

03

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

© А.В. Минаков<sup>1,2</sup>, А.А. Шебелева<sup>1,2</sup>, А.А. Ягодницына<sup>1,3</sup>,  
А.В. Ковалев<sup>1,3</sup>, А.В. Бильский<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет

E-mail: Aminakov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 30 октября 2016 г.

Проведено расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа с поперечными размерами канала  $200 \times 400 \mu\text{m}$ . Определен диапазон существования снарядного режима течения. Установлена зависимость длины снарядов парафинового масла от отношения расходов жидкостей. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Показано их хорошее согласие.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45037.16549

В последнее десятилетие наблюдается существенный интерес к двухфазным течениям в микроканалах. Течение несмешивающихся жидкостей в микроканалах используется для производства эмульсий, синтеза наноматериалов, проведения реакций нитрования и экстракции. Перспективным направлением также является 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, особен-

но 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 настоящей 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 (для парафинового масла  $\rho = 845 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 110 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,  $\theta = 25^\circ$ ; для касторового масла  $\rho = 935 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 650 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,  $\theta = 152^\circ$ ). Вязкость масел определялась с помощью ротационного вискозиметра (относительная погрешность измерений составляла 3%), плотность — путем взвешивания известного объема 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 находились 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  $200 \times 200 \text{ }\mu\text{m}$ , выходного —  $200 \times 400 \text{ }\mu\text{m}$ , что соответствует гидравлическому диаметру  $267 \text{ }\mu\text{m}$ . Длина входного канала равнялась 11.5 mm, выходного — 22.5 mm. Микроканал закреплялся на предметном столике инвертированного микроскопа Zeiss Axio Observer.Z с объективом  $5\times$  (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 съемки варьировалась в пределах от 5 до 150 Hz в зависимости от скорости потока. Режимы фиксировались за счет 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 относитель-

ной 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  $\sigma = 14 \text{ mN/m}$  — поверхностное натяжение между жидкостями,  $\rho$  — плотность жидкости,  $d$  — гидравлический диаметр канала,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости,  $U$  — среднерасходная скорость жидкости, величины с нижними индексами  $p$  и  $c$  относятся к парафиновому и касторовому маслу соответственно.

Для моделирования двухфазных течений в микроканале Т-типа использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках (VOF), которая хорошо зарекомендовала себя при расчете 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 алгоритм CSF [8], суть которого состоит во введении в уравнение движения дополнительной объемной силы

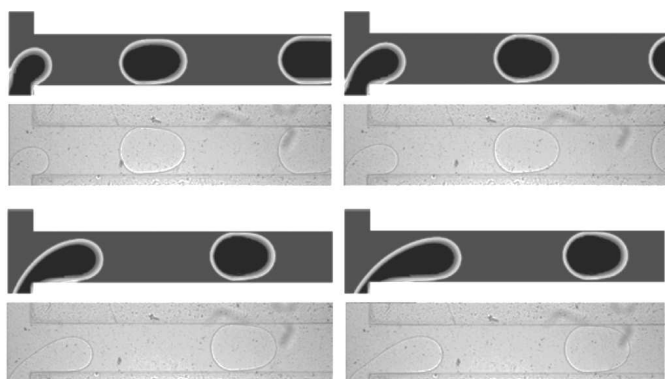
$$F_s = \sigma k \nabla F, \quad (1)$$

где  $k$  — кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали

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

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

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



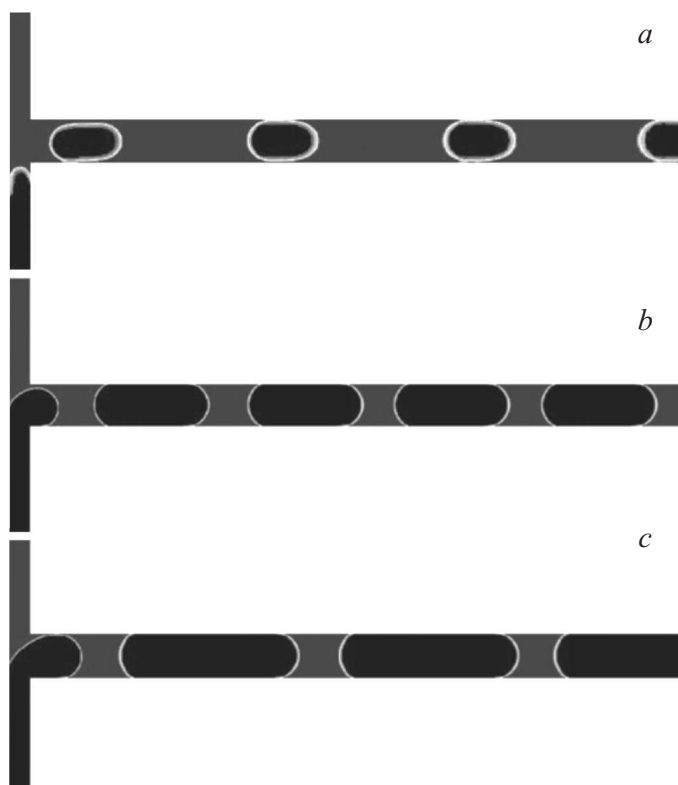
**Рис. 1.** Сравнение расчета и эксперимента на этапе формирования снаряда.  $Q_c = 0.1 \mu\text{l}/\text{min}$ ,  $Q_p = 0.05 \mu\text{l}/\text{min}$ .

При этом на твердой стенке величина вектора нормали определяется по краевому углу смачивания  $\theta$

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

$n_w$ ,  $\tau_w$  — нормальный и тангенциальный к стенке векторы.

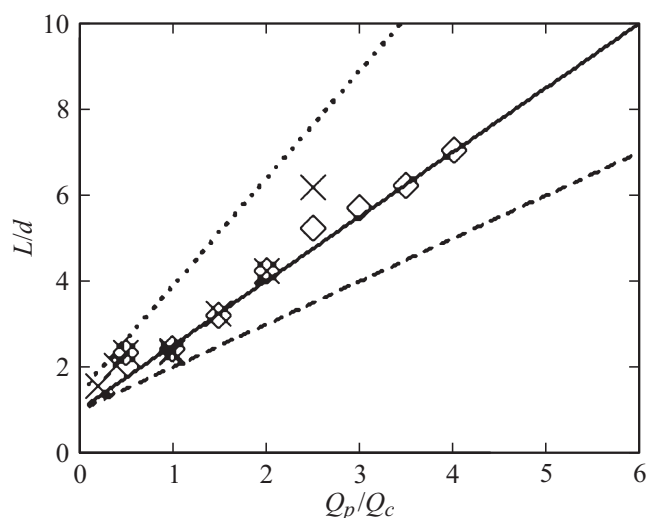
Методика решения уравнений и основные особенности численных исследований описаны в работах [9,10]. В расчетном исследовании было рассмотрено течение несмешивающихся жидкостей в Т-образном микроканале при фиксированном расходе касторового масла  $Q_c = 0.1 \text{ l}/\text{min}$  и варьируемом расходе парафинового масла  $Q_p = 0.05\text{--}0.25 \text{ l}/\text{min}$ . Геометрия расчетной области частично воспроизводила измерительный участок эксперимента. Размеры входных каналов составляли  $2400 \times 200 \times 200 \mu\text{m}$ , канала смешения —  $3000 \times 400 \times 200 \mu\text{m}$ . Через верхний канал подавалось касторовое масло, через нижний — парафиновое масло. Все физические свойства жидкостей соответствовали эксперименту. Для расчетов использовалась структурированная расчетная сетка, состоящая из 850 000 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.



**Рис. 2.** Результаты моделирования снарядного режима течения при фиксированном значении расхода касторового масла  $Q_c = 0.1 \mu\text{l}/\text{min}$  и варьируемом значении расхода парафинового масла  $Q_p$ : 0.05 (a); 0.2 (b) и 0.25  $\mu\text{l}/\text{min}$  (c).

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, что число Куранта меньше единицы.

В результате расчетов и экспериментов было определено, что снарядный режим течения для данной смеси в исследуемом мик-



**Рис. 3.** Зависимость безразмерной длины снаряда от отношения расходов. Крестики — экспериментальные данные, ромбы — данные расчета, сплошная кривая — предложенная корреляция, штриховая — корреляция [5], пунктирная — корреляция [6].

роканале существует в следующих диапазонах расходов жидкостей:  $0.05 < Q_c < 1.5 \mu\text{l}/\text{min}$ ,  $0.05 < Q_p < 0.5 \mu\text{l}/\text{min}$ , что соответствует безразмерным параметрам  $10^{-9} < We_c < 10^{-6}$  и  $10^{-9} < We_p < 10^{-7}$ .

Далее был подробно 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 ( $Q_c = 0.1 \mu\text{l}/\text{min}$ ,  $Q_p = 0.05 \mu\text{l}/\text{min}$ ). На рисунке приведена картина течения, соответствующая четырем последовательным моментам времени. Видна динамика образования и движение снарядов парафинового масла в касторовом масле. Хорошее качественное согласие экспериментальных фотографий и результатов моделирования наблюдается не только на этапе движения отдельных снарядов, но и на этапе их формирования, что наиболее важно. Формы границы раздела сред в сходные моменты времени в расчете и эксперименте очень хорошо согласуются, что свидетельствует о

хорошей разрешающей способности расчетного алгоритма. На рис. 2 представлены результаты моделирования при фиксированном значении расхода касторового масла  $Q_c = 0.1 \mu\text{l}/\text{min}$  и варьируемом значении расхода парафинового масла  $Q_p = 0.05, 0.2, 0.25 \mu\text{l}/\text{min}$ . Как видно, с увеличением расхода растет длина прибора парафинового масла. Длина приборов является важнейшей количественной характеристикой данного вида течения. Этот параметр важен для практики, поскольку от него зависят характеристики процессов теплообмена в такой смеси. Зависимость отношения длины прибора к гидравлическому диаметру канала от отношения расходов касторового и парафинового масла показана на рис. 3. Анализ полученных данных показал, что безразмерная длина приборов хорошо описывается следующей корреляцией:  $L/d = 1 + 1.45(Q_p/Q_c)$ . На рис. 3 также приведено сравнение расчета и эксперимента по длине прибора. В целом расхождение расчета и эксперимента не превышает 5%, что вполне приемлемо для такой сложной вычислительной задачи. Для сравнения на рисунок добавлены корреляции из работ [5] ( $L/d = 1 + Q_p/Q_c$ ) и [6] ( $L/d = 1.38 + 2.52Q_p/Q_c$ ). Как видно, эти зависимости тоже линейные. Их коэффициенты зависят от конкретных геометрических параметров микромиксера.

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

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

## Список литературы

- [1] *Tran T.M., Lan F., Thompson C.S., Abate R.* // Phys. D. Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 114004.
- [2] *Ахметов А.Т., Саметов С.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 3–28.
- [3] *Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 17. С. 1–8.
- [4] *Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V., Bilsky A.V.* // 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.* // Microfluidics and Nanofluidics. 2008. V. 5. P. 711–717.
- [7] *Hirt C.W., Nichols B.D.* // Comput. Phys. 1981. V. 39. P. 201–226.
- [8] *Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A.* // 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. V. 22. P. 61–71.
- [10] *Minakov A.V.* // Comput. Mathem. Mathem. Phys. 2014. V. 54. P. 1560–1570.