

УДК 536.529

Численное моделирование газожидкостных потоков в мини- и микроканалах*

Д.В. Гузей¹, А.В. Минаков^{1,2}, М.И. Пряжников¹, А.А. Дектерев^{1,2}

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

²*Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: gudimas@yandex.ru

В работе представлены результаты тестирования методики расчета двухфазных течений в мини- и микроканалах. Методика расчета основана на известном методе жидкости в ячейках и процедуре CSF для учета сил поверхностного натяжения. При помощи данной методики были рассмотрены задачи о течении водомасляной эмульсии и газожидкостном течении в микроканалах Т-типа, а также проведено моделирование стационарного газового течения в круглом микроканале; выполнено сравнение численных результатов с экспериментальными данными; получено хорошее согласование результатов.

Ключевые слова: двухфазные течения, микроканалы, VOF-метод, SIMPLEC-алгоритм, метод контрольного объема.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается существенный интерес к двухфазным течениям в микроканалах. Это обусловлено не только вопросами фундаментальной науки, но и серьезными достижениями в области практических приложений. Двухфазный режим течения в микро- и миниканалах встречается в большом числе современных технологических и промышленных устройств, использующих газожидкостные потоки. В случае двухфазного течения в микроканалах определяющее влияние на скорость движения пузырей газа оказывают капиллярные силы. Такой режим течения, как объект исследования, отличается большой сложностью, особенно в каналах некругового сечения с острыми углами. Расчет двухфазных течений и в макроскопических каналах представляет довольно сложную задачу, а в микроканалах сложность описания сильно возрастает за счет существенной роли взаимодействия жидкости со стенкой. В связи с этим разработка эффективной и достоверной численной методики моделирования двухфазных течений в микроканалах является крайне актуальной задачей.

Проведенный литературный обзор показал, что существует большое количество различных подходов к моделированию течений жидкости с подвижными границами.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФ (грант 14-19-00312), Президента РФ (грант МК-6296.2013.8), а также в рамках гос. задания МОН РФ СФУ на 2014 г.

Наиболее полные обзоры методов решения задач с подвижными контактными границами можно найти в работах [1–6].

Все численные алгоритмы разрешения подвижной границы по типу используемой сетки можно условно разделить на три большие группы — лагранжевы, эйлеровы методы и так называемые бессеточные методы. В лагранжевых алгоритмах расчетные узлы и ячейки движутся вместе со сплошной средой, в эйлеровых алгоритмах узлы и ячейки покоятся, а сплошная среда движется сквозь эйлерову сетку. Случай подвижных сеток, скорость движения которых отлична от скорости материальной среды, отвечает смешанному эйлерово-лагранжевому описанию движения. Отдельно можно выделить группу бессеточных методов, в которых либо вообще не используется расчетная сетка, либо используется только поверхностная сетка, либо сетка используется только для подготовки данных к расчету и анализу результатов.

В лагранжевых алгоритмах узлы расчетной сетки движутся вместе со сплошной средой, и подвижная граница отслеживается расположенными на ней расчетными узлами. Этот подход позволяет максимально точно описывать контактную границу и аккуратно проводить учет сложных граничных условий на ней, например, учесть силу поверхностного натяжения. Однако использование лагранжева подхода требует пересчета сетки на каждом временном шаге, что может быть весьма затратным. Кроме того, поскольку форма подвижной границы и траектория ее движения часто очень сложны, то использование лагранжевых методов может привести к существенному искривлению расчетных ячеек, что вызывает значительные погрешности в результатах расчета. Частично решить эту проблему позволяет использование неструктурированных расчетных сеток, а также многоблочных перекрывающихся или скользящих сеток. Этот подход получил особенно большое распространение для моделирования течений с движущимися твердыми телами.

Эйлеровы методы хороши тем, что для расчетов используется неподвижная, часто ортогональная и равномерная расчетная сетка. При этом отслеживание межфазной границы в этой группе методов осуществляется с помощью дискретных лагранжевых или непрерывных эйлеровых маркеров. По способу отслеживания контактной границы эйлеровы методы можно разделить на три большие группы: алгоритмы дискретных точечных маркеров (point tracking methods), алгоритмы дискретных или непрерывных поверхностных маркеров (interface tracking methods) и алгоритмы непрерывных объемных маркеров (interface capturing methods). На сегодняшний день наибольшее распространение получили методы, реализующие идею непрерывных маркеров, к которым можно отнести следующие: метод крупных частиц [3], в котором в качестве функции-маркера фактически используется плотность среды, метод жидкости в ячейках (Volume-of-Fluid method или VOF-метод) [7], метод псевдоконцентраций [8], метод скалярного уравнения [9]. В этой группе методов в качестве функций-маркеров используется функция объемной концентрации жидкости в расчетной ячейке. По существу эти методы очень схожи между собой и фактически являются разновидностями метода жидкости в ячейках. Различие заключается в основном в способе определения функции маркера. Очень популярным является метод функций уровня (Level set method), предложенный авторами работы [6] и развитый в более поздних работах. В данном методе в качестве функции маркера используется функция уровня, указывающая расстояние до поверхности раздела, примерно так, как это делается в картографии для обозначения высоты рельефа над уровнем моря. Функция-маркер в данном случае является непрерывной и плавно меняющейся, что существенно облегчает численное решение эйлерова уравнения переноса. Однако трудности начинаются на этапе так называемой реконструкции поверхности, когда по гладкому распределению функции уровня необходимо восстановить положение границы раздела.

Надо сказать, что основным недостатком и трудностью большинства методов непрерывных маркеров является искусственное размытие границы раздела сред, связанное с численной диффузией, возникающей при решении уравнения переноса функции-маркера.

Особенно эта проблема актуальна для методов, использующих разрывную функцию-маркер (VOF-метод, метод псевдоконцентраций). Подобную проблему можно встретить при численном решении невязких уравнений газовой динамики с ударными волнами и контактными разрывами. В газовой динамике проблему размытия скачков обычно решают при помощи ENO или TVD схем или путем применения адаптивных расчетных сеток, сгущенных в области разрыва. Аналогичные подходы применяются и при численном решении уравнения переноса в методе непрерывных объемных маркеров. Также существуют и несколько специальных методик, основанных на “геометрической реконструкции” поверхности, согласно которой делается предположение о форме свободной поверхности в расчетной ячейке, и на основе известного поля скорости осуществляется перенос данной формы. Более подробный анализ этих алгоритмов можно найти в работах [10, 11]. Наиболее совершенную разновидность метода “геометрической реконструкции” представляет PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) алгоритм, он является довольно точным, однако очень сложен в реализации, плохо обобщается в трехмерном случае для неортогональных расчетных сеток и требует значительных вычислительных затрат [12, 13].

Несмотря на обозначенные трудности, благодаря своей эффективности и простоте реализации, среди алгоритмов непрерывных объемных маркеров наибольшую популярность на сегодняшний день получил метод VOF [7]. Этот метод имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими методиками и позволяет справляться с задачами, решение которых часто невозможно для большинства методов с явным выделением контактной границы: опрокидывание волны, распад и соединение пузырей, заполнение резервуаров и другие. VOF-метод на сегодняшний день по праву считается наиболее эффективным для решения задач со свободной поверхностью.

Целью настоящей работы являлось тестирование и адаптация численной методики, основанной на VOF-методе, для моделирования двухфазных потоков в микроканалах.

Математическая модель

Как было сказано выше, в представляемой работе для моделирования двухфазных течений в микроканалах использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках [7], которая хорошо зарекомендовала себя для расчета макроскопических течений со свободной поверхностью [14, 15]. Идея этого метода состоит в том, что жидкость и газ рассматриваются как единая двухкомпонентная среда, и пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется при помощи специальной функции-маркера $F(x, y, z, t)$, величина которой задает объемную долю жидкой фазы в расчетной ячейке следующим образом:

$$F(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{если ячейка пустая,} \\ 1, & \text{если ячейка полностью заполнена жидкостью} \end{cases}$$

и $0 < F(x, y, z, t) < 1$ — если через ячейку проходит граница раздела фаз.

Поскольку свободная поверхность движется вместе с жидкостью, то отслеживание перемещения свободной границы в пространстве осуществляется путем решения уравнения переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{v} — вектор скорости двухфазной среды, найденный из решения системы уравнений гидродинамики, состоящей из уравнения сохранения массы или уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

и уравнений движения или закона сохранения импульса:

$$\partial \rho \mathbf{v} / \partial t + \nabla (\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla (\boldsymbol{\tau}) + \mathbf{F}, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ — тензор вязких напряжений, \mathbf{F} — вектор объемных сил, p — статическое давление, ρ — плотность двухфазной среды.

Составляющие тензора вязких напряжений τ_{ij} определяются как

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right),$$

где μ — динамическая вязкость двухфазной среды, u_i — компоненты вектора скорости.

Плотность и молекулярная вязкость рассматриваемой двухкомпонентной среды находятся через объемную долю жидкости в ячейке по правилу смеси: $\rho = \rho_1 F + (1 - F)\rho_2$, $\mu = \mu_1 F + (1 - F)\mu_2$, здесь ρ_1, μ_1 — плотность и вязкость жидкости, ρ_2, μ_2 — соответственно плотность и вязкость газа. Полученные таким способом величины плотности ρ и вязкости μ входят в уравнения движения и определяют физические свойства двухфазной среды.

При рассмотрении течений жидкости с границей раздела приходится сталкиваться с явлением поверхностного натяжения, пренебречь которым в случае течения в микроканалах нельзя. В микроканалах поверхностное натяжение играет ключевую роль. Изучение течений, контролируемых силами поверхностного натяжения, является очень трудной задачей. Поэтому к достоинствам VOF-метода также стоит отнести и то обстоятельство, что он позволяет относительно просто учесть влияние сил поверхностного натяжения.

Чаще всего для моделирования поверхностного натяжения в рамках VOF-метода используют CSF (Continuum Surface Force) [16] алгоритм, суть которого состоит во введении в уравнения движения дополнительной объемной силы \mathbf{F}_S , величина которой определяется из соотношения: $\mathbf{F}_S = \sigma \cdot k \cdot \nabla F$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, k — кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали: $k = \nabla (\mathbf{n}/|\mathbf{n}|)$. Нормаль к свободной поверхности вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли жидкой фазы в ячейке: $\mathbf{n} = \nabla F$. При этом на твердой стенке величина вектора нормали определяется по краевому углу смачивания θ : $\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos(\theta) + \boldsymbol{\tau}_w \sin(\theta)$, где $\mathbf{n}_w, \boldsymbol{\tau}_w$ — нормальный и тангенциальный к стенке вектора единичной длины.

Детально используемая методика описана в работах [14, 15]. Здесь же отметим основные моменты численной методики. Разностный аналог конвективно-диффузионных уравнений находится с помощью метода конечного объема для структурированных многоблочных сеток, при применении которого автоматически выполняется консервативность полученной схемы. Для аппроксимации конвективных членов уравнений гидродинамики (3) используется противопоточная схема второго порядка QUICK. Для аппроксимации нестационарных слагаемых уравнений гидродинамики используется неявная схема первого порядка. Диффузионные потоки и источниковые члены аппроксимируются со вторым порядком точности. Связь между полями скорости и давления реализуется при помощи SIMPLEC-процедуры на совмещенных сетках. Для устранения осцилляций поля давления используется подход Рхи-Чоу, связанный с введением монотонизатора в уравнения для поправки давления. Аппроксимация уравнения конвективного переноса объемной доли жидкости в ячейках осуществляется при помощи TVD-схемы Superbee с локально-одномерным расщеплением пространственного оператора. Такой подход позволяет преодолеть описанные выше трудности с разрешением подвижной межфазной границы раздела. Полученная система разностных уравнений решается итерационным способом с применением многосеточного решателя.

Тестирование численного алгоритма

Течение водномасляной эмульсии в микроканале Т-типа

В обсуждаемой задаче рассматривалось капельное течение водномасляной смеси в Т-образном микроканале, соответствующий эксперимент был проведен в работе [17]. Геометрию канала можно видеть на рис. 1. Высота канала — 33 мкм, ширина верхнего входа — 50 мкм, ширина правого входа — 100 мкм, общая длина канала составляла 1900 мкм. На твердых стенках задавалось условие прилипания, на входах задавалась скорость воды и масла, на выходе задавалось условие нулевого давления. Через правый боковой вход подается масло, через узкий верхний вход — вода. Для расчетов использовалась ортогональная сетка, состоящая из 121 тысячи ячеек: 380 узлов по длине канала, 20 — по ширине и 16 — по высоте канала, со сгущением к стенкам канала. Выбор детализации расчетной сетки осуществлялся исходя из методических расчетов, предварительно проведенных на последовательности различных по детализации сеток. Насыщение сетки считалось достаточным если по интересующим параметрам отклонение результатов на грубой и детальной сетках не превышало 5 %. Физические свойства воды были определены следующим образом: плотность — 1000 кг/м^3 , вязкость — $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$; масла: плотность — 930 кг/м^3 , вязкость — $0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Коэффициент поверхностного натяжения задавался равным $0,072 \text{ Н/м}$.

Расчеты проводились для различных соотношений объемных расходов воды и масла в диапазоне $Q_w/Q_0 = 0,3\text{--}2$. Объемный расход воды был фиксирован: $Q_w = 0,14 \text{ мл/с}$. Поскольку точное значение краевого угла смачивания в эксперименте не было известно, расчеты проводились для нескольких значений краевого угла смачивания. Типичная картина течения при заданном отношении расходов и краевом угле смачивания равном 150° приведена на рис. 1. Здесь капиллярное число определялось по формуле: $Ca = \mu U/\gamma$, где U — среднерасходная скорость масла, μ — вязкость масла, γ — коэффициент поверхностного натяжения.

На рис. 2 показана картина течения для краевого угла смачивания 90° . Как видно из сравнения рис. 1 и 2, при одинаковом соотношении расходов воды и масла в зависимости от значения краевого угла смачивания наблюдаются совершенно различные

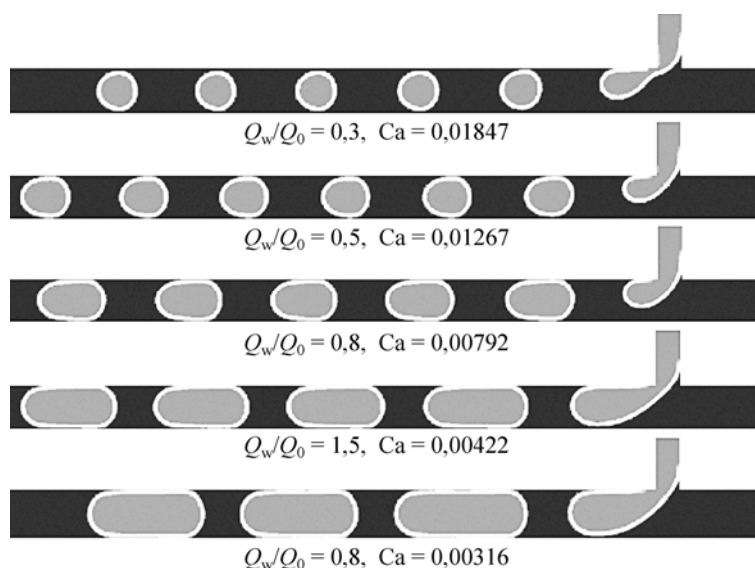


Рис. 1. Результаты расчетов течения водномасляной смеси для различных соотношений расхода воды и масла при краевом угле смачивания 150° .

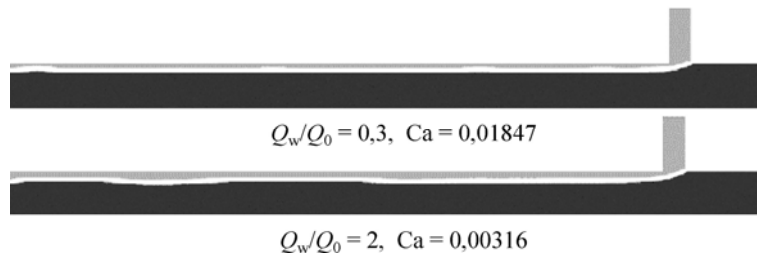


Рис. 2. Результаты расчетов течения водомасляной смеси для различных соотношений расхода воды и масла при краевом угле смачивания 90° .

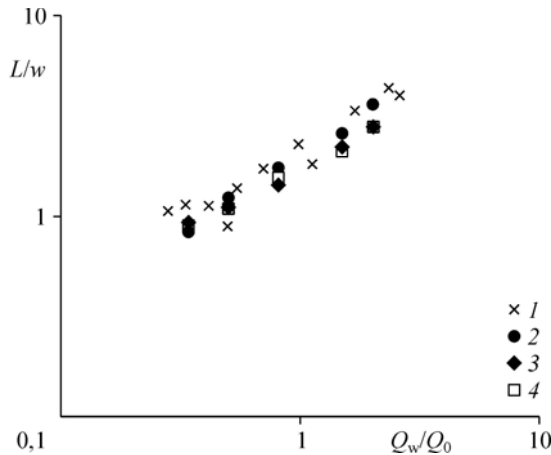


Рис. 3. Зависимость безразмерной длины капли воды от отношения расходов воды–масла.

Результаты экспериментов [17] (1), расчеты при углах контакта 150 (2), 160 (3), 180 (4) градусов.

режимы течения жидкости в микроканале. Таким образом, показано, что краевой угол смачивания играет определяющую роль в двухфазном течении в микроканалах.

В результате расчетов было установлено, что предельное значение краевого угла смачивания, при котором начинают образовываться водные

капли, составляет около 120° . При более низких значениях осуществляется пленочное течение, так как это показано на рис. 2.

Количественное сравнение с экспериментом проведено по зависимости безразмерной длины капли воды от отношения расходов воды и масла. Обезразмеривание длины проведено на ширину верхнего входа $w = 50$ мкм. Результаты сравнения показаны на рис. 3. Как видно из графика, на длину капли очень сильное влияние оказывает краевой угол смачивания. Наилучшее согласование с экспериментом наблюдается при значении $\theta = 150^\circ$.

Моделирование образования пузырей азота в водном растворе глицерина

В описанной задаче рассматривался процесс образования пузырей азота в водном растворе глицерина. В эксперименте, проведенном в работе [18], использовалось несколько крестообразных микроканалов. Геометрия каналов представлена на рис. 4. Газ подавался с бокового входа, а жидкость подавалась с двух перпендикулярных основному каналу входов, расположенных напротив друг друга. Расчеты были проведены для микроканалов квадратного сечения 400×400 и 600×600 мкм. Общая длина микроканала составляла 4400 мкм. На каждый вход жидкости подавался расход $Q_i/2$. В расчетах объемный расход азота задавался постоянным — $Q_g = 14$ мм³/с, а расход рабочей жидкости Q_i варьировался в диапазоне от 10 до 60 мм³/с. На входах задавалось значение массового расхода, на выходе условие нулевого давления. На стенках канала задавалось условие прилипания. Использовалась ортогональная расчетная сетка, состоявшая из 378 тыс. узлов: 360 узлов — по длине канала и 30 узлов — по высоте и ширине канала.

В эксперименте в качестве рабочей жидкости выступал 25 и 50 %-й водный раствор глицерина с 0,5 %-ой добавкой додецилсульфата натрия (SDS). Также в качестве рабочей жидкости использовалась вода с 0,5 %-ой добавкой додецилсульфата натрия.

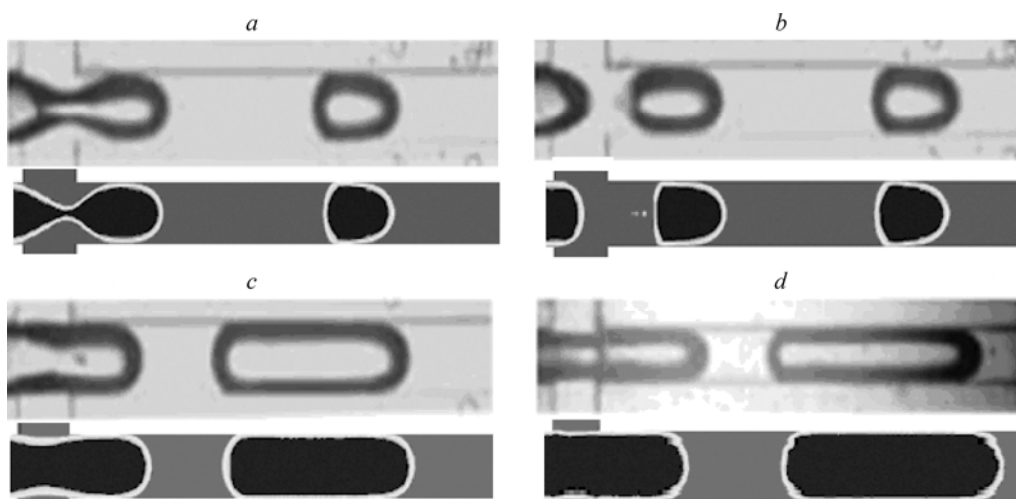


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов с фотографиями, сделанными в ходе экспериментов, для микроканала сечением 400×400 мкм.

$Q_g = 14 \text{ мм}^3/\text{с}$, $Q_l = 56 \text{ мм}^3/\text{с}$: 25 %-й водный раствор глицерина при $t = 5$ мс (a) и при $t = 6$ мс (b);
 $Q_g = 14 \text{ мм}^3/\text{с}$, $Q_l = 14 \text{ мм}^3/\text{с}$: 25 %-й водный раствор глицерина (c) и вода с добавкой SDS 0,5 % (d).

Добавка додецилсульфата натрия производилась с целью изменения коэффициента поверхностного натяжения рабочей жидкости.

Физические свойства рабочих жидкостей — плотность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения — составляли соответственно для 25 %-го водного раствора глицерина: 1060 кг/м^3 , $0,00232 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $0,0315 \text{ Н/м}$; для 50 %-го водного раствора глицерина: 1130 кг/м^3 , $0,00653 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $0,0315 \text{ Н/м}$; для воды: 1000 кг/м^3 , $0,00092 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $0,033 \text{ Н/м}$. Значение краевого угла смачивания в расчетах равнялось 180° .

На рис. 4 представлено качественное сравнение результатов расчетов с фотографиями течения в микроканале сечением 400×400 мкм для различных рабочих жидкостей и расходов, полученных с помощью μ -PIV-метода в ходе экспериментов. Как видно, наблюдается хорошее качественное согласование экспериментальных данных и расчетных изолиний. Добиться идеального совпадения довольно сложно, поскольку процесс образования пузырей нестационарный и в расчете трудно «поймать» момент времени, зафиксированный на кадрах в ходе эксперимента. Кроме того, на фотографиях мы видим пузыри целиком, из-за этого они выглядят несколько больше своего реального размера. Тем не менее, в целом согласие вполне удовлетворительное.

Количественное сравнение результатов расчетов было проведено по зависимости безразмерной длины пузыря азота L/W от расхода жидкости, где W — сторона канала. На рис. 5 представлены результаты расчетов для микроканалов сечением 400×400 и

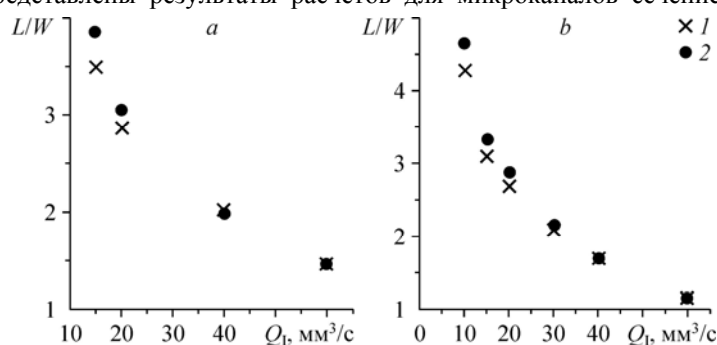


Рис. 5. Зависимость безразмерной длины пузыря жидкости от расхода жидкости. Сечение микроканалов: 600×600 (a), 400×400 (b) мкм; 1 — расчеты: 600 (a), 400 (b) мкм; 2 — эксперименты: 600 (a), 400 (b) мкм.

600×600 мкм, при этом объемный расход газа был задан равным 20 мм³/с, а расход жидкости варьировался в диапазоне от 10 до 60 мм³/с. В качестве рабочей жидкости использовался 50 %-й водный раствор глицерина с 0,5 %-ой добавкой SDS. Как видно из графиков на рис. 5, наблюдается удовлетворительное согласование расчетных значений с экспериментальными данными. Максимальное расхождение по длине пузырей в расчете и эксперименте составляет 7 %. С уменьшением расхода жидкости совпадение расчета и эксперимента ухудшается. Это может быть связано с тем, что с уменьшением расхода жидкости увеличивается длина газового пузыря. С увеличением длины газового пузыря уменьшается толщина жидкого слоя между ним и твердой стенкой и его становится трудно разрешить с помощью расчетной сетки.

Газожидкостное течение в Т-образном микроканале круглого сечения

В следующей тестовой задаче было рассмотрено моделирование газожидкостного течения в Т-образном микроканале круглого сечения. Диаметр трубок $d = 250$ мкм, общая длина канала составляла 18 мм. Через один из боковых входов подавался воздух, через другой — вода. Физические параметры воды составляли: плотность — 998,2 кг/м³, вязкость — 0,001003 Па·с; воздуха: плотность — 1,225 кг/м³, вязкость — $1,7894 \times 10^{-5}$ Па·с. В расчетах варьировалось соотношение скоростей воздуха и воды на входе в каналы. На стенках задавались условия прилипания, на выходе — условие нулевого давления. Значение краевого угла смачивания было задано 90°. Расчетная сетка состояла из 267 тыс. расчетных узлов со сгущением к пересечению каналов.

На рис. 6 представлены изолинии плотности двухфазной смеси в центральном сечении канала при различных скоростях жидкости. В рассматриваемом случае вода подается сверху (показано серым цветом), воздух подается снизу (показано черным цветом). Как видно из рисунка, в канале смешения жидкость движется в виде отдельных капель, разделенных прослойками воздуха. С увеличением расхода жидкости частота образования капель увеличивается и расстояние между ними уменьшается. Размер самих капель увеличивается.

Количественное сравнение данных моделирования с экспериментальными [19] представлено на рис. 7 в виде зависимости безразмерной длины водяной капли $L = L/d$ от безразмерной скорости жидкости $\tilde{V} = V_L / (V_L + V_G)$, где V_L и V_G — соответственно

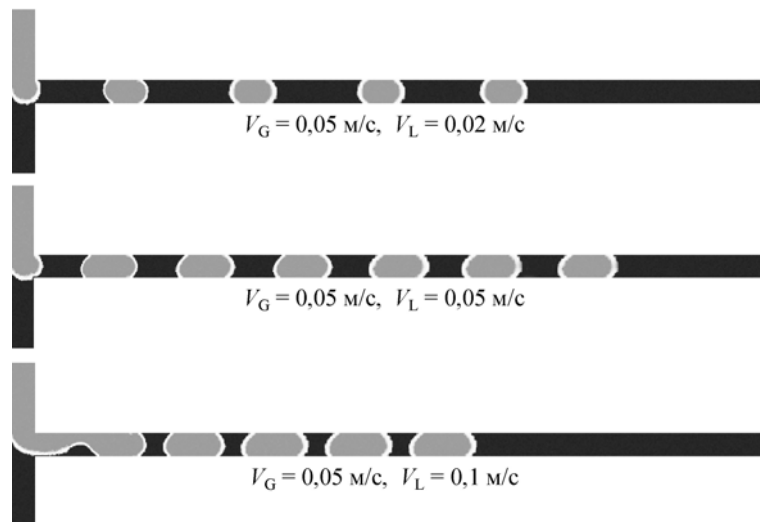


Рис. 6. Картина течения в Т-образном микроканале круглого сечения для различных скоростей жидкости.

Рис. 7. Зависимость безразмерной длины капли от соотношения скоростей.

1 — экспериментальные данные работы [19] при $d = 0,25$ мм, 2 — настоящий расчет.

скорость воды и воздуха. Экспериментальные данные имеют довольно значительный разброс, тем не менее, расчетные данные вполне хорошо описывают эксперимент.

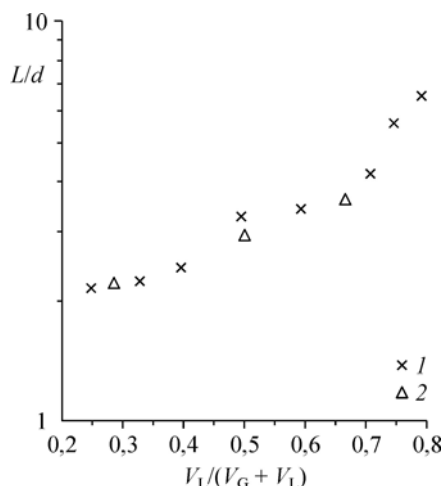
Моделирование стационарного газового снаряда в микрочанале

В описанных выше задачах проведено сравнение результатов моделирования с экспериментом по размерам образующихся в микрочаналах пузырей или капель. Эти размеры можно рассматривать как некие комплексные интегральные характеристики газожидкостного течения. Однако при верификации численной методики хотелось бы понимать, насколько хорошо она описывает локальное поведение течения, особенно в области пограничного пристеночного слоя между стенкой и пузырем. Хорошим тестом могут являться данные экспериментального изучения квазистационарного снарядного течения [20]. В эксперименте измерялось трение на стенке канала в зависимости от длины газового снаряда. В этом случае трение полностью определяется толщиной жидкой пленки, образующейся между газовым пузырем и стенкой канала, поэтому данная задача может служить хорошим тестом для рассматриваемой методики.

Экспериментальная установка [20] представляет собой вертикальный круглый канал диаметром 2 см, в который подается рабочая жидкость со скоростью 0,2 м/с. В настоящей работе точка, в которой начинается снаряд, была фиксирована местом ввода газа. Эксперимент проводился при среднерасходной скорости жидкости, равной 16 см/с. Для образования снаряда воздух подавался в вертикальную трубку из нержавеющей стали, внешний диаметр которой равнялся 0,3 см. Нижняя часть трубки располагалась в потоке жидкости по оси основной трубы, а верхняя выходила наружу установки. Герметизация осуществлялась при помощи штуцера, который позволял вертикальное перемещение трубки. Для того чтобы трубка находилась на оси трубы, применялось специальное центрирующее устройство. К нижнему концу трубки была припаяна нержавеющая трубка внешним диаметром 0,15 см, к которой крепилась фторопластовая насадка с отверстием для выхода газа, расположенным на нижнем торце, имеющая коническую форму. При подаче газа в трубку происходило образование газового пузыря под поверхностью насадки. В определенном диапазоне скоростей опускного течения жидкости в рабочем участке происходило образование стационарного газового снаряда (пузыря Тейлора), носик которого располагался в точке ввода газа на нижнем торце насадки.

Расчеты проводились в двумерной постановке, на ортогональных сетках различной детализации: 200×15 и 300×65 расчетных узлов по длине и ширине канала соответственно. Физические параметры воздуха определены следующим образом: динамическая вязкость — $1,7894 \times 10^{-5}$ Па·с, плотность — $1,225$ кг/м³; воды: вязкость — $1,003 \times 10^{-3}$ Па·с, плотность — $998,2$ кг/м³.

Типичная картина стационарного снарядного течения показана на рис. 8. Справа приведены результаты расчетов течения для четырех значений длины снаряда. В верхней части снаряда течение являлось практически стационарным. В доньшке снаряда происходит периодический отрыв газовых пузырьков, которые хорошо видны на рис. 8.



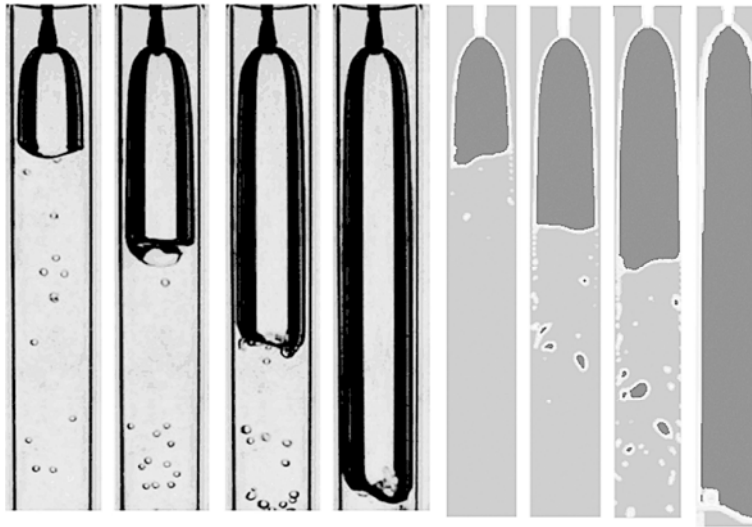
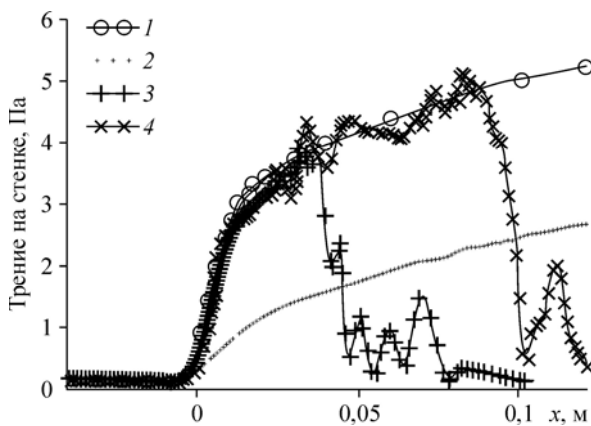


Рис. 8. Стационарное снарядное течение в круглом канале.

Унос газа с пузырьками компенсируется расходом газа через трубочку. В результате размер снаряда остается практически постоянным.

Количественное сравнение результатов расчетов с экспериментом проведено по величине трения на стенке канала. Результаты сравнения приведены на рис. 9. Экспериментальная кривая получена для снаряда длиной более 12 см. Как видно из графика, до тех пор, пока снаряд не закончится, трение на стенке не зависит от его длины, что еще раз подчеркивает, что трение в данном случае практически обусловлено толщиной пленки. Из графика 9 можно видеть, что на расчетное значение трения на стенке существенную роль оказывает детализация сетки в области пограничного пристеночного слоя. С насыщением сетки результаты расчетов приближаются к эксперименту. Таким образом, было установлено, что для корректного моделирования газожидкостных течений в микроканалах необходимо не менее десяти расчетных узлов на толщину жидкой пленки между стенкой канала и газовым пузырем.

Как уже отмечалось, при большой длине снаряда течение нельзя рассматривать как стационарное. Начиная примерно с 2 см, жидкая пленка перестает быть устойчивой. На ней развиваются возмущения, которые приводят к образованию волн, движущихся в направлении течения.



Заключение

Разработана и протестирована численная методика расчета двухфазных течений со свободной поверхностью в микроканалах.

Рис. 9. Трение на стенке по длине канала.

Эксперимент — 1, расчеты: на грубой сетке (200×15) — 2, на детальной сетке (300×65) при $L = 4$ см — 3, на детальной сетке (300×65) при $L = 10$ см — 4.

Методика расчета учитывает нестационарность и трехмерность процесса движения и образования пузырей и капель в микроканалах, а также поверхностное натяжение и эффекты смачивания поверхностей. Расчетный алгоритм легко адаптируется к реальной геометрии любого микроканала. Проведено детальное тестирование разработанной численной методики на решении ряда задач ламинарного газожидкостного течения с подвижной границей раздела в мини- и микроканалах различной геометрии. Результаты тестирования сопоставлены по локальным и интегральным параметрам с данными натуральных экспериментов. Численное решение всех рассмотренных задач в целом хорошо качественно и количественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

По результатам проведенного тестирования было показано, что при расчете газожидкостных течений в микроканалах особую роль играет детализация сетки в области пограничного пристеночного слоя между пузырьем и твердой стенкой. Было установлено, что для корректного моделирования газожидкостных течений в микроканалах необходимо не менее десяти расчетных узлов на толщину жидкой пленки между стенкой канала и газовым пузырьем. Кроме того, было показано, что значение краевого угла смачивания играет ключевую роль при описании двухфазных потоков в микроканалах. Поэтому при проведении расчетов необходимо внимательно следить, чтобы его значение максимально соответствовало данным рассматриваемого эксперимента.

Таким образом, результаты тестирования показали, что алгоритм позволяет описывать широкий класс двухфазных течений в микроканалах различной геометрии. Следующим шагом по модификации представленной численной методики будет ее обобщение на описание двухфазного теплообмена в микроканалах, в том числе и с учетом фазовых переходов.

Список литературы

1. Бурого Н.Г. Численное решение задач с МСС с подвижными границами раздела: дисс. ... д. физ.-мат. наук: 01.02.04. М., 2003. 222 с.
2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 519 с.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 391 с.
4. Хакимянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 393 с.
5. Kothe D.B., Rider W.J., Mosso S.J., Brock J.S., Hochstein J.I. Volume tracing of interfaces having surface tension in two and three dimensions // AIAA Paper. 1996. No. 96-0859.
6. Osher S., Sethian J.A. Front propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations // J. Comput. Phys. 1988. Vol. 79, No. 1. P. 12-49.
7. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF). Method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. phys. 1981. Vol. 39, No. 1. P. 201-226.
8. Thompson E. Use of pseudo-concentrations to follow creeping viscous flows during transient analysis // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. 1986. Vol. 6. P. 749-761.
9. Liu J., Spalding D.B. Numerical simulation of flows with moving interfaces // Physico-chemical Hydrodynamics. 1988. Vol. 10, No. 5/6. P. 625-637.
10. Rudman M. Volume tracking methods for interfacial flow calculations // Int. J. for Numerical Method in Fluids. 1997. Vol. 24, No. 7. P. 671-691.
11. Rider W.J., Kothe D.B. Reconstructing volume tracking // J. Comput. Phys. 1998. Vol. 141, No. 2. P. 112-152.
12. Huang M., Wu L., Chen B. A piecewise linear interface-capturing volume-of-fluid method based on unstructured grids // Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals. 2012. Vol. 61, No. 5. P. 412-437.
13. Fochesato C., Loubere R., Motte R., Ovidia J. Adaptive Subdivision Piecewise Linear Interface Calculation (ASPLIC) for 2D multi-material hydrodynamic simulation codes // Int. J. for Numerical Methods in Fluids. 2013. P. 1-20.
14. Миначов А.В. Численный алгоритм решения пространственных задач гидродинамики с подвижными твердыми телами и свободной поверхностью // Сиб. журн. индустр. мат. 2008. Т. 36, № 4. С. 95-105.
15. Миначов А.В. Численное моделирование нестационарных течений несжимаемой жидкости со свободной поверхностью при помощи VOF метода // Вест. сиб. гос. аэрокосм. ун-та. 2008. Т. 19, № 2. С. 9-13.

16. **Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.** A continuum method for modeling surface tension // *J. Comput. Phys.* 1992. Vol. 100, No. 2. P. 335–354.
17. **Garstecki P., Fuerstman M.J., Stone H.A., Whitesides G.M.** Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of breakup // *Lab on a Chip*. 2006. No. 6, No. 3. P. 437–446.
18. **Fu T., Funfschilling D., Ma Y., Li H.Z.** Scaling the formation of slug bubbles in microfluidic flow-focusing devices // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2010. Vol. 8, No. 4. P. 467–475.
19. **Quin D., Lawal A.** Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel // *Chem. Engng Sci.* 2006. Vol. 61, No. 23. P. 7609–7625.
20. **Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д.** Возмущение нисходящего потока жидкости стационарным газовым снарядом // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2010. № 4. С. 88–96.

*Статья поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.,
после доработки — 29 мая 2014 г.*