

Определение закона изменения управляющего давления над клапанами микронасоса с пневматическим приводом

© В.А. Петров¹, Т.Н. Герасименко², О.В. Киндеева¹, А.И. Хаустов¹

¹ Московский авиационный институт, Москва, 125080, Россия

² ООО «НТЦ «БиоКлиникум», Москва, 115088, Россия

Проведено математическое моделирование мембранного микронасоса с пневматическим приводом. Такие насосы широко применяются для обеспечения циркуляции среды в микрофлюидных устройствах, используемых в различных областях науки и техники. Микронасос состоит из трех тонкостенных мембран: двух клапанных и одной мембраны рабочей камеры. Работа насоса осуществляется по специальному алгоритму попеременной подачи сжатого и разреженного воздуха на мембраны клапанов и рабочей камеры от блока управления. Установление нового значения давления над клапанами и рабочей камерой происходит не мгновенно, поэтому накладывается ограничение на частоту переключения клапанов и рабочей камеры. Цель — определение закона изменения давления над клапанами микронасоса и нахождение ограничений на частоту их переключения. Получены зависимости, описывающие нарастание и спад величины давления над рабочей камерой, которые экспериментально проверены на специально разработанном стенде. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: микронасос, мембрана, микрофлюидное устройство, пневматический привод, переходный процесс

Введение. В настоящее время стремительно развиваются и находят широкое применение микрофлюидные устройства, используемые для обеспечения циркуляции среды в управляющих элементах энергетических, транспортных машин и механизмов, микроэлектронике, биофизике и других областях. Основным элементом таких устройств — микронасос для подачи объемов жидкости, как правило, не более 30 мкл/мин.

Существует множество микронасосов с различными типами приводов: перистальтические [1], электроосмотические, мембранные [2], пьезоэлектрические [3, 4], дисковые [5] и др. В данной статье рассмотрен микронасос с пневматическим приводом, обладающий следующими преимуществами:

- не создает электромагнитных полей, которые могут изменять химический состав перекачиваемой жидкости;
- обеспечивает подачу жидкости в широком диапазоне изменения расхода и давлений нагнетания;
- проточная часть насоса не имеет нерабочих неактивных объемов.

Различные научные труды содержат по большей степени отрывочные данные, касающиеся микронасосов с пневматическим приво-

дом, которые часто не согласуются между собой (это касается и однотипных насосов) [6–10]. Такое положение можно объяснить сложностью явлений, происходящих при движении жидкости через каналы микронасоса, и тем, что такие явления недостаточно изучены. В большинстве работ введены существенные упрощения. Так, например, в статье [9] предполагается линейная зависимость между объемным расходом газа и перепадом управляющего давления в трубке, что вносит значительную погрешность в расчет, а в работе [11] для связи массового расхода воздуха с перепадом давлений использован закон Пуазейля, который справедлив для несжимаемой жидкости, и для рассмотрения пневматических устройств неприменим.

Одно из важнейших требований, предъявляемых к таким насосам — обеспечение малых точно дозированных подач нагнетаемой жидкости с требуемыми расходом и давлением. При этом установлено, что точность варьирования этих параметров строго зависит от частоты срабатывания клапанов и изменения управляющего давления.

Целью данной статьи является получение закона изменения управляющего давления над мембранами пневматического микронасоса при различных геометрических и режимных параметрах, характеризующих его работу.

Объект исследования. Исследуемый мембранный микронасос состоит из трех активных элементов: входного и выходного клапанов и мембраны рабочей камеры (рис. 1).



Рис. 1. Мембранный микронасос

Конструкция микронасоса с пневматическим приводом показана на рис. 2. В его основе поликарбонатная пластина 1, на которую нанесен слой из полидиметилсилоксана (ПДМС) 2. В этом слое сформированы клапаны насоса и стенки микроканала. К поликарбонатной пластине подключаются пневматические трубки 6 управляющего давления, а снизу приклеено предметное стекло 3. Микронасос имеет отверстия 5, 7 для подключения датчиков давления, а также специальные отверстия для подвода 4 и отвода 8 жидкости. Нагнетание жидкости может осуществляться из любого из этих отверстий, поскольку насос — двунаправленный. Микронасос имеет три мембраны. Две из них выполняют функцию входного и выходного клапанов и имеют в своей конструкции перемычку, которая при закрытии полностью перекрывает канал. Третья, центральная, мембрана (мембрана рабочей камеры) перемычки не имеет.

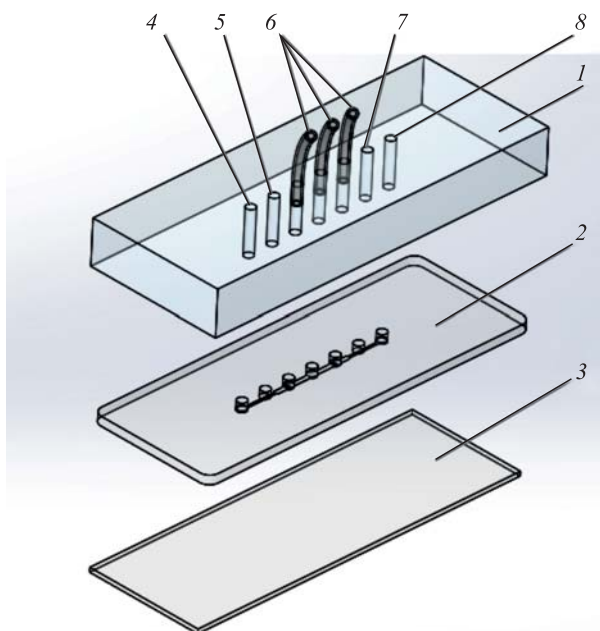


Рис. 2. Конструкция микронасоса с пневматическим приводом:

1 — поликарбонатная пластина; 2 — слой ПДМС; 3 — предметное стекло; 4, 8 — отверстия для подвода и отвода жидкости, соответственно; 5, 7 — отверстия для подключения датчиков давления; 6 — пневматические трубки

Блок управления (БУ) — пневматический прибор, состоящий из пневмораспределителей, ресиверов, регуляторов давления, эжекторов и трубок, соединяющих элементы и узлы между собой. Микронасос подключается к блоку управления при помощи гибких трубок. Циркуляция жидкости обеспечивается за счет поочередного открытия и закрытия клапанов и движения мембраны рабочей камеры согласно специально разработанному алгоритму, состоящему из шести последовательно сменяющихся тактов. Нагнетание жидкости осуществляется путем циклического повторения данных тактов с определенной частотой. Амплитуда $\pm p$ и частота f (или период переключения T) управляющего давления над клапанами влияют на амплитуду и частоту движения мембраны рабочей камеры, определяя тем самым объем перекачиваемой за такт жидкости. С помощью БУ можно настраивать значения положительного и отрицательного управляющих давлений и частоту переключения клапанов, что позволяет менять динамические параметры (подачу и напор) микронасоса в широком диапазоне.

Положение клапанов и рабочей камеры напрямую зависит от величины давления воздуха над мембранами. Когда переключается клапан пневмораспределителя, в пневматической трубке, идущей от

БУ к насосу, начинается переходный процесс изменения давления воздуха. Трубка имеет достаточно большой объем, поэтому мембрана срабатывает не сразу. Требуется определенное время для того, чтобы заполнить управляющие трубки сжатым воздухом или откачать воздух из них. По этой причине накладывается ограничение частоты переключения клапанов и рабочей камеры.

Определение закона изменения давления над мембраной. С блока управления на мембраны микронасоса подается управляющее давление. Наиболее полно изменение давления воздуха над мембраной по времени t при его росте и спаде, соответственно, описывают уравнения [12]:

$$\frac{d\eta_{up}}{dt} = A\eta_{up}^{2/7} \sqrt{\eta_{up}^{-2/7} - 1}; \quad (1)$$

$$\frac{d\eta_{dn}}{dt} = -A\eta_{dn}^{5/7} \sqrt{1 - \eta_{dn}^{2/7}}. \quad (2)$$

Здесь $\eta_{up} = p_{up} / p_0$ и $\eta_{dn} = p_{dn} / p_0$, где p_0 — давление на выходах из БУ; p_{up} и p_{dn} — давление в фазе его нарастания и спада соответственно. Коэффициент A равен

$$A = \frac{R_z \sqrt{T_k} b S \mu}{V}, \quad (3)$$

где $R_z = 287$ Дж/(кг·К) — универсальная газовая постоянная (для сухого воздуха); T_k — температура воздуха; $b = 0,155$ (кг·К/Дж)^{1/2} — коэффициент, зависящий от свойств воздуха в подводящей трубке; S — площадь отверстия на входе в подводящую трубку; V — объем воздуха в подводящей трубке; μ — коэффициент истечения воздуха в подводящую трубку. Изменением объема подводящей трубки за счет смещения мембраны можно пренебречь. При постоянном диаметре подводящей трубки ее объем является функцией только ее длины l .

Уравнения (1) и (2) интегрируем с помощью замен $\zeta = \sqrt{1 - \eta_{up}^{2/7}}$ и $\zeta = 1 - \eta_{dn}^{2/7}$ соответственно. В результате получаем неявную зависимость нарастания давления над мембраной от времени

$$\begin{aligned} & \left(1 - \eta_{up}^{2/7}\right)^{1/2} - \frac{2}{3}\left(1 - \eta_{up}^{2/7}\right)^{3/2} + \frac{1}{5}\left(1 - \eta_{up}^{2/7}\right)^{5/2} - \left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{1/2} + \\ & + \frac{2}{3}\left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{3/2} - \frac{1}{5}\left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{5/2} = -\frac{A}{7}(t - t_0) \end{aligned} \quad (4)$$

и явную зависимость спада давления над мембраной от времени

$$\eta_{dn} = 1 - \sqrt{1 - \eta_0^{2/7}} + \frac{A}{7} (t - t_0)^{7/2} \quad (5)$$

Здесь η_0 — нормированное значение давления в момент времени t_0 .

Полагая, что $\eta_{up} = 1$ в случае нарастания давления и $\eta_{dn} = 0$ в случае его спада, найдем время установления равновесия

$$\Delta t_{up} = \frac{7}{A} \left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{1/2} - \frac{2}{3} \left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{3/2} + \frac{1}{5} \left(1 - \eta_0^{2/7}\right)^{5/2} ; \quad (6)$$

$$\Delta t_{dn} = \frac{7}{A} \left(\sqrt{1 - \eta_0^{2/7}} - 1\right). \quad (7)$$

Давление над мембраной можно описать кусочно-гладкой функцией вида

$$p(t) = \begin{cases} 2p_0(\eta_{up}(t) - 0,5), & t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t_{up}, \\ p_0, & t_0 + \Delta t_{up} < t < t_0 + \Delta t_{up} + \delta t, \\ 2p_0(\eta_{dn}(t) - 0,5), & t_0 + \Delta t_{up} + \delta t \leq t \leq t_0 + \Delta t_{up} + \delta t + \Delta t_{dn}, \\ \dots \end{cases} \quad (8)$$

где δt — длительность плато; $\eta_{up}(t)$ и $\eta_{dn}(t)$ определяются по формулам (4) и (5) соответственно.

В результате подстановки всех необходимых параметров в уравнение (8) получаем кривую изменения давления над мембраной рабочей камеры (рис. 3).

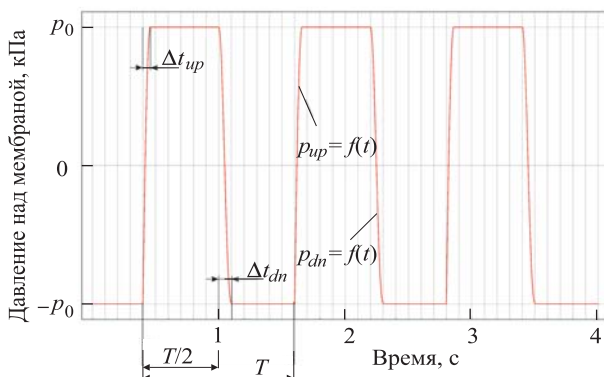


Рис. 3. Изменение давления над мембраной рабочей камеры от времени при $p_0 = \pm 30$ кПа, $T = 1,2$ с

Экспериментальная проверка результатов расчетного исследования. Для проверки результатов теоретического исследования был спроектирован стенд (рис. 4). Для регистрации изменения давления воздуха над мембраной рабочей камеры был использован аналоговый датчик давления PSE533 фирмы SMC, позволяющий измерять избыточное давление в диапазоне $-101 \dots 101$ кПа, его точность составляет ± 1 % от полного диапазона. Датчик давления 8 устанавливался с помощью фитинга в торец подводящей трубки рядом с мембраной клапана насоса. Его показания регистрировались осциллографом 7 Tektronix MSO 3014 с интервалом 0,0004 с.

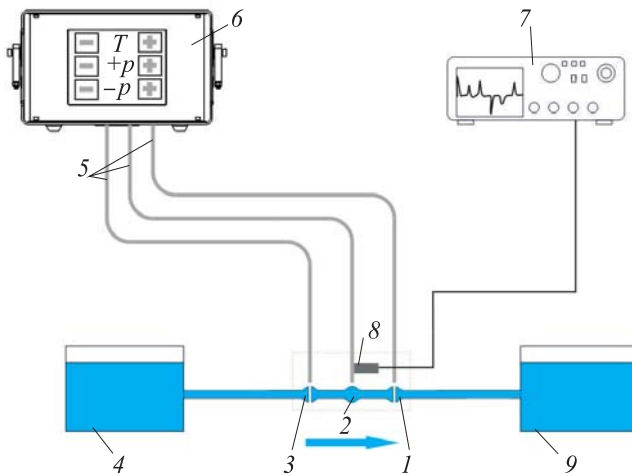


Рис. 4. Схема экспериментального стенда:
1, 3 — клапаны насоса; 2 — рабочая камера насоса; 4 — питающий резервуар; 5 — подводящие трубки; 6 — блок управления; 7 — осциллограф; 8 — датчик давления; 9 — приемный резервуар

Во время эксперимента варьировались следующие параметры: длина подводящей трубки l (0,3 и 1, 2 м), диапазон изменения управляющего давления p (± 30 и ± 50 кПа), период переключения управляющего давления T (6,25; 1,2; 0,4; 0,3 с). Согласно уравнениям (3), (6) и (7), именно перечисленные параметры влияют на время нарастания и спада управляющего давления над мембраной рабочей камеры насоса.

Анализ результатов расчетного и экспериментального исследований. Полученные по расчетным зависимостям (6)–(8) и в результате экспериментальных исследований изменения давления воздуха над мембраной рабочей камеры микронасоса в зависимости от длины подводящей пневматической трубки представлены в виде

кривых на рис. 5. Установлено, что чем меньше длина (или объем) подводящей трубки, тем быстрее протекает процесс выравнивания давления между пневмораспределителем БУ и рабочей камерой микронасоса. Кроме того, при закрытии мембраны рабочей камеры наблюдается лучшая сходимости результатов расчета и экспериментов по сравнению с ее открытием. В эксперименте падение давления занимает практически такой же промежуток времени, что и в теории, однако имеет более пологую форму, что можно объяснить прилипанием мембраны ко дну микрофлюидного устройства в закрытом положении. Учет прилипания мембраны ко дну в математической модели — очень сложная задача, поскольку момент отлипания мембраны может сопровождаться срывом потока и возникновением вихрей.

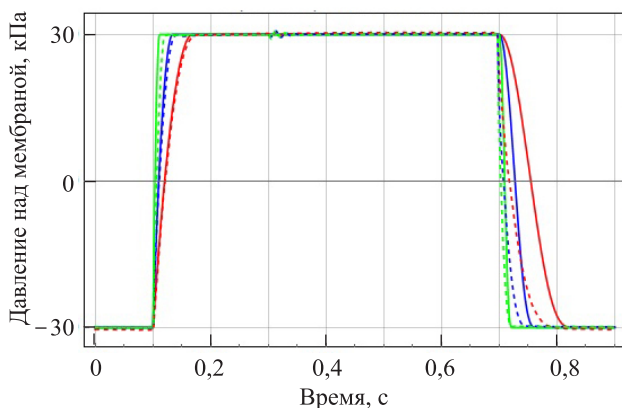


Рис. 5. Сравнение изменения давления над мембраной (режим: управляющее давление $p = \pm 30$ кПа, период его переключения $T = 1,2$ с) при длине l подводящей трубки, равной:

— 2, 1, 0,3 м (теория);
 - - - 2, 1, 0,3 м (эксперимент)

Влияние периода переключения T на время роста и спада давления над мембраной ($\Delta t_{up} + \Delta t_{dn}$) показано на рис. 6. Уменьшаясь, период переключения становится соизмерим со временем роста и спада давления, т. е. существует некоторое значение $T_{кр} = \Delta t_{up} + \Delta t_{dn}$, соответствующее минимально возможному периоду переключения, при котором еще будет достигаться необходимое давление над мембранами насоса при его работе с максимальной эффективностью. По данным графиков (см. рис. 6) незначительное срезание амплитуды давления начинает наблюдаться при $T = 0,4$ с.

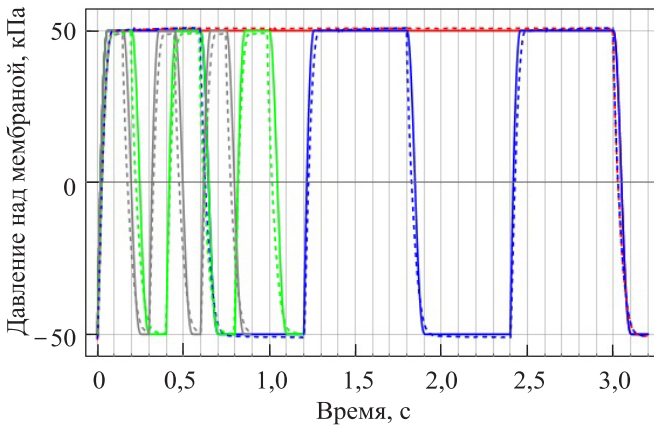


Рис. 6. Сравнение кривых изменения давления над мембраной для управляющего давления $p = \pm 50$ кПа и длины подводящей трубки $l = 2$ м при T , равном:

—, —, —, — 6,25, 1,2, 0,4, 0,3 с (теория);
 - - - - - , - - - - - , - - - - - , - - - - - 6,25, 1,2, 0,4, 0,3 с (эксперимент)

Из уравнений (6) и (7) и многочисленных экспериментальных данных были получены значения $\Delta t_{up} + \Delta t_{dn}$ для разных управляющих давлений и длин подводящих трубок. Данные значения представлены для управляющего давления $p = \pm 50$ кПа на рис. 7. Максимально допустимые тактовые частоты для всех рассмотренных режимов приведены в таблице.

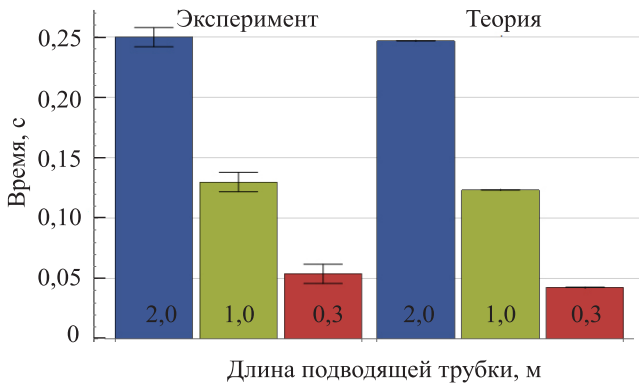


Рис. 7. Сравнение времени переходного процесса изменения давления над мембраной рабочей камеры, полученного экспериментально и теоретически (режим: управляющее давление $p = \pm 50$ кПа, период переключения $T = 1,2$ с) при разных значениях l

Максимально допустимая частота (Гц) переключения клапанов при различных значениях управляющего давления

Длина трубки l , м	Управляющее давление p , кПа	
	± 30	± 50
0,3	176	150
1,0	60	48
2,0	30	24

Заключение. Полученные в результате математического моделирования зависимости, подтвержденные экспериментально на специально спроектированном стенде, позволяют определять изменение управляющего давления воздуха над мембранами микронасоса с пневматическим приводом при различных геометрических и режимных параметрах, характеризующих его работу. С помощью представленных зависимостей могут быть определены ограничения на частоту переключения клапанов микронасоса. Результаты данной работы могут быть использованы для определения оптимального режима работы микронасоса с пневматическим приводом, что позволит достичь высокой точности подачи жидкости в микрофлюидные устройства. Полученные кривые изменения давления над мембранами клапанов необходимы в дальнейшей работе для составления полной математической модели микронасосов со схожей конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yang H., Tsai T.H., Hu C.C. Portable valve-less peristaltic micropump design and fabrication. *DTIP of MEMS and MOEMS*, 2008, 9–11 April, pp. 273–278.
- [2] Yang C.-C., Miao J.-M., Lih F.-L., Liu T.L., Ho M.H. The performance analysis of valveless micropump with contoured nozzle/diffuser. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 199–204.
- [3] Kar S., McWhorter S., Ford S.M., Soper S.A. Piezoelectric mechanical pump with nanoliter per minute pulse-free flow delivery for pressure pumping in micro-channels. *Analyst*, 1998, vol. 123, pp. 1435–1441.
- [4] Robinson S. Driving piezoelectric actuators. *Power Electronics Technology*, 2006, April, pp. 40–44.
- [5] Blanchard D., Ligrani P., Gale B. Single-disk and double-disk viscous micropumps. *Sensors and Actuators, A Physical*, 2005, vol. 122, no. 1, pp. 149–158.
- [6] Woias P. Micropumps: summarizing the first two decades. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2001, vol. 4560, pp. 39–52.
- [7] Inman W., Domansky K., Serdy J., Owens B., Trumper D., Griffith L. Design, modeling and fabrication of a constant flow pneumatic micropump. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, vol. 17, no. 5, pp. 891–899.
- [8] Yamada T., Ando S., Naruse Y. *Pneumatically driven micro-pump*. US 5499909 A, 1996.
- [9] Nedelcu O.T., Morelle J.-L., Tibeica C., Voccia S., Codreanu I., Dahms S. Modelling and simulation of a pneumatically actuated micropump. *Proceedings of International Semiconductor Conference, CAS*, 2007, vol. 1, pp. 77–80.

- [10] Huang C.-W., Huang S.-B., Lee G.-B. Pneumatic micropumps with serially connected actuation chambers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 11, pp. 2265–2272.
- [11] Busek M., Nötzel M., Polk C., Sonntag F. Characterization and simulation of peristaltic micropumps. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 165–169.
- [12] Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. *Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1986, 584 с.

Статья поступила в редакцию 14.06.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петров В.А., Герасименко Т.Н., Киндеева О.В., Хаустов А.И. Определение закона изменения управляющего давления над клапанами микронасоса с пневматическим приводом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1662>

Петров Владимир Андреевич — научный сотрудник кафедры «Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов» Московского авиационного института. Автор пяти статей. Область научных интересов: микрофлюидика, микронасосы, гидродинамика. e-mail: petrovv@inbox.ru

Герасименко Татьяна Николаевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ООО «НТЦ «БиоКлиникум». Автор 18 статей и одного изобретения. Область научных интересов: математическое моделирование, МКЭ, микрофлюидика. e-mail: staubchen03@gmail.com

Киндеева Ольга Владимировна — аспирант кафедры «Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов» Московского авиационного института. Автор трех статей. Область научных интересов: микрофлюидные устройства, гидродинамика, системы жизнеобеспечения. e-mail: ov.kindeeva@gmail.com

Хаустов Александр Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов» Московского авиационного института. Автор более 80 статей, шести изобретений. Область научных интересов: гидроаэродинамика, насосы, системы жизнеобеспечения. e-mail: khaustov.alex@mail.ru

Determination of the law of control pressure change over the valves of a pneumatically operated micropump

© V.A. Petrov¹, T.N. Gerasimenko², O.V. Kindeeva¹, A.I. Khaustov¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russia

² SRC "Bioclinicum", Moscow, 115088, Russia

The purpose of this research was to carry out mathematical simulation of a membrane pneumatically operated micropump. Such pumps are widely used to circulate the medium in microfluidic devices applied in various fields of science and technology. A micropump consists of three thin-walled membranes: two valves and one membrane of the working chamber. The pump is operated according to a special algorithm by alternating supply of compressed and vacuum air to the membranes of the valves and the working chamber from the control unit. Definition of a new pressure value over the valves and the working chamber is not instantaneous, so a limitation is imposed on the switching frequency of the valves and the working chamber. The purpose of the work is to determine the law of pressure change over the membranes and to find a limitation on the frequency of their switching. Dependences describing the increase and decrease in the pressure value above the working chamber are obtained and tested experimentally on a specially designed stand. The results of mathematical modeling are in good agreement with the experimental data.

Keywords: micropump, membrane, microfluidic device, pneumatic drive, transient process

REFERENCES

- [1] Yang H., Tsai T.H., Hu C.C. Portable valve-less peristaltic micropump design and fabrication. *DTIP of MEMS and MOEMS*, 2008, 9–11 April, pp. 273–278.
- [2] Yang C.-C., Miao J.-M., Lih F.-L., Liu T.L., Ho M.H. The performance analysis of valveless micropump with contoured nozzle/diffuser. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 199–204.
- [3] Kar S., McWhorter S., Ford S.M., Soper S.A. Piezoelectric mechanical pump with nanoliter per minute pulse-free flow delivery for pressure pumping in micro-channels. *Analyst*, 1998, vol. 123, pp. 1435–1441.
- [4] Robinson S. Driving piezoelectric actuators. *Power Electronics Technology*, 2006, April, pp. 40–44.
- [5] Blanchard D., Ligrani P., Gale B. Single-disk and double-disk viscous micropumps. *Sensors and Actuators, A Physical*, 2005, vol. 122, no. 1, pp. 149–158.
- [6] Woias P. Micropumps: summarizing the first two decades. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2001, vol. 4560, pp. 39–52.
- [7] Inman W., Domansky K., Serdy J., Owens B., Trumper D., Griffith L. Design, modeling and fabrication of a constant flow pneumatic micropump. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, vol. 17, no. 5, pp. 891–899.
- [8] Yamada T., Ando S., Naruse Y. *Pneumatically driven micro-pump*. US 5499909 A, 1996.
- [9] Nedelcu O.T., Morelle J.-L., Tibeica C., Voccia S., Codreanu I., Dahms S. Modelling and simulation of a pneumatically actuated micropump. *Proceedings of International Semiconductor Conference, CAS*, 2007, vol. 1, pp. 77–80.

- [10] Huang C.-W., Huang S.-B., Lee G.-B. Pneumatic micropumps with serially connected actuation chambers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, vol. 16, no. 11, pp. 2265–2272.
- [11] Busek M., Nötzel M., Polk C., Sonntag F. Characterization and simulation of peristaltic micropumps. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 165–169.
- [12] Malozemov V.V., Rozhnov V.F., Pravetskiy V.N. *Sistemy zhizneobespecheniya ekipazhey letatelnykh apparatov* [Life support systems for aircraft crews]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 584 p.

Petrov V.A., Researcher of the Department of Aircraft Life Support Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University). Author of five scientific papers. Science research interests include microfluidics, micropumps, hydrodynamics. e-mail: petrovv@inbox.ru

Gerasimenko T.N., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher at SRC “Bioclinicum”. Author of 18 scientific papers and one invention. Science research interests include mathematical simulation, microfluidics. e-mail: staubchen03@gmail.com

Kindeeva O.V., post-graduate student of the Department of Aircraft Life Support Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University). Author of three scientific papers. Science research interests include microfluidic devices, hydrodynamics, life support systems. e-mail: ov.kindeeva@gmail.com

Khaustov A.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Aircraft Life Support Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University). Author of over 80 scientific papers and six inventions. Science research interests include hydroaerodynamics, pumps, life support systems. e-mail: khaustov.alex@mail.ru