

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mails: aniskin@itam.nsc.ru; maslov@itam.nsc.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И КРИВОЛИНЕЙНОГО МИКРОКАНАЛОВ \*

В работе представлены экспериментальные результаты по определению коэффициента гидравлического сопротивления двух микроканалов круглого сечения: прямолинейного и криволинейного. Внутренний диаметр каналов в обоих случаях составлял 100 мкм. Диапазон чисел Рейнольдса – от 110 до 2 216. Измерение давления производилось одновременно в четырех точках по длине канала. Для прямолинейного микроканала коэффициент гидравлического сопротивления находится в хорошем соответствии с теоретическим значением для круглых гладких труб. Для криволинейного микроканала значение сопротивления искривленного участка на 17 % меньше, чем справочное значение для плавно изогнутых труб. Экспериментальные результаты сравниваются с расчетами, выполненными с помощью программного пакета Fluent.

*Ключевые слова:* микротечения, микроканал, гидравлический коэффициент сопротивления.

### Введение

Получающие все большее распространение микро- и нанотехнологии диктуют необходимость миниатюризации жидкостных систем. Применение микрожидкостных систем для охлаждения микроэлектронных компонентов является привлекательным и перспективным в силу их большой эффективности. Наряду с системами охлаждения микрожидкостные системы находят применение в медико-биологических приложениях. Для оптимизации дизайна микрожидкостных систем необходимо ясное понимание механизмов переноса жидкости как при ламинарном, так и при турбулентном течении жидкости.

За последние 15–20 лет много исследовательских групп представляли свои результаты по падению давления и коэффициенту гидравлического сопротивления для ламинарного и турбулентного течения жидкости в микроканалах. Для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления обычно применяют два способа. Первый

заключается в измерении давления в коллекторах на входе и на выходе микроканала. Измеряемое таким образом давление является суммой потерь давления в различных частях микроканала. Для учета влияния концевых эффектов, под которыми подразумевается падение давления на входе и выходе микроканала, а также в области развивающегося течения, часто используются справочные значения коэффициентов местного сопротивления [1–5]. Для исключения влияния концевых эффектов применяется метод двух каналов [6–8].

Вторым способом вычисления коэффициента гидравлического сопротивления является измерение давления непосредственно в области развитого течения [9–13]. Измерения давления внутри микроканалов затруднены вследствие малых размеров каналов и сложности технологии их изготовления.

В работах [9; 12] в качестве канала использовались металлические трубки достаточного большого диаметра – от 0,55 до 1,1 мм, в которых просверливались отвер-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (интеграционный проект СО РАН № 110).  
Авторы выражают благодарность Павлу Александровичу Поливанову за оказанную помощь в работе.

ствия для измерения давления. Измерения проводились в области развитого течения.

В работе [10] исследовалось течение жидкости в микроканалах прямоугольного сечения с гидравлическим диаметром от 25 до 100 мкм. В качестве рабочей жидкости использовались вода и воздух, для которых числа Рейнольдса составляли  $4,9 < Re < 2\,068$  и  $6,8 < Re < 18\,814$  соответственно. Авторам удалось сделать кремниевые микроканалы с восемью отверстиями по длине канала размером  $7 \times 10$  мкм. Дренажные отверстия располагались на равном расстоянии друг от друга. Авторы получили хорошее совпадение экспериментально определенного значения коэффициента гидравлического сопротивления с теоретическим значением. Однако экспериментальные точки на приводимом в статье графике распределения давления по длине канала имеют значительный разброс.

В работе [11] исследовалось течение жидкости в прямоугольном микроканале с гидравлическим диаметром 169 мкм. Канал имел 8 отверстий по длине диаметром 27 мкм. В начальной области микроканала было расположено 5 дренажных отверстий для подробного изучения области развивающегося течения. Рабочей жидкостью являлась вода, а диапазон чисел Рейнольдса составлял от 230 до 4 740. Коэффициент гидравлического сопротивления, определенный в работе, хорошо согласуется с теоретическим значением. Число Рейнольдса перехода оказалось чуть выше, чем для каналов макроразмера и составило 2 370. Авторы указывают, что характер распределения давления в области развивающегося течения при различных диапазонах чисел Рейнольдса может быть разным. Исследователи объясняют это различие отрывом потока в начале канала.

В работе [13] авторы использовали только два дренажных отверстия исключительно для определения коэффициента гидравлического сопротивления. Распределение давления по длине канала в работе получено не было.

Что касается течения жидкости в искривленных микроканалах, то потребность в такого рода исследованиях очень высока для разработки пассивных микромиксеров. Однако экспериментальных работ по определению коэффициента сопротивления ис-

кривленных участков микроканалов практически нет.

В работе [14] авторы изучали течение жидкости в искривленном микроканале прямоугольного сечения с гидравлическим диаметром 167–182 мкм в диапазоне чисел Рейнольдса от 70 до 2 000. Вычисленное значение коэффициента гидравлического сопротивления сравнивалось с эмпирической формулой, приведенной в справочнике по гидравлическим сопротивлениям. К недостаткам работы можно отнести то, что размеры микроканала определены с очень большой погрешностью как по ширине, так и по высоте микроканала. Как известно из анализа литературы, касающейся определения коэффициента гидравлического сопротивления микроканалов, точное определение размеров каналов является очень важным с точки зрения погрешности вычисления коэффициента сопротивления. Даже небольшая неточность при определении размера микроканала приводит к весьма значительным погрешностям при вычислении коэффициента гидравлического сопротивления микроканала. Однако авторы указывают на неприменимость справочной формулы для течения жидкости в искривленных микроканалах.

Целью настоящей работы являлась разработка технологии изготовления микроканалов прямолинейной и искривленной формы с возможностью внутреннего измерения давления по длине канала, а также вычисление на основе полученного распределения давления коэффициентов гидравлического сопротивления прямолинейного и криволинейного микроканалов.

### Микроканалы

Для изготовления микроканалов была разработана технология «предварительного изготовления». Суть технологии заключается в том, что на первом этапе из твердого материала выполняется вся необходимая форма экспериментального стенда: микроканал и отводы от микроканала. Затем предварительно изготовленная форма заливается жидким полимерным составом, после полимеризации которого форма удаляется. В результате получается полимер с микроканалом внутри.

Особое внимание при изготовлении микроканалов было уделено созданию одинако-

вой геометрии на входе и выходе микроканалов. Одинаковая геометрия на концах микроканалов давала возможность объединять полученные данные по распределению давления при прокачке жидкости с одной и с другой стороны микроканала, повышая, таким образом, информативность данных.

На основе разработанной технологии были изготовлены два стенда: один с прямолинейным, другой с криволинейным микроканалами. Фотографии и схемы каналов представлены на рис. 1. Криволинейный микроканал представлял собой канал U-образной формы с диаметром закругления 3,2 мм. Длина криволинейного канала составляла 19,97 мм, прямолинейного – 19,37 мм. На фотографиях отчетливо видны отводы для внутреннего измерения давления.

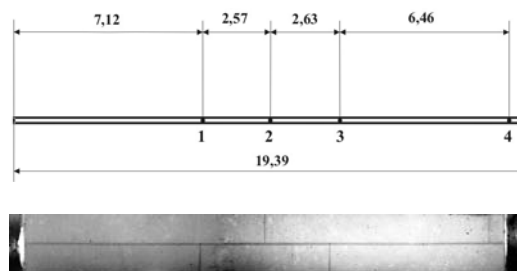
Внутренний диаметр определялся по электронной фотографии сечения микроканала (рис. 2, а). Диаметр микроканалов в обоих случаях составлял 100 мкм.

На рис. 2, б приведена электронная фотография продольного сечения микроканала, на которой отчетливо видны отверстия для измерения давления (1 и 2). По длине каналов было сделано по 4 отверстия для измерения статического давления. Отверстия имели неправильную овальную форму, и их размер составлял примерно  $5 \times 10$  мкм.

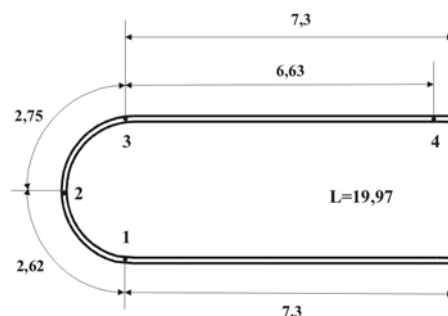
### Определение коэффициента гидравлического сопротивления микроканала

Основными характеристиками течения жидкости в микроканале являются расход жидкости и перепад давления на микроканале. Полный перепад давления на всей длине микроканала складывается из падений давления на различных участках микроканала. На входе в микроканал и на выходе из него происходит падение давления, связанное с резким изменением площадей по ходу течения жидкости. В области развивающегося течения происходит изменение давления вследствие установления профиля течения жидкости от равномерно распределенного на входе до профиля течения Пуазейля. Длина области развивающегося течения зависит от гидравлического диаметра микроканала и от числа Рейнольдса [15]:

$$L_{\text{разв}} \approx 0,05 \text{Re} D.$$

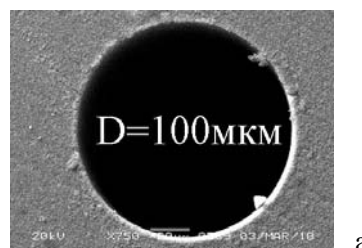


а

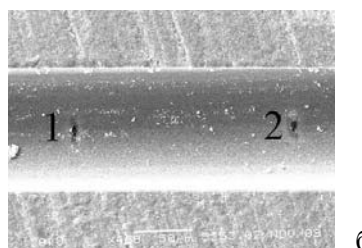


б

Рис. 1. Прямолинейный (а) и U-образный (б) микроканалы. Размеры указаны в миллиметрах



а



б

Рис. 2. Поперечное (а) и продольное (б) сечения микроканала

В области развитого течения, где реализуется профиль течения Пуазейля, падение давления происходит только за счет вязкого трения. Падение давления в этой области определяется как

$$\Delta P = \frac{f \rho V^2 L}{2D},$$

где  $D$  – диаметр канала;  $V$  – средняя скорость жидкости в канале;  $L$  – длина канала;  $f$  – коэффициент пропорциональности между падением давления в микроканале и скоростным напором. Коэффициент  $f$  зависит от формы сечения микроканала, шероховатости и числа Рейнольдса, его называют еще коэффициентом гидравлического сопротивления или коэффициентом Дарси. Таким образом, для определения коэффициента гидравлического сопротивления необходимо знать падение давления в области развитого течения. Коэффициент гидравлического сопротивления вычисляется по формуле

$$f = \frac{\pi D^4 \Delta P_{ij}}{2 \operatorname{Re} Q \mu \Delta L_{ij}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – массовый расход жидкости;  $\Delta P_{ij}$  – разница давлений между точками измерения давления;  $\Delta L_{ij}$  – расстояние между точками измерения давления.

В случае криволинейного канала, в котором присутствует вихревое движение на большом участке длины канала проводилось сравнение коэффициента сопротивления криволинейного участка микроканала со справочными эмпирическими данными для плавно изогнутых труб, для которых относительный радиус кривизны  $\frac{R_0}{D} \geq 1,5$ , приведенными в [16], где  $R_0$  – радиус закругления канала.

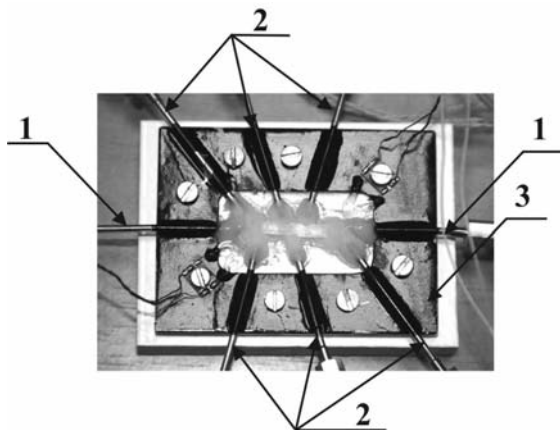


Рис. 3. Экспериментальный стенд

Из [16] следует, что для реализованных в настоящей работе чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления для плавно изогнутых труб  $f_{\text{справ}}$  определяется по формуле:

$$f_{\text{справ}} = \frac{20}{\operatorname{Re}^{0,65}} \left( \frac{D}{2R_0} \right)^{0,175}.$$

Экспериментальное значение коэффициента сопротивления закругленного участка определялось по формуле (1), где  $i = 1, j = 3$ .

## Эксперимент

На рис. 3 представлена фотография экспериментального стенда с прямолинейным каналом, представляющего собой пластину из оргстекла, на которой закреплен полимер с микроканалом. Подвод и отвод жидкости (1), как и выводы на датчики давления (2), обеспечивается металлическими трубками, припаянными к металлической пластине (3), которая закреплена поверх пластины из оргстекла. Сообщение между микроканалом и трубками обеспечивается канально-полостной системой. Для жесткости вся система крепится на металлической основе.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная деионизованная вода. Жидкость была очищена от газа пропусканием через нее гелия. Небольшое, но постоянное количество гелия пропусклось через воду в течение эксперимента.

На рис. 4 показана схема эксперимента. Жидкость (2) направляется жидкостным насосом (4) через фильтр (3) в микроканал (6), находящийся на экспериментальном стенде. В ходе эксперимента измеряются давления на входе в канал и на выходе из него, а также в четырех точках по длине микроканала. С помощью весов (5) обеспечивается контроль за расходом жидкости.

Термопары для измерения температуры жидкости были размещены внутри коллектора вблизи входа и выхода микроканала. Термопары Т-типа были изготовлены из проводов диаметром около 20 мкм.

## Оценка погрешностей

Для того чтобы проанализировать влияние экспериментальных параметров на коэффициент сопротивления, применялась стандартная процедура оценки погрешностей.

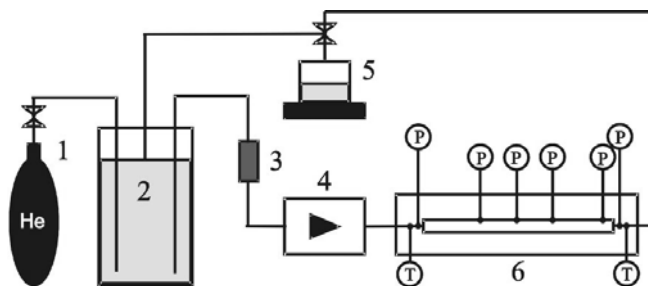


Рис. 4. Схема эксперимента

Коэффициент сопротивления определялся по формуле Дарси (1). Переписывая эту формулу в измеряемых величинах, получим:

$$f = \frac{\pi \Delta P_{ij} D^5}{8 \rho Q^2 L_{ij}},$$

где  $D$  – диаметр канала;  $Q$  – массовый расход жидкости;  $\Delta P_{ij}$  – разница давлений между точками измерения давления;  $L_{ij}$  – расстояние между ними.

Относительная погрешность коэффициента гидравлического сопротивления  $e_f$  в зависимости от погрешности независимых переменных определяется как

$$e_f = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta P} e_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{5}{D} e_D\right)^2 + \left(\frac{2}{Q} e_Q\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} e_\rho\right)^2 + \left(\frac{1}{L} e_L\right)^2}.$$

Из приведенной формулы видно, что максимальную погрешность в определении коэффициента гидравлического сопротивления может вносить ошибка определения диаметра микроканала. Именно по этой причине диаметр канала определяется по электронной фотографии. Точность определения диаметра составляла 1%. Точность определения расхода при малых числах Рейнольдса составляла 4%, при больших – 2%. Длина канала измерялась с точностью  $\pm 50$  мкм. Паспортные данные для точности датчиков давления – 0,25%. Таким образом, погрешность измерения коэффициента сопротивления составляла от 8 до 13%.

## Результаты

По экспериментальным результатам было построено распределение давления жидкости в микроканале по нормированной

длине канала как для прямолинейного, так и для криволинейного микроканала (рис. 5). Дополнительно было проведено численное моделирование пакетом Fluent. На графиках точками показаны экспериментальные значения, линией – расчет.

Для криволинейного микроканала распределение давления носит нелинейный характер. Как показывает расчет, на искривленном участке образуются вихри Дина (рис. 6), которые и приводят к нелинейному распределению давления. На рис. 6 изображена верхняя половина сечения канала в точке 2 (см. рис. 1).

Для канала круглого сечения, в случае развитого течения, число Пуазейля  $P_0 = fRe = 64$ . На рис. 7, а представлены значения коэффициента гидравлического сопротивления для прямолинейного канала в виде нормированного числа Пуазейля  $C^*$  в зависимости от числа Рейнольдса:

$$C^* = \frac{(fRe)_{\text{экс}}}{(fRe)_{\text{теор}}}.$$

Полное сопротивление микроканала, представленное на зависимости  $C^*$  от  $Re$ , растет, что определяется увеличением влияния концевых эффектов.

На рис. 7, б приведена зависимость  $C^*$  от  $Re$  для криволинейного участка U-образного микроканала, здесь  $C^* = \frac{f_{13} Re}{f_{\text{справ}} Re}$ . Видно,

что экспериментально определенное значение коэффициента гидравлического сопротивления меньше справочного значения для участков плавно изогнутых труб на 17% для всех экспериментально достигнутых чисел Рейнольдса.

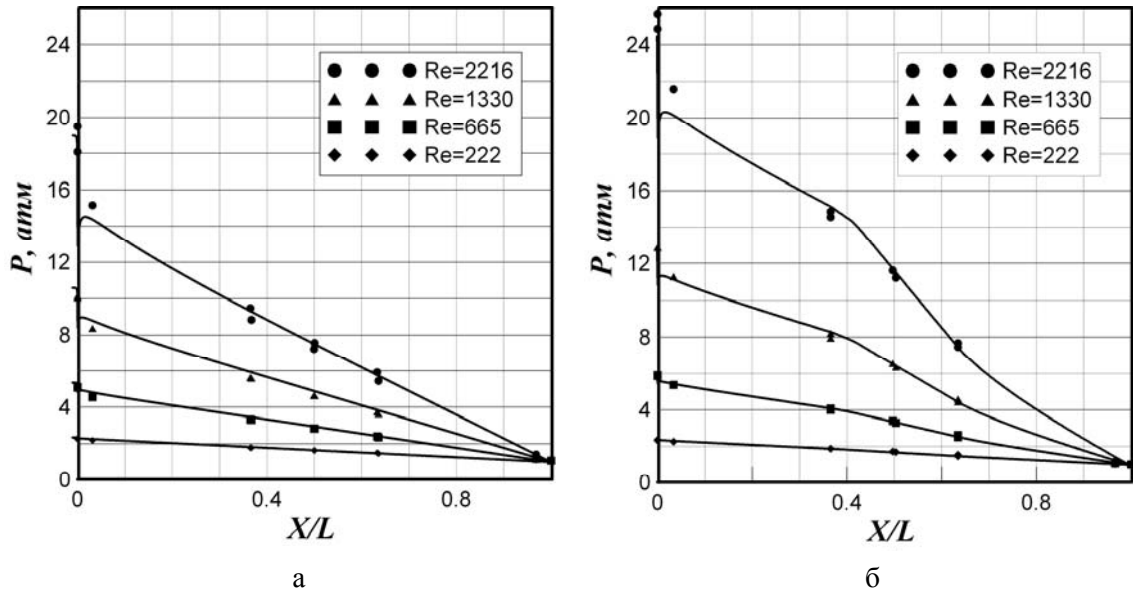


Рис. 5. Распределение давления жидкости по нормированной длине прямолинейного (а) и криволинейного (б) микроканалов

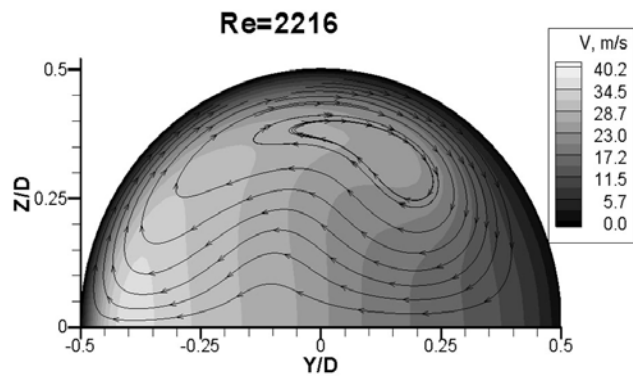


Рис. 6. Поперечное распределение скорости жидкости

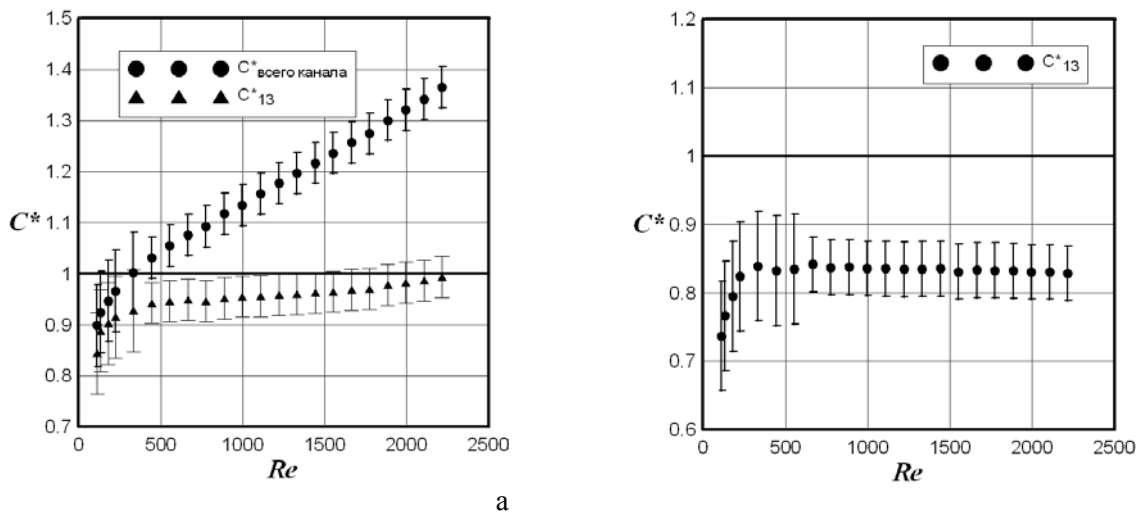


Рис. 7. Зависимость  $C^*$  от  $Re$  для прямолинейного канала (а) и для криволинейного участка U-образного канала (б)

## Выводы

Разработана технология и изготовлены микроканалы с отверстиями в стенках для измерения давления. Найдено распределение давления жидкости вдоль прямолинейного и криволинейного каналов. Показано, что для прямолинейного микроканала распределение давления в области развитого течения для всех экспериментальных чисел Рейнольдса носит линейный характер, и коэффициент гидравлического сопротивления находится в соответствии с теоретическим значением для круглых каналов. Для криволинейного микроканала распределение давления вдоль канала нелинейно, что обусловлено образованием вихрей Дина, общий перепад давления при одинаковом расходе жидкости превышает перепад давления для прямолинейного микроканала. Коэффициент сопротивления криволинейного участка U-образного микроканала оказался меньше справочного значения. Разница составила 17 %.

## Список литературы

1. Weilin Q., Mala Gh. M., Dongqing L. Pressure-Driven Water Flows in Trapezoidal Silicon Microchannels // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43. No. 3. 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 Journal of Science and Engineering*. 2004. Vol. 7. No. 1. P. 11–16.
3. Hsieh S.-S., Lin Ch.-Y., Huang Ch.-F., Tsai H.-H. Liquid Flow in a Microchannel // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. Vol. 14. No. 4. P. 436–445.
4. Judy J., Maynes D., Webb B. W. Characterization of Frictional Pressure Drop for Liquid Flows through Microchannels // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. No. 17. P. 3477–3489.
5. Li Z., He Y.-L., Tang G.-H., Tao W.-Q. Experimental and Numerical Studies of Liquid Flow and Heat Transfer in Microtubes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. No. 17–18. P. 3447–3460.
6. Mala Gh. M., Li D. Flow Characteristics of Water in Microtubes // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1999. Vol. 20. No. 2. P. 142–148.
7. Celata G. P., Cumo M., McPhail S., Zummo G. Characterization of Fluid Dynamic Behaviour and Channel Wall Effects in Microtube // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2006. Vol. 27. No. 1. P. 135–143.
8. Celata G. P., Morini G. L., Marconi V., McPhail S. J., Zummo G. Using Viscous Heating to Determine the Friction Factor in Microchannels – An Experimental Validation // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2006. Vol. 30. No. 8. P. 725–731.
9. 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 Engineering*. 2003. Vol. 24. No. 3. P. 4–16.
10. Kohl M. J., Abdel-Khalik S. I., Jeter S. M., Sadowski D. L. An Experimental Investigation of Microchannel Flow with Internal Pressure Measurements // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. No. 8. P. 1518–1533.
11. Costaschuk D., Elsnab J., Petersen S., Klewicki J. C., Ameel T. Axial Static Pressure Measurements of Water Flow in a Rectangular Microchannel // *Experiments in Fluids*. 2007. Vol. 43. No. 6. P. 907–916.
12. Dutkowski K. Experimental Investigations of Poiseuille Number Laminar Flow of Water and Air in Minichannels // *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume. 2008. Vol. 51. No. 25–26. P. 5983–5990.
13. Baviere R., Ayela F. Micromachined Strain Gauges for the Determination of Liquid Flow Friction Coefficients in Microchannels // *Meas. Sci. Technol.* 2004. Vol. 15. P. 377–383.
14. Wei-hua Yang, Jing-zhou Zhang, Hui-er Cheng. The Study of Flow Characteristics of Curved Microchannel // *Applied Thermal Engineering*. 2005. Vol. 25. No. 13. P. 1894–1907.
15. Steinke M. E., Kandlikar S. G. Single-Phase Liquid Friction Factors in Microchannels // *International Journal of Thermal Sciences*. 2006. Vol. 45. No. 4. P. 1073–1083.
16. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

V. M. Aniskin, K. V. Adamenko, A. A. Maslov

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION FACTORS  
FOR STRAIGHT AND CURVED MICROCHANNELS**

This article presents experimental results of determining the friction factors for two microchannels with circular cross-section: rectilinear and curvilinear. The inner diameter of channels in both cases was 100 microns. The Reynolds numbers ranged from 110 to 2216. Pressure measurement was carried out simultaneously in four locations along the channel. Friction factor for the straight microchannel was in good agreement with the theoretical value for the round smooth tubes. For the curved microchannel, the value of friction factor of the curved section was 17 percent less than the reference value for smoothly curved tubes. The experimental results are compared with calculations which were made using the software package Fluent.

*Keywords:* microflows, curved microchannel, friction factor.