

DOI: 10.15825/1995-1191-2015-1-97-102

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА И НАПОРА РОТОРНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ КРОВИ

Г.П. Иткин, И.А. Филатов, К.Н. Дозоров, А.В. Адашкин

ФГБУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

В статье приводится описание методов, средств и результатов расчета основных параметров осевого насоса (перепада давления и расхода) на основе анализа его технических характеристик (потребляемого тока и скорости вращения ротора). Показано, что расчетное значение перепада давления и расхода во всем диапазоне рабочих нагрузок и скоростей вращения ротора насоса отличается от измеренного не более чем на 10%. Демонстрируется возможность включения созданных средств в систему управления осевым насосом крови для протезирования функций левого желудочка сердца.

Ключевые слова: роторные насосы, скорость вращения ротора, расход насоса, напор насоса, алгоритм управления, косвенные измерения, потребляемый ток.

INDIRECT METHODS OF MEASURING FLOW RATE AND PRESSURE DROP OF ROTARY BLOOD PUMPS

G.P. Itkin, I.A. Filatov, K.N. Dozorov, A.V. Adaskin

V.I. Schumakov Federal Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

The article describes complex software to calculate the main parameters of the axial pump (pressure drop and flow rate) on the basis of an analysis of its technical characteristics (current consumption and pump speed). It is shown that the calculated value of pressure drop and flow rate throughout the range of operating loads and pump speeds is different from the measured one by no more than 10%. It is shown that this software package may be included in the control system of axial pump.

Key words: rotary pump, pump speed, flow rate, pressure drop, control system, noninvasive monitoring, current consumption.

Большинство систем управления имплантируемыми роторными насосами (РН), используемых в системах вспомогательного кровообращения, основаны на поддержании заданной скорости вращения ротора (СВР) насоса, что позволяет обеспечить необходимый для жизнедеятельности организма кровотоки [1]. Как правило, установка значения СВР производится непосредственно во время операции и корректируется на этапах реанимационного сопровождения и реабилитации. При выписке пациента из стационара значение СВР остается постоянным за счет работы системы стабилизации блока электронного управления имплантированным насосом крови. Такой режим работы насоса связан с

ограничением физической активности пациента, поскольку системный кровоток определяется в основном функциональными возможностями насоса. Поэтому любые изменения физической активности пациента могут компенсироваться в определенных пределах только за счет большей экстракции кислорода из артериальной крови [2]. Основные сложности реализации алгоритмов управления такими насосами прежде всего связаны с отсутствием надежных, длительно работающих инвазивных систем измерения расхода и напора насоса. Кроме этого, даже при наличии таких каналов прямого измерения их применение в будущем делает систему ненадежной, учитывая длительность механической

Для корреспонденции: Иткин Георгий Пинкусович. Адрес: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 1. Тел.: (499) 190-60-34; (916) 129-78-33. E-mail: georgeitkin@mail.ru.

For correspondence: Itkin Georgy Pinkusovich. Address: Moscow, Schukinskaya str., 1. Tel.: (499) 190-60-34; (916) 129-78-33. E-mail: georgeitkin@mail.ru.

поддержки кровообращения. Альтернативным способом получения информации о расходе насоса и перепаде давления является косвенная оценка данных параметров с использованием сигналов, получаемых системой управления непосредственно с насоса. Такими сигналами являются скорость вращения ротора и ток, потребляемый насосом [3–6].

При создании методов косвенной оценки расхода и напора РН необходимо учесть следующие требования:

- исходная информация для расчета параметров насоса – текущее значение тока, мощности и скорости вращения, полученные с блока управления осевым насосом;
- пределы допускаемых отклонений контролируемых значений параметров должны быть не более $\pm 10\%$, диапазон рассчитанных значений расхода – от 3 до 8 л/мин и перепада давления – от 30 до 120 мм рт. ст.

Алгоритм расчета косвенной оценки расхода и перепада давления

Для получения мгновенных значений напора и расхода осевого насоса обратимся к теории, описывающей характеристики РН.

Двигатель таких насосов в общем случае можно описать выражением [7]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_F - T_{LOAD}, \quad (1)$$

где J – момент инерции двигателя, Нм; ω – скорость вращения ротора насоса, 1/сек; T_M – вращающий момент двигателя, Нм; T_F – момент сопротивления вязкого трения, Нм; T_{LOAD} – момент нагрузки, Нм.

Вращающий момент двигателя:

$$T_M = K_1 I, \quad (2)$$

где K_1 – постоянный коэффициент; I – электрический ток обмоток двигателя, А.

Момент сопротивления вязкого трения:

$$T_F = K_2 \omega, \quad (3)$$

где K_2 – постоянный коэффициент.

Выражение для момента нагрузки может быть записано в расширенном виде после подстановки в него зависимости напора от расхода насоса:

$$T_{LOAD} = \frac{\omega^2}{\eta} (K_1 F_{DL} - K_2 F_{DL}^2). \quad (4)$$

График этой зависимости при постоянных значениях ω и η представлен на рис. 1. Для определения мгновенного значения расхода РН необходимо получить обратную зависимость $F_{PUMP} = f(T_{LOAD})$, но исходя из формы кривой, это невозможно в силу неоднозначности получаемой характеристики, поскольку одному значению момента нагрузки T_{LOAD}

соответствуют 2 значения расхода насоса, которые могут быть допустимыми при данных условиях.

Для определения средних значений расхода и напора РН необходимо определить их взаимосвязь с параметрами, которые можно измерить прямым способом: потребляемый ток, напряжение и СВР.

Для получения средних значений тока и СВР насоса использован фильтр скользящего среднего. Данный фильтр во временной области можно описать выражением:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k), \quad (5)$$

где x и y – входной и выходной сигналы фильтра соответственно; N – порядок фильтра.

Порядок фильтра определяется длительностью получаемого сигнала и частотой сбора данных. Частота сбора данных выбрана 250 Гц. Рекомендуемая длительность накопления информации для анализа variability сердечного ритма составляет 5 минут, соответственно, интервал времени для получения средних значений тока и скорости вращения ротора должен быть значительно меньше. Выбранное нами значение длительности установлено равным 10 с. Таким образом, порядок фильтра $N = 2500$.

Для проведения исследований был собран представленный на рис. 2 стенд.

Конструкция РН обуславливает ограничения диапазонов скорости и расхода, которые могут быть использованы при косвенных измерениях. Диапазон расхода ограничен областью монотонного уменьшения тока при увеличении расхода. На СВР менее 6000 об/мин на диапазоне расхода 2 л/мин (от 1 до 3 л/мин) изменение тока составляет 0,03–0,05 А и погрешность превышает предельную (10%).

Максимальное значение фактической СВР для вязкой жидкости (40% раствор глицерина) составляет 10 300 об/мин.

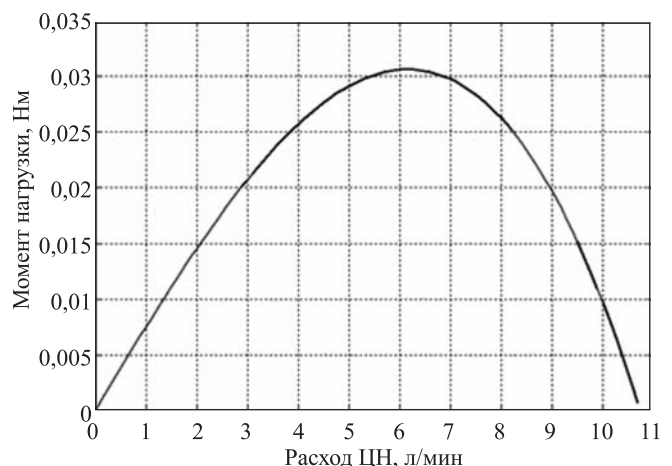


Рис. 1. График зависимости момента нагрузки от расхода насоса

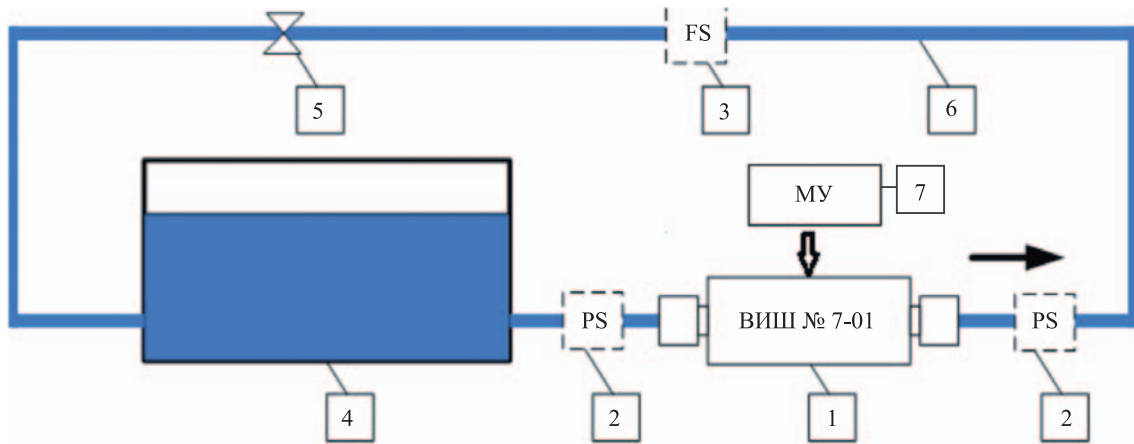


Рис. 2. Схема гидродинамического стенда: 1 – РН ВИШ № 7-01; 2 – измеритель давления инвазивным методом «Ангиотон» с датчиками PS; 3 – измеритель расхода TS410 (Transonic Systems Inc.) с датчиком FS; 4 – резервуар с жидкостью; 5 – регулятор/зажим; 6- перфузионная магистраль; 7 – модуль управления РН

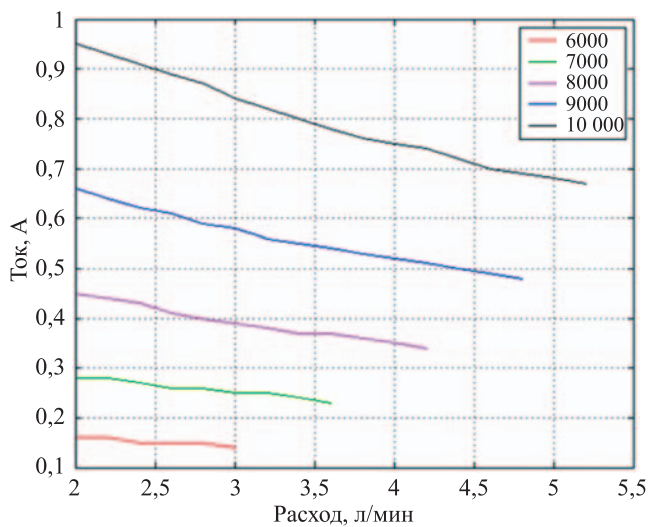


Рис. 3. Зависимость тока от расхода насоса

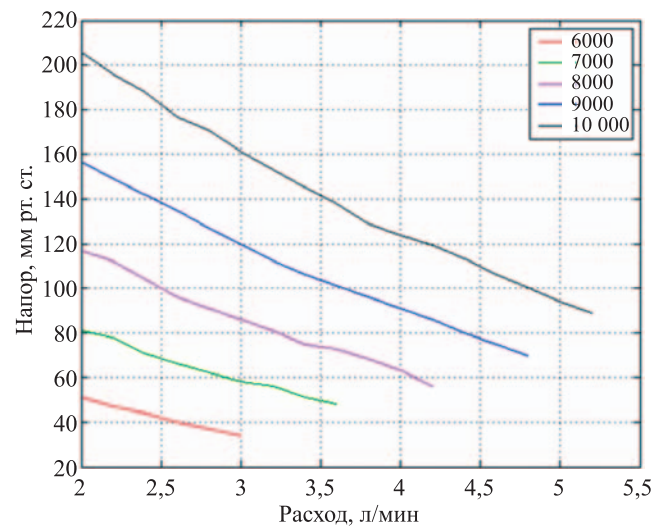


Рис. 4. Зависимость напора от расхода насоса

Результаты стендовых экспериментов представлены на рис. 3 (зависимость тока от расхода), рис. 4 (зависимость напора от расхода) и рис. 5 (граничные значения расхода для различных значений СВР).

В ходе исследований на стенде различных режимов работы РН были получены наборы требуемых значений и определено выражение расхода насоса как зависимости от СВР (ω) и от средней величины потребляемого тока I_{MEAN} :

$$\hat{F}_{PUMP} = K_1 + K_2 \omega_{MEAN} + K_3 \omega_{MEAN}^2 + K_4 I_{MEAN} + K_5 I_{MEAN}^2 + K_6 I_{MEAN}^3, \quad (6)$$

где \hat{F}_{PUMP} – среднее значение расхода насоса в мл/с, определенное косвенным методом; ω_{MEAN} – среднее значение СВР насоса, об/мин; $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – постоянные коэффициенты.

В результате регрессионного анализа получены коэффициенты для уравнения оценки расхода, представленные в табл. 1.

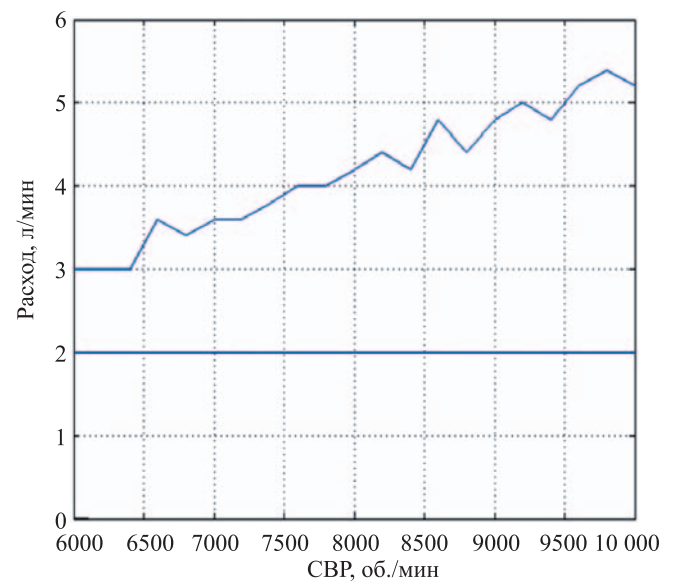


Рис. 5. Зависимость граничных значений расхода насоса от СВР

Таблица 1

Значения коэффициентов для определения расхода

Параметр	Значение	Размерность
K1	-15,635	$\frac{мл}{с}$
K2	4,416E-3	$\frac{мл}{с} / \frac{об}{мин}$
K3	-5,8E-8	$\frac{мл}{с} / \left(\frac{об}{мин}\right)^2$
K4	-3,0886	$\frac{мл}{с \cdot А}$
K5	0,1778	$\frac{мл}{с \cdot А^2}$
K6	-4,387E-3	$\frac{мл}{с \cdot А^3}$

Экспериментальные и расчетные (с использованием указанных коэффициентов) данные представлены на рис. 6. Абсолютная погрешность расхода не превышает 0,3 л/мин на всем диапазоне, а относительная – 10% на расходе более 2,5 л/мин (при требуемом расходе более 3 л/мин).

Для получения оценки среднего напора воспользуемся следующей формулой

$$\Delta P_{PUMP} = C_0 \omega^2 - C_1 F_{PUMP} \omega. \quad (7)$$

Так как приведенные данные используют измерения средних величин, а коэффициенты уравнения рассчитаны для мгновенных значений расхода, их

необходимо скорректировать для уменьшения погрешности. Значения коэффициентов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов для определения напора насоса

Параметр	Значение	Размерность
C ₀	2.651E-6	$\frac{мм \text{ рт. ст.}}{\left(\frac{об}{мин}\right)^2}$
C ₁	-3.42E-3	$\frac{мм \text{ рт. ст.}}{\frac{об}{мин} \cdot \frac{мл}{с}}$

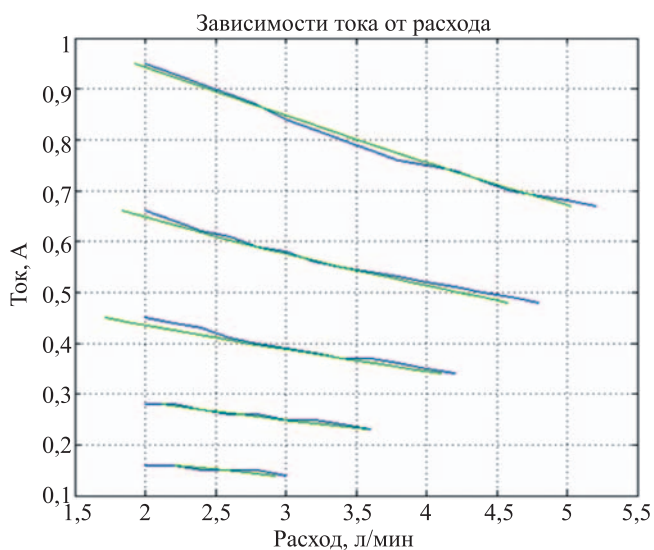


Рис. 6. Экспериментальные (зеленого цвета) и расчетные (синего цвета) графики значений расхода

Экспериментальные и расчетные (с использованием указанных коэффициентов) данные представлены на рис. 7. Абсолютная погрешность расхода не превышает 10 мм рт. ст., а относительная – 10% на всем диапазоне.

Полученные коэффициенты косвенного расчета расхода и напора были занесены в программное обеспечение Pumpex системы управления и мониторинга исследуемого на стенде РН.

На используемых диапазонах СВР и расхода регистрировались значения расхода и напора, полученные с измерителей прямым методом и отображаемые в Pumpex по результатам косвенного расчета. Полученные графики представлены на рис. 8 и 9.

Сравнение расчетных и экспериментальных расходно-напорных характеристик показывает достаточно небольшое их расхождение (рис. 10).

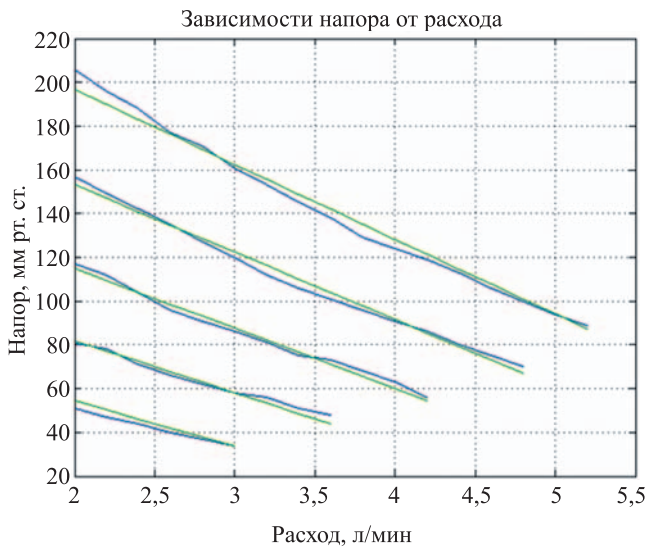


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные значения напора

Можно отметить, что характер кривых соответствует характеристикам датчиков прямого измерения. Динамические свойства записанного сигнала напора полностью определяются динамическими свойствами преобразователя давления. Исходя из полученных экспериментальных данных и динамических свойств насоса, можно определить динамическую характеристику РН:

$$W(s) = \frac{F}{P} = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (8)$$

где $\tau = 0,01$ с – постоянная времени.

Влияние динамической составляющей характеристики РН на создаваемый поток и измерительную систему незначительно, в частности потому, что длительность фаз сердечного цикла значительно больше создаваемых задержек и измеряются средние значения расхода и напора.

Разрабатываемые алгоритмы косвенного расчета перепада давления и расхода насоса введены в состав информационно-вычислительного обеспечения системы вспомогательного кровообращения с настройкой и верификацией режимов на гидродинамическом стенде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны математические и программные средства косвенной оценки расхода осевого насоса и перепада давления на основании информации, полученной с блока управления имплантируемым осевым насосом: текущее значение тока (мощности потребления) и скорости вращения ротора насоса. Данные программные средства реализованы в информационно-вычислительном модуле, обеспечивающем обработку и отображение результатов косвенных измерений

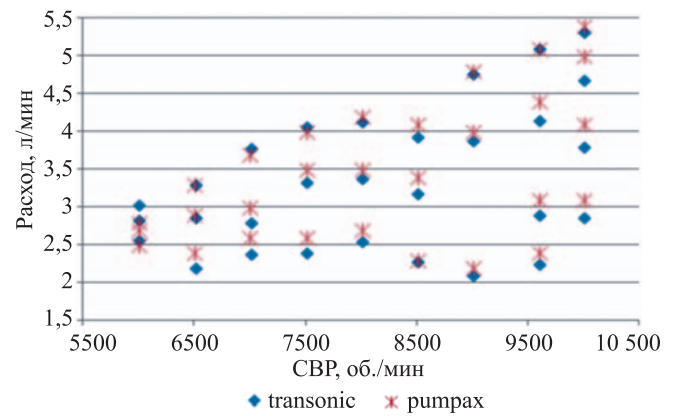


Рис. 8. Сравнение результатов измерений расхода

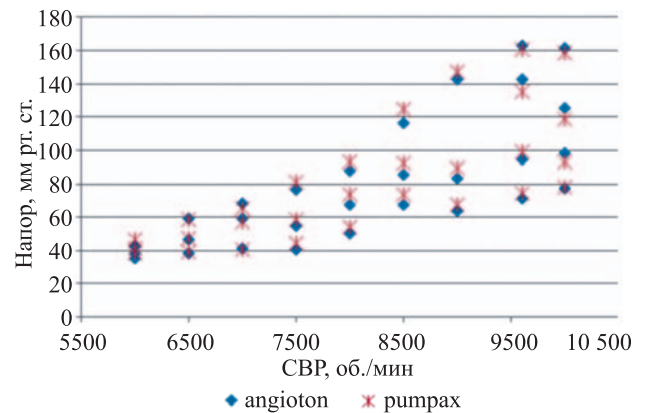


Рис. 9. Сравнение результатов измерений напора

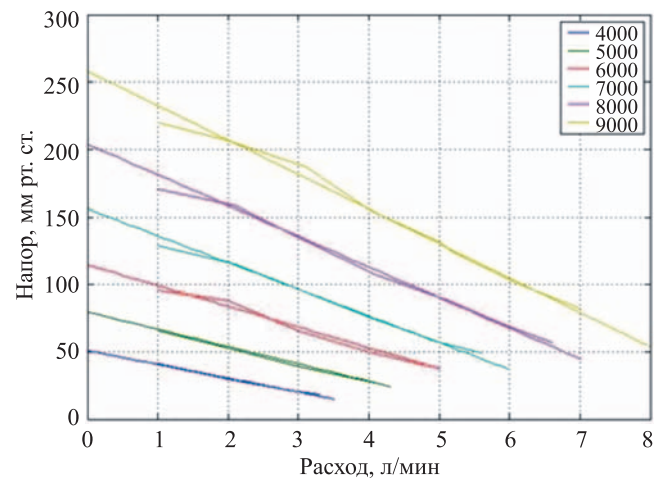


Рис. 10. Расходно-напорные характеристики насоса по результатам моделирования и эксперимента

расхода и перепада давления осевого насоса в эксперименте на животных в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Stevenson LW, Kormos RL. Mechanical cardiac support 2000: Current applications and future trial design. J. of Heart and lung Transpl. 2001; 20: 1–38.*

2. *Гайтон А.* Физиология кровообращения. Минутный объем сердца и его регуляция: пер с англ., Л.: Наука, 1980. *Gajton A.* Fiziologija krovoobrashhenija. Minutnyj obem serdca i ego reguljacija L: Nauka, 1980.
3. *Ayre PJ, Lowell NH, Woodard JC.* Non-invasive flow estimation in an implantable rotary pump: a study considering non-pulsatile and pulsatile flow. *Physiol. Measurement.* 2003; 24: 179–189.
4. *Funakibo A, Ahmed S, Sakuma I, Fukui Y.* Flow rate and pressure head estimation in a centrifugal blood pump. *Artif Organs.* 2002; 26: 985–990.
5. *Guruprasad A, Giridharan, Mikhail Skliar.* Physiological Control of Blood Pumps Using Intrinsic Pump Parameters: A Computer Simulation Study. *Artificial Organs.* 2006; 30 (4): 301–307.
6. *Schima H, Trubel W, Moritz A, Wieselthaler G, Stohr HG, Thoma H et al.* Noninvasive monitoring of rotary blood pumps: Necessity, possibilities, and limitations. *Artif. Organs.* 1992; 6: 195–202.
7. *Калекин АА.* Гидравлика и гидравлические машины. М.: Мир, 2005: 512. *Kalekin AA.* Gidravlika i gidravlicheskie mashiny. М.: Mir, 2005: 512.

Статья поступила в редакцию 29.01.2015 г.