

Мембранный микронасос как основной элемент микрофлюидных устройств

М. С. Палагин

В статье представлен краткий обзор структур мембранных микронасосов. Обсуждаются различные актюаторы, их достоинства и недостатки. Рассмотрены разные типы микроклапанов, используемых в мембранных микронасосах, их структура и принцип действия.

Ключевые слова: микрофлюидика, мембранный микронасос, актюаторы, микроклапаны.

1. Введение

Микрофлюидика является одной из самых динамично развивающихся областей микро-технологий в последнее десятилетие. Эта область имеет дело с проектированием и разработкой миниатюрных устройств и систем, которые детектируют, перекачивают, перемешивают и управляют небольшими объемами жидкости.

Большинство микрофлюидных устройств нуждаются в насосах и клапанах, размеры которых сопоставимы с объемом перекачиваемой жидкости. Так, например, микронасос является ключевым элементом систем доставки лекарств. При помощи таких систем обеспечивается перемещение лекарственных средств из резервуара в тело человека (в ткани или кровеносные сосуды) с высокой точностью и надежностью. К достоинствам систем доставки лекарств с использованием микронасосов также относят возможность локальной доставки лекарств, меньшее количество побочных эффектов и высокую терапевтическую эффективность при лечении [1].

Использование микронасосов в системах химического и биологического анализа выглядит весьма перспективным. Миниатюризация анализирующих систем позволяет снизить требуемое количество образцов и реагентов (тем самым уменьшается стоимость анализа), повысить эффективность благодаря уменьшению времени выполнения анализа и ручного вмешательства человека. Яркими примерами таких систем являются системы полного микроанализа и системы диагностики пациента на месте [2].

Подача топлива – важный аспект различных миниатюрных энергетических систем. В этих системах в процессе работы перекачивают, контролируют и управляют малыми объемами жидкости (топлива). Таким образом, микронасос является одним из ключевых компонентов микроэнергетических систем [3].

Из-за ряда достоинств микрофлюидные устройства и системы с каждым годом в мире становятся все более востребованными. Так, например, согласно источнику средний годовой рост мирового рынка микрофлюидных устройств и систем в период с 2016 по 2020 год будет составлять 19.3 %, достигнув отметки в \$7.5 млрд. Следовательно, в ближайшие годы развитию микрофлюидных систем и в частности управляющих элементов – микронасосов будет уделяться большое внимание.

На данный момент все существующие микронасосы можно разделить на две большие группы:

- немеханические микронасосы, основанные на прямом преобразовании энергии в непрерывное перемещение жидкости;
- механические микронасосы, использующие колебательное или вращательное перемещение механических частей для перекачивания жидкостей.

Основное преимущество механических микронасосов – возможность перекачивать любые жидкости, а не только проводящие или диэлектрические, как в случае немеханических насосов [4].

В статье представлен обзор конструкций микронасосов мембранного типа, которые являются предметом многочисленных исследований в области технологии МЭМС. Рассматривается их принцип действия и структура. Демонстрируются возможные конструкции и схемные решения для основных элементов микронасосов, их достоинства и недостатки.

2. Структура и принцип действия мембранного микронасоса

На рис. 1 представлена структура и принцип действия мембранного микронасоса. Основные компоненты мембранного микронасоса – камера, мембрана, устройство воздействия на мембрану (актюатор), входной и выходной микроклапаны. Поток жидкости или газа образуется за счет колебаний мембраны микронасоса под действием актюатора. В результате колебаний мембраны в камере микронасоса поочередно создается пониженное и избыточное давление. Прокачка жидкости или газа через микронасос осуществляется за два такта. Во время первого такта (такта втягивания) за счет прогиба мембраны в камере микронасоса создается пониженное давление (объем камеры увеличивается) и жидкость или газ засасывается в камеру насоса через входной микроклапан. В следующий такт (такт выталкивания) под действием актюатора на мембрану в камере микронасоса создается избыточное давление (объем камеры микронасоса уменьшается), за счет которого жидкость или газ из камеры насоса перемещается через выходной микроклапан. Микроклапаны на входе и на выходе блокируют нежелательный обратный поток в соответствующих тактах работы микронасоса, тем самым направляя образованный внутри камеры двунаправленный поток жидкости в желаемом направлении.

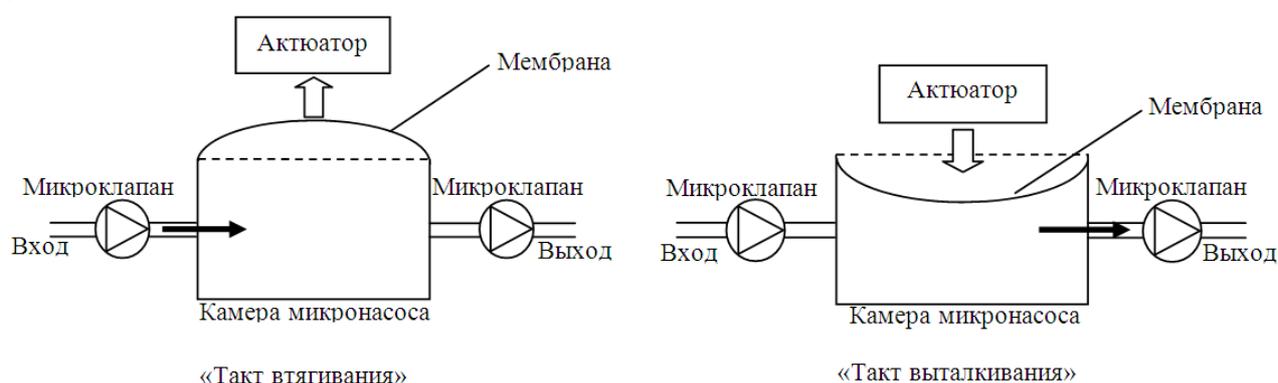


Рис. 1. Схематическое изображение структуры и принципа действия мембранного микронасоса

3. Виды актюаторов

Выбор механизма воздействия на мембрану играет важную роль в определении производительности микронасоса, так как влияет на скорость, силу и величину отклонения мембраны микронасоса. В изготовлении микронасосов встречаются такие механизмы воздействия, как пьезоэлектрический, электростатический, термopневматический, электромагнитный, би-

металлический, на основе сплавов с эффектом памяти формы и ион-проводящих полимерных пленок.

3.1. Пьезоэлектрический актюатор

В основе пьезоэлектрического механизма воздействия лежит деформация пьезоэлектрического материала, прикрепленного к подвижной мембране, под действием электрического поля, как показано на рис. 2 [5].

Пьезоэлектрические микронасосы имеют такие достоинства, как высокие рабочие частоты, большие потоки жидкости/газа, низкое энергопотребление, точный контроль прогиба мембраны. Относительно высокое рабочее напряжение и сложный процесс крепления пьезоэлектрического материала к мембране являются недостатками микронасосов с этим механизмом воздействия. Также микронасос с пьезоэлектрическим механизмом имеет пределы по миниатюризации.

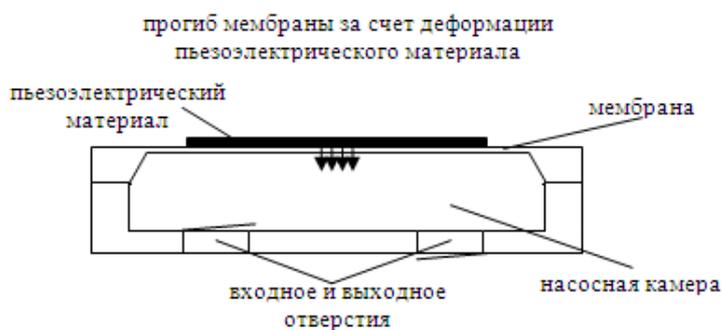


Рис. 2. Схематическое изображение пьезоэлектрического микронасоса

3.2. Электростатический актюатор

Электростатический актюатор использует кулоновские силы притяжения между двумя противоположно заряженными электродами для прогиба мембраны, которой является один из электродов. Схематическое изображение электростатического микронасоса представлено на рис. 3. При возникновении напряжения между электродами происходит прогиб мембраны, в результате чего в зависимости от конструкции увеличивается или уменьшается объем камеры насоса под мембраной. Когда приложенное напряжение снимается, мембрана возвращается в первоначальное положение за счет механической жесткости [6].

К достоинствам электростатических актюаторов можно отнести легкость в изготовлении и интегрировании, высокую скорость работы, низкое энергопотребление и невосприимчивость к изменениям температуры и влажности. Малый прогиб мембраны и высокие рабочие напряжения являются недостатками электростатических актюаторов.



Рис. 3. Схематическое изображение электростатического микронасоса

3.3. Термопневматический актюатор

Термопневматический механизм воздействия основан на термически вызванном изменении объема или фазовом изменении материала в герметичной камере. Периодическое изменение объема камеры приводит к изменению давления внутри полости, приводя в движение мембрану. Термопневматический микронасос схематически представлен на рис. 4 [7].

Такие микронасосы работают при низких напряжениях и не нуждаются в сложной электронной схеме управления. К тому же микронасосы с термопневматическим взаимодействием могут быть весьма компактными и при этом создавать высокие скорости потока жидкости. Изготовление микронасосов возможно с использованием стандартной кремниевой технологии. Серьезным недостатком такого типа микронасосов является большое время отклика (определяется тепловой постоянной времени). Также термопневматические микронасосы отличаются высоким энергопотреблением, следовательно, исключается возможность использования таких микронасосов в портативных устройствах.



Рис. 4. Схематическое изображение термопневматического микронасоса

3.4. Электромагнитный актюатор

Обычно микронасос с электромагнитным актюатором имеет камеру насоса, гибкую мембрану, постоянный магнит и набор микрокатушек, как показано на рис. 5 [8]. Либо постоянный магнит, либо набор из микрокатушек крепится на мембрану. Магнитную силу можно варьировать за счет изменения тока в микрокатушках. Ток, проходящий по катушкам, генерирует магнитное поле, которое создает силу притяжения или отталкивания между постоянным магнитом и набор из микрокатушек.

Электромагнитный актюатор обеспечивает бо́льшую силу воздействия на бо́льшие расстояния по сравнению с электростатическим актюатором. Также этот тип актюатора работает при низких напряжениях. Однако электромагнитный механизм воздействия имеет ограничения в миниатюризации. В целом электромагнитные микронасосы имеют высокое энергопотребление и тепловыделение.

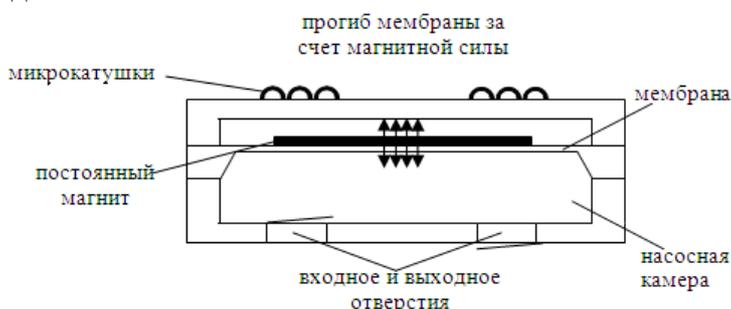


Рис. 5. Схематическое изображение электромагнитного микронасоса

3.5. Биметаллический актюатор

Биметаллический механизм воздействия основан на разнице коэффициентов термического расширения двух материалов, соединенных вместе, под действием температурных изменений. Схематическое изображение биметаллического микронасоса показано на рис. 6 [9]. Мембрана выполнена из двух разных металлов, которые имеют различные коэффициенты термического расширения. При увеличении температуры за счет термических напряжений происходит деформация мембраны.

Биметаллические микронасосы имеют простую конструкцию, работают при относительно низких напряжениях по сравнению с другими типами микронасосов. Однако такие микронасосы имеют маленький прогиб мембраны (из-за маленьких коэффициентов термического расширения материалов), не способны работать на высоких частотах.



Рис. 6. Схематическое изображение биметаллического микронасоса

3.6. Актюатор на основе сплава с эффектом памяти формы

Эффект памяти формы предполагает фазовый переход между двумя твердыми фазами: от аустенитной фазы (при высокой температуре) к мартенситной фазе (при низкой температуре). В материалах с эффектом памяти формы мартенсит намного более пластичен, чем аустенит, и при низкой температуре может подвергаться большой деформации. При нагревании до начальной температуры аустенита материал возвратится к изначальной форме, если он механически не ограничен. При условии, что материал будет механически ограничен, он будет оказывать большую силу при принятии изначальной формы. Эти фазовые переходы приводят к механической деформации, которая используется в актюаторах. Схематическое изображение микронасоса с эффектом памяти формы представлено на рис. 7 [10].

Высокая мощность, хорошая стойкость к химическим веществам и биосовместимость делают материалы с эффектом памяти формы многообещающими в области МЭМС. Деформацию сплавов с эффектом памяти формы невозможно точно контролировать и предсказывать из-за чувствительности к температуре. Микронасосы на базе эффекта памяти формы требуют высокого энергопотребления, не могут достаточно охлаждаться при высоких частотах.

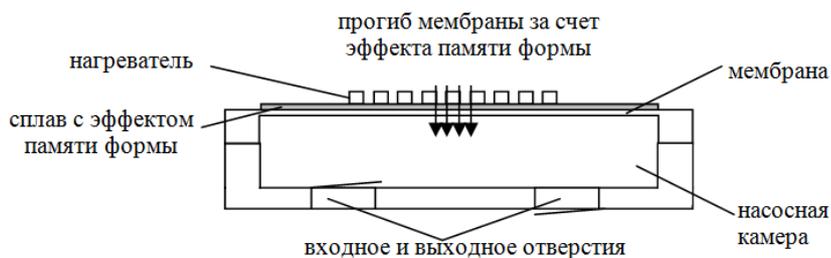


Рис. 7. Схематическое изображение микронасоса на основе эффекта памяти формы

3.7. Актюатор на основе ион-проводящей полимерной пленки

Полимерные МЭМС-актюаторы могут работать в водной среде, имея большое отклонение и меньшее энергопотребление, в отличие от обычных МЭМС-актюаторов. Ион-проводящие пленки являются наиболее популярными полимерными актюаторами. Такие пленки приводятся в действие градиентом напряжений путем ионного движения, вызванного электрическим полем. Ион-проводящая полимерная пленка состоит из полиэлектролитной пленки с химически осажденной платиной на обе стороны. Под действием электрического поля ионы по обе стороны полимерной молекулярной цепи будут перемещаться к катоду. В это самое время, перемещаясь к катоду, каждый катион возьмет с собой некоторые молекулы воды. Это движение ионов вызовет расширение катода в ион-проводящей полимерной пленке. Схематическое изображение структуры и принципа действия ион-проводящей полимерной пленки представлено на рис. 8 [11].

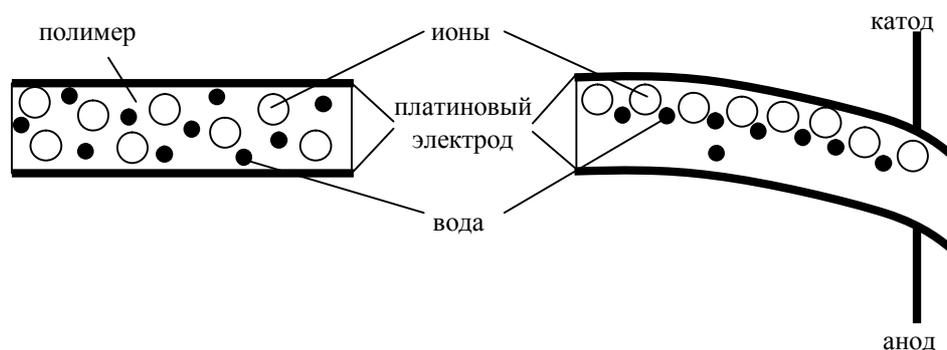


Рис. 8. Схематическое изображение структуры и принципа действия ион-проводящей полимерной пленки

4. Микрочлапаны

Важными элементами микронасосов являются микрочлапаны, которые сильно влияют на такие параметры микронасоса, как дифференциальное давление, скорость потока и эффективность. Микрочлапаны можно разделить на механические и немеханические. В свою очередь, механические и немеханические микрочлапаны делятся на пассивные и активные.

4.1. Механические микрочлапаны

Механические микрочлапаны представляют собой структуры, которые обеспечивают направление потока за счет деформации, перемещения или прогиба.

Активные механические микрочлапаны – это микрочлапаны, которые открываются и закрываются под действием независимого механизма воздействия. Почти любой мембранный актюатор, представленный выше, может использоваться в качестве активного механического микрочлапана. Наиболее распространенные механизмы воздействия для активных механических микрочлапанов: электростатический, пьезоэлектрический, термопневматический и биметаллический. Управляя временем и продолжительностью открытого/закрытого состояния микрочлапана, уменьшаются утечки потока и регулируется рабочая частота. Структура и принцип работы микронасоса с активными микрочлапанами представлены на рис. 9 [12].

Микронасосы с активными механическими микроклапанами имеют низкие потери потока, работают при высоких частотах и способны перекачивать жидкость в двух направлениях. Однако такие микронасосы сложны в изготовлении, требуют дополнительной схемы управления микроклапанами и имеют более высокое энергопотребление. Также активные механические микроклапаны при длительной эксплуатации подвержены износу и могут быть заблокированы частицами, которые содержатся в жидкости.

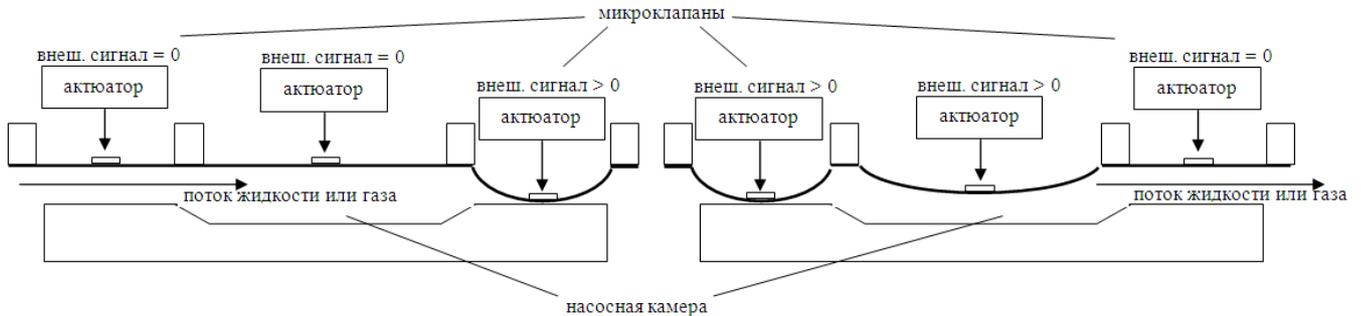


Рис. 9. Принцип действия микронасоса с активными механическими микроклапанами

Пассивные механические микроклапаны не имеют каких-либо механизмов воздействия, управление потоком зависит от давления в камере насоса. Принцип работы пассивных механических микроклапанов представлен на рис. 10. Изменение давления в камере микронасоса осуществляется непосредственно с помощью колебаний мембраны. Пассивные механические микроклапаны могут пропускать жидкость только в одном направлении. Микроклапан остается закрытым до тех пор, пока дифференциальное давление через него не станет достаточно большим, чтобы открыть его [13].

Микронасосы с пассивными микроклапанами имеют малые потери потока, более просты в изготовлении по сравнению с микронасосами с активными механическими микроклапанами. Низкие рабочие частоты, невысокая надежность – недостатки микронасосов с данным типом микроклапанов.

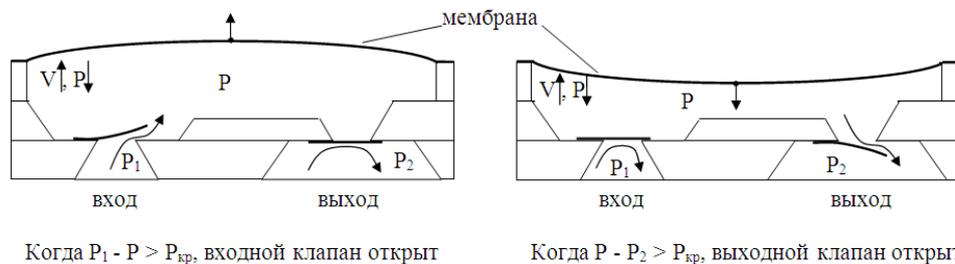


Рис. 10. Принцип действия микронасоса с пассивными механическими микроклапанами

4.2. Немеханические микроклапаны

Немеханические микроклапаны не имеют подвижных частей для направления потока. Геометрия таких микроклапанов остается неизменной, преобразование ненаправленного потока в направленный осуществляется за счет добавления энергии жидкости или определенной геометрии микроклапана. Немеханические микроклапаны широко используются из-за простой конструкции и высокой надежности.

Принцип действия микронасоса с активными немеханическими микроклапанами основан на температурной зависимости вязкости жидкости, вызывающей изменение в сопротивлении потока. Камера насоса с мембраной соединяется с входным и выходным каналами через маленькие дроссели с кремниевыми нагревателями. Как только объем в камере насоса уменьшается, выходной дроссель нагревается, тем самым уменьшается вязкость жидкости вблизи выходного канала, следовательно, больше жидкости проходит через выходной канал, и наоборот, как показано на рис. 11 [14].

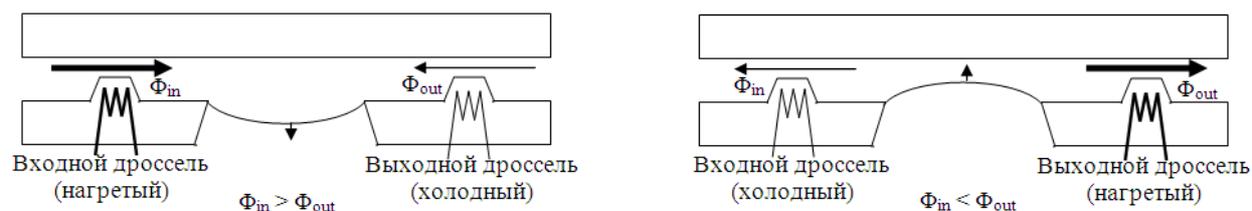


Рис. 11. Принцип действия микронасоса с активными немеханическими микроклапанами

Пассивные немеханические микроклапаны имеют определенную геометрию, за счет которой оказывается разное сопротивление движению потока в прямом и обратном направлениях. Различные варианты пассивных немеханических микроклапанов представлены на рис. 12.

Элемент с маленьким углом θ имеет низкое сопротивление движению потока в направлении расходящихся стенок и называется диффузором (рис. 12а). Элемент с большим углом θ имеет низкое сопротивление движению потока в направлении сходящихся стенок. Такой элемент называется соплом (рис. 12б) [15]. Клапаны Тесла, изображенные на рис. 12в, представляют собой раздвоенные каналы, в которых разделенный поток возвращается в основной поток под прямым углом в обратном направлении [16].

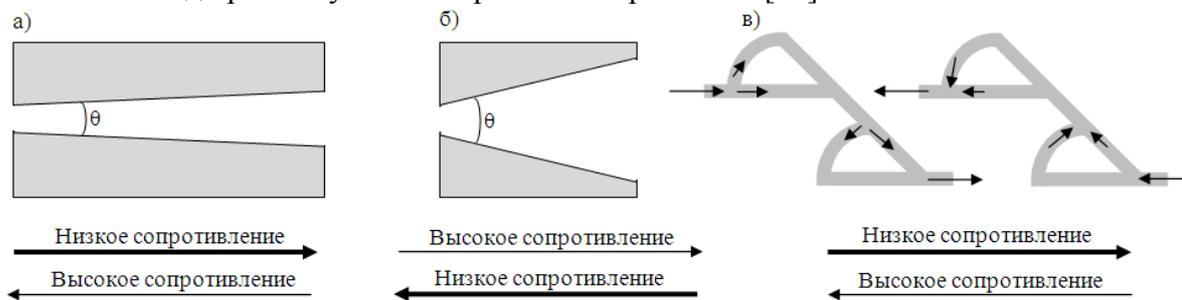


Рис. 12. Пассивные немеханические микроклапаны

5. Заключение

На данный момент наличие большого количества разнообразных конструкций позволяет легко подобрать подходящий мембранный микронасос под конкретную область применения.

В системах полного микроанализа каких-либо требований к скорости потока и максимальному обратному давлению не предъявляется. Выбор механизма актюации в основном будет зависеть от конкретных возможностей разработчика микрофлюидной системы. Для мобильной системы полного микроанализа однозначно лучше использовать актюаторы с низким энергопотреблением, например, электростатические или пьезоэлектрические. В миниатюрных и полностью интегральных системах используются электростатические, термopневманические или биметаллические актюаторы. Для более надежной работы таких систем в качестве микроклапанов целесообразно использовать немеханические, так как содержащиеся в исследуемых образцах частицы могут вызвать блокирование механических клапанов.

В системах доставки лекарств обычно не требуется высоких скоростей потока, но должно обеспечиваться прецизионное дозирование лекарственных средств. Одним из способов повышения точности дозирования является увеличение максимального обратного давления микронасоса, поэтому желательно использование пассивных или активных микроклапанов. Также можно добавить, что для систем доставки лекарств (мобильная или имплантируемая система доставки инсулина) важным параметром является энергопотребление. Применение в таких системах пьезоэлектрического или электростатического актюатора удовлетворит тре-

бованию энергоэффективности.

В системах газовой микрохроматографии микронасосы должны обеспечивать большие скорости потока (для высокой скорости анализа) и высокие обратные давления (для транспортировки газа через длинную разделительную колонну). Благодаря высокой степени интеграции электростатических актюаторов возможно изготовление высокопроизводительных газовых микронасосов, состоящих из определенного количества последовательных насосных камер (до 18 штук) и механических активных микроклапанов.

Безусловно, наиболее перспективным для любого типа конструкций будет изготовление мембранных микронасосов в интегральном исполнении, то есть в составе интеллектуальных устройств или систем. С развитием и усовершенствованием МЭМС-технологий область применения микрофлюидных устройств и систем будет постоянно расширяться.

Учитывая, что в России планируется развитие собственного производства микронасосов для удовлетворения потребностей внутреннего рынка, представленная в статье информация будет полезной для исследователей и производителей, которые хотели бы попробовать свои силы в такой быстроразвивающейся области, как микрофлюидика.

Литература

1. *Waseem A. M., Shahzadi T., Asim N., Nitin A.* MEMS based system for drug delivery // 6th International Conference on Emerging Technologies. Islamabad, Pakistan, 2010. P. 82–87.
2. *Nisar A., Afzulpurkar N., Mahaisavariya B., Tuantranont A.* MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications // *Sensors and Actuators B*. 130. 2008. P. 917–942.
3. *Xue-feng H., Sheng-ji L., Guan-qing W., Dan L., Yan L., Ning D., Jiang-rong X.* Micropump application for micro power systems: A review // *IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Wuhan, China, 2011. P. 1–4.
4. *Левицкий А. А., Левицкая З. В., Ситников А. М.* Компоненты микросистемной техники. Лабораторный практикум. Учебное пособие. СФУ, Красноярск. 2007. 85 с.
5. *Linnemann R., Woias P., Senfft C.-D., Ditterich J. A.* A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquids and gases // in: *Proceedings of the MEMS98*. Heidelberg, Germany, 1998. P. 532–537.
6. *Machauf A., Nemirovsky Y., Dinnar U.* A membrane micropump electrostatically actuated across the working fluid // *J. Micromech. Microeng.* 15. 2005. P. 2309–2316.
7. *Jeong O. C., Yang S. S.* Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragm // *Sens. Actuators A: Phys.* 83. 2000. P. 249–255.
8. *Gong Q., Zhou Z., Yang Y., Wang, Design X.* Design, optimization and simulation on microelectromagnetic pump // *Sens. Actuators A: Phys.* 83. 2000. P. 200–207.
9. *Zou J. X., Ye Y. Z., Zhou Y., Yang Y.* A novel thermally actuated silicon micropump // in: *Proceedings of the 1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*. 1997. P. 231–234.
10. *Xu D., Wang L., Ding G., Zhou Y., Yu A., Cai B.* Characteristics and fabrication of NiTi/Si diaphragm micropump // *Sens. Actuators A: Phys.* 93. 2001. P. 87–92.
11. *Guo S., Fukuda T.* Development of the micropump using ICPF actuator // in: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1. 1997. P. 266–271.
12. *Jang L.-S., Li Y.-J., Lin S.-J., Hsu Y.-C., Yao W.-S., Tsai M.-C., Hou C.-C.* A stand-alone peristaltic micropump based on piezoelectric actuation // *Biomed Microdevices* 9. 2007. P. 185–194.
13. *Zengerle R., Richter A., Sandmaier H.* A micro membrane pump with electrostatic actuation // *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*. Travemunde, Germany, 1992. P. 19–24.
14. *Matsumoto S., Maeda R., Klein A.* Characterization of a valveless micropump based on liquid viscosity // *Microscale Thermophysical Engineering* 3(1). 1999. P. 31–42.
15. *Olsson A., Stemme G., Stemme E.* Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropump // *Sensors and Actuators A*. 84. 2000. P. 165–175.

16. *Gamboa A. R., Morris C. J., Forster F. K.* Improvements in fixedvalve micropump performance through shape optimization of valves // *Journal of Fluids Engineering*. 127. 2005. P. 339–346.

*Статья поступила в редакцию 30.09.2015;
переработанный вариант – 25.05.2016*

Палагин Максим Сергеевич

аспирант кафедры электронных приборов НГТУ (630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20), e-mail: m.palagin91@gmail.com.

Membrane micropumps in MEMS technology

M. Palagin

This paper presents a brief overview of membrane micropumps structure. Various actuators, their advantages and disadvantages are discussed. Different types of microvalves used in membrane micropump, their structure and operating principle are also considered.

Keywords: microfluidics, membrane micropump, actuator, microvalves.