**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2012 Т. 4 № 4 С. 781−792**

Ки&М

МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 532.5

Компьютерное моделирование тепломассообменных процессов в микроканалах с использованием CFD-пакета σFlow

А.С. Лобасов[1,a], А.В. Минаков[1,2]

[1] ФГОАУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,
Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, 28

[2] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1
E-mail: [a] perpetuityrs@mail.ru

*Получено 9 августа 2012 г.,
после доработки 31 октября 2012 г.*

Данная работа посвящена численному моделированию тепломассообменных процессов в микроканалах. Микроканалы — каналы, характерный диаметр которых порядка 100 мкм, интерес к изучению процессов в которых растёт с каждым годом, в связи с бурным развитием микрофлюидной техники. Исследование проводилось с помощью программного комплекса σFlow. Были рассмотрены изотермические и неизотермические течения в микроканалах различной конфигурации. Полученные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными или аналитическими данными и в целом для всех задач получено хорошее их согласование.

Ключевые слова: микроканалы, CFD, микрофлюидная техника, численное моделирование

Numerical simulation of heat and mass transfer processes in microchannels using CFD-package σFlow

A.S. Lobasov[1], **A.V. Minakov**[1,2]

[1] Siberian federal university, Kirenskogo str. 28, Krasnoyarsk, 660074, Russia
[2] Institute of thermal physics SB RAS, Lavrentiev av. 1, Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. — This article is dedicated to numerical modeling of heat and mass transfer processes in microchannels. Microchannels are channels, that characteristic diameter is about 100 μm. Interest to the study of processes in them is growing every year, due to the rapid development of microfluid technique. The study was conducted using the software package σFlow. Isothermal and nonisothermal flows in microchannels of various configurations were considered. The obtained results were compared with available experimental and analytical data. In general for all problems a good agreement was obtained.

Keywords: microchannels, CFD, mircofluid technique, numerical modelling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, pp. 781–792 (Russian).

Введение

На сегодняшний день в настоящих и будущих теплообменных приложениях становится всё более и более важным применение микромасштабных охлаждающих устройств, таких как микроканальные теплоприёмники, которые обеспечивают высокие значения коэффициента теплопередачи при течении жидкостей в относительно небольших объёмах. В особенности течение хладагента через большое число вырезанных или вытравленных микроканалов, с целью теплоотведения и поддержания постоянной температуры в микроэлектромеханических системах, интегрированных электрических цепях, лазерно-диодных массивах, высокоэнергетических отражателях и других микроустройствах, подверженных кратковременным высоким тепловым нагрузкам, охлаждение электроники, управление температурными режимами в аэрокосмической индустрии, МЭМС устройства для биологических и химических исследований и т. д. По мере развития микро- и нанотехнологий и внедрения их в различные отрасли человеческой деятельности (электроника, химическая, биологическая, пищевая индустрии) все чаще возникают задачи о течении жидкости в микро- и наноканалах. Микроканалы — каналы, характерный диаметр которых порядка 100 мкм, в настоящее время получили очень широкое распространение в различных приложениях. Их применяют для транспорта наночастиц, бактерий, молекул ДНК, охлаждения микроэлектронных устройств, в качестве химических реакторов для микроскопических количеств вещества и многого другого.

Одно из бурно развивающихся направлений микросистемной техники — микрофлюидные системы. Согласно современной терминологии, флюидное микроустройство обеспечивает выполнение функций за счет локализации, течения, разделения, хранения микро- и наноколичеств жидкости или газа, а также их физико-химических превращений под действием внешних электрических, магнитных, оптических, механических, тепловых и химических воздействий.

В соответствии с этим определением к микрофлюидной технике можно отнести, во-первых, все микромасштабные устройства, являющиеся прямыми аналогами макромасштабного оборудования современных технологий обработки жидких и газообразных веществ, а во-вторых — принципиально новые микрофлюидные устройства, не имеющие аналогов в макромире в связи с особыми, специфическими условиями протекания процессов в микроразмерных элементах микрофлюидных систем.

Эти особые условия связаны с качественным скачком при переходе к размерам менее 100 мкм, когда обрабатываемые среды еще могут рассматриваться как непрерывные континуумы, но за счет малых поперечных размеров каналов микрофлюидных систем радикальным образом изменяется соотношение силовых, энергетических и массовых потоков. В частности, ослабевает роль массовых (объемных) факторов (гравитационные, центробежные, инерционные силы) и возрастает роль поверхностных сил (капиллярных, вязких). Во многих случаях это смещение баланса потоков поддается управлению и может использоваться в целях многократной интенсификации процессов, для создания комбинации технологических условий, не достижимых в обычном оборудовании, а также для получения уникальных продуктов и материалов.

Развитие новых приложений, для которых главным требованием является возможность охлаждения различных жидких и газообразных веществ в ограниченном пространстве, заставляет многих исследователей сфокусироваться на изучении и предсказании тепло- и гидродинамических процессов в мини- и микроканалах. Одним из методов исследования таких процессов является использование численного моделирования, в частности, CFD-пакета SigmaFlow, возможность применения которого показана в работе [Minakov, Rudyak, Gavrilov, Dekterev, 2010]. Несмотря на микронные, а в некоторых случаях даже нанометровые размеры каналов, течения в них описываются в рамках классической гидродинамики.

Математическая модель и основные моменты численной методики

Как известно, в обычных условиях течения жидкостей и не слишком разреженных газов вполне можно описывать методами механики сплошной среды. Однако в микроканалах ситуация существенно меняется. В этих условиях течения жидкости и газа, как правило, следует описывать по-разному. Действительно, если газ не слишком плотный (до давлений примерно 10–20 атм) соответствующее число Кнудсена Kn таких микротечений изменяется в пределах $10^{-2} \leq \mathrm{Kn} \leq 10^{2}$. В этом диапазоне чисел Кнудсена течение уже не описывается уравнениями гидродинамики. Точнее, на нижнем пределе все еще можно использовать уравнения Навье–Стокса, но с граничными условиями скольжения. Затем примерно до чисел Кнудсена $\mathrm{Kn} \sim 10^{-1}$ необходимо применять уравнения Барнетта, а потом — кинетическое уравнение Больцмана. При этом стоит иметь в виду, что к использованию уравнений Барнетта необходимо относиться с осторожностью. Строго говоря, они не полные и не учитывают эффектов памяти.

Таким образом, начиная примерно с 50 мкм, для моделирования микротечений газа нельзя применять обычные гидродинамические методы. Для моделирования течений газа в таких условиях можно использовать метод прямого статистического моделирования Монте-Карло (ПСМ). Однако скорости течений в микроканалах обычно не велики, а в этих условиях метод ПСМ работает неудовлетворительно. Реального продвижения можно добиться, решая для данных задач полное уравнение Больцмана или применяя метод молекулярной динамики. Для использования последнего необходимо порядка $10^5 \div 10^6$ молекул в ячейке. Вычислительные затраты при этом будут колоссальными.

С микротечениями жидкостей ситуация немного проще, поскольку приближение сплошной среды здесь работает для каналов гораздо меньших размеров, чем для газов.

В рамках гидродинамического подхода, использованного в данной работе, микротечения моделируются посредством решения уравнений Навье–Стокса. Многочисленные натурные эксперименты [1] показывают, что для жидкостей такое описание адекватно для микроканалов с минимальным характерным размером порядка 1 мкм. Сегодня известно немало алгоритмов, позволяющих решить такую задачу. Это и различные модификации метода Галеркина, включая спектральные методы и методы конечных элементов и конечных объемов, различные бессеточные методы (см. [Karnidakis, 2005] и цитированную там литературу).

В данной работе для моделирования течений и теплообмена в микроканалах использовался CFD пакет SigmaFlow – универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломассообмена и горения, развиваемый специалистами Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН и кафедры теплофизики Сибирского федерального университета [Rudyak, 2008; А. А. Гаврилов, 2010; А. А. Гаврилов, 2010]. В работе рассматриваются несжимаемые течения ньютоновских жидкостей, которые описываются уравнениями Навье–Стокса.

Уравнение неразрывности:

$$\nabla v = 0, \tag{1}$$

где v — вектор скорости м/с.

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla\left(\rho v \cdot v\right) = -\nabla p + \nabla \tau, \tag{2}$$

где ρ — плотность, кг/м^3; t — время, с; p — давление, Па. Тензор вязких напряжений равен

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right),$$

где μ — молекулярная вязкость, Па·с.

Уравнение сохранения энергии рассматривается в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla\left(\rho v h\right) = \nabla\left(\lambda \nabla T\right) + S_h, \tag{3}$$

где λ — коэффициент теплопроводности, T — температура среды, S_h — источниковый член, отвечающий за приток (отток) энергии в процессе химического реагирования, излучения или каких-либо других процессах.

Энтальпия среды вычисляется как

$$h(T)=\int_{T_0}^{T} C_p(T)\,dT. \tag{4}$$

Удельная теплоемкость компонент задается в виде полинома 4-й степени от температуры:

$$C_p(T)=Z_2+\sum_{m=2}^{5} Z_{m+1}T^{m-1}.$$

Температура среды T в каждой точке рассчитывается из уравнения (4) по вычисленному из уравнения (3) значению энтальпии h.

В качестве граничных условий на стенках каналов для компонент вектора скорости во всех случаях использовались условия прилипания.

Детальное описание численного алгоритма программы SigmaFlow приведено в работах [Rudyak, 2008; А. А. Гаврилов, 2010; А. А. Гаврилов, 2010]. Здесь же отметим основные моменты численной методики. Разностный аналог конвективно-диффузионных уравнений находится с помощью метода конечного объема [Патанкар, 1984; Быстров, 2005; Ferziger, 2002] для неструктурированных сеток. В этом случае полученная схема автоматически оказывается консервативной. Суть метода заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно-разностных соотношений. Аппроксимация конвективных членов уравнений переноса осуществляется соответственно с помощью противопоточных схем второго порядка QUICK [Leonard, 1979]. Для аппроксимации нестационарных слагаемых уравнений гидродинамики применяется неявная схема второго порядка. Диффузионные потоки и источниковые члены аппроксимируются конечно-объемными аналогами центрально-разностных соотношений со вторым порядком точности. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализуется при помощи SIMPLE-C процедуры на совмещенных сетках [Патанкар, 1984; Быстров, 2005]. Для устранения осцилляций поля давления используется подход Рхи–Чоу, заключающийся во введении монотонизатора в уравнения для поправки давления [Рхи, 1984]. Полученные в результате дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений разностные уравнения решаются итерационным способом с применением алгебраического многосеточного решателя AMG [Trottenberg, 2001].

Разработанный алгоритм применялся при решении широкого круга задач внешнего и внутреннего обтекания [Rudyak, 2008; А. А. Гаврилов, 2010; А. А. Гаврилов, 2010]. Вместе с тем его применимость для описания микротечений требовала специального тестирования.

Моделирование изотермических течений в микроканалах

Было рассмотрено установившееся ламинарное течение жидкости в микроканале круглого и треугольного сечения. На рис. 1 представлены расчётные сетки для моделируемых микроканалов и распределение модуля скорости в поперечном сечении канала. Длина каждого из них — 1 000 мкм, число Рейнольдса равно единице. Расчетные сетки: для круглого микроканала 10 × 10 × 10 узлов и 40 × 40 × 10 узлов, диаметр канала был равен 100 мкм; для треугольного микроканала 20 × 20 × 10 узлов и 100 × 100 × 10 узлов, длина стороны — 100 мкм. Задачи о установившемся ламинарном течении жидкости в прямолинейных трубах имеют аналитические решения, которые описаны в литературе [Лойцянский, 1987]. Согласно аналитике, связь расхода жидкости G с перепадом давления Δp на участке трубы длины l определяется следующим образом: $G = \dfrac{a^4\sqrt{3}}{320}\dfrac{\Delta p}{\mu l}$ — для трубы треугольного сечения с длиной стороны равной a; $G = \dfrac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l}$ — для трубы круглого сечения радиуса r.

Установившееся распределение скорости в трубе:

$$w(x,y) = \frac{\Delta p \cdot y}{2\sqrt{3}\mu a l}\cdot\left(y - \sqrt{3}x - \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)\cdot\left(y + \sqrt{3}x - \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)$$ – для трубы треугольного сечения;

$$w(x,y) = \frac{r^2 \Delta p}{4\mu l}\left(1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2}\right)$$ – для трубы круглого сечения.

Эти решения были сопоставлены с численными расчётами, и получено хорошее согласование по величине перепадов давления, представленных в таблице 1, и по форме профилей скорости, проведённых через центральное сечение канала, представленных на рис. 2.

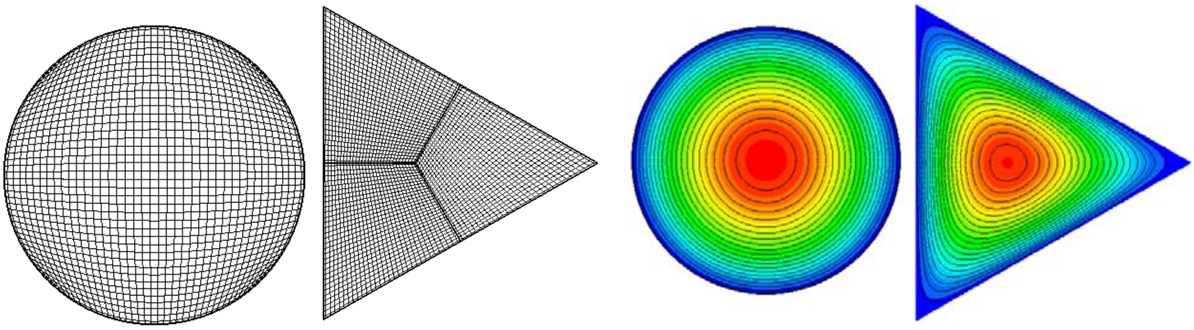

Рис. 1

Таблица 1

Re	$\Delta p_{аналит}$, Па	$\Delta p_{расчёт}$, Па	$\varepsilon = \lvert\Delta p_{аналит} - \Delta p_{расчёт}\rvert / \Delta p_{аналит}$,%
Круглый микроканал			
1	3.2	3.199	0.018
10	32	31.995	0.017
100	320	319.994	0.018
1000	3200	3199.559	0.014
Треугольный микроканал			
1	8	7.997	0.036
10	80	79.968	0.039
100	800	799.68	0.04
1000	8000	7996.777	0.04

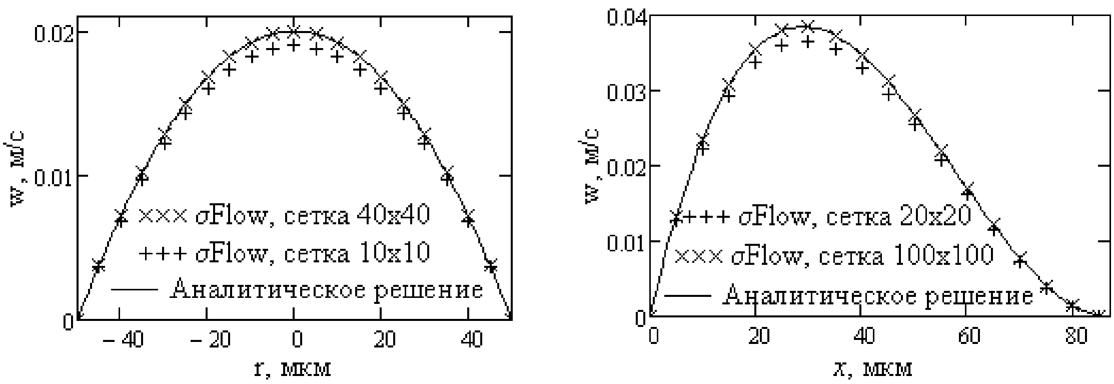

Рис. 2

Как видно из таблицы и графиков, отклонение численного решения от аналитического не превышает десятых долей процента.

Также рассмотрено ламинарное течение ньютоновской жидкости в микродиффузоре, микрофотография которого приведена на рис. 3. Ширина узкой части канала — 150 мкм, ширина широкой части — 750 мкм, толщина канала — 100 мкм. Жидкость движется из узкой части канала в широкую часть. На твердых стенках заданы условия прилипания. На входе фиксирован расход жидкости, соответствующий значению числа Рейнольдса, равному 1.

На рис. 3, так же, в виде изолиний модуля скорости и давления, приведена качественная картина течения в диффузоре.

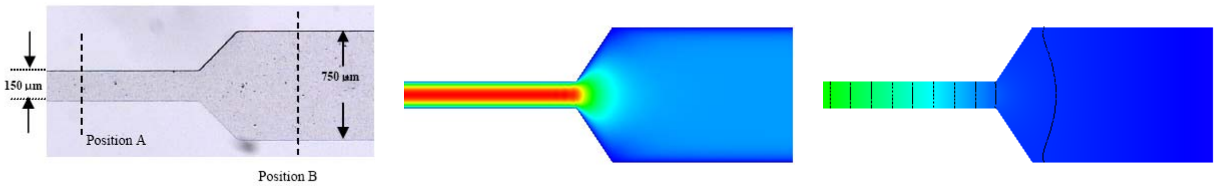

Рис. 3

На рис. 4 приведено количественное сопоставление расчета с данными MicroPIV измерений из работы [Ferziger, 2002]. Сопоставление проведено по профилю осевой компоненты скорости в сечении B на рис. 3. Обезразмеривание проведено на величину максимальной в этом сечении скорости.

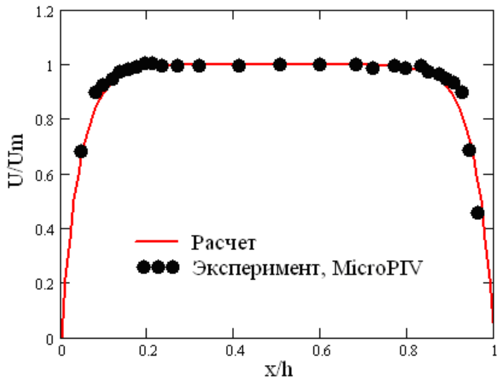

Рис. 4

Кроме того, было рассмотрено ламинарное течение ньютоновской жидкости в микротройнике, микрофотография которого приведена на рис. 5. Ширина канала всюду равна – 100 мкм, толщина канала также равна – 100 мкм. Жидкость движется по каналу слева направо, так, как это показано на рис. 5. На твердых стенках заданы условия прилипания. На входе в тройник фиксирован расход жидкости, соответствующий значению числа Рейнольдса, равному 1. Также, на рисунке 5 в виде изолинии модуля скорости и давления приведена качественная картина течения в тройнике.

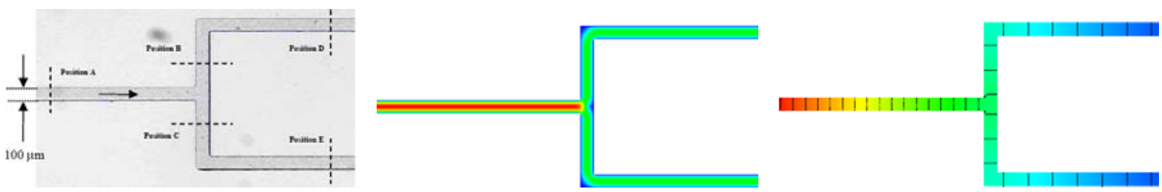

Рис. 5

На рис. 6 приведено количественное сопоставление расчета с данными MicroPIV измерений из работы [Ferziger, 2002]. Сопоставление проведено по профилям осевой компоненты скорости в сечениях A и B на рис. 5. Обезразмеривание проведено на величину среднерасходной скорости.

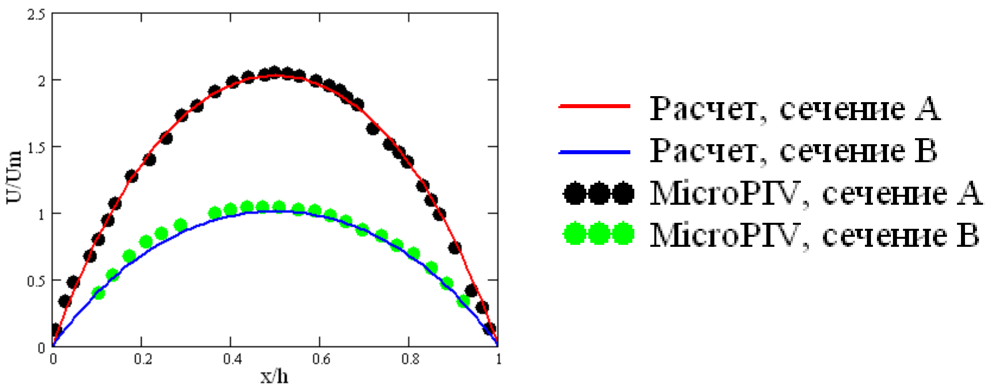

Рис. 6

Моделирование теплообменных процессов в микроканалах

С помощью пакета σFlow было проведено моделирование процесса теплообмена в прямом канале круглого сечения. Канал представляет собой круглую трубу длиной $l = 2000$ мкм и диаметром $d = 100$ мкм. Теплофизические свойства среды представлены в таблице 2.

Таблица 2

Молекулярная вязкость, μ	0.001 Па·сек
Коэффициент теплопроводности, λ	1.4 Вт/(м·К)
Теплоёмкость, C_p	4200 Дж/(кг·К)
Плотность, ρ	1000 кг/м3
Число Прандтля, Pr	3
Массовый расход, G	0.7854 мг/с
Среднемассовая скорость, v	0.1 м/с

В первом граничном случае на стенках канала задавалась постоянная температура $T_с = 293$ К. Площадь боковой поверхности канала равна 0.3141 мм^2. Температура среды на входе в канал $T_ж = 283$ К. Также на входе в канал задавался параболический профиль скорости. Расчёт производился на трёхмерной пятиблочной сетке со сгущением к стенкам канала, каждый блок которой содержал 30 × 30 ×1 50 ячеек, всего 675 000 ячеек. Количественной характеристикой, которая вычислялась в результате расчёта, было локальное число Нуссельта на стенке. Число Нуссельта вычислялось при помощи температуры ядра потока [Цветков, 2005]:

$$T_b(x) = T_ж + \frac{P}{G \cdot c_p} \cdot \int_0^x q_с(x)dx = T_ж + \frac{4}{\mathrm{Re} \cdot \mu \cdot c_p} \cdot \int_0^x q_с(x)dx\,,$$

где P — периметр поперечного сечения, $q_с$ — плотность теплового потока на стенке,
и коэффициента теплоотдачи на стенке [Цветков, 2005]:

$$\mathrm{Nu}(x) = \frac{d \cdot q_с(x)}{\lambda \cdot (T_с - T_b(x))}\,.$$

На рис. 7 показано распределение профиля температуры по длине канала. На рис. 8 показано изменение числа Нуссельта по длине канала. Как видно из этого рисунка, местное число

Нуссельта асимптотически стремится к интегральному значению, которое для ламинарного режима и постоянной температуре стенки является константой, равной 3.66.

Эмпирическая зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса (Re):

$$\mathrm{Nu}(\mathrm{Re}) = 1{,}55 \cdot \left(\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}\frac{d}{l}\right)^{\frac{1}{3}},$$

в данной постановке справедливая для $\mathrm{Re} \geq 250$.

На рис. 9 показана зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

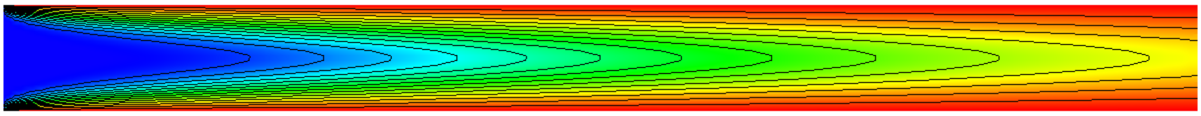

Рис. 7

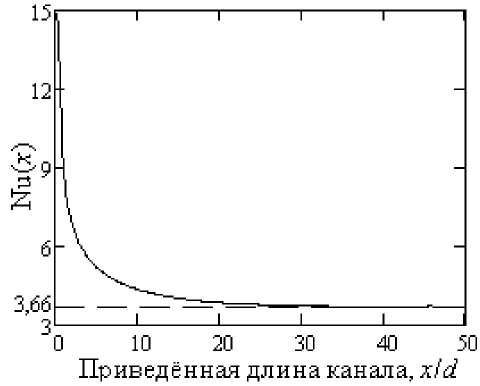

Рис. 8

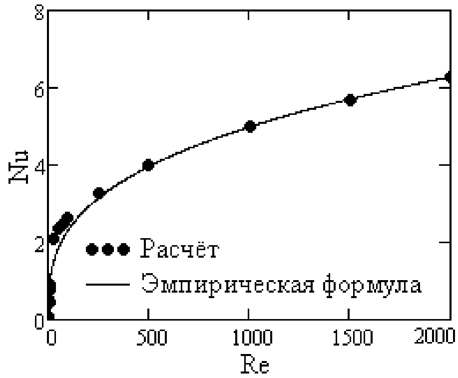

Рис. 9

Во втором граничном случае на стенках канала задавалась постоянная плотность теплового потока, равная 10 МВт/м^2. Количественной характеристикой, которая вычислялась в результате расчёта, также было локальное число Нуссельта на стенке.

Для данного случая температура ядра потока вычисляется следующим образом [Цветков, 2005]:

$$T_b(x) = T_{\text{ж}} + \frac{q_{\text{с}} \cdot P \cdot x}{G \cdot c_p} = T_{\text{ж}} + \frac{4 \cdot q_{\text{с}} \cdot x}{\mathrm{Re} \cdot \mu \cdot c_p},$$

а коэффициент теплоотдачи на стенке:

$$\mathrm{Nu}(x) = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{q_{\text{с}}}{T_{\text{с}}(x) - T_b(x)}.$$

На рис. 10 показано распределение профиля температуры по длине канала.

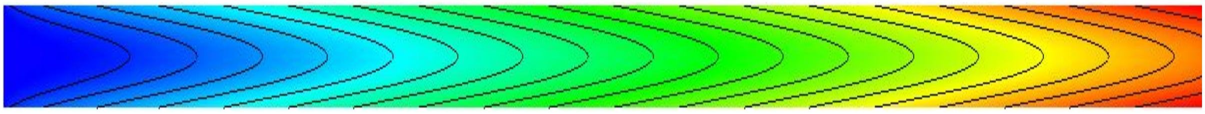

Рис. 10

При постоянной плотности теплового потока на стенке круглого канала среднемассовая температура жидкости линейно изменяется по длине трубы [Цветков, 2005]:

$$\overline{\Theta} = \frac{\left(\overline{T} - T_{\text{ж}}\right)\lambda}{q_{\text{с}} \cdot d} = \frac{4}{\mathrm{Pe}} \cdot \frac{x}{d},$$

где $\bar{\Theta}$ — безразмерная среднемассовая температура жидкости, $\bar{T}$ — среднемассовая температура жидкости, Pe — число Пекле.

На начальном термическом участке $0 \le x \le l_{\text{н.т.}}$ ($l_{\text{н.т.}} = 0.07 \cdot d \cdot \mathrm{Pe}$) местное значение коэффициента теплоотдачи падает с ростом *x*. Результаты теоретического расчёта на этом участке приближённо описываются уравнением [Цветков, 2005]:

$$\mathrm{Nu} = 1.31 \cdot \left(\frac{1}{\mathrm{Pe}} \cdot \frac{x}{d} \right)^{-\frac{1}{3}}.$$

Сопоставление результатов расчёта с аналитическим решением, полученным по данной формуле, показано на рис. 11.

Выражение для числа Нуссельта, справедливое для всего участка теплообмена [Цветков, 2008]:

$$\mathrm{Nu} = 4.36 + 1.31 \left(\frac{1}{\mathrm{Pe}} \cdot \frac{x}{d} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{\left(-13 \sqrt{\frac{1}{\mathrm{Pe}} \cdot \frac{x}{d}} \right)}.$$

На рис. 12 представлена зависимость местного числа Нуссельта от числа Рейнольдса и сопоставление результатов расчёта с аналитическим решением, полученным по данной формуле. Как видно из этого рисунка, местное число Нуссельта асимптотически стремится к интегральному значению, которое для ламинарного режима и постоянной плотности теплового потока на стенке является константой, равной 4.364.

Рис. 11

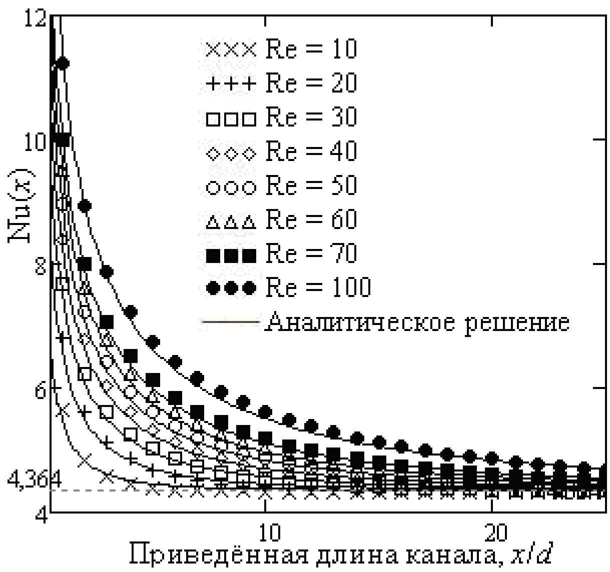

Рис. 12

Таким образом, анализ сопоставления результатов численного моделирования с аналитическими решениями показал хорошее согласование данных как качественно, так и количественно.

Также было проведено моделирование теплообмена в Т-образном микроканале. Геометрия канала показана на рис. 13: ширина канала — 0.5 мм, высота — 1 мм, длина канала смешения – 3 мм, длина входных каналов — 1.25 мм. Рабочей жидкостью являлась вода. Во входных каналах задавался постоянный массовый расход в 1.5 г/ч. Температура жидкости на одном входе была равна 27 °С, на другом — 55 °С.

Для корректного описания процессов теплообмена в прямоугольном Т-образном микромиксере тепловое смешение делится на зону Т-образного соединения (a-b-c-d) и канал смешения, как это показано на рис. 13. В зоне Т-образного соединения горячая и холодная деионизованная вода течёт соосно по двум входным рукавам. Тепловое перемешивание начинается при их контакте. Число Рейнольсда меньше единицы, поток ламинарный. В процессе теплового перемешивания в канале смешения преобладает теплопроводность. Для расчета использовалась декартова двухблочная сетка, состоящая из 245 000 узлов и сгущенная к области слияния потоков.

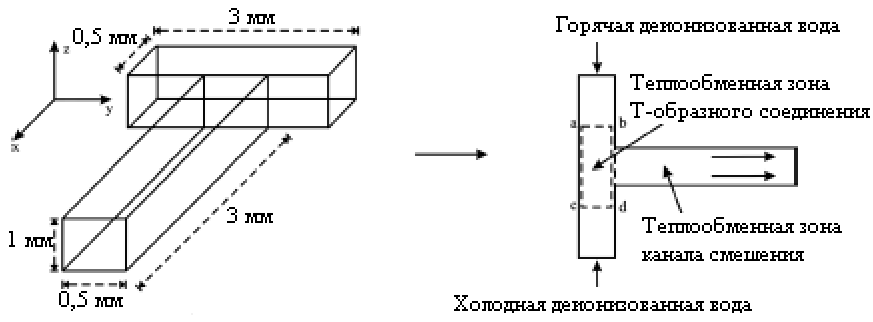

Рис. 13

Результаты численного моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными [Xu, 2010]. На рис. 14 показано качественное сравнение расчётного и экспериментального профиля температуры в центральном сечении Т-образного канала. На рис. 15 показано распределение температуры жидкости в сечении, перпендикулярном каналу смешения, на расстояниях от входа в этот канал, равных 0 мкм, 25 мкм, 50 мкм и 75 мкм соответственно, и приведены экспериментальные значения температур для этих сечений. Осью абсцисс на этих рисунках является безразмерная координата y* — приведённая ширина канала (y* = y/W, где W — полуширина канала, равная 0.25 мм).

Как видно из графиков, численное моделирование качественно и количественно описывает результаты эксперимента.

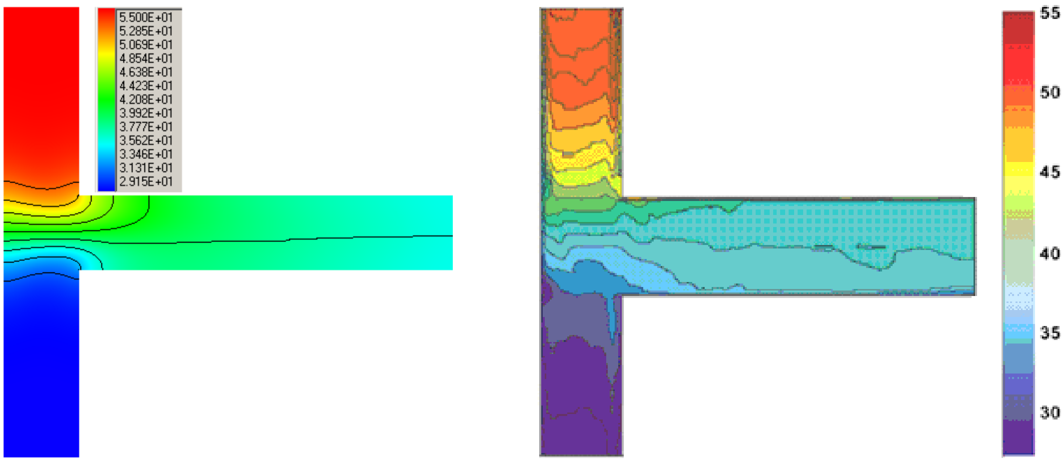

Рис. 14

Заключение

На основе универсального программного комплекса SigmaFlow разработана численная методика моделирования гидродинамики и теплообмена в микроканалах. Математическая модель построена на гидродинамическом описании микротечений и теплообмена, основанном на численном решении уравнений Навье–Стокса и переноса энергии в пространственной

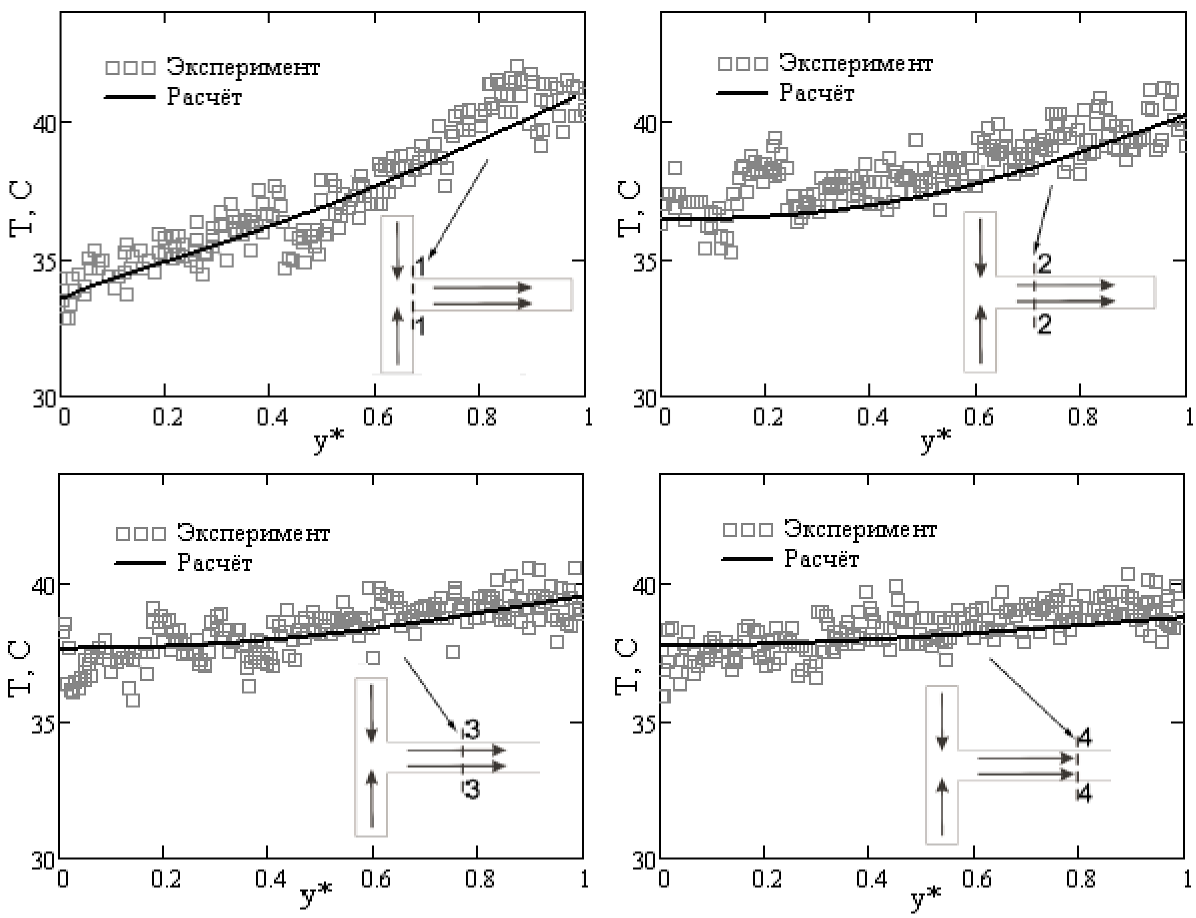

Рис. 15

и нестационарной постановке. Многочисленные вычислительные эксперименты, проведенные в рамках данной работы, подтвердили справедливость такого подхода для жидкостей с граничными условия прилипания на стенках для размеров каналов порядка 10 мкм, а с граничными условиями скольжениями для еще более мелких каналов. Тестирование и адаптация математической модели и численного алгоритма проведены на имеющихся экспериментальных данных по течениям и теплообмену в микроканалах. В целом по результатам проведенного тестирования получено хорошее согласование с имеющимися экспериментальными данными как по локальным характеристикам течения (формы профиля скорости и температуры, полученные micro-PIV и LIF измерениями), так и по интегральным параметрам (коэффициенты сопротивления и теплоотдачи) в широких диапазонах чисел Рейнольдса и размеров микроканалов. Для большинства рассмотренных задач расхождение с экспериментом составило порядка нескольких процентов. Данное обстоятельство еще раз подтверждает тот факт, что для жидкостей, вплоть до каналов микронного размера, гидродинамика и теплообмен описываются классическими соотношениями механики сплошных сред.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (№ 12-08-33061) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (№№ 16.740.11.0642, 14.A18.21.0344, 14.132.21.1750 и 8756).

Список литературы

Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб — СПб.: Судостроение, 2005. — 392 с.

Гаврилов А. А., Минаков А. В., Дектерев А. А., Рудяк В. Я. Численный алгоритм для моделирования ламинарных течений в кольцевом канале с эксцентриситетом. Сиб. журн. индустр. матем. 2010. — Том. 13:4. — С. 3–14.

Гаврилов А. А., Минаков А. В., Дектерев А. А., Рудяк В. Я. Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом // Вычислительные технологии, 2012. — Т. 17, № 1. — С. 44–56.

Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 840 с.

Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

Рхи С. М. Численный расчет турбулентного обтекания профиля с отрывом у задней кромки. Пер. с англ. / С. М. Рхи, У. Л. Чоу // Аэрокосмическая техника, 1984. — Т. 2, № 7. — С. 33–43.

Цветков Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену. уч. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 196 с.

Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — 550 С.

Ferziger J.H. and Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Springer Verlag, Berlin, 2002. — P. 423.

Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. — Berlin, Germany, 2002.

Karnidakis G., Beskok A., Aluru N. Microflows and nanoflows. Interdisciplinary Applied Mathemathics, Vol. 29, Springer Science+Business Media, Inc., 2005. — 817 p.

Leonard B. P. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // Comp. Math. Appl. Mech. Eng. Vol. 19 — 1979. — P. 59–98.

Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A.A. On Optimization of Mixing Process of Liquids in Microchannels // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. — 2010. — 3(2). — C. 146–156.

Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. Application of new numerical algorithm of solving the Navier–Stokes equations for modeling the work of a viscometer of the physical pendulum type // Thermophysics & Aeromechanics.Vol. 15. — 2008. — P. 333–345.

Trottenberg U., Cornelis W. Oosterlee, Anton Schüller. Multigrid, Academic Press, 2001. — P. 631.

Xu, Bin. Thermal mixing of two miscible fluids in a T-shaped microchannel / Bin Xu, Teck Neng Wong, Nam-Trung Nguyen, Zhizhao Che, John Chee Kiong Chai // Biomicrofluidics 4, 044102 (2010).