

## РАЗРАБОТКА МИКРОФЛЮИДНОГО ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

### DEVELOPMENT OF A HIGH-PRECISION MICROFLUIDIC DIFFERENTIAL PRESSURE SENSOR

*N. Shipulya*

*Summary.* This paper presents the results of development of the differential microfluidic pressure sensor. The principle this structure is based on the differential pressure in the microfluidic Wheatstone bridge. This microfluidic bridge is a prototype of the Wheatstone electric bridge, only with a replacement electrical to microfluidic lines. The advantage of such a sensor was the absence of numerous regulating mechanical valves and membranes, creating measurement errors. A prototype microfluidic system of silicon and glass was created to test the behavior of the microfluidic Wheatstone bridge. Practice has shown that in the experimental sample laminar flow regime is preserved, there is no turbulence. This principle of measuring differential pressure is unique and innovative.

*Keywords:* differential pressure sensor, microfluidics, microfluidic Wheatstone bridge, autocalibration.

**Шипуля Наталья Дмитриевна**

Аспирант, Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики  
natalya.shipulya27@mail.ru

*Аннотация.* В работе представлены результаты разработки новой конструкции датчика дифференциального давления, принцип действия которого основан на перепаде давления в микрофлюидном мостике Уитстона. Микрофлюидный мостик является прототипом электрического мостика Уитстона, лишь с тем отличием, что электрические линии связи заменены на жидкостные. Преимуществом работы такого датчика являлось отсутствие многочисленных регулирующих механических клапанов и мембран, создающих погрешности измерений. Для проверки поведения микрофлюидного мостика Уитстона был создан прототип микрофлюидной системы из кремния и стекла. Практика показала, что в экспериментальном образце сохраняется ламинарный режим потока, отсутствуют завихрения и турбулентности. Данный принцип измерения дифференциального давления является уникальным и инновационным.

*Ключевые слова:* дифференциальный датчик давления, микрофлюидика, микрофлюидный мостик Уитстона, автокалибровка.

### Введение

**В** данной работе рассмотрен инновационный микрофлюидный датчик дифференциального давления. Уникальность конструкции заключается в использовании микрофлюидного мостика Уитстона, который лег в основу измерительного процесса. Для эпохи миниатюризации и сверхточности такой датчик выполняет требования современного рынка, что обеспечивает полезность и актуальность создание такого прибора. Микрофлюидный мостик Уитстона широко известен в кругах биомедицины и аналитической химии [7]. Такое устройство может выполнять роль сепаратора, ловителя, микроконтроллера потоков газа и жидкости [8]. Но не только в таких отраслях будет полезна эта структура. Пользуясь технологическими возможностями метода плазмохимического травления [6], получить микрофлюидную структуру с каналами порядка 40 мкм не составляет никакого труда.

На современном рынке существуют высокоточные датчики дифференциального давления, как отечественного производства, так и зарубежного [1, 3, 9]. В силу своих принципов работы и других технологических тонкостей, они не могут претендовать на уникальные приборы высокого класса точности, совмещающие в себе

портативные габариты, мобильность и стоимостные характеристики.

### Принцип действия предлагаемого датчика дифференциального давления

Предложенная конструкция датчика дифференциального давления содержит в себе микрофлюидный мостик Уитстона. Этот мостик является аналогом электрического мостика Уитстона [2], представленного на Рис. 1.

Отличие заключается в том, что электрические линии связи заменены на микрофлюидные микроканалы с потоком рабочей среды. На Рис. 2 представлена схема микрофлюидного мостика Уитстона с характерными размерами.

Такая пятиканальная микрофлюидная система имеет области с повышенным и пониженным гидравлическим сопротивлениями. Области  $R_H$  — соответствуют областям постоянного низкого сопротивления. Они выполняют роль равномерности и сохранения ламинарного режима в системе, чтобы на входе в мостиковый канал  $R_M$  не было завихрений и турбулентности. Микроканалы  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_X$  аналогичны плечам в электрическом мости-

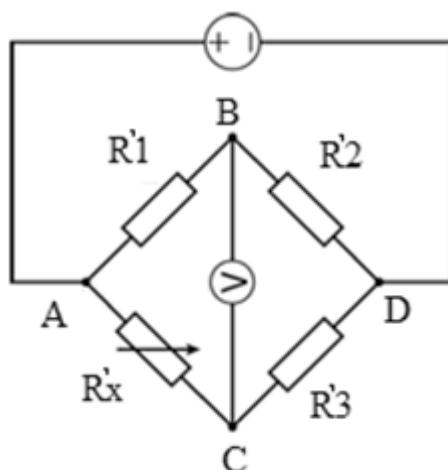


Рис. 1. Электрическая схема измерительного мостика Уитстона:  $R'1-3$  — «плечи» мостика;  $AD$  — диагональ питания;  $BC$  — измерительная диагональ;  $R'x$  — элемент с переменным сопротивлением;  $V$  — гальванометр [2]

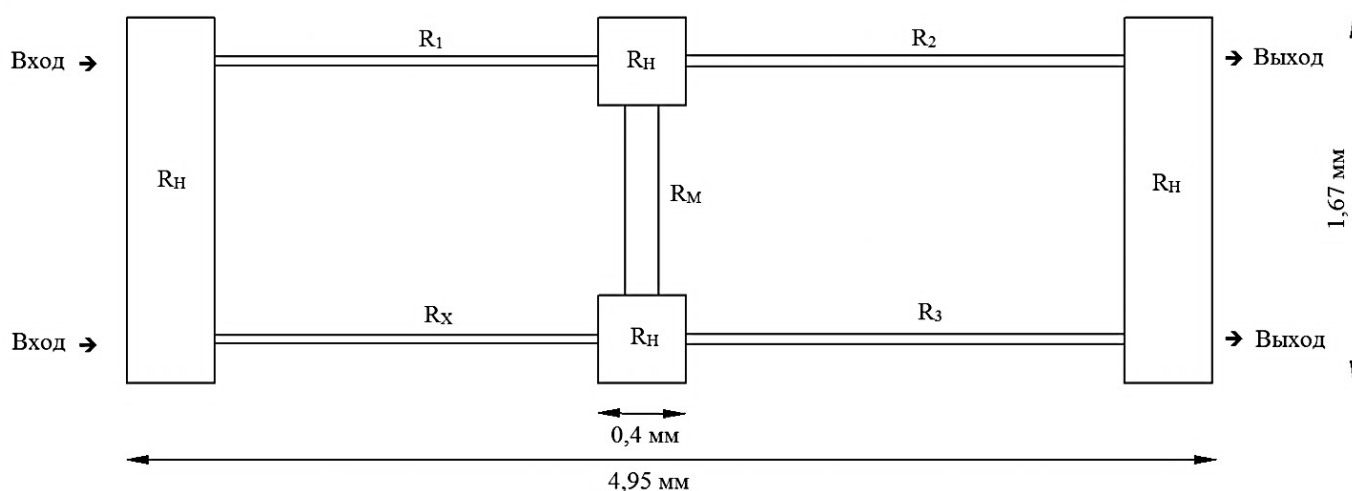


Рис. 2. Схема пятиканальной микрофлюидной системы, вид сверху:  $R_1, R_2, R_3$  — микроканалы с постоянными значениями ширины и гидравлическими сопротивлениями;  $R_x$  — микроканал с переменным значением ширины и различными гидравлическими сопротивлениями;  $R_m$  — мостовой канал;  $R_n$  — области с постоянным низким сопротивлением [5]

ке. Они имеют постоянное высокое гидравлическое сопротивление. Микроканалы  $R_1, R_2, R_3$  имеют постоянную ширину, а микроканал  $R_x$  — переменную. Ширина переменного канала выбирается на стадии изготовления структуры. Она влияет на гидравлическое сопротивление микроканала, соответственно, от этого зависит сбалансированное состояние мостика. Тем самым система имеет вариативность исполнения. Ширина выбирается в зависимости от требуемого диапазона измерения давления.

На Рис. 3 представлена схема принципа работы микрофлюидного датчика дифференциального давления.

Общую схему можно разделить на пять блоков: опорный источник дифференциального давления (А), коммутирующее устройство (Б), мембранный чувствительный элемент (В), блок управления (Г) и устройство индикации (Д). Система приходит в действие, когда в микрофлюидном контуре создаётся поток с неизвестными давлениями на входе и выходе. Постоянство потока поддерживается действием микронасоса (5). Проходя через пятиканальную микрофлюидную систему, поток жидкости с пониженным давлением выходит через боковые ответвления мостикового канала (10,11), называемым опорным давлением  $\Delta P_{on}$ . Через коммутирующее устройство (Б) в мембранный чув-

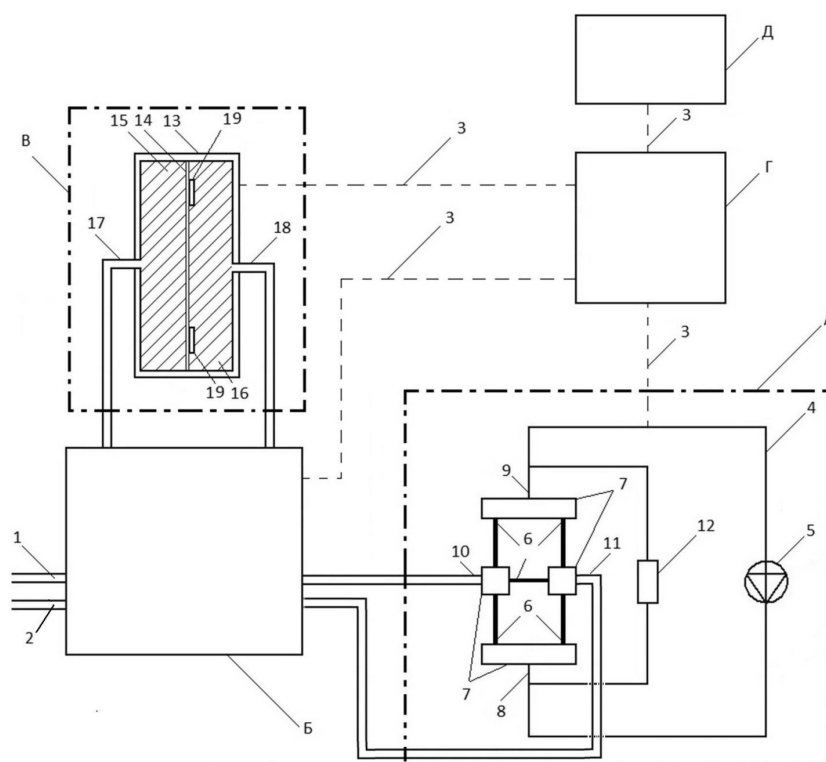


Рис. 3. Датчик дифференциального давления: А — опорный источник дифференциального давления; Б — коммутирующее устройство; В — мембранный чувствительный элемент; Г — блок управления; Д — устройство индикации; 1, 2 — входы неизвестного внешнего дифференциального давления; 3 — электрические линии управления и связи; 4 — микрофлюидный контур; 5 — микронасос; 6 — система из пяти микроканалов с постоянным высоким гидравлическим сопротивлением; 7 — полости с постоянным низким гидравлическим сопротивлением; 8, 9 — входы пятиканальной микрофлюидной структуры; 10, 11 — выходы пятиканальной микрофлюидной структуры; 12 — датчик дифференциального давления высокого диапазона; 13 — корпус; 14 — упругая мембрана; 15, 16 — полости; 17, 18 — вводяные каналы давления рабочей среды; 19 — тензорезисторы [4]

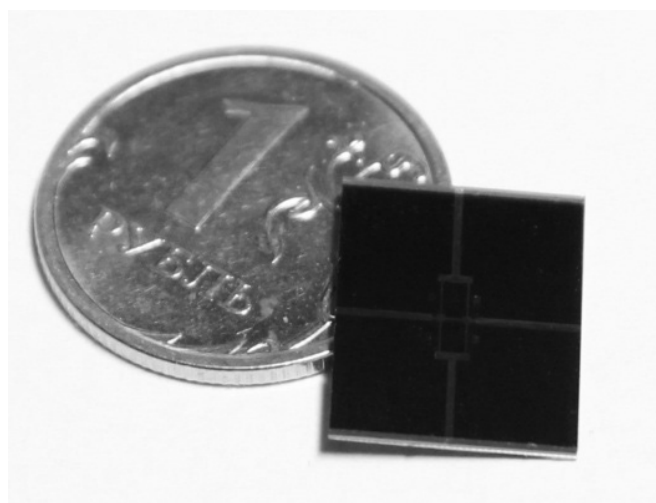


Рис. 4. Пятиканальная микрофлюидная структура из кремния и стекла

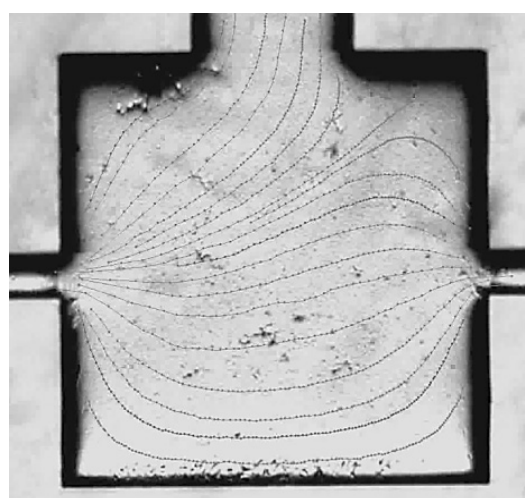


Рис. 5. Экспериментальные линии тока в области пониженного гидравлического сопротивления [5]

ствительный элемент (В) попеременно подаются два потока — неизвестный, который надо измерить  $\Delta P_{\text{изм}}$  и поток с пониженным давлением  $\Delta P_{\text{оп}}$ . Сравнивая эти два сигнала, система в циклическом режиме изменяет сигнал пониженного давления до тех пор, пока оба сигнала не будут равны. Затем производится простейшее элементарное вычисление пониженного давления в пятиканальной микрофлюидной системе, и блок индикации выдаёт окончательный результат измерения. Вычисление является элементарным, потому что выполняется в одно действие. Поток с пониженным давлением — это есть отношение разницы перепада давлений между входом и выходом пятиканальной микрофлюидной системы  $\Delta P_{\text{оп}}$  (8,9) к коэффициенту понижающего давления  $k$ . Где коэффициент понижающего давления  $k$  — это величина, зависящая от ширины переменного канала  $R_x$ , задаваемого при производстве микрофлюидной структуры. Коэффициент понижающего давления  $k$  может принимать значения от 1 до 1000. Измерение опорного давления  $\Delta P_{\text{оп}}$  производится датчиком дифференциального давления высокого диапазона (12) с абсолютной погрешностью  $\pm P_{\text{вх}}$ . Погрешность определения опорного дифференциального давления  $\Delta P_{\text{оп}}$  и соответственно измеряемого дифференциального давления  $\Delta P_{\text{изм}}$  будет определяться как  $\pm P_{\text{вх}}'/k$ . То есть абсолютная погрешность уменьшается в  $k$  раз [4].

### Проверка ламинарности

Для проверки работоспособности данного устройства была изготовлена пятиканальная микрофлюидная структура из кремния со стеклом (Рис. 4) [6].

Был проведён эксперимент на проверку сохранения режима ламинарности потоков жидкости при переходе из области повышенного гидравлического сопротивления в пониженную. На Рис. 5 изображен фрагмент структуры с областью пониженного гидравлического сопротивления. Пунктирные линии соответствуют линиям тока. Характер поведения линий тока описывает ламинарный режим потока. Это доказывает, что система имеет постоянство ламинарного режима без завихрений и турбулентности.

### Результаты

В современном мире всё стремится к миниатюризации и высокотехнологичности, поэтому в данной статье представлена принципиально новая схема датчика дифференциального давления. Благодаря своей упрощённой системе измерения, а также отсутствию дополнительных механических клапанов и других многочисленных элементов, создающих большие погрешности измерений, данный прибор обладает высокой точностью измерений и низкой погрешностью. Точность такого датчика составляет 0,001 Па, диапазон измерений до 1000 Па. Обладая набором инновационных решений таких как, жидкая или газообразная рабочая среда, отсутствие механических элементов, элементарное вычисление и микрогабариты — прибор сохраняет высокую точность измерений в расширенном температурном диапазоне от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ , а также в условиях вибраций и экстремальной окружающей обстановке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. БД Сенсор РУС. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.bdsensors.ru/>
2. Ким Д.Б., Кропотов А. А., Герашенко Л. А. Физика: Электричество и электромагнетизм: Лабораторный практикум. — Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. — 144 с.
3. Меандр. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.meandr.ru/>
4. Пат. 172269 РФ. Датчик дифференциального давления/ Н. Д. Шипуля, С. А. Конаков // Бюл. — 2017. — № 19.
5. Шипуля Н. Д. Моделирование микрофлюидного датчика для высокоточных измерений: дис. магистра материаловедения и технологии материалов. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 2017.
6. Konakov S.A., Krzhizhanovskaya V. V. 3D simulation and analytical model of chemical heating during silicon wet etching in microchannels// Journal of Physics: Conf. Ser. 2016. 681(1), P. 012035.
7. Sackmann E., Fulton A., Beebe D. The present and future role of microfluidics in biomedical research// Nature. 2014. Vol. 507(7491), P. 181–189.
8. Tanyeri M., Ranka M., Sittipolkul N. and Schroeder C. Microfluidic Wheatstone bridge for rapid sample analysis// Lab on a Chip. 2011. Vol. 11(24), P. 4181–4186.
9. WIKA. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://en-co.wika.de/home\\_en\\_co.WIKA](http://en-co.wika.de/home_en_co.WIKA)

© Шипуля Наталья Дмитриевна (natalya.shipulya27@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»