

УДК 533.6.011

Управление потоком «жидкость – жидкость» с магнитной дисперсной фазой в микроканале Т-типа за счет наложения постоянного магнитного поля^{*}

А.В. Ковалев^{1,2}, А.А. Ягодницына^{1,2}, А.В. Бильский¹

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

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: therfmig@gmail.com

Исследована возможность управления посредством постоянного магнитного поля двухфазным течением несмешивающихся жидкостей с высоким отношением вязкостей несущей и дисперсной фаз в микроканале Т-типа, когда дисперсная фаза является ферромагнитной жидкостью. Обнаружены эффекты разделения снарядов и микрокапель магнитной жидкости, а также возможность управления структурой параллельного течения несмешивающихся жидкостей. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования микрофлюидных систем с целью эффективной сортировки частиц, а также интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Ключевые слова: микроканалы, двухфазные течения, снарядный режим, ферромагнитная жидкость, поверхностно-активные вещества.

Введение

Микрофлюидные технологии с применением двухфазных и двухжидкостных течений в каналах с характерными размерами, составляющими десятки и сотни микрометров, активно развиваются в последнее время и уже показали свою эффективность для сортировки и анализа биологических объектов, химического синтеза веществ и наноматериалов, экстракции и пр. В перечисленных процессах важно контролировать режим течения и управлять структурой потока. Методы управления могут быть пассивными, основанными на изменении свойств жидкостей или геометрии микроканала, а также активными, включающими применение внешних сил [1]. Одним из активных методов управления является наложение магнитного поля на потоки с магниточувствительными веществами. Такой метод обладает рядом преимуществ — бесконтактностью, низким тепловыделением и простотой реализации. На практике в качестве среды, чувствительной к магнитному полю, часто применяются ферромагнитные жидкости [2].

Ферромагнитные жидкости представляют собой коллоидный раствор частиц диаметром 5–20 нм. Для стабилизации в жидкость добавляются поверхностно-активные

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (код проекта 23-79-01332).

вещества (ПАВ), что приводит к значительному снижению поверхностного или межфазного натяжения (до порядка 1 мН/м и менее). В микроканальных потоках «жидкость – жидкость» при большой разнице между вязкостью несущей и дисперсной фаз и относительно низком межфазном натяжении могут проявляться различные особенности, такие как отсутствие параллельного режима течения и срыв микрокапель с задней кромки снарядов дисперсной фазы в снарядном режиме течения (эффект tip-streaming) [3]. При этом использование водных ферромагнитных жидкостей малой вязкости в качестве дисперсной фазы в контакте с несущей фазой высокой вязкости (от 1 Па·с и более) остается практически неисследованным для микроканальных потоков.

Настоящая работа направлена на исследование возможности управления двухфазным течением несмешивающихся жидкостей с высоким отношением вязкостей несущей и дисперсной фаз в микроканале Т-типа, когда дисперсная фаза является ферромагнитной жидкостью. В работе продемонстрированы эффекты разделения снарядов и микрокапель магнитной жидкости, а также управление параллельным течением несмешивающихся жидкостей посредством постоянного магнитного поля. Полученные результаты важны для разработки микрофлюидных двухфазных устройств с использованием ферромагнитных жидкостей.

Экспериментальная установка

В качестве несущей жидкости использовался полидиметилсилоксан Sylgard 184 с вязкостью $\mu_c = 5,3$ Па·с и плотностью $\rho_c = 1,05$ г/см³. Дисперсная фаза представлена ферромагнитной жидкостью на водной основе, в качестве стабилизатора использовалось поверхностно-активное вещество на основе олеиновой кислоты с объемной концентрацией 12 %. Данному составу в отсутствие внешнего магнитного поля соответствовали следующие физические свойства: плотность $\rho_d = 1,16$ г/см³, вязкость $\mu_d = 6,5$ мПа·с, межфазное натяжение $\sigma = 5,8$ мН/м. Намагниченность насыщения составляла $M = 1\text{--}40$ кА/м.

В работе использовался микроканал прямоугольного сечения 200×400 мкм, выполненный из пластины полиметилметакрилата путем микрофрезерования и последующей склейки с другой пластиной из того же материала. Магнитное поле создавалось блоком постоянных неодимовых магнитов, изготовленных из материала N42H, с остаточной магнитной индукцией $B_r = 1,3$ Тл. Схема относительного расположения микроканала и магнита представлена на рис. 1. Блок магнитов устанавливался на микрофлюидном чипе (высота над микроканалом равнялась 2 мм), а его размеры составляли 10×8×5 мм.

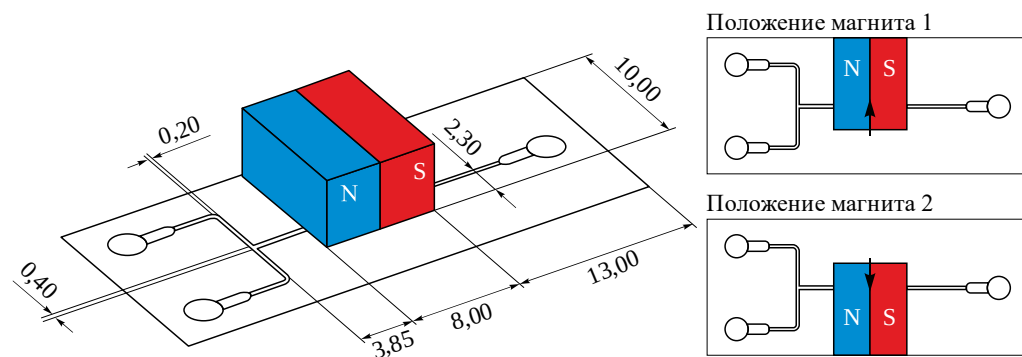


Рис. 1. Схема используемого в эксперименте рабочего участка.

Стрелками указано направление электромагнитной силы, действующей на ферромагнитную жидкость в канале; размеры указаны в миллиметрах.

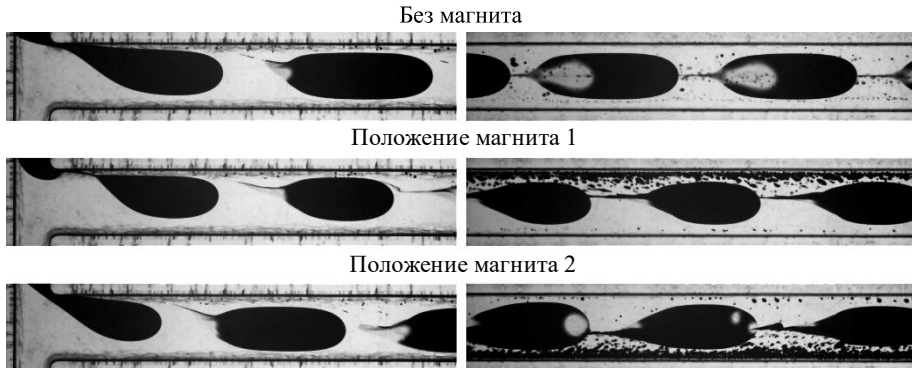


Рис. 2. Снарядный режим течения при расходах фаз $Q_c = 0,5$ мкл/мин и $Q_d = 0,5$ мкл/мин для случаев с наложением внешнего магнитного поля и без.
Левый столбец — Т-область, правый — 15 мм от Т-области.

Исследовалось два варианта расположения магнита (положения 1 и 2 на рис. 1), в которых градиент магнитного поля (электромагнитная сила) был направлен в противоположные стороны относительно оси микроканала.

Микроканал фиксировался на предметном столике микроскопа Zeiss Axio Observer Z1 с объективами, имеющими увеличение 5х и 10х, и освещался галогенной лампой, встроенной в микроскоп. Расходы дисперсной Q_d и несущей Q_c фаз задавались шприцевым насосом KDS Gemini 88. Поток визуализировался в проходящем свете, а изображения регистрировались скоростной камерой PCO 1200 hs.

Результаты

Поток «ферромагнитная жидкость – полидиметилсилоксан» был визуализирован в области формирования течения — в Т-образном соединении и на расстоянии 15 мм от него. В потоке без наложения внешнего магнитного поля было обнаружено два вида течения — снарядный режим со срывом микрокапель (рис. 2) и непрерывный волновой режим (рис. 3). Срыв микрокапель в снарядном режиме обусловлен комбинированным эффектом низкого отношения вязкостей фаз $\lambda = \mu_d / \mu_c \sim 10^{-3}$ и наличием существенной концентрации ПАВ, которая приводит к понижению межфазного натяжения и увеличению числа

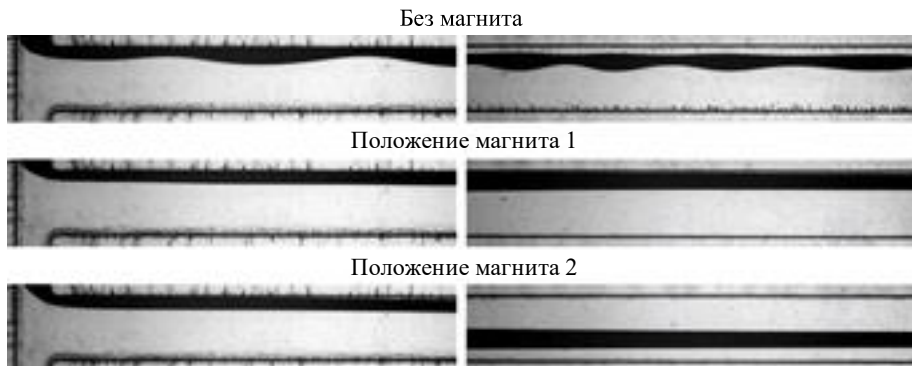


Рис. 3. Непрерывный волновой режим течения при расходах фаз $Q_c = 0,5$ мкл/мин и $Q_d = 15$ мкл/мин для случаев с наложением внешнего магнитного поля и без.
Левый столбец — Т-область, правый — 15 мм от Т-области.

капиллярности [4]. Кроме того, наблюдалось образование каверны в хвостовой части снаряда, которая увеличивалась вниз по потоку. Данный эффект связан с адсорбцией ПАВ в задней части снаряда [5].

При наложении внешнего магнитного поля была обнаружена интенсификация отрыва микрокапель с задней кромки снарядов, их количество на расстоянии 15 мм от Т-области заметно возрастало. При этом оторвавшиеся капли фокусировались магнитным полем вблизи одной из боковых стенок канала в соответствии с направлением градиента магнитного поля.

В волновом непрерывном режиме жидкости текли параллельно. Без наложения внешнего магнитного поля по межфазной поверхности распространялись волны, не нарушающие ее целостности. В обоих вариантах расположения магнита наблюдалась стабилизация межфазной границы и затухание соответствующих волн. Поток дисперсной фазы, оставаясь неразрывным, прижимался при этом к боковой стенке либо, наоборот, отслаивался и сдвигался в сторону противоположной стенки в зависимости от направления внешней силы.

Данный эффект может быть использован для активного управления потоком дисперсной фазы без нарушения его целостности, что может найти применение в аналитических системах для химии и биологии.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияния внешнего магнитного поля на потоки несмешивающихся жидкостей с магнитной дисперсной фазой для случая высокой вязкости несущей фазы и низкого межфазного натяжения. Обнаружены эффекты магнитной фокусировки как микрокапель феррофлюида, так и его струи, текущей непрерывно. Показано, что фокусировка происходит в соответствии с направлением электромагнитной силы, действующей на ферромагнитные частицы, что может быть использовано для создания микрофлюидных устройств с активным управлением за счет внешнего магнитного поля.

Список литературы

1. Zhu P., Wang L. Passive and active droplet generation with microfluidics: a review // *Lab Chip*. 2017. Vol. 17, No. 1. P. 34–75.
2. Yang R., Hou H., Wang Y., Fu L. Micro-magnetofluidics in microfluidic systems: a review // *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 2016. No. 224. P. 1–15.
3. Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V. Flow hydrodynamics of immiscible liquids with low viscosity ratio in a rectangular microchannel with T-junction // *Chemical Eng. J.* 2018. No. 352. P. 120–132.
4. Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Экспериментальное исследование дисперсных потоков в микроканалах для 3D-печати композитных материалов // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 6. С. 913–920.
5. Olbricht W.L., Kung D.M. The deformation and breakup of liquid drops in low Reynolds number flow through a capillary // *Physics of Fluids A*. 1992. Vol. 4, No 7. С. 1347–1354.

*Статья поступила в редакцию 26 марта 2024 г.,
после доработки — 7 июня 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*