МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

№ 3 (327) 2021

МАЙ–ИЮНЬ

Издается с 1967 г., г. Москва

ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

Г.Г. Боярский, А.М. Невзоров, А.И. Хаустов

Проектирование микронасоса для поддержки левого желудочка сердца

Аннотация

Представлены результаты проектирования осевого микронасоса (МН) для поддержки левого желудочка сердца человека. Сформированы основные требования к массогабаритным размерам малоинвазивного микронасоса. Выявлены особенности выбора основных геометрических размеров МН и их влияние на его напорные и энергетические характеристики. Приведены результаты проектирования, и получены его напорные и энергетические характеристики.

Введение

Прогресс в современной кардиохирургии невозможен без применения механических нагнетательных устройств, которые обеспечивали бы частичную или полную, временную или постоянную замену функции сердца. Совершенствование, разработка новых методов лечения, внедрение трансплантации в медицинскую практику поставили задачу разработки новых простых, доступных для широкого применения и в то же время совершенных насосов. При этом основной тенденцией в клинической практике является миниатюризация размеров устройств, чтобы обеспечить малоинвазивность их применения. Так, для механической поддержки кровообращения, введенного в полость левого желудочка с использованием стандартной методики катетеризации полостей сердца по Сельдингеру, требуется, чтобы максимальный диаметр имплантируемой части осевого насоса не превышал 7 мм, а длина была не более 45 мм. Предельно допустимый диаметр определяется средним диаметром кровеносного русла пути имплантации, а длина жесткой части насоса ограничивается радиусом аорты.

В настоящий момент известны устройства поддержки функции левого желудочка на основе микронасосов [1]-[4]. Однако неизвестны их напорно-расходные и энергетические характеристики, что не позволяет эффективно применять их для различных клинических случаев. Основной целью работы является проектирование микрогабаритных осевых насосов (диаметром менее 7 мм и общей длиной не более 45 мм) для поддержки левого желудочка сердца с подачей 3 л/мин и давлением на выходе до 130 мм рт. ст. и определение их напорно-расходных и энергетических характеристик.

Материалы и методы

В авиационной и космической технике всегда уделялось большое внимание массогабаритным характеристикам конструкции летательного аппарата (ЛА) и его бортового оборудования. Уменьшение массы конструкции ЛА обеспечивает увеличение полезной нагрузки, что равноценно увеличению дальности полета или радиуса действия, скороподъемности, маневренности. Из практики проектирования и опыта применения насосов для ЛА [5]-[8] известно, что уменьшение габаритных размеров приводит к уменьшению эффективности насосов, что объясняется увеличением относительных размеров, таких как относительная величина шероховатости поверхности лопаток насоса, корпуса, относительных зазоров между вращающимися и стационарными элементами насоса и т. д., которые оказывают существенное влияние на гидравлические, дисковые потери и потери на утечки, а значит, на эффективность работы насоса.

Основные ограничения на выбор размеров осевого микронасасоса (МН) для поддержки левого желудочка оказывают диаметр и длина его элементов, ограниченные размерами сосудов и аорты, диаметром вала рабочего колеса, который определяется по крутящему моменту и прочностным характеристикам материала, а также размерами подшипниковых узлов. Поэтому размеры микронасоса определяются в основном не из оптимальных с точки зрения КПД или минимальной травмы крови, а из компоновочных требований. Таким образом, целью работы является проектирование микронасоса с максимальной энергетической эффективностью при строго ограниченных размерах, определение его напорных и энергетических характеристик, что позволит в дальнейшем отработать конструкцию МН, обеспечивающую наименьшую травму крови при его работе.

Результаты

На первом этапе проектирования использовались рекомендации [9], [10], позволяющие определить основные геометрические параметры осевого насоса на основании двумерной теории течения жидкости в лопаточных насосах: углы установки лопаток, диаметр периферии, втулки на входе и выходе рабочего колеса (РК) и спрямляющего аппарата (СА).

© Издатель: СОО «Международное НТО приборостроителей и метрологов».

Исходными данными для определения основных параметров МН являются: подача V, которую он должен обеспечить, равную 3 л/мин ($5 \cdot 10^{-5}$ м^3/с), и напор, который он должен создавать,

$$H = \Delta p / \rho g = 1{,}6 \text{ м},$$

где $\rho = 1050$ кг/м^3 – плотность крови; $\Delta p = (p_{вых} - p_{вх})$ – разность давления между давлением на выходе $p_{вых}$ из МН, равным давлению в аорте, и давлением на входе $p_{вх}$ в МН, равным давлению в левом желудочке.

На *рис. 1* представлен внешний вид и габаритные размеры разработанного микронасоса, где $L = 43$ мм; $D = 6{,}5$ мм; поз. 1 – корпус; поз. 2 – рабочее колесо; поз. 3 – спрямляющий аппарат. Основным параметром, обеспечивающим требуемые гидродинамические характеристики МН, а именно расход и напор насоса, является геометрия лопаток рабочего колеса и спрямляющего аппарата. Для определения геометрии профилей лопаток разработана программа расчета, результаты расчета представлены на *рис. 2а* и *б*.

Обсуждение

Определение напорно-расходных и энергетических характеристик выполнялось методом компьютерного моделирования. В программном комплексе моделирования решались уравнения Навье-Стокса, дискретизированные на расчетной сетке. Для оптимального разрешения особенностей решения расчетная программа автоматически адаптирует расчетную сетку к решению задачи. Для решения представленной системы дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов. В расчетах кровь принимается как ньютоновская несжимаемая жидкость с вязкостью $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ Па·с плотностью 1055 кг/м^3.

Напорно-расходные и энергетические характеристики МН представлены на *рис. 3* и *4*.

Из приведенных данных видно, что разработанный микронасос обеспечивает требуемые параметры для поддержки функции левого желудочка. Следует также отметить, что разработанная методика проектирования МН позволила при этом на расчетных режимах работы МН (расход 3 л/мин) обеспечить максимальную гидравлическую мощность в ограниченных размерах, что позволяет на следующем этапе проводить оптимизацию проточной части микронасоса для обеспечения минимальной травмы крови при его работе.

Список литературы:

1. *Шумаков В.И., Толпекин В.Е., Попов Т.А.* Атлас вспомогательного кровообращения. – Алма-Ата: Гылый, 1992. 205 с.
2. *Mukku, Venkata K. et al.* Use of impella ventricular assist device in patients with severe coronary artery disease presenting with cardiac arrest // The International Journal of Angiology: Official Publication of the International College of Angiology. 2012. Vol. 21. № 3. PP. 163-166.
3. *Иткин Г.П.* Механическая поддержка кровообращения: проблемы, решения и новые технологии // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2014. № 16 (3). С. 76-84.
4. *Pepino P., Germano C., Piermario O. et al.* Successful use of the Impella Recover LP 5.0 device for circulatorysupport during

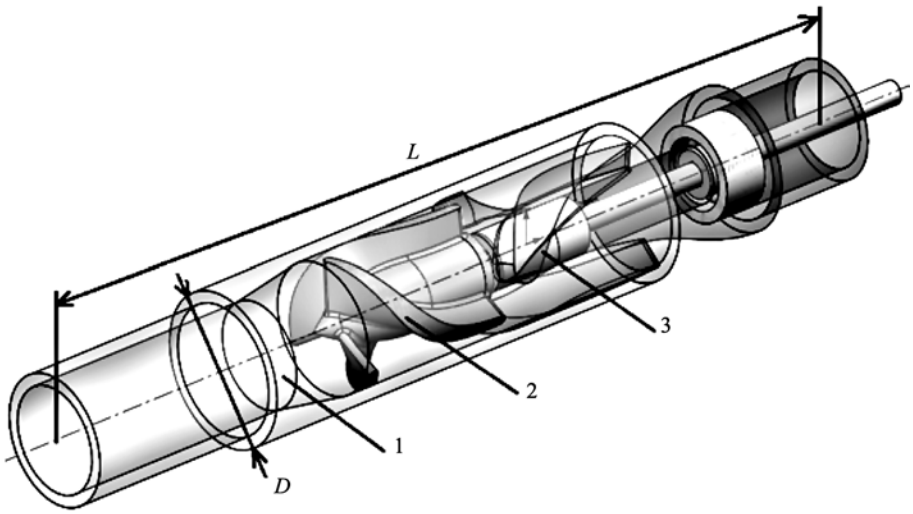

Рис. 1. Внешний вид микронасоса: 1 – корпус; 2 – рабочее колесо; 3 – спрямляющий аппарат

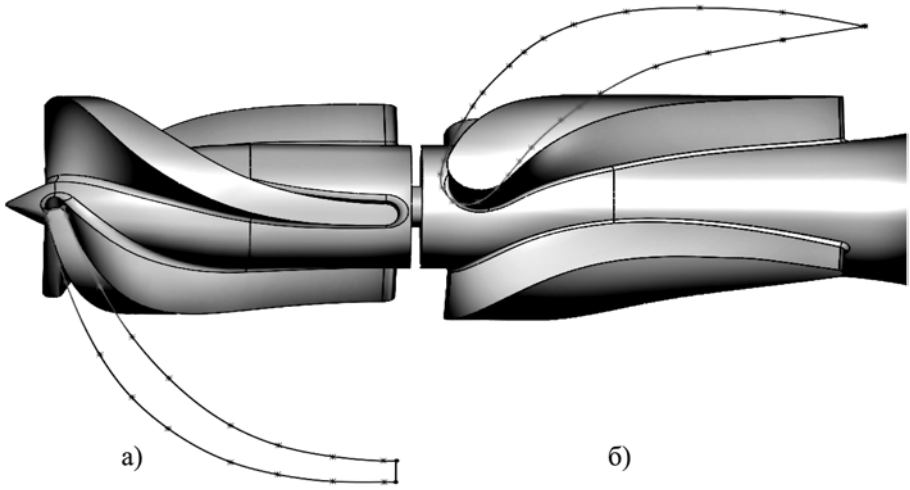

Рис. 2. Трехмерная модель рабочего колеса (а) и спрямляющего аппарата (б)

off-pump coronary artery bypass grafting // International Journal of Surgery. 2014. Vol. 5. PP. 803-805.
5. *Хаустов А.И., Боярский Г.Г., Сорокин А.Е.* Экспериментальное определение динамических характеристик микронасосов биотехнической системы орбитальной станции // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 184-190.
6. *Хаустов А.И.* Теоретическое исследование и испытание насосов нагнетательных систем летательных аппаратов // Вестник МАИ. 2008. Т. 15. № 1. С. 70-76.
7. *Хаустов А.И., Шашкин И.Н., Киндеев М.И.* Проектирование осевых насосов для систем терморегуляции летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 50. С. 17.
8. *Хаустов А.И., Шашкин И.Н., Мальгичев В.А., Невзоров А.М.* Конструктивные особенности проектирования подшипниковых узлов для осевых насосов систем терморегуляции летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 50. С. 18.
9. Высокооборотные лопаточные насосы / Под ред. Б.В. Овсянникова и В.Ф. Чебаевского. – М.: Машиностроение, 1975. С. 336.
10. *Овсянников Б.В., Боровский Б.И.* Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1986. С. 376.

Глеб Геннадьевич Боярский,
аспирант,
кафедра 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности»,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Андрей Михайлович Невзоров,
генеральный директор,
ООО «ДОНА-М»,
Александр Иванович Хаустов,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности»,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва,
e-mail: glebboyarsky@gmail.com

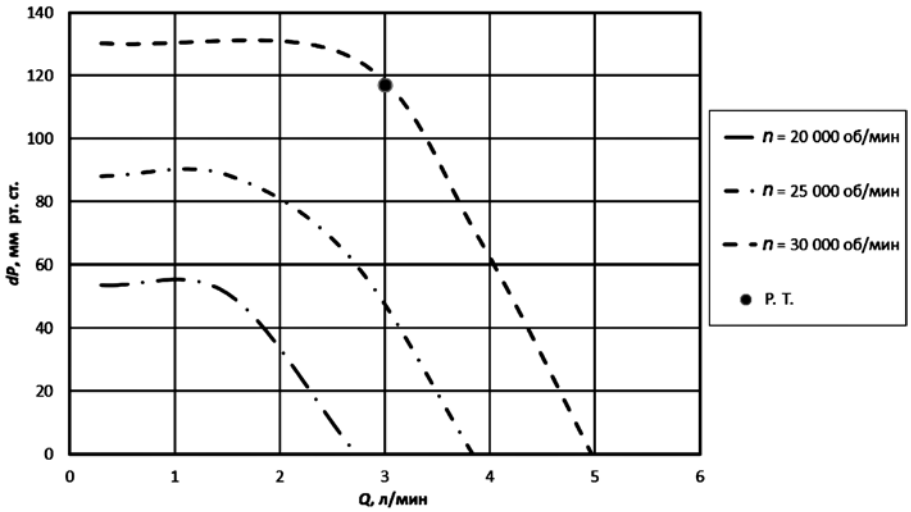

Рис. 3. Расчетные напорно-расходные характеристики МН

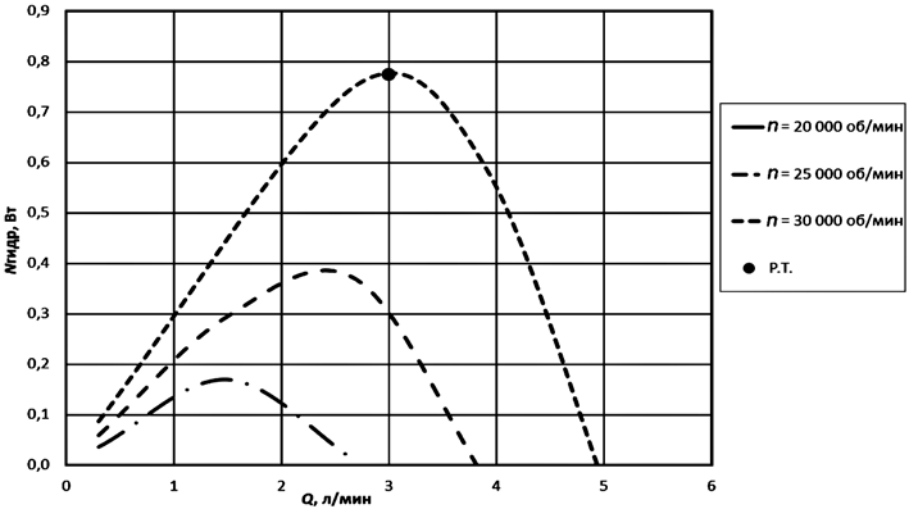

Рис. 4. Расчетные зависимости гидравлической мощности от расхода МН