

Досліджено вплив системи вставок різної геометрії на теплові потоки із зовнішнього твердого середовища в теплоносій, поміщений усередині двовимірною криволінійного мікроканалу при малих числах Рейнольдса. Встановлено вплив геометрії вставок та їх розміщення в каналі на структуру течії, що розвивається в каналі і на загальний тепловий потік через обмежуючі поверхні. Показано, що система вставок в криволінійному каналі дозволяє збільшити рівень теплових потоків на 60 % по відношенню до каналу без вставок для заданої швидкості течії теплоносія в каналі

Ключові слова: конвективно-дифузійна теплопередача, чисельне рішення, в'язка рідина, мікроканал зі вставками

Исследовано влияние системы вставок различной геометрии на тепловые потоки из внешней твердой среды в теплоноситель, помещенный внутри двумерного криволинейного микроканала при малых числах Рейнольдса. Установлено влияние геометрии вставок и их размещение в канале на структуру течения, развиваемого в канале, и на общий тепловой поток через ограничивающие поверхности. Показано, что система вставок в криволинейном канале позволяет увеличить уровень тепловых потоков на 60 % по отношению к каналу без вставок для заданной скорости течения теплоносителя в канале

Ключевые слова: конвективно-диффузионная теплопередача, численное решение, вязкая жидкость, микроканал со вставками

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ МИКРОКАНАЛАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

А. А. Гуржий

Доктор физико-математических наук, профессор*

E-mail: a.gourjii@gmail.com

А. В. Шалденко

Аспирант*

E-mail: o.shaldenko@gmail.com

*Кафедра автоматизации проектирования энергетических процессов и систем

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

Стремительный рост требований к вычислительной технике сегодня стимулирует разработку новых процессоров с большими функциональными возможностями, увеличенным быстродействием и разрядностью. Любое усложнение процессоров связано с увеличением элементной базы, формируемой на кристалле микросхемы. При этом возникает проблема надежного и управляемого отвода выделяемого тепла с процессора или с отдельных его частей во внешнюю среду.

Исследования [1] показывают, что воздушный принудительный теплоотвод с поверхности процессоров, которые сегодня применяются в вычислительной технике, фактически выходит на свои предельные возможности. Одним из технических решений проблемы устойчивого и контролируемого теплоотвода является создание в кристалле процессора системы каналов с жидким теплоносителем, который за счет диффузионного и конвективного потоков внутри канала может выводить тепло с кристалла процессора во внешнюю среду с достаточно высокими значениями удельного теплового потока.

Системы микроканалов широко применяются при создании химических чипов (химических микрореакторов [2, 3]), которые позволяют на электронном уровне контролировать, управлять динамически неустойчи-

вые химические реакции. При этом возникает возможность синтеза новых материалов с улучшенными физическими свойствами [4, 5]. Большинство таких реакций необходимо проводить в узком температурном диапазоне. Поэтому проблема улучшенного отвода теплоты с кристаллов процессоров различного назначения представляет сегодня актуальную прикладную задачу.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблеме контролируемого охлаждения (нагревания) элементов микроэлектроники сегодня посвящено много исследований [1, 6]. Анализ физических процессов в микроканалах показывает, что в рассматриваемой системе имеет место два наиболее важных механизма теплопередачи: молекулярная диффузия, вызванная передачей тепла за счет броуновского движения, и конвективный перенос, вызванный передачей тепла за счет движения теплоносителя в канале. Если первый механизм, в основном, определяется тепловыми свойствами материала подложки, теплоносителя и поверхностью контакта [7], то второй механизм управляется структурой течения в микроканале, который развивается при малых числах Рейнольдса Re .

Одной из перспективных технологий контролируемого и управляемого отвода тепла является формирование на кремниевой подложке системы микроканалов [3], по которым протекает теплоноситель. Для изготовления системы микроканалов различной конфигурации сегодня применяют технологию склеивания слоев кремния [8], травления и наращивания подложки [9] и др.

Открытие явления детерминированного хаоса [10, 11] позволило многим исследователям посмотреть на проблему переноса скалярных полей в жидкостях с новых концептуальных позиций. Было показано, что ламинарные потоки могут обладать динамической неустойчивостью. При этом в жидкости возникают интенсивные процессы переноса массы [11, 12], энергии [13]. Однако не все ламинарные потоки обладают таким свойством и не во всей области течения такие эффекты имеют место. Исследования [14, 15] показали, что интенсивные процессы переноса чаще всего возникают в областях течения, в которых формируются локализованные вихревые структуры. Такие течения характеризуется наличием поперечной составляющей поля скорости по отношению к оси микроканала. Ненулевая поперечная компонента скорости может привести к потере устойчивости ламинарного течения и, как результат, процессы переноса скалярных полей в жидкости могут существенно возрасти [16].

Другими словами, формирование поперечного потока в микроканале открывает дополнительные возможности выравнивания профиля поля температур в теплоносителе и, как результат, к повышению значения градиента температур в областях, прилегающих к границам канала [17]. С технической точки зрения образование когерентных вихревых структур в микроканалах можно получить за счет:

- формирования на одной (или нескольких) поверхностях канала системы упорядоченных канавок, направленных под углом к оси канала [18];
- введения в канал системы препятствий различной геометрии [19];
- изготовления криволинейных (зигзагообразных) профилей каналов [20];
- другие решения.

Изменение геометрии канала или введение системы препятствий в потоке приводит к необходимости дальнейшего увеличения разности давлений, прикладываемых к входу и выходу микроканала. При этом остается невыясненным вопрос о целесообразности изменения геометрии микроканалов в современных микропроцессорах: покрывает ли увеличение приложенного градиента давления увеличение теплопередачи из кремниевого кристалла в теплоноситель?

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является определение влияния системы вставок внутри криволинейного микроканала, заполненного вязкой однородной несжимаемой жидкостью, на величину теплового потока из внешней твердой среды в жидкость. Необходимо выяснить влияние образования локализованных вихревых структур в течении за препятствиями внутри микроканала при малых числах Рейнольдса Re на уровни тепловых потоков через ограничивающие поверхности.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- сформировать двумерную численную модель конвективно-диффузионных процессов в канале, заполненном однородной вязкой несжимаемой жидкостью;
- провести тестирование модели для случая прямолинейного канала без вставок;
- выявить основные закономерности процессов теплопередачи в зигзагообразных микроканалах с системой внутренних вставок для диапазона скоростей теплоносителя, который применяется при охлаждении кристаллов процессоров.

4. Методика проведения численного эксперимента

4. 1. Численная модель

Рассмотрим процессы теплопередачи внутри двухмерного криволинейного канала с внутренними вставками (рис. 1), заполненного однородной, вязкой, несжимаемой жидкостью с плотностью ρ , коэффициентом температуропроводности α_F , коэффициентом теплопроводности γ_F и коэффициентом кинематической вязкости ν . Пусть стенки канала выполнены из твердого материала с коэффициентом температуропроводности α_S , коэффициентом теплопроводности γ_S . Далее индексы “S” и “F” будут относиться к твердой и жидкой средам, соответственно. Необходимо определить уровень тепловых потоков из внешней среды в жидкий теплоноситель для каналов с различной геометрией вставок (рис. 1). Течение развивается по направлению стрелок.

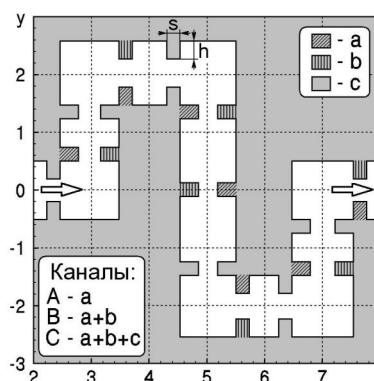


Рис. 1. Геометрия каналов с различной системой вставок

Пронормируем задачу на U_0 – характерная скорость жидкости на входе канала, D – ширина входного отверстия, $\Delta T = T_1 - T_0$ – разность температур теплоносителя на входе канала T_0 и температуры T_1 подложки на удалении ($y = \pm H$) от срединной линии канала.

Процессы движения жидкости и переноса тепла внутри канала описываются уравнением Навье-Стокса, уравнением неразрывности и уравнением конвективно-диффузионной теплопередачи, которые в прямоугольной системе координат имеют следующую консервативную форму в безразмерном виде [17, 21]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial UQ}{\partial x} + \frac{\partial VQ}{\partial y} = \frac{1}{Pe} \left\{ \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right\}, \quad (4)$$

где $U(x,y,t)$, $V(x,y,t)$ – проекции поля скорости, $p(x,y,t)$ – поле давления, $Q(x,y,t)$ – поле температур, $Re=U_0L/\nu$ – число Рейнольдса, $Pe=PrRe=U_0L/\alpha$ – число Пекле, а $Pr=\nu/\alpha$ – число Прандтля. Для твердой среды второе и третье слагаемые в левой части уравнения (4) опускаются.

В дальнейшем, для проведения анализа структуры течения внутри канала удобно ввести функцию тока $\Psi(x,y,t)$, которая связана с распределением поля скорости выражениями [21]:

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}. \quad (5)$$

В этом случае линии равного уровня ($\Psi=const$) представляют собой кривые, в каждой точке которой касательная и вектор поля скорости течения совпадают. Для стационарных течений линии равного уровня совпадают с траекториями жидких частиц [22].

Дифференцирование уравнения (1) по координате x , уравнения (2) по координате y и последующее сложение полученных выражений с учетом (3) позволяет получить уравнение Пуассона для давления [23]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = - \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \right\}. \quad (6)$$

Начальными условиями задачи являются распределения полей, соответствующих покоящейся, холодной жидкости, $U(x,y,0)=V(x,y,0)=0$, $Q(x,y,0)=0$, внутри канала. Полагаем, что вся подложка имеет $Q(x,y,0)=1$. Начальное распределение поля давления получается после решения уравнения (6) для заданных значений давления на входе $p(0,y,0)=p_1$ и выходе $p(D,y,0)=0$ канала, при $0,5 < y < 0,5$.

Граничными условиями для поля скорости являются условие прилипания ($U(x,y,t)=V(x,y,t)=0$) на твердых поверхностях канала и параболический профиль скорости на входе и выходе канала [22]:

$$\begin{aligned} U(0,y,t) = U(D,y,t) = U_0(1-y^2), \\ V(0,y,t) = V(D,y,t) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Граничными условиями для поля давления на ограничивающих поверхностях канала являются граничные условия второго рода: производная по нормали к поверхности $\partial p / \partial n = 0$. Граничными условиями для поля температур являются отсутствие теплового потока $\partial Q / \partial n = 0$ на границах расчетной области и равенство температур и тепловых потоков на границе канала [24]:

$$Q_F(x,y,t) = Q_S(x,y,t), \quad \frac{\partial Q_F}{\partial n} = \gamma \frac{\partial Q_S}{\partial n}, \quad (8)$$

где $\gamma = \gamma_s / \gamma_f$ – отношение коэффициентов теплопроводности материала подложки и жидкого теплоносителя.

Рассматриваемая задача решалась численно на расчетной области ($0 \leq x \leq 10$, $-10 \leq y \leq 10$) равномерной сеткой $\delta_x = \delta_y = \delta = 0.05$.

Введем обозначение индексов узлов расчетной сетки:

$$U(x,y,t) = U(i\delta, j\delta, \Delta t) = U_{i,j}^n,$$

$$V(x,y,t) = V(i\delta, j\delta, \Delta t) = V_{i,j}^n,$$

$$Q(x,y,t) = Q(i\delta, j\delta, \Delta t) = Q_{i,j}^n,$$

$$p(x,y,t) = p(i\delta, j\delta, \Delta t) = p_{i,j}^n, \quad (9)$$

Для решений уравнений параболического типа (1), (2) и (4) применялся простой явный метод второго порядка точности по пространственным переменным и первого порядка точности по временной переменной с разностями против потока [22, 25]. Введение обозначения

$$F_{i,j}^n = \{U_{i,j}^n, V_{i,j}^n, Q_{i,j}^n\}, \quad Ze = \{Re, Re, Pe\} \quad (10)$$

позволяет записать вычислительную схему в общем виде:

$$\begin{aligned} F_{i,j}^{n+1} = -\beta^* \left([UF]_{i,j}^n + [VF]_{i,j}^n \right) + (1-4\beta) F_{i,j}^n + \\ + \beta \left(F_{i+1,j}^n + F_{i-1,j}^n + F_{i,j+1}^n + F_{i,j-1}^n \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\beta = \frac{\Delta}{Ze\delta^2}$, $\beta^* = \frac{\Delta}{\delta}$,

$$[UF]_{i,j}^n = \begin{cases} (UF)_{i,j}^n - (UF)_{i-1,j}^n & \text{при } U_{i,j}^n \geq 0, \\ (UF)_{i+1,j}^n - (UF)_{i,j}^n & \text{при } U_{i,j}^n < 0, \end{cases}$$

$$[VF]_{i,j}^n = \begin{cases} (VF)_{i,j}^n - (VF)_{i,j-1}^n & \text{при } V_{i,j}^n \geq 0, \\ (VF)_{i,j+1}^n - (VF)_{i,j}^n & \text{при } V_{i,j}^n < 0. \end{cases}$$

Для решения уравнения эллиптического типа (6) использовался метод последовательной верхней релаксации [23]:

$$p_{i,j}^{(k+1)} = p_{i,j}^{(k)} (1-\lambda) + \frac{\lambda}{4} \left\{ p_{i+1,j}^{(k)} + p_{i-1,j}^{(k)} + p_{i,j+1}^{(k)} + p_{i,j-1}^{(k)} - S_{i,j} \right\}, \quad (12)$$

где

$$S_{i,j} = \frac{1}{4} \times \left\{ (U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n)^2 + (V_{i,j+1}^n - V_{i,j-1}^n)^2 + (U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n)(V_{i+1,j}^n - V_{i-1,j}^n) \right\}.$$

В приведенном выражении индекс k означает номер итерации на текущем временном слое. Итерации проводятся до момента, при котором $|p_{i,j}^{(k+1)} - p_{i,j}^{(k)}| < \epsilon$, где ϵ – заданная точность решения уравнения на системе контрольных точек.

4. 2. Тестирование модели

Тестирование численной модели проводилось на гидродинамической задаче о стационарном течении вязкой несжимаемой жидкости внутри прямолинейного канала длиной $L=18D$ при числах Рейнольдса $Re < 650$. Сравнение численных данных профилей продольных скоростей (рис. 2) с данными [26] свидетельствуют о том, что в указанном диапазоне значений Re численная схема находит решение с ошибкой, не превышающей 0,8 %.

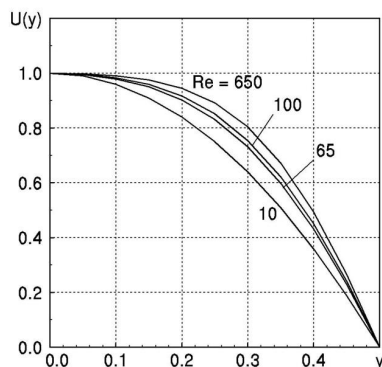


Рис. 2. Профиль продольной скорости в прямолинейном канале при разных числах Рейнольдса Re

Задача теплопроводности тестировалась на одномерной нестационарной задаче передачи тепла от стенки с температурой $Q(L,t)=1$ к стенке с температурой $Q(0.5,t)=0$ при $0.5 \leq x \leq 10$, $t < 5$. Сравнение численных результатов (рис. 3) на равномерной сетке, $\delta=0.05$, с аналитическим решением задачи [24] показывает, что численное решение найдено с максимальной ошибкой 0.2 %.

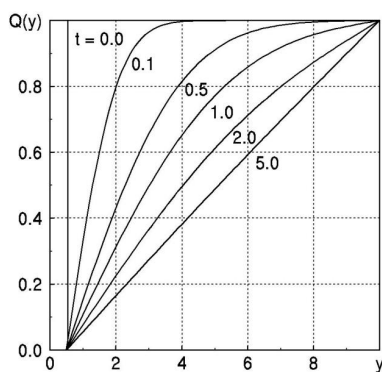


Рис. 3. Профили поля температур в тестовой задаче для различных моментов времени

Таким образом, простая явная схема для численного решения параболических уравнений и метод последовательной верхней релаксации для решения эллиптического уравнения в двумерной задаче конвективно-диффузионного теплопереноса внутри криволинейного канала, заполненного однородной, вязкой жидкостью, с хорошей точностью определяет распределение физических полей в области малых значений чисел Рейнольдса Re.

5. Результаты исследований процессов теплопередачи

Рассмотрим процессы конвективно-диффузионной теплопередачи в канале (рис. 1) с общей осевой длиной $L=18.0$, который заполнен однородной, вязкой, несжимаемой жидкостью (вода) с числом Прандтля $Pr=7$. Внешняя теплопроводящая среда представляет собой твердое тело (керамика) с числом Прандтля $Pr=0.33$ по отношению к вязкости жидкости и относительным коэффициентом теплопроводности $\gamma=23.5$.

При медленном движении жидкости внутри канала формируется стационарное, ламинарное течение. Характерный пример течения при $Re=25$ показан на рис. 4, а,

который содержит семейство линий тока с шагом дискретизации $\Delta\Psi = (\Psi_1 - \Psi_0) / 20$, где Ψ_1 и Ψ_0 – значения функции тока на верхней и нижней границах канала, соответственно. На рис. 4, б показано распределение поля температур с шагом дискретизации $\Delta Q = 0.01$.

Видно, что течение жидкости придерживается осевой линии канала. В этой области теплоноситель имеет минимальную температуру. Поле температур постепенно увеличивается по направлению к границам, формируя тепловой поток внутрь канала. Асимметрия поля температур хорошо заметна в правой части рисунка на сегменте канала, в котором жидкость движется сверху вниз. Жидкость сильнее нагрета около правой границы канала, здесь формируется наибольший тепловой поток из внешней среды.

С увеличением скорости течения в угловых областях канала начинают формироваться угловые вихри Моффата [27]. На рис. 5, а показано аналогичное распределение функции тока и поля температур в канале без вставок при $Re=100$. Замкнутые линии тока в угловых областях нанесены с шагом дискретизации $\Delta\Psi = (\Psi_1 - \Psi_0) / 200$. Предельные линии тока, разделяющие циркуляционные зоны течения и основной поток, показаны на рисунке штриховой линией. Поле температур показано на рис. 5, б, на котором нанесены линии равного уровня с шагом дискретизации $\Delta Q = 0.02$.

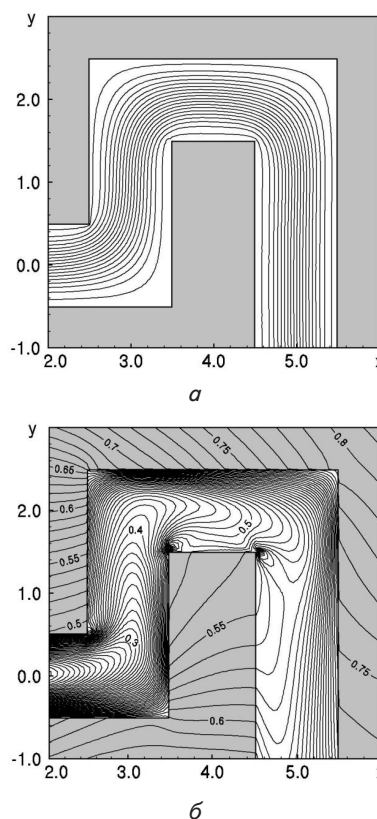


Рис. 4. Течение жидкости внутри канала без вставок в момент $t=100$ при $Re=25$: а – распределение поля функции тока; б – распределение поля температур

Для увеличения скорости течения жидкости необходимо увеличивать разность давлений на входе и выходе канала. Угловые вихри уменьшают эффективную ширину канала, что приводит к необходимости еще большего увеличения разности давлений. Иссле-

дования показывают, что угловые вихри появляются в рассматриваемом течении при числах Рейнольдса $Re > 30 \dots 40$. В этом случае теплоноситель отбирает большее количество тепла из внешней среды, поскольку граница течения имеет более низкую температуру по сравнению со случаем на рис. 4, б. Интересно отметить, что угловые вихри с течением времени нагреваются прилегающей границей, на границе раздела вихревой зоны с основным потоком формируется высокий градиент поля температур.

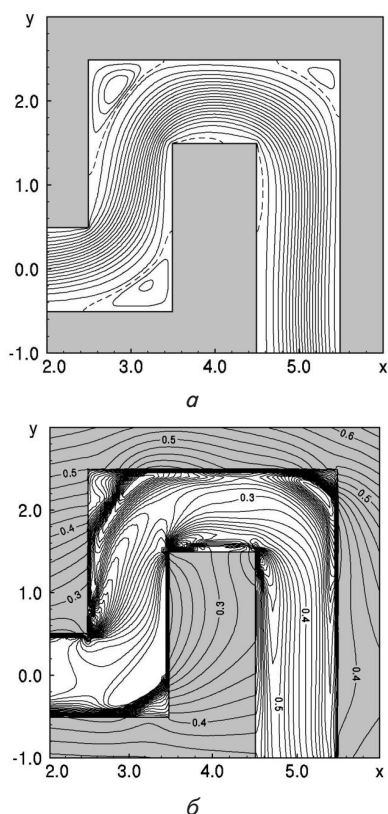


Рис. 5. Течение жидкости внутри канала без вставок в момент $t=100$ при $Re=100$: а – распределение поля функции тока; б – распределение поля температур

С появлением вставок эффективная ширина канала уменьшается (рис. 6). Для вставок высотой $h=0.2$ вихревые структуры появляются не только в угловых зонах канала, но и за препятствиями. При несимметричной системе вставок центральная часть основного потока ближе подходит к нагретым ограничивающим поверхностям. Исследования показывают, что угловые вихри с увеличением числа Рейнольдса Re постепенно теряют свою устойчивость, начинают совершать колебательные движения по отношению к вершине угла. Это приводит к обмену жидкостями между угловыми вихрями и основным потоком, увеличивая общее количество тепла, уносимое теплоносителем.

Увеличение количества вставок или их высоты приводит к увеличению размеров локализованных вихревых структур в рассматриваемом течении. На рис. 7 показано распределение поля функции тока и поля температур для канала В со вставками высотой $h=0.3$. В этом случае эффективное сечение основного потока уменьшилось, а продольная скорость течения между вставками увеличилась. Видно, что начинают формироваться угло-

вые вихри не только за вставками, но и перед ними. Квазистационарные угловые вихри с течением времени нагреваются, поэтому часть нагретой жидкости из вихревой зоны постоянно сносится потоком, формируя аналогичный поток массы холодной жидкости из основного течения в область, занятую вихрями.

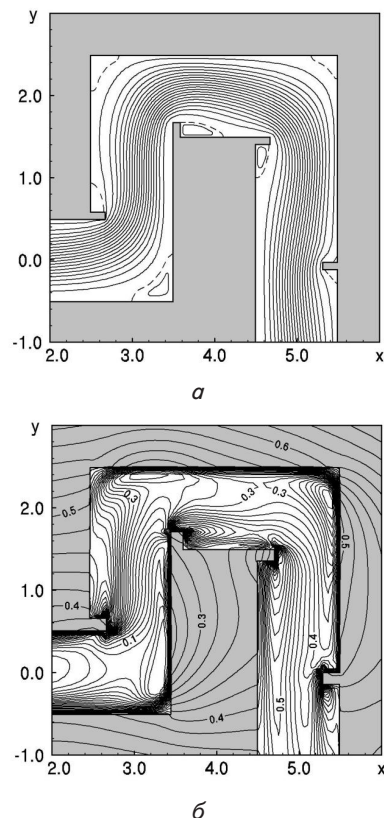


Рис. 6. Течение жидкости внутри канала А с вставками высотой $h=0.2$ в момент $t=100$ при $Re=65$: а – распределение поля функции тока; б – распределение поля температур

Дальнейшее увеличение количества вставок приводит к постепенному выравниванию поля температур внутри канала. В этом случае на границе канала формируется большой градиент поля температур, что приводит к заметному увеличению теплового потока через границы канала. На рис.8 показан характерный случай для канала С со вставками высотой $h=0.3$ при $Re=65$.

Исследования показывают, что увеличение скорости течения теплоносителя в криволинейном канале приводит к увеличению уровней тепловых потоков через ограничивающие поверхности. Для увеличения скорости теплоносителя необходимо увеличивать разность приложенных давлений к входу и выходу канала. На рис. 9 показана зависимость нормированной разности давлений от числа Рейнольдса Re , рассчитанного по максимальной скорости в центре на входе канала, для различных геометрий канала (рис. 1). На рисунке сплошной линией, соединяющей кружочки, показана зависимость для канала без вставок. Видно, что в области $Re < 40 \dots 50$ эта зависимость в первом приближении является линейной. При $Re > 40 \dots 50$ в угловых зонах канала начинают формироваться угловые вихри, поэтому разность давлений в канале возрастает быстрее для соответствующей скорости теплоносителя.

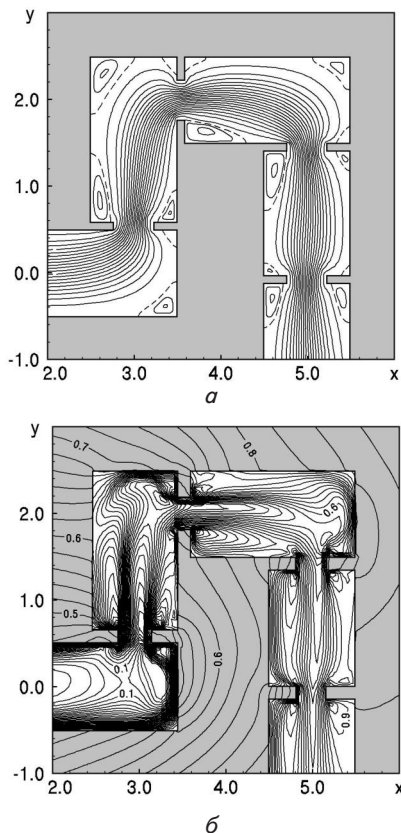


Рис. 7. Течение жидкости внутри канала В с вставками высотой $h=0.3$ в момент $t=100$ при $Re=65$: а – распределение поля функции тока; б – распределение поля температур

Анализ полученных результатов показывают, что введение вставок в канал приводит к увеличению необходимой разности давлений для заданной скорости течения. Для диапазона малых чисел Рейнольдса Re увеличение значения $\Delta p/L$ для каналов с вставками, по сравнению с соответствующими данными для каналов без вставок, оказывается прямо пропорциональным количеству вставок и их высоте. Этот эффект вызван тенденцией уменьшения эффективного сечения канала по мере увеличения скорости течения. Исследования показали, что с увеличением скорости потока, эта разница в приложенных давлениях в каналах со вставками и в канале без вставок постепенно уменьшается.

На рис. 10 показана зависимость усредненного по поверхностям канала теплового потока от скорости течения теплоносителя от скорости теплоносителя с обозначениями, используемыми на рис. 9. Видно, что уровень теплового потока в канале без вставок увеличивается с увеличением числа Рейнольдса Re . Однако наклон этой зависимости постепенно уменьшается и достигает своего минимума при $Re \approx 50...80$. В дальнейшем уровень теплового потока через границы увеличивается достаточно быстро при увеличении скорости течения теплоносителя в канале. Анализ численных результатов показывает, что тепловые потоки в каналах со вставками больше тепловых потоков, формируемых в канале без вставок. Например, канал с несимметричными вставками (канал А) имеет тепловой поток на 6...15 %, а канал симметричными вставками (канал В) – на 20...50 % выше потока, развиваемого в канале без

вставок. Еще большие значения (25...60 %) достигаются в канале С. Данные на рис. 10 показывают, что увеличение высоты вставок в диапазоне $h=0.1...0.3$ позволяют увеличить тепловой поток из внешней среды примерно на 10...30 % практически во всем диапазоне чисел Рейнольдса Re .

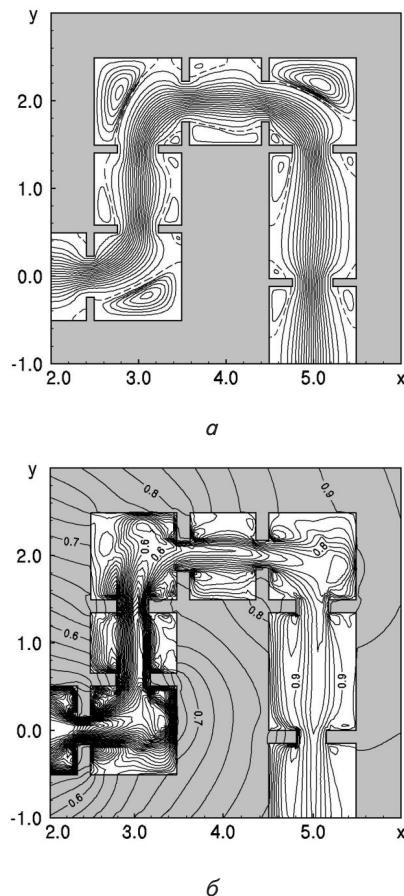


Рис. 8. Течение жидкости внутри канала С с вставками высотой $h=0.3$ в момент $t=100$ при $Re=65$: а – распределение поля функции тока; б – распределение поля температур

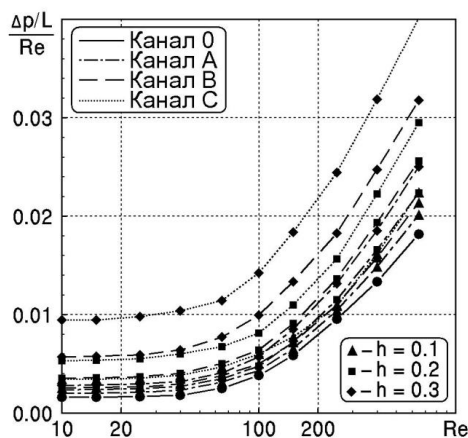


Рис. 9. Зависимость разности давлений на входе и выходе канала в зависимости от числа Рейнольдса Re для различных геометрий канала и высоты вставок

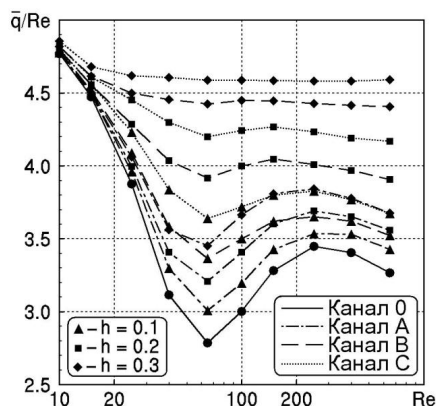


Рис. 10. Зависимость усредненного теплового потока через границы канала в зависимости от числа Рейнольдса Re для различных геометрий канала и высоты вставок

Данные на рис. 10 показывают, что увеличение высоты вставок в диапазоне $h=0.1...0.3$ позволяют увеличить тепловой поток из внешней среды примерно на 10..30 % практически во всем диапазоне чисел Рейнольдса Re.

6. Обсуждение результатов исследования процессов теплопередачи внутри криволинейных микроканалов

В работе проведено исследование процессов теплопередачи из внешней твердой среды в жидкий теплоноситель, протекающий внутри микроканала со сложной геометрией ограничивающих поверхностей при малых числах Рейнольдса. Основное внимание уделено уровню тепловых потоков, которые формируются на границе раздела течения с внешней средой. Приведенные в работе безразмерные зависимости позволяют оценить уровень тепловых потоков для зигзагообразных каналов с системой вставок различной высоты для некоторого набора их расположения внутри канала.

Исследования показали, что тепловые потоки в криволинейном канале могут быть значительно увеличены (примерно 1,5 раза по сравнению с каналом без вставок) за счет формирования локализованных, квазистационарных вихревых структур в угловых зонах канала, и в областях перед и за вставками. Появление вихрей приводит к потере устойчивости ламинарного течения, по аналогии с явлением хаотической адвекции жидкостей [10, 11] ламинарными течениями, которая сопровождается интенсивными процессами переноса скалярных полей. Взаимодействие поля скорости, наведенного вихревыми структурами, с продольной компонентой скорости внутри канала, формируют ненулевой поперечный поток поля температур, наличие которого приводит к постепенному выравниванию поля температур в поперечном сечении канала. Такое распределение поля температур приводит к формированию больших градиентов температур около ограничивающих течение твердых поверхностей и, как результат, к большим тепловым потокам из внешней среды в теплоноситель.

Энергия, необходимая для формирования локализованных вихревых структур в рассматриваемом течении, и для поддержания циркуляционного течения

в угловых зонах канала, затрачивается за счет увеличенной разности давлений на входе и выходе канала по сравнению с каналом без вставок. Другими словами, эффект увеличения теплового потока в ламинарном течении вязкой, однородной жидкости происходит за счет энергии внешнего давления, приложенного к каналу.

Исследования показали, что для течений теплоносителя с числом Рейнольдса $Re < 15...20$ введение в канал различных вставок или препятствий с различной геометрией не является эффективным. Появление вставок сужает эффективное сечение канала, однако при таких скоростях теплоносителя еще не могут сформироваться когерентные вихревые структуры и, как результат, уровень тепловых потоков фактически остается на уровне, соответствующем каналу без вставок.

Увеличение скорости течения теплоносителя приводит к образованию угловых вихрей в канале. Стационарность таких структур фактически не меняет картину тепловых потоков в рассматриваемой задаче, поскольку теплоотдача жидкости, содержащейся в вихрях, во внешний поток в канале осуществляется только за счет диффузии. Как только вихри теряют свою стационарность (вихри совершают колебательные движения около угловой поверхности, находятся в квазистационарном состоянии), к диффузионному тепловому потоку добавляется конвективный поток, вызванный периодическими вовлечениями и выбросами жидкости из центральной части канала в область, занятую вихрями. Расчеты показали, что по мере увеличения скорости течения теплоносителя внутри криволинейного канала, уровень теплопередачи из внешней среды в канал постепенно возрастает при неизменной геометрии канала.

Предложенная в работе численная модель конвективно-диффузионной теплопередачи может быть использована при изучении тепловых потоков в каналах другой геометрии. Однако модель имеет ограничения, связанные с двумерностью рассматриваемых процессов, и ограничением скорости течения теплоносителя в микроканале (число Рейнольдса $Re=650...800$). Последнее ограничение вызвано величиной дискретизации физических полей ($\delta=0.05$) в рассматриваемой задаче и применением простой явной схемы численного решения дифференциальных уравнений параболического типа.

Полученные зависимости могут оказать существенную поддержку конструкторам и технологам микроэлектронной промышленности при проведении оценок уровней тепловых потоков, которые могут выводить жидкие теплоносители в микропроцессорах, микрочипах в химической промышленности, в микроэлектронике различного назначения, и уровня разности давлений, которые необходимо прикладывать к микроканалам для достижения заданной скорости течения. Появляется новая возможность использования регулирования уровня тепловых потоков за счет изменения разности давлений, прикладываемых к каналам в микроэлектронике.

Отдельный интерес в поставленной задаче представляет влияние трехмерности на величины тепловых потоков, взаимному влиянию микроканалов, расположенных в одной плоскости и некоторые другие аспекты рассматриваемой задачи применительно к

проблеме формирования управляемого и контролируемого теплового потока, выделяемого в кристаллах микроэлектронных устройств, во внешнюю среду.

7. Выводы

1. Сформирована двухмерная модель конвективно-диффузионных процессов теплопередачи из внешней среды в жидкий теплоноситель внутри криволинейного канала с системой вставок различной геометрии для малых чисел Рейнольдса. Задача решена численно на равномерной сетке с использованием простого явного метода для решения уравнений параболического типа и метода последовательной верхней релаксации для решения уравнений эллиптического типа с соответствующими начальными и граничными условиями.

2. Проведено тестирование модели на гидродинамической задаче двухмерного течения вязкой несжимаемой жидкости внутри прямолинейного бесконечного канала и одномерной задаче теплопередачи в твердой среде от нагретой стенки к холодной стенке. Данные численного эксперимента находятся в хоро-

шем соответствии с аналитическими решениями и данными, опубликованными в научной литературе.

3. Показано, что введение вставок в криволинейные каналы с числом Рейнольдса $Re < 15 \dots 20$ являются неэффективными по сравнению с каналом без вставок, поскольку получаемое незначительное увеличение тепловых потоков не компенсируется большим увеличением приложенной к каналу разности давлений. Установлено, что с увеличением скорости теплоносителя уровень тепловых потоков через ограничивающие поверхности увеличивается за счет образования локализованных вихревых структур в угловых зонах канала.

4. Установлено, что тепловые потоки могут быть увеличены за счет введения системы вставок различной высоты. Вихревые структуры возникают не только за препятствиями, но и перед ними (при $Re > 30 \dots 40$).

5. Показано, что уровень тепловых потоков в криволинейном канале для значений числа Рейнольдса $Re > 40$ течения теплоносителя в канале со вставками различной геометрии можно увеличить до 60 % по сравнению с каналом без вставок за счет увеличения разности давлений, прикладываемых к входу и выходу канала.

Литература

- Colgan, E. G. A practical implementation of silicon microchannel coolers for high power chips [Text] / E. G. Colgan, B. Furman, M. Gaynes, W. S. Graham, N. C. LaBianca, J. H. Magerlein et al. // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2007. – Vol. 30, Issue 2. – P. 218–225. doi: 10.1109/tcapt.2007.897977
- Mawatari, K. Microflow systems for chemical synthesis and analysis: approaches to full integration of chemical process [Text] / K. Mawatari, Y. Kazoe, A. Aota, T. Tsukahara, K. Sato, T. Kitamori // Journal of Flow Chemistry. – 2012. – Vol. 1, Issue 1. – P. 3–12. doi: 10.1556/jfchem.2011.00003
- Koo, J.-M. Integrated microchannel cooling for three-dimensional electronic circuit architectures [Text] / J.-M. Koo, S. Im, L. Jiang, K. E. Goodson // Journal of Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127, Issue 1. – P. 49–58. doi: 10.1115/1.1839582
- Yang, P. Patterning porous oxides within microchannel networks [Text] / P. Yang, A. H. Rizvi, B. Messer, B. F. Chmelka, G. M. Whitesides, G. D. Stucky // Advanced Materials. – 2001. – Vol. 13, Issue 6. – P. 427–431. doi: 10.1002/1521-4095(200103)13:6<427::aid-adma427>3.3.co;2-3
- Miyazaki, M. Microchannel enzyme reactors and their applications for processing [Text] / M. Miyazaki, H. Maeda // Trends in Biotechnology. – 2006. – Vol. 24, Issue 10. – P. 463–470. doi: 10.1016/j.tibtech.2006.08.002
- Kandlikar, S. G. Evolution of microchannel flow passages – Thermohydraulic performance and fabrication technology [Text] / S. G. Kandlikar, W. J. Grande // ASME 2002. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – New Orleans, Louisiana, 2002. – P. 59–72. doi: 10.1115/imece2002-32043
- Chen, Y. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [Text] / Y. Chen, P. Cheng // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45, Issue 13. – P. 2643–2648. doi: 10.1016/s0017-9310(02)00013-3
- Oh, K. W. A low-temperature bonding technique using spin-on fluorocarbon polymers to assemble microsystems [Text] / K. W. Oh, A. Han, S. Bhansali, C. H. Ahn // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2002. – Vol. 12, Issue 2. – P. 187–191. doi: 10.1088/0960-1317/12/2/313
- Liu, R. H. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel [Text] / R. H. Liu, M. A. Stremmer, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian et al. // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2000. – Vol. 9, Issue 2. – P. 190–197. doi: 10.1109/84.846699
- Aref, H. Stirring by chaotic advection [Text] / H. Aref // Journal of Fluid Mechanics. – 1984. – Vol. 143, Issue 1. – P. 1–23. doi: 10.1017/s0022112084001233
- Ottino, J. M. The kinematics of mixing: stretching, chaos and transport [Text] / J. M. Ottino. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989. – 364 p.
- Mashelkar, R. A. Seamless chemical engineering science: the emerging paradigm [Text] / R. A. Mashelkar // Chemical Engineering Science. – 1995. – Vol. 50, Issue 1. – P. 1–22. doi: 10.1016/0009-2509(94)00459-5
- Tangborn, A. V. Chaotic advection in 2-D mixed convection flow [Text] / A. V. Tangborn, D. M. Silevitch, T. Howes // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 1995. – Vol. 5, Issue 2. – P. 432–438. doi: 10.1063/1.166113

14. Бернінг, Р. Змішування в'язкої рідини в прямокутному мікроканалі [Текст] / Р. Бернінг, О. А. Гуржій, В. В. Мелешко // *Мат. Мет. І Фіз.-мех. поля.* – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 140–148.
15. Гуржій, А. А. Локальные карты растяжений: приложение для задачи об адвекции в произвольном поле скорости [Текст] / А. А. Гуржій, Х. Пеерхосаини // *Прикладная гидромеханика.* – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 28–43.
16. Aref, H. Chaotic advection of fluid particle [Text] / H. Aref // *Philosophical Transactions of Royal Society A.* – 1990. – Vol. 333. – P. 273–288.
17. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена [Текст] / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
18. Stroock, A. D. Chaotic mixer for microchannels [Text] / A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezić, H. A. Stone, G. M. Whitesides // *Science.* – 2002. – Vol. 295, Issue 5555. – P. 647–651. doi: 10.1126/science.1066238
19. Roberts, E. P. L. The simulation of stretch rates for the quantitative prediction and mapping mixing within a channel flow [Text] / E. P. L. Roberts, M. R. Mackley // *Chemical Engineering Science.* – 1995. – Vol. 50, Issue 23. – P. 3727–3746. doi: 10.1016/0009-2509(95)00196-c
20. Mengeaud, V. Mixing processes in a zigzag microchannel: Finite element simulations and optical study [Text] / V. Mengeaud, J. Josseland, H. N. Girault // *Analytical Chemistry.* – 2002. – Vol. 74, Issue 16. – P. 4279–4286. doi: 10.1021/ac025642e
21. Ламб, Г. Гидродинамика [Текст] / Г. Ламб. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1947. – 929 с.
22. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
23. Роуч, П. Вычислительная гидромеханика [Текст] / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
24. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
25. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. [Текст] / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 504 с.
26. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
27. Moffatt, H. K. Viscous and resistive eddies near a sharp corner [Text] / H. K. Moffatt // *Journal of Fluid Mechanics.* – 1964. – Vol. 18. – P. 1–18.