

УДК 532.536.24:533

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МИКРОКАНАЛОВ

В. М. Анискин, К. В. Адаменко, А. А. Маслов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mails: aniskin@itam.nsc.ru, maslov@itam.nsc.ru

Представлены данные экспериментов по определению коэффициента гидравлического сопротивления в микроканалах. В экспериментах исследовались стеклянные микроканалы круглого сечения диаметром 34,5, 33,6 и 24,5 мкм различной длины. В качестве рабочей жидкости использовалась чистая деионизированная дегазированная вода. Диапазон значений числа Рейнольдса составлял $13 \leq Re \leq 330$. Для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления использовался метод двух каналов. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими значениями для случая развитого ламинарного течения в каналах круглого сечения, однако использование метода двух каналов имеет ограничения.

Ключевые слова: ламинарное течение в микроканалах, коэффициент гидравлического сопротивления, микротечения.

Введение. При разработке и использовании микроустройств возникает необходимость изучения течения жидкости в микроканалах. Микрожидкостные устройства применяются, например, в биомедицине (химический анализ, анализ ДНК), процессах смешения и сепарации на микроуровне, а также в высокоэффективных системах охлаждения электронных компонентов. Для оптимизации микрожидкостных систем необходимо исследовать движение жидкости в микроканалах как для ламинарного режима течения, так и для турбулентного. Главный вопрос, возникающий при проектировании микрожидкостных устройств, это вопрос о применимости данных о поведении жидкости на макроуровнях для прогнозирования поведения жидкости при переходе на микроуровень. Прежде всего это относится к зависимости гидравлического сопротивления микроканалов от числа Рейнольдса. Результаты проведенных за последние 15–20 лет исследований не дают ответа на этот вопрос.

В ряде работ (см., например, [1–5]) экспериментально найденный коэффициент гидравлического сопротивления существенно отличается от его расчетного значения. В [3–5] это объясняется более ранним ламинарно-турбулентным переходом. В работах [6–15] отмечается, что экспериментально определенные значения коэффициента гидравлического сопротивления хорошо согласуются с его расчетными значениями.

Целью настоящей работы является определение коэффициента гидравлического сопротивления микроканалов диаметром 34,5, 33,6 и 24,5 мкм с использованием метода двух каналов, а также апробация данного метода на микроканалах малой длины.

Методика измерений и экспериментальная установка. Работа с микроканалами предъявляет определенные требования к изготовлению микрожидкостных устройств и к методам определения параметров течения.

Методика измерений. Основными характеристиками течения жидкости в микроканале являются расход жидкости и перепад давления на входе и выходе микроканала. Расход жидкости через микроканал определяется такими ее свойствами, как плотность, вязкость и др. Полный перепад давления в микроканале равен сумме падений давления на его различных участках. На входе в микроканал и на выходе из него давление существенно уменьшается, что обусловлено резким изменением площади сечения. Падение давления происходит и в области, в которой профиль течения жидкости меняется от равномерно распределенного на входе до профиля течения Пуазейля. Длина этой области (области развивающегося течения) $L_{\text{разв}}$ зависит от гидравлического диаметра микроканала D_h и от числа Рейнольдса и вычисляется по формуле [16]

$$L_{\text{разв}} = 0,05 \text{ Re } D_h.$$

В области, где реализуется профиль течения Пуазейля (область развитого течения жидкости), падение давления происходит только за счет вязкого трения и определяется по формуле

$$\Delta P = f \rho V^2 L / (2D_h),$$

где f — коэффициент пропорциональности между падением давления в микроканале и скоростным напором (коэффициент гидравлического сопротивления или коэффициент Дарси), зависящий от формы сечения микроканала, шероховатости и числа Рейнольдса.

Таким образом, полное падение давления жидкости в микроканале есть сумма падений давления в указанных выше областях.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления микроканала обычно используется два способа.

Первый способ предполагает измерение давления непосредственно в области развитого течения [4, 8, 9, 12, 14]. Однако на практике не всегда можно измерить давление непосредственно внутри микроканала.

Удобным и легко реализуемым является второй способ — измерение давления в коллекторах на входе и выходе микроканала. Измеряемое таким образом давление является суммой потерь давления в различных частях микроканала. Для исключения влияния концевых эффектов, под которыми понимается падение давления на входе и выходе микроканала, а также в области развивающегося течения, используются справочные значения коэффициентов местного сопротивления [1, 2, 5, 6, 11], а также применяется метод двух каналов [3, 10, 14, 15]. Основная идея этого метода заключается в том, что влияние концевых эффектов не зависит от длины канала, а определяется только расходом жидкости. Поэтому можно предположить, что при одинаковом расходе жидкости через микроканалы одного и того же диаметра, но различной длины влияние концевых эффектов будет одинаковым для каждого микроканала. Следовательно, различие перепадов давления в микроканалах соответствует разности их длин и коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле

$$f = \frac{\pi D_h^4 (\Delta P_1 - \Delta P_2)}{2 \text{ Re } Q \mu (L_1 - L_2)}, \quad (1)$$

где Q — расход жидкости.

Анализ имеющихся данных показывает, что метод двух каналов используется для определения коэффициента гидравлического сопротивления микроканалов достаточно большого удлинения ($L/D_h \gg 100$). Однако существуют перспективные технологии, позволяющие изготавливать микроканалы малого удлинения ($L/D_h < 100$) с различными свойствами внутренней поверхности [17, 18]. Вопрос о применимости в этом случае метода двух каналов требует специального изучения.

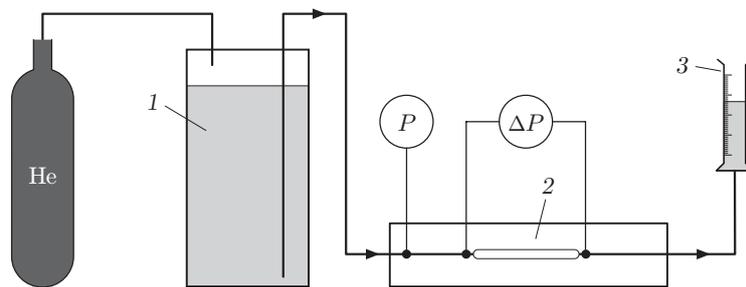


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — емкость с водой, 2 — рабочий стенд, 3 — емкость для измерения расхода

В некоторых работах (см., например, [7, 13]) способ учета влияния концевых эффектов не указывается. В работе [15] предложен способ расчета коэффициента гидравлического сопротивления на основе измерения разности температур жидкости на входе и выходе микроканала.

Схема измерения. Схема измерения давления показана на рис. 1. Газ под давлением подавался в емкость с водой. Вода по силиконовым трубкам поступала к рабочему стенду, на котором располагался микроканал. Пройдя через микроканал, вода поступала в емкость для измерения расхода, который определялся по изменению положения мениска за определенное время. В ходе эксперимента измерялось давление на входе в микроканал, а также перепад давления в микроканале. Для всех микроканалов максимальное давление на входе не превышало значения $P = 1$ МПа, что определялось прочностью соединения силиконовых и металлических трубок.

В качестве газа, создающего давление для движения жидкости, был выбран гелий, так как он плохо растворяется в воде. Отсутствие растворенных в воде газов необходимо для правильного измерения расхода жидкости. В качестве рабочей жидкости использовалась чистая деионизированная вода объемом 0,5 л, предварительно дегазированная путем пропускания через нее в течение 30 мин небольшого количества гелия.

Микроканалы. В экспериментах использовались стеклянные микроканалы, изготовленные из капилляра путем его нагрева и вытягивания над открытым пламенем. От полученной таким образом заготовки последовательно отрезались микроканалы различной длины.

Для того чтобы определить форму и размер сечения микроканала, входное сечение первого микроканала и выходное сечение последнего исследовались с помощью электронно-сканирующего микроскопа. От точности определения диаметра микроканала зависит точность вычисления коэффициента гидравлического сопротивления. Электронные фотографии входных сечений микроканалов приведены на рис. 2. Анализ полученных фотографий показывает, что микроканалы диаметром $D_h = 34,5; 25,4$ мкм имеют эллиптическую форму сечения, что учитывалось при определении гидравлического диаметра. Для всех исследуемых микроканалов ($D_h = 34,5; 33,6; 25,4$ мкм) наблюдалось незначительное изменение размеров входного и выходного сечений. Средние диаметры и длины изготовленных микроканалов, а также погрешности их определения приведены в таблице.

Для определения шероховатости внутренней поверхности микроканала часть микрокапиллярной заготовки срезалась вдоль оси таким образом, чтобы открылась стенка канала, и с помощью трехмерного анализатора структуры поверхности “ZYGO NewView 6300” проводились измерения. Величина шероховатости составляла порядка 5 нм, что позволяет считать стенку абсолютно гладкой.

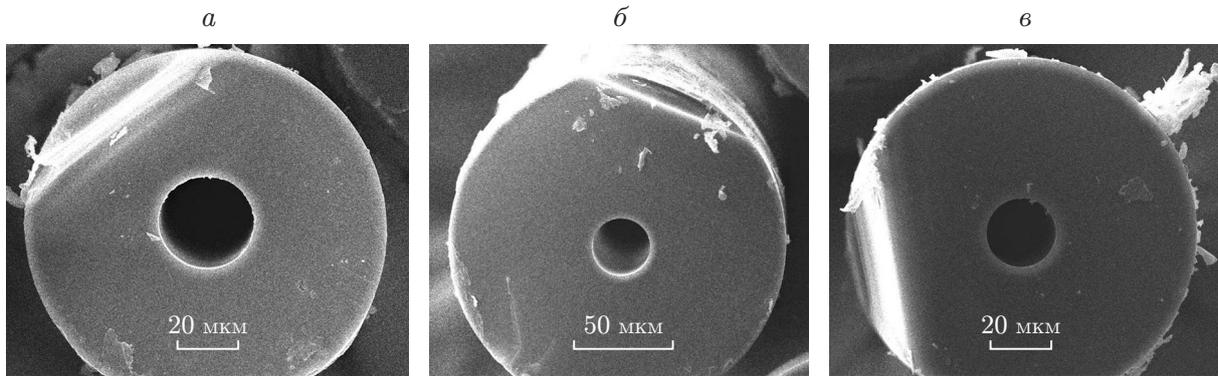


Рис. 2. Электронные фотографии входных сечений микроканалов различного диаметра:

a — $D_h = 34,5$ мкм, *б* — $D_h = 33,6$ мкм, *в* — $D_h = 25,4$ мкм

Параметры исследуемых микроканалов

D_h , мкм	Номер микроканала	L , мм	$\frac{L}{D_h}$	δD_h , мкм	δL , мм
34,5	1	20,23	600	1,2	0,06
	2	8,43	250	1,2	0,03
	3	4,66	138	1,2	0,03
33,6	1	11,72	349	0,5	0,04
	2	5,88	175	0,5	0,03
	3	2,87	85	0,5	0,03
25,4	1	8,74	344	1,2	0,03
	2	4,12	162	1,2	0,03
	3	2,25	89	1,2	0,03

При проведении эксперимента возникали затруднения при соединении стеклянного микроканала и металлических трубок диаметром 1,9 мм для подвода-отвода жидкости (рис. 3). Для решения этой проблемы из фотополимера были изготовлены специальные миниатюрные соединительные узлы — фитинги, к которым также с помощью фотополимера присоединялись металлические трубки. Микроканал закреплялся в фитинге с помощью эпоксидной смолы. Точность расположения торцевого среза микроканала относительно стенки коллектора составляет ± 25 мкм.

На рис. 4 приведена фотография рабочего стенда. Экспериментальный стенд представляет собой пластину из оргстекла, к которой с двух сторон с помощью винтов крепятся две металлические пластины с припаянными к ним металлическими трубками. По трубкам 3 осуществлялись подвод и отвод жидкости, трубки 4 использовались для подсоединения датчиков давления. Микрокапилляр располагался в центре пластины. Для устойчивости вся конструкция крепится к металлической пластине 6.

Результаты эксперимента. Для удобства представления данных результаты проведенного экспериментального исследования приведены на рис. 5 в виде зависимости нормированного числа Пуазейля C_* от числа Рейнольдса:

$$C_* = (f Re)_3 / (f Re)_p.$$

Данные, приведенные на рис. 5, *a*, получены с использованием метода двух каналов для микроканалов 1 и 3 различных диаметров (см. таблицу). Видно, что результаты экспериментов согласуются с теоретическими значениями в пределах погрешности. Разность

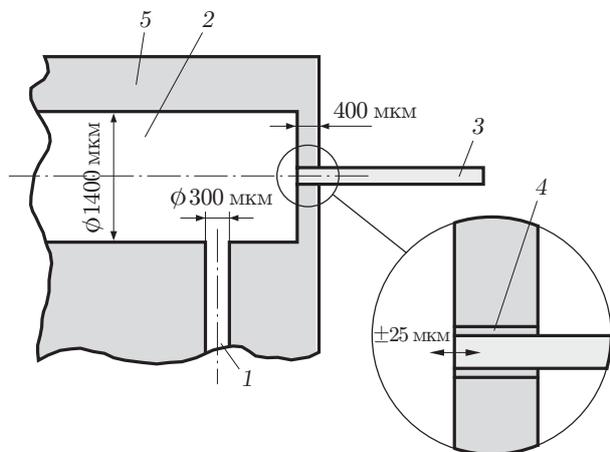


Рис. 3

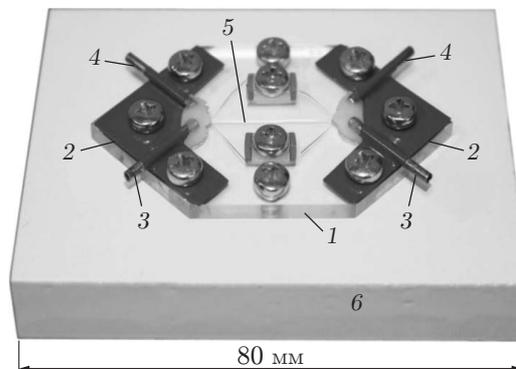


Рис. 4

Рис. 3. Схема соединения стеклянного микроканала и металлической трубки для подвода-отвода жидкости:

1 — канал для измерения давления, 2 — коллектор цилиндрической формы, 3 — микроканал, 4 — эпоксидная смола, 5 — фотополимер

Рис. 4. Экспериментальный стенд:

1 — пластина из оргстекла, 2 — металлические пластины, 3 — металлические трубки, по которым осуществлялись подвод и отвод жидкости, 4 — металлические трубки для подсоединения датчиков давления, 5 — микрокапилляр, 6 — металлическая пластина-основание

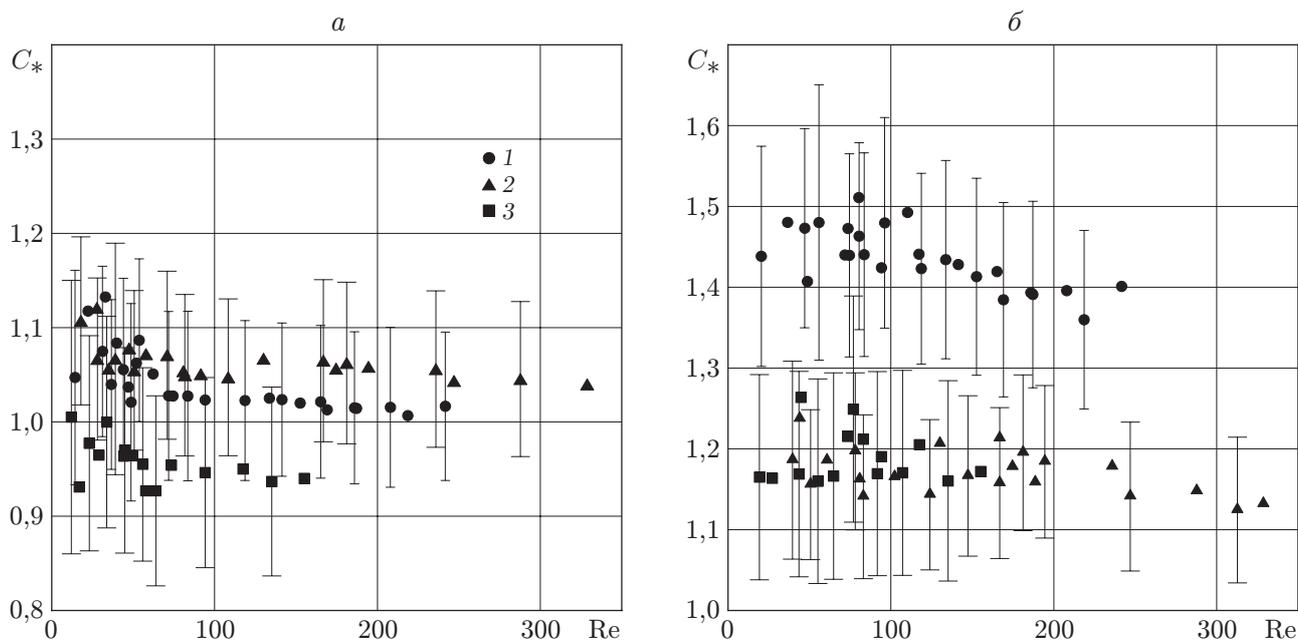


Рис. 5. Зависимости нормированного числа Пуазейля от числа Рейнольдса, полученные по формуле (1) для микроканалов 1, 3 (а) и 2, 3 (б) различного диаметра:

1 — $D_h = 34,5$ мкм, 2 — $D_h = 33,6$ мкм, 3 — $D_h = 25,4$ мкм

удлинений L/D_h микроканалов 1 и 3 указанных диаметров составляет 462, 264 и 255 соответственно.

На рис. 5,б приведены значения нормированного числа Пуазейля, полученные с использованием метода двух каналов для микроканалов 2 и 3 различных диаметров (см. таблицу). В этом случае разность удлинений L/D_h микроканалов 2 и 3 равна 112 при $D_h = 34,5$ мкм, 90 при $D_h = 33,6$ мкм и 73 при $D_h = 25,4$ мкм. На рис. 5,б видно, что экспериментально полученные значения коэффициента гидравлического сопротивления превышают его теоретическое значение на 15–50 %.

Заключение. Установлено, что для стеклянных микроканалов круглого сечения диаметром 34,5, 33,6 и 25,4 мкм экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления хорошо согласуются с теоретическими в диапазоне значений числа Рейнольдса $13 \leq Re \leq 330$.

Проведенные эксперименты показали ограниченность применения метода двух каналов. Для корректного использования данного метода необходимо, чтобы длина короткого микроканала составляла не менее 150 калибров (диаметров), а разность длин двух микроканалов — не менее 150–170 калибров. Для коротких (менее 100–120 калибров) микроканалов применение метода двух каналов некорректно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Weilin Q., Mala Gh. M., Dongqing L.** Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2000. V. 43. P. 353–364.
2. **Chen Y. T., Kang S. W., Tuh W.-C., Hsiao T.-H.** Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in microchannels // Tamkang J. Sci. Engng. 2004. V. 7, N 1. P. 11–16.
3. **Mala Gh. M., Li D.** Flow characteristics of water in microtubes // Intern. J. Heat Fluid Flow. 1999. V. 20. P. 142–148.
4. **Kandlikar S. G., Joshi S., Tian S.** Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes // Heat Transfer Engng. 2003. V. 24, N 3. P. 4–16.
5. **Hsieh S.-S., Lin Ch.-Y., Huang Ch.-F., Tsai H.-H.** Liquid flow in a micro-channel // J. Micromech. Microengng. 2004. V. 14. P. 436–445.
6. **Judy J., Maynes D., Webb B. W.** Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2002. V. 45. P. 3477–3489.
7. **Celata G. P., Cumo M., Guglielmi M., Zummo G.** Experimental investigation of hydraulic and single-phase heat transfer in 0.130-mm capillary tube // Microscale Thermophys. Engng. 2002. N 6. P. 85–97.
8. **Kohl M. J., Abdel-Khalik S. I., Jeter S. M., Sadowski D. L.** An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005. V. 48. P. 1518–1533.
9. **Costaschuk D., Elsnab J., Petersen S., et al.** Axial static pressure measurements of water flow in a rectangular microchannel // Exp. Fluids. 2007. V. 43. P. 907–916.
10. **Celata G. P., Cumo M., McPhail S., Zummo G.** Characterization of fluid dynamic behaviour and channel wall effects in microtube // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2006. V. 27. P. 135–143.
11. **Li Z., He Y.-L., Tang G.-H., Tao W.-Q.** Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 3447–3460.
12. **Dutkowski K.** Experimental investigations of Poiseuille number laminar flow of water and air in minichannels // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 5983–5990.

13. **Cui H., Silber-Li Z., Zhu S.** Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure // *Phys. Fluids*. 2004. V. 16, N 5. P. 1803–1810.
14. **Baviere R., Ayela F.** Micromachined strain gauges for the determination of liquid flow friction coefficients in microchannels // *Measurement Sci. Technol.* 2004. V. 15, N 2. P. 377–383.
15. **Celata G. P., Morini G. L., Marconi V., et al.** Using viscous heating to determine the friction factor in microchannels: An experimental validation // *Exp. Thermal Fluid Sci.* 2006. V. 30. P. 725–731.
16. **Steinke M. E., Kandlikar S. G.** Single-phase liquid friction factors in microchannels // *Intern. J. Thermal Sci.* 2006. V. 45. P. 1073–1083.
17. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K., et al.** Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // *Physica E*. 2000. V. 6. P. 829–831.
18. **Романов С. И., Пышный Д. В., Вандышева Н. В. и др.** Кремниевая микроканальная матрица для биочиповых технологий // *Нано- и микросистемная техника*. 2007. № 9. С. 55–61.

Поступила в редакцию 30/XI 2009 г.
