

Расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа

А.В. Минаков^{1,2}, А.А. Шебелева^{1,2}, А.А. Ягодницына^{1,3}, А.В. Ковалев^{1,3}, А.В. Бильский^{1,3}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск

E-mail: Aminakov@sfu-kras.ru

Проведено расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа с поперечными размерами канала 200×400 мкм. Определен диапазон существования снарядного режима течения. Установлена зависимость длины снарядов парафинового масла от отношения расходов жидкостей. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Показано хорошее согласие расчета и эксперимента.

В последнее десятилетие наблюдается существенный интерес к двухфазным течениям в микроканалах. Течение несмешивающихся жидкостей в микроканалах используются для производства эмульсий, синтеза наноматериалов, проведения реакций нитрования и экстракции. Перспективным направлением является также развитие капельных микрореакторов для биомедицинских приложений [1], производительность которых может быть на порядки увеличена по сравнению с традиционными системами. Двухкомпонентные потоки жидкость-жидкость в микроканалах характеризуются набором различных режимов течений [2–4]. Эти режимы обусловлены балансом сил инерции, вязкого трения и межфазного взаимодействия, которые как правило преобладают над силами гравитации из-за малых характерных размеров канала. Такой режим течения как

снарядный отличается большой сложностью, особенно в каналах некругового сечения с острыми углами. Для практических приложений интерес представляет возможность предсказания режимов снарядного течения и их свойств, например, длины [5,6] или скорости снарядов, а также развитие методов математического моделирования, имеющих высокую предсказательную надежность.

В нашей работе впервые проведено расчетно-экспериментальное исследование наиболее распространенного в микроканалах снарядного режима течения смеси парафиновое масло–касторовое масло, с крайне высокой вязкостью (650 мПа·с) одной из фаз.

Предварительно были измерены физические свойства используемых жидкостей (парафиновое масло: $\rho=845 \text{ кг/м}^3$, $\mu=110 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, $\theta=25^\circ$, касторовое масло: $\rho=935 \text{ кг/м}^3$, $\mu=650 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, $\theta=152^\circ$). Вязкость масел измерялась с помощью ротационного вискозиметра, относительная погрешность измерений составляла 3%. Плотность измерялась путём взвешивания известного объёма жидкости, с относительной погрешностью 1%. Измерение контактных углов смачивания и поверхностного натяжения осуществлялось с помощью установки KRUSS DSA-100 (Германия). Поверхностное и межфазное натяжение измерялись методом висючей капли. Неопределенность измерений при этом не превышала 2%. Контактные углы измерялись прямым гониометрическим методом, с использованием различных моделей для аппроксимации формы поверхности капли.

Эксперименты проводились в микроканалах Т-типа, изготовленных из полимера SU-8 компанией microLIQUID (Испания). Специальной обработки поверхности канала для придания поверхности гидрофильности или гидрофобности не производилось. Поперечные размеры входных каналов составляли 200x200 мкм, выходного 200x400 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру 267 мкм. Длина входного канала равнялась 11.5 мм, а выходного 22.5 мм. Микроканал закреплялся на предметном столике

инвертированного микроскопа Zeiss Axio Observer.Z с объективом 5x (числовая апертура 0.12) и освещался встроенной в него галогенной лампой. Для визуализации режимов течения к микроскопу была подключена скоростная камера pco.1200 hs. Частота съёмки варьировалась в пределах от 5 до 150 Гц в зависимости от скорости потока. Режимы фиксировались за счёт наблюдения границы раздела между жидкостями, благодаря различию в показателях преломления. Течение в канале создавалось с помощью двойного шприцевого насоса «KDS Gemini 88», позволяющего задавать расход с относительной погрешностью 0.35%. Эксперименты проводились в широких диапазонах расходов, что

обеспечило также широкий диапазон чисел Рейнольдса $Re = \frac{\rho U d}{\mu}$, $2.1 \cdot 10^{-5} < Re_p < 0.1$,

$4 \cdot 10^{-6} < Re_c < 0.01$, Вебера $We = \frac{\rho U^2 d}{\sigma}$, $1.7 \cdot 10^{-9} < We_p < 0.01$, $2 \cdot 10^{-9} < We_c < 0.01$, и капиллярного

числа $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$, $8 \cdot 10^{-5} < Ca_p < 0.1$, $4.8 \cdot 10^{-4} < Ca_c < 1.16$. Здесь $\sigma = 14$ мН/м – поверхностное

натяжение между жидкостями, ρ – плотность жидкости, d – гидравлический диаметр канала, μ – динамическая вязкость жидкости, U – среднерасходная скорость жидкости.

Для моделирования двухфазных течений в микроканале Т-типа использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках (VOF), которая хорошо зарекомендовала себя для расчета двухфазных течений в микроканалах [7]. Суть этого метода состоит в том, что жидкости рассматриваются как единая двухкомпонентная среда и пространственное распределение фаз, в пределах расчетной области, определяется при помощи специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$, которая задает объемную долю жидкой фазы в расчетной ячейке следующим образом: $F(x, y, z, t) = 0$, если ячейка пустая, $F(x, y, z, t) = 1$, если ячейка полностью заполнена жидкостью, и $0 < F < 1$, если через ячейку проходит граница раздела.

При рассмотрении течений жидкости с границей раздела приходится сталкиваться с явлением поверхностного натяжения, пренебречь которым в нашем случае нельзя. Для

моделирования поверхностного натяжения в рамках VOF метода используют CSF [8] алгоритм, суть которого состоит во введении в уравнения движения дополнительной объемной силы.

$$F_s = \sigma k \nabla F \quad (1)$$

Где k – кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали:

$$k = \nabla \left(\frac{n}{|n|} \right) \quad (2)$$

Нормаль к свободной поверхности (n) вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли одной из жидкостей в ячейке:

$$n = \nabla F \quad (3)$$

При этом на твердой стенке величина вектора нормали определяется по краевому углу смачивания θ , n_w , τ_w – нормальный и тангенциальный к стенке вектора.

$$n = n_w \cos \theta + \tau_w \sin \theta \quad (4)$$

Методика решения уравнений и основные особенности численных исследований описаны в работах [9-10]. В расчетном исследовании было рассмотрено течение несмешивающихся жидкостей в Т-образном микроканале при фиксированном расходе касторового масла $Q_c=0.1$ мкл/мин и варьируемым расходом парафинового масла $Q_p=0.05-0.25$ мкл/мин. Геометрия расчетной области частично воспроизводила измерительный участок эксперимента. Размеры входных каналов: $2400 \times 200 \times 200$ мкм, канала смешения: $3000 \times 400 \times 200$ мкм. Через верхний канал подается касторовое масло, через нижний – парафиновое масло. Все физические свойства жидкостей соответствовали эксперименту. Для расчетов использовалась структурированная расчетная сетка, состоящая из 850 тысяч узлов. Такая детализация сетки подобрана исходя из предварительно проведенных методических расчетов. В качестве граничных условий на входах задавалось значение массового расхода соответствующей жидкости, с

установившимся профилем скорости. На выходе ставились условия Неймана (равенство нулю производных по нормали от всех скалярных величин). На стенках канала задавалось условие прилипания. Задача решалась в нестационарной постановке. Величина временного шага выбиралась исходя из условия: число Куранта < 1 .

В результате расчетов и экспериментов было определено, что снарядный режим течения для данной смеси, в исследуемом микроканале, существует в следующем диапазоне расходов жидкостей: $0.05 < Q_c < 1.5$ мкл/мин, $0.05 < Q_p < 0.5$ мкл/мин, что соответствует следующим безразмерным параметрам: $10^{-9} < We_c < 10^{-6}$ и $10^{-9} < We_p < 10^{-7}$.

Далее подробно был изучен снарядный режим течения этой смеси. На рис. 1 представлено качественное сравнение результатов расчета с экспериментальными фотографиями на этапе формирования снаряда, для одного из режимов течения ($Q_c = 0.1$ мкл/мин, $Q_p = 0.05$ мкл/мин). На рисунках показана картина течения, соответствующая четырем последовательным моментам времени. Видна динамика образования и движение снарядов парафинового масла в касторовом масле. Как видно, наблюдается хорошее качественное согласие экспериментальных фотографий и результатов моделирования, не только на этапе движения отдельных снарядов, но, что наиболее важно, на этапе их формирования. Форма границы раздела сред в сходные моменты времени в расчете и эксперименте очень хорошо согласуется, что говорит о хорошей разрешающей способности расчетного алгоритма.

На рис. 2 представлены результаты моделирования при фиксированном значении расхода касторового масла $Q_c = 0.1$ мкл/мин и варьируемом значении расхода парафинового масла $Q_p = 0.05; 0.2; 0.25$ мкл/мин. Как видно, с увеличением расхода, увеличивается длина снаряда парафинового масла. Длина снарядов является важнейшей количественной характеристикой данного вида течения. Этот параметр важен для практики, поскольку от него зависят характеристики процессов тепломассообмена в такой смеси. Зависимость безразмерной длины снаряда на гидравлический диаметр канала от

отношения расходов касторового и парафинового масла показана на рис.3. Анализ полученных данных показал, что безразмерная длина снарядов хорошо описывается следующей корреляцией: $L/d = 1 + 1.45 \cdot (Q_p / Q_c)$.

Сравнение расчета и эксперимента по длине снаряда показано на рис.3. В целом расхождение расчета и эксперимента не превышает 5%, что вполне приемлемо для такой вычислительной задачи.

Таким образом, в результате исследований определен диапазон существования снарядного режима течения смеси вязких жидкостей касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа. Установлена зависимость длины снарядов парафинового масла от отношения расходов жидкости. Показано хорошее согласие расчета и эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (грант №16-19-10519).

Список литературы

- [1] Tran T.M., Lan F., Thompson C.S., Abate R. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2013. V. 46. 114004.
- [2] Foroughi H., Kawaji M. // Int. J. Multiph. Flow. 2011. V. 37. P. 1147–1155.
- [3] Zhao Y., Chen G., Yuan Q. // J. AIChE. 2006. V. 52. P. 4052–4060.
- [4] Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V, Bilsky A.V. // J.Chem. Eng. 2016. V. 303. P. 547–554.
- [5] Garstecki P., Fuerstman M.J., Stone H., Whitesides G.M. // Lab Chip. 2006. V.6. P. 437–446.
- [6] Xu J.H., Li S.W., Tan J., Luo G.S. // Microfluid. Nanofluidics. 2008. V.5. P. 711–717.
- [7] Hirt C.W, Nichols B.D. // J. of computational physics. 1981. V. 39. P. 201–226.
- [8] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. // J. Comput. Phys. 1992. V. 100. P. 335– 54.
- [9] Guzei D.V., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Dekterev A.A. // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. 22 (1), P. 61-71.
- [10] Minakov, A.V. // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2014. V. 54 (10). P. 1560-1570.

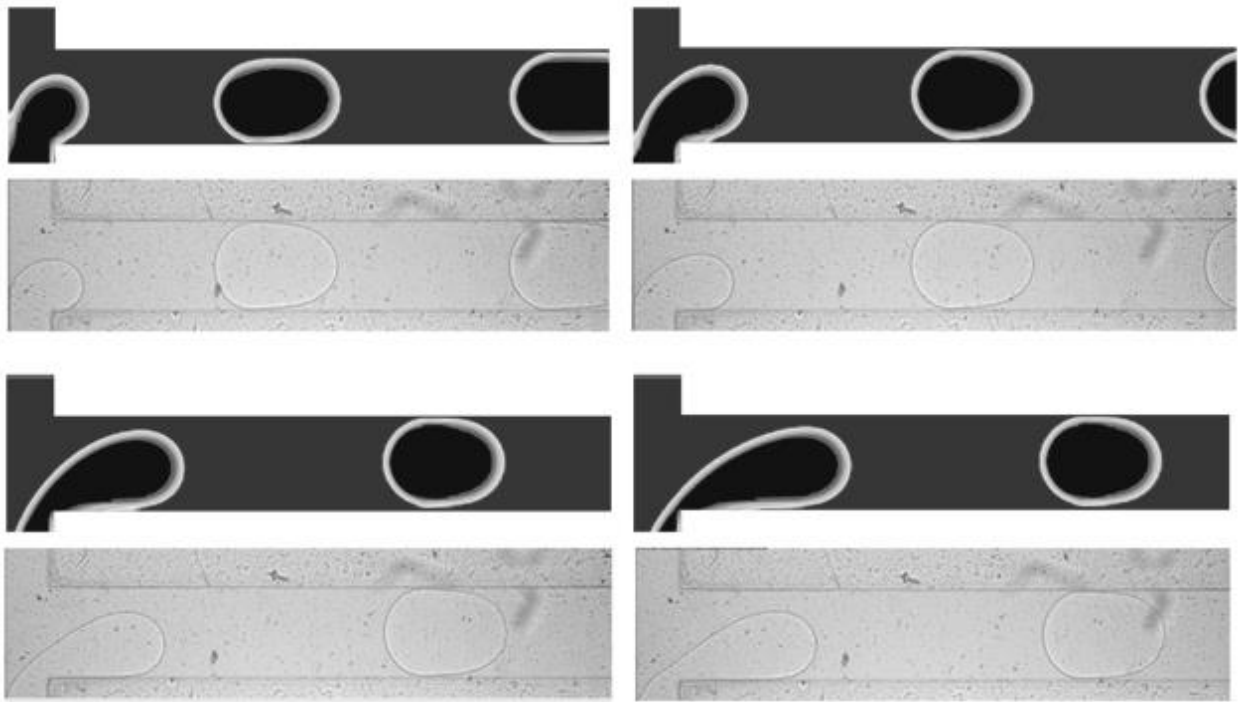


Рис. 1. Сравнение расчета и эксперимента на этапе формирования снаряда

($Q_c=0.1$ мкл/мин, $Q_p=0.05$ мкл/мин).

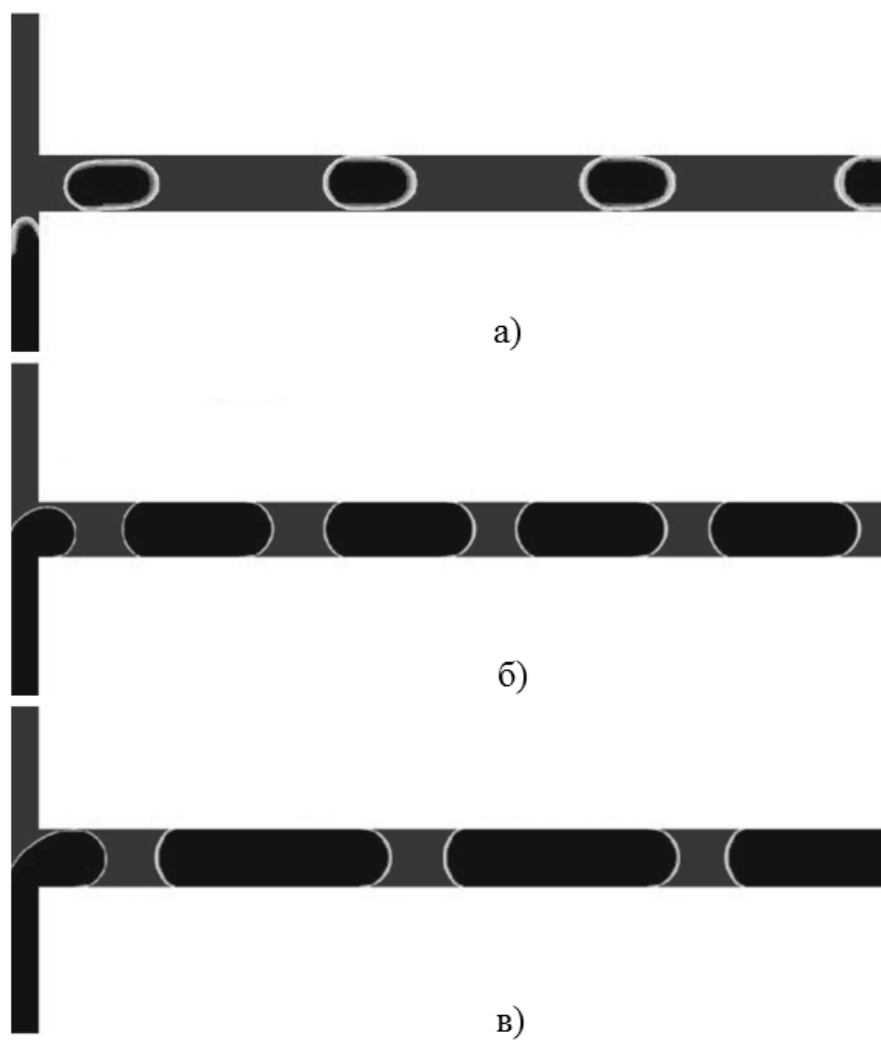


Рис. 2. Результаты моделирования снарядного режима течения при фиксированном значении расхода касторового масла $Q_c=0.1$ мкл/мин и варьируемом значении расхода парафинового масла. а) $Q_p=0.05$ мкл/мин; б) $Q_p=0.2$ мкл/мин; в) $Q_p=0.25$ мкл/мин.

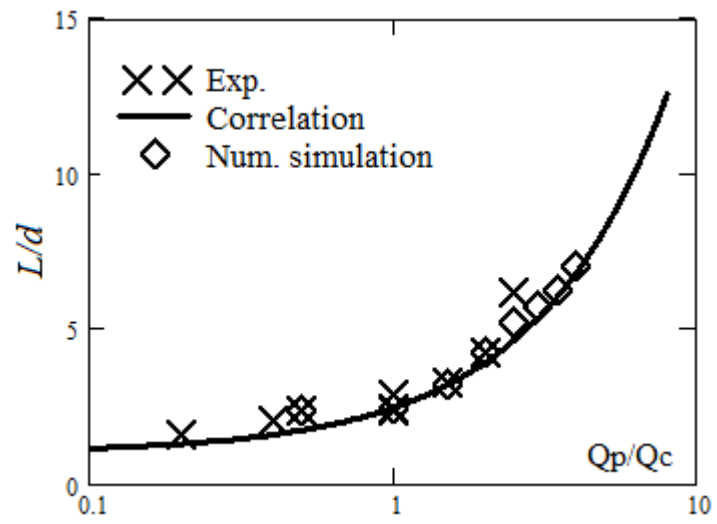


Рис. 3. Зависимость безразмерной длины снаряда от отношения расходов.