 г), который управляется трехфазным двигателем постоянного тока и поддерживается двумя гибридными подшипниками (ГМП); вращение осуществляется без механического контакта со статором. Кровь течет в осевом направлении относительно входного и выходного каналов, проходя через выпрямитель, турбину и диффузор (служащий для замедления выходного потока крови). Выпрямитель и диффузор закреплены на корпусе насоса и выступают относительно ротора, не вступая в физический контакт с вращающимся ротором, в то время как турбина усажена в расточку ротора.

Статор двигателя набран из листов электротехнической стали толщиной 0.23 мм и расположен на середине ротора с 8-полюсными постоянными магнитами, склеенными диаметрально напротив ротора. Катушки двигателя, намотанные вокруг

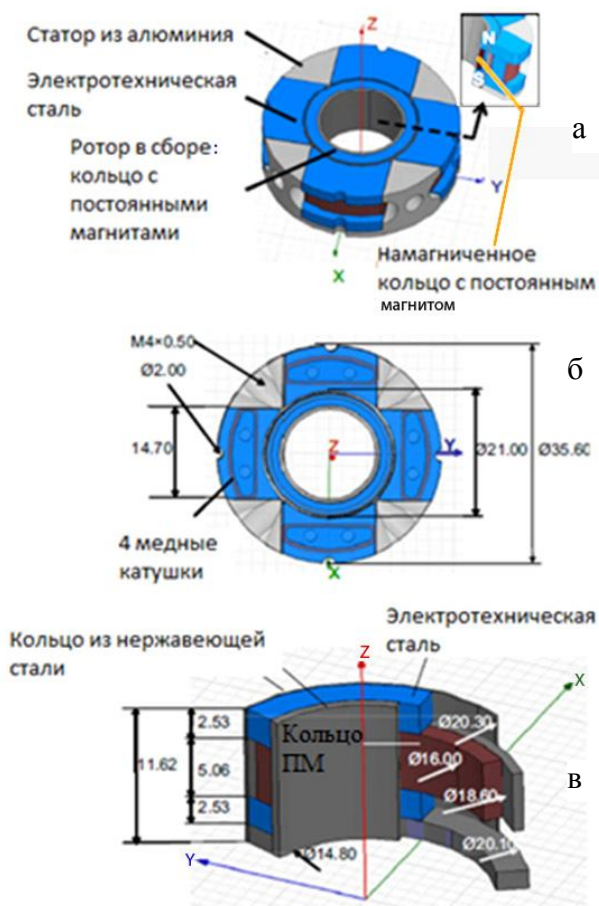


Рис. 9. Структура гибридного магнитного подшипника [12]: общий вид (а), вид по Z (б), разрез (в)

статора, приводятся в действие трехфазными токами для обеспечения более высокого среднего крутящего момента двигателя на роторе.

Структура и размеры ГМП указаны на рис. 9. Магнитный сердечник ГМП, как показано на рис. 9, набран из листов электротехнической стали толщиной 0.23 мм. Его диаметр составляет 14.8 мм. Между двумя кольцами каждого ГМП располагается кольцо постоянного магнита, сделанное из материала неодим-железо-бор (NdFeB). ГМП имеет четыре катушки со 180 медными витками на каждой катушке, диаметр провода 0.15 мм.

Также подобные системы реализуемы с помощью активных магнитных подшипников, которые позволяют контролировать положение ротора, что дает увеличение срока службы таких аппаратов. Помимо установки в осевые насосы магнитная левитация используется и в центробежных насосах перекачки крови.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение в клинической практике аппаратов вспомогательного кровообращения третьего поколения для механической поддержки сердца позволяет достигнуть высоких результатов для пациентов с сердечной недостаточностью и помогает дождаться выполнения успешной трансплантации сердца. Перспективы применения АВК обуславливаются их надежностью и безопасностью для структуры крови. Развитие подшипников и подшипниковых узлов для медицинских аппаратов вспомогательного кровообращения является актуальной задачей и может стать предметом новых исследований и открытий как в области механики сердечного насоса, так и в области материалов для узлов и аппаратов вспомогательного кровообращения. Преобразование узлов и частей аппаратов вспомогательного кровообращения также нуждается в совершенствовании подходов к их проектированию и моделированию, что является отдельной задачей, требующей исследования, анализа и разработки. Такие перспективы смогут стать ключевыми в кардиологической практике и позволят сохранить жизни тысячам людей.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (проект МК-508.2019.8)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петровский Б.В. Большая Медицинская Энциклопедия. 3-е изд., онлайн версия. URL: <https://БМЭ.орг>
2. Гидравлические и пневматические подшипники. Электронный ресурс.

URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлические_и_пневматические_подшипники (дата обращения 06.06.2019).

3. Диффузор (гидроаэродинамика). Электронный ресурс. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Диффузор_\(гидроаэродинамика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Диффузор_(гидроаэродинамика)) (дата обращения 10.06.2019).
4. Гринвальд В.М., Кузьмин Г.С., Маслобоев Ю.П., Селищев С.В., Тельшев Д.В. Первый отечественный аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н "СПУТНИК" на основе имплантируемого насоса крови // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. Т. 20, № 5. С. 516–521.
5. Космические технологии пришли на помощь кардиологам в Китае. Сайт "НАУЧНАЯ РОССИЯ". URL: <https://scientificrussia.ru/articles/china-robotic-heart> (дата обращения 16.06.2019).
6. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения для левого желудочка сердца. Berlin Heart. Электронный ресурс. URL: https://www.assomedica.by/sites/default/files/2017-12/Berlin%20Heart_INCOR%20LVAD.pdf (дата обращения 16.06.2019).
7. Masuzawa T., Osa M., Mapley M. Ch. 11: Motor design and impeller suspension // Mechanical Circulatory and Respiratory Support. Elsevier, 2017. P. 335–377.
8. HeartWare HVAD system. Advanced Heart Failure Management. Электронный ресурс. URL: <https://www.medtronic.com/xg-en/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/ventricular-assist-devices/heartware-hvad-system.html> (дата обращения 16.06.2019).
9. HeartMate 3 Offers new hope. Электронный ресурс. URL: <https://www.abbott.com/life-changing-tech/heartmate-3-offers-new-hope.html> (дата обращения 16.06.2019)
10. Griffith K., Jenkin E., Pagani FD. First American experience with the Terumo DuraHeart™ left ventricular assist system // Perfusion. 2009. Vol. 24, no. 2. P. 83–89. DOI: 10.1177/0267659109106826
11. Yoshio O., Keiji K., Masatoshi A., et al. Initial In Vivo Evaluation of the DexAide Right Ventricular Assist Device // ASAIO Journal. 2005. Vol. 51, no. 6. P. 739–742. DOI: 10.1097/01.mat.0000187399.46756.fc
12. Lim T.M., Zhang D., Yang J., Cheng S., et al. Design and parameter estimation of hybrid magnetic bearings for blood pump applications // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. Vol. 23, no. 7. P. 2352–2382. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.03.012

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Контакты: Нурғалиева Рушана Азатовна, Rushana39.45@mail.ru

Материал поступил в редакцию 09.09.2019

PRESENT AND FUTURE OF CIRCULATORY ASSIST DEVICES (REVIEW)

F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. A. Nurgalieva

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

This article is devoted to a review of existing third-generation assisted circulatory devices, which are indicated for severe forms of heart failure. The development of technologies has allowed the use of electromagnetic rotor suspension in heart pumps of the third generation, in which there is no or partially no mechanical contact of the main moving element – the rotor. This is allowed by the use of magnetic rotor suspension with hydrodynamic and electromagnetic bearings. The rotor is suspended by magnetic forces of repulsion or attraction. These devices are used in the absence of a donor organ or in the restoration of one's own heart weakened by myocardium. An acute shortage of donor organs requires immediate decisions to improve existing ones and to design, manufacture new apparatuses for auxiliary blood circulation, which will extend the life of people with heart failure. Undoubtedly, such devices have high demands on reliability, safety and biocompatibility. The development of bearings and bearing assemblies for medical devices for auxiliary circulation is an urgent task and may become the subject of new researches and discoveries both in the field of mechanics of the heart pump and in the field of materials for nodes and devices for auxiliary circulation.

Keywords: assisted circulatory apparatus, bearings, magnetic suspension, rotor, stator

REFERENCES

1. Petrovskij B.V. *Bol'shaya Medicinskaya Enciklopediya. Izdanie tret'e, onlajn versiya*. [The Great Medical Encyclopedia. Edition three, online version]. URL: <https://бмэ.опр> (In Russ.).
2. *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie podshipniki*. Elektronnyj resurs [Hydraulic and pneumatic bearings. Electronic Resource]. Wikipedia russ. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлические_и_пневматические_подшипники (accessed 06.06.2019). (In Russ.).
3. *Diffuzor (gidroaerodinamika)*. Elektronnyj resurs [Diffuser (hydroaerodynamics). Electronic Resource]. Wikipedia russ. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Диффузор_\(гидроаэродинамика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Диффузор_(гидроаэродинамика)) (accessed 10.06.2019). (In Russ.).
4. Grinvald V.M., Kusmin G.S., Masloboev Yu.P., Selishchev S.V., Telyshev D.V. [First Domestic Ventricular Assistant Device AVK-N "Sputnik" on Basis of Implantable Blood Pump]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika* [Journal Proceedings of universities. Electronics], 2015, vol. 20, no. 5, pp. 516–521. (In Russ.).
5. *Kosmicheskie tekhnologii prishli na pomoshch' kardiologam v Kitae* [Space technology came to the help of cardiologists in China]. Site NAUCHNAYA ROSSIYA. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/china-robotic-heart> (accessed 16.06.2019).
6. *Implantiruemaya sistema vpomogatel'nogo krovoobrashcheniya dlya levogo zheludochka serdca* [Implantable assisted circulation system for the left ventricle of the heart]. E-resourcet. URL: https://www.assomedica.by/sites/default/files/2017-12/Berlin%20Heart_INCOR%20LVAD.pdf (accessed 16.06.2019).
7. Masuzawa T., Osa M., Mapley M. Ch. 11: Motor design and impeller suspension. *Mechanical Circulatory and Respiratory Support*. Elsevier, 2017, pp. 335–377. DOI: 10.1016/B978-0-12-810491-0.00011-4
8. *HeartWare HVAD system. Advanced Heart Failure Management*. URL: <https://www.medtronic.com/xgen/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/ventricular-assist-devices/heartware-hvad-system.html> (accessed 16.06.2019).
9. *HeartMate 3 Offers new hope*. URL: <https://www.abbott.com/life-changing-tech/heartmate-3-offers-new-hope.html> (accessed 16.06.2019)
10. Griffith K., Jenkin E., Pagani F.D. First American experience with the Terumo DuraHeart™ left ventricular assist system. *Perfusion*, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 83–89. DOI: 10.1177/0267659109106826
11. Yoshio O., Keiji K., Masatoshi A., et al. Initial In Vivo Evaluation of the DexAide Right Ventricular Assist Device. *ASAIO Journal*, 2005, vol. 51, no. 6, pp. 739–742. DOI: 10.1097/01.mat.0000187399.46756.fc
12. Lim T.M., Zhang D., Yang J., Cheng S., et al. Design and parameter estimation of hybrid magnetic bearings for blood pump applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, no. 7, pp. 2352–2382. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.03.012

Contacts: Nurgalieva Rushana Azatovna,
Rushana39.45@mail.ru

Article received by the editorial office on 09.09.2019