

8. Wang J., Fruchtl D., Sun Z., Coleman J.N., Blau W.J. Control of optical limiting of carbon nanotube dispersions by changing solvent parameters // *Physical Chemistry C*. 2010. Vol. 114. № 13. PP. 6148-6156.
9. Izard N., Menard C., Riehl D., Doris E., Mioskowski C., Anglaret E. Combination of carbon nanotubes and two-photon absorbers for broadband optical limiting // *Chemical Physics Letters*. 2004. Vol. 391. P. 124.
10. Mishra S.R., Rawat H.S., Mehendale S.C., Rustagi K.C., Sood A.K., Bandyopadhyay R., Govindaraj A., Rao C.N.R. Optical limiting in single-walled carbon nanotube suspensions // *Chemical Physics Letters*. 2000. Vol. 317. PP. 510-514.
11. Izard N., Billaud P., Riehl D., Anglaret E. Influence of structure on the optical limiting properties of nanotubes // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30. № 12. PP. 1509-1511.
12. Vivien L., Riehl D., Delouis J.F., Delaire J.A., Hache F., Anglaret E. Picosecond and nanosecond polychromatic pump-probe studies of bubble growth in carbon-nanotube suspension // *Opt. Soc. Am. B*. 2002. Vol. 19. № 2. PP. 208-214.
13. Siva Y. Carbon Nanotubes – Synthesis, Characterization, Applications // *InTech*. 2011. P. 514.
14. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М. Определение характеристик ограничителя интенсивности оптического излучения на основе нестационарного уравнения переноса излучения в нелинейной среде // *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 1. С. 26-29.
15. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М., Герасименко А.Ю., Савельев М.С. Исследование нелинейных характеристик ограничителей интенсивности мощного оптического излучения // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 116. № 3. С. 486-494.

Александр Юрьевич Герасименко,  
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,  
Виталий Маркович Подгаецкий,  
д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. научный сотрудник,  
Михаил Сергеевич Савельев,  
аспирант,  
Сергей Андреевич Терещенко,  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
кафедра биомедицинских систем,  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, г. Зеленоград,  
e-mail: podgaetsky@yandex.ru

*Д.С. Петухов, С.В. Селищев, Д.В. Тельшев*

## Развитие аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца как наиболее эффективный способ лечения острой сердечной недостаточности

### Аннотация

В статье рассматривается эволюция аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка (АВК ЛЖ). Описываются их конструктивные особенности, и приводится статистика по выживаемости пациентов после трансплантации. Отмечается, что можно выделить три поколения АВК ЛЖ, отличающихся прежде всего конструкцией подвижных частей имплантированных компонентов.

### Введение

Пересадка донорского сердца является золотым стандартом в лечении последней стадии сердечной недостаточности. Однако количество ежегодно пересаживаемых донорских сердец остается практически неизменным на протяжении последних лет; так, в США ежегодно пересаживают около 2000 сердец, в России эта цифра значительно меньше и достигает 100 трансплантаций. Данные цифры гораздо ниже существующей потребности в лечении острых форм сердечной недостаточности. Например, в США потребность составляет около 100 тыс. трансплантаций, в России данная цифра в разы выше.

Поскольку вопрос увеличения количества донорских сердец остается открытым и его решение не представляется возможным в ближайшем будущем, на сегодняшний день эффективным способом лечения острой сердечной недостаточности является использование имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения. Существует несколько вариантов исполнения, а именно левый насос (ЛН), правый насос, совместное применение левого и правого насосов (бивентрикулярный обход). Наибольшее практическое применение в клинической практике находит ЛН, что в первую очередь связано с большой нагрузкой на левый желудочек сердца, отвечающий за перекачку крови по большому кругу кровообращения. Так, количество имплантаций ЛН в США в 2009 г. превысило количество пересадок донорского сердца [1].

### Основная часть

На сегодняшний день можно выделить три поколения ЛН.

### Первое поколение

К первой категории относятся так называемые насосы пульсирующего типа. В основу изобретения пульсирующих насосов легло предположение о необходимости переноса крови из левого желудочка способом, близким к работе здорового сердца. По этой причине ЛН пульсирующего типа перекачивает кровь в пульсирующем режиме, повторяя насосную функцию левого желудочка. Клинические испытания первого насоса данного типа (HeartMate IP LVAS) были начаты в 1986 году в Техасском институте сердца [2]. И в 1994 году было получено разрешение FDA на применение данного насоса как моста к трансплантологии. Вес имплантированной части составлял около 570 г и обеспечивал скорость потока до 12 л/мин при частоте пульсаций 140 уд./мин.

Использование данного типа насоса позволило значительно понизить смертность от острой сердечной недостаточности относительно результатов медикаментозного лечения. На *рис. 1* представлена статистика выживаемости в зависимости от типа лечения острой сердечной недостаточности, полученная в период 1998...2001 гг. в американских сердечных центрах [3].

Стоит отметить, что изначальный прототип насоса, используемый в 1986 году, имел громоздкий блок управления и ограничивал мобильность пациента за пределами клиники [4]. Далее блок управления был заменен на более миниатюрный, оснащенный переносными источниками энергии. Дизайн и функциональность блока управления претерпели незначительные изменения в ходе эволюции систем вспомогательного кровообращения. Основные изменения в первую оче-

редь были связаны с конструкцией насоса, обеспечивающего перекачку крови.

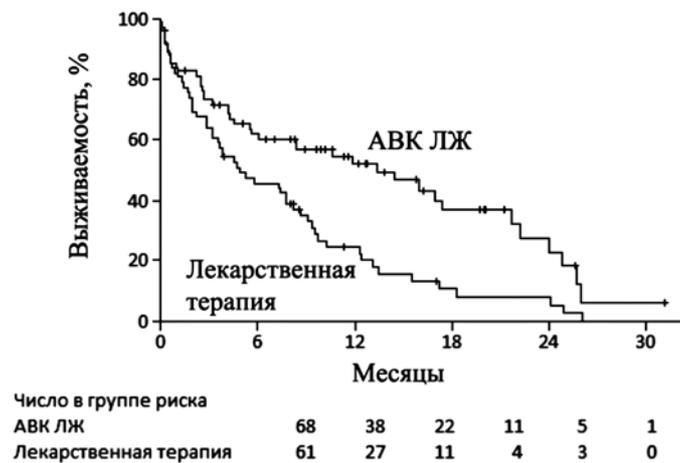


Рис. 1. Анализ выживаемости Каплана-Мейера в группах пациентов, которым имплантировали АВК ЛЖ, и группах пациентов, проходивших лекарственную терапию

Устройства первого поколения обладали рядом существенных недостатков, что послужило основой для дальнейшего развития и совершенствования ЛН. Механическая прочность насоса была не на высоком уровне, существовал большой риск заражения, тромбообразования и гемолиза, что делало рискованным использование устройств первого поколения на конечной стадии лечения. Также имплантированная часть насосов первого поколения была достаточно шумной и имела большие размеры, что предусматривало чрезмерное хирургическое вскрытие грудной клетки во время трансплантации. Однако системы первого поколения были заметным шагом вперед по сравнению с медикаментозным лечением, что, во-первых, позволило увеличить количество людей, дождавшихся пересадки донорского сердца, во-вторых, увеличило продолжительность жизни пациентов с острой сердечной недостаточностью и, в-третьих, показало перспективность разработки и совершенствования имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения.

### Второе поколение

Ко второму поколению ЛН относятся неп пульсирующие осевые насосы, которые поддерживают постоянный поток крови из левого желудочка в аорту. Теоретическое преимущество конструкции осевого насоса заключается в снижении тромбообразования и минимизации износа и поломки из-за использования нескольких подвижных частей.

Данные насосы значительно меньше насосов первого поколения, они обладают более простой конструкцией за счет отсутствия механических подшипников и механических и биологических клапанов, что делает их потенциально более надежными устройствами. Значительно меньшие массогабаритные показатели позволяют использовать их на относительно маленьких пациентах и детях (с поверхностью тела < 1,5 м<sup>2</sup>). Снижение энергопотребления этих насосов позволяет уменьшить вес экстракорпорального оборудования (аккумуляторные батареи, система управления) и увеличить время автономной работы таких систем без смены батарей. Существенным преимуществом этих насосов является их бесшумность. Кроме того, осевые насосы требуют минимума специальных профессиональных навыков в управлении, поскольку единственным параметром управления является скорость вращения ротора насоса [5].

Основная дискуссия относительно эффективности использования ЛН второго поколения связана с нефизиологичностью потока, генерируемого насосом, в связи с отсутствием пульсаций. Главные доводы в пользу неп пульсирующего потока заключаются в том, что пульсации имеют место только в локации крупных сосудов, основная же функция кровообра-

щения ложится на более мелкие сосуды, в которых пульсации практически отсутствуют.

Эффективность неп пульсирующего потока в результате подтверждается клиническими данными (рис. 2), согласно которым выживаемость пациентов с системами второго поколения превосходит аналогичные параметры для ЛН первого поколения [6].

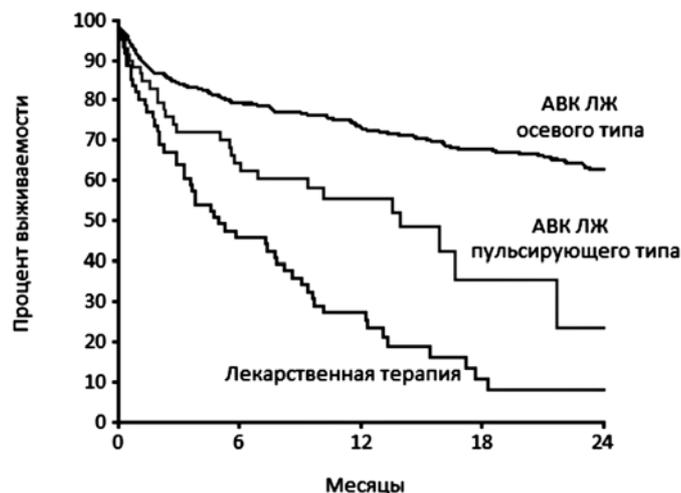


Рис. 2. Выживаемость на последней стадии сердечной недостаточности, лечение которой проводилось с помощью лекарственной терапии и механически поддерживаемого кровообращения

### Третье поколение

Основным отличием систем третьего поколения от ЛН второго поколения является применение явления магнитной левитации в роторе, что позволяет избавиться от проблемы трения в насосе. Целью разработки систем третьего поколения является дальнейшее уменьшение тромбообразования, увеличение износоустойчивости и долговечности. Системы третьего поколения представляют собой центробежные насосы постоянного тока [7]. Помимо конструктивных особенностей насосы центробежного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с насосами осевого типа, а именно более низкую скорость вращения при сопоставимой скорости потока, высокую эффективность и анатомическую конструкцию.

Наилучшие параметры выживаемости на сегодняшний момент показывают устройства второго поколения. Так, выживаемость через два года после имплантации для устройств второго поколения составляет около 70 %, а третьего – около 60 %.

Данные результаты обусловлены недостаточностью клинических данных для систем третьего поколения и широкой апробацией систем второго поколения, что в первую очередь связано с получением разрешения FDA на использование «HeartMate II» как моста к трансплантологии в 2008 году и на целенаправленное лечение в 2010 году, что послужило катализатором к увеличению числа трансплантаций.

Подавляющее число трансплантаций приходится на системы поддержки функции левого желудочка неп пульсирующего типа (второе поколение), что говорит об эффективности и широкой апробации систем данного вида.

Также следует отметить значительное снижение показателя смертности после имплантации ЛН. Так, в короткий промежуток с 2005 по 2009 годы число трансплантаций ЛН практически утроилось, в то же время смертность в этот период понизилась в 2 раза [1], что подтверждает эффективность и перспективность использования ЛН для лечения острой сердечной недостаточности. Несмотря на все последние успехи использования имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения, смертность от применения данных систем превосходит смертность от трансплантации донорского сердца (рис. 3), что показывает необходи-

мость дальнейшего совершенствования имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения.



Рис. 3. Общий коэффициент смертности в условиях стационара, отражающий процент пациентов, умерших во время учетной госпитализации как при ортопической трансплантации сердца (ОТС), и при имплантации аппарата вспомогательного кровообращения левого желудочка (АВК ЛЖ) за 2005-2009 гг.

В связи со значительным увеличением имплантаций ЛН и снижением смертности после имплантации существенно изменилось назначение имплантированных приборов; так, в 2008 году половина всех имплантированных систем использовалась как мост к трансплантологии, к 2012 году число таких систем составляло чуть больше 20 %. В то же время использование имплантируемых ЛН увеличилось с 5 % в 2008 году до 44 % в 2012 году [8].

#### Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что на сегодняшний день наибольшее распространение получили системы второго поколения, что выражается в общем количестве трансплантаций и выживаемости пациентов после трансплантации. Поэтому наиболее перспективными представляются разработка и серийный выпуск в России имплантированных насосов длительной механической поддержки кровообращения второго поколения, которые хорошо себя зарекомендовали и как мост к трансплантологии, и как целенаправленное лечение острой сердечной недостаточности. Необходимость дальнейшего совершенствования аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка связана с уровнем выживаемости после трансплантации. Пороговым значением в данном случае выступает смертность после пересадки донорского сердца. Для дальнейшего интегрирова-

ния аппаратов вспомогательного кровообращения в клиническую практику необходимо не только совершенствовать технологии, но и уменьшать итоговую стоимость аппарата, что позволит сделать данный вид высокотехнологичной медицинской помощи более доступным.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00044).*

#### Список литературы:

1. *Mulloy D.P. et al.* Orthotopic heart transplant versus left ventricular assist device: A national comparison of cost and survival // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2013. Vol. 145 (2). PP. 566-573.
2. *Frazier O.H. et al.* Improved Mortality and Rehabilitation of Transplant Candidates Treated with a Long-Term Implantable Left Ventricular Assist System // *Annals of Surgery.* 1995. Vol. 222. PP. 327-338.
3. *Rose E.A. et al.* Long-term use of a left ventricular assist device for end-stage heart failure // *N. Engl. J. Med.* 2001. Vol. 345 (20). PP. 1435-1443.
4. *Garbade J., Bittner H.B., Barten M.J., Mohr F.-W.* Current Trends in Implantable Left Ventricular Assist Devices // *Cardiology Research and Practice.* 2011. Vol. 2011.
5. *Иткин Г.П.* Устройства для вспомогательного кровообращения: прошлое, настоящее и будущее непальсирующих насосов // *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2009. Т. 11. № 3. С. 81-87.
6. *Miller L.W., Guglin M., Rogers J.* Cost of Ventricular Assist Devices: Can We Afford The Progress? // *Circulation.* 2013. Vol. 127 (6). PP. 743-748.
7. *Farrar D.J., Bourque K., Dague C.P., Cotter C.J., Poirier V.L.* Design features, developmental status, and experimental results with the Heartmate III centrifugal left ventricular assist system with a magnetically levitated rotor // *ASAIO J.* 2007. Vol. 53 (3). PP. 310-315.
8. *Rodriguez L.E., Suarez E.E., Loebe M., Bruckner B.A.* Ventricular assist devices (VAD) therapy: New technology, new hope? // *Methodist DeBakey Cardiovasc J.* 2013. Vol. 9 (1). PP. 32-37.

*Дмитрий Сергеевич Петухов,*  
аспирант,

*Сергей Васильевич Селищев,*

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

*Дмитрий Викторович Тельшев,*

*канд. техн. наук, доцент, ст. научный сотрудник,*

*кафедра биомедицинских систем,*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,*

*г. Москва, г. Зеленоград,*

*e-mail: telyshev@bmslab.miet.ru*

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,  
РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!**

**ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ  
«МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»**

**НА 2015 ГОД.**

**Индекс по каталогу «Роспечать» – 72940.**

**В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.**

**Стоимость подписки: 950 руб. – за один номер,  
2850 руб. – на первое полугодие 2015 года (3 номера), 5700 руб. – на 2015 год (6 номеров).**

**Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.**