УДК 532.6:532

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА

Ягодницына А.А., Ковалев А.В., Бильский А.В.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-08-31502 мол_а, № 14-08-00961 а

АННОТАЦИЯ

Выполнена визуализация режимов течения жидкость-жидкость в прямом микроканале прямоугольного сечения, а также в области натекания жидкостей в микроканале Т-типа для трех наборов несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами: керосин – вода, парафиновое масло – вода и парафиновое масло – касторовое масло. Получены режимы течения в широком диапазоне чисел Вебера, включающем режимы с доминированием капиллярных сил и сил инерции. Анализ полученных режимных карт показал, что обобщение результатов возможно при использовании модифицированного безразмерного критерия – числа Вебера помноженного на отношение вязкостей двух жидкостей.

ВВЕДЕНИЕ

Течение двухкомпонентных несмешивающихся жидкостей в микроканалах встречаются в различных приложениях, таких как получение эмульсий [1], нитрование [2], экстракция [3] и других биохимических приложений [4]. Микроканальные устройства обеспечивают более высокие скорости тепло- и массообмена, а реакции в них можно реализовать в виде непрерывного и при этом более безопасного процесса. При этом затраты энергии на создания единицы площади контакта фаз в микроканальных устройствах минимальны по сравнению с другими альтернативными способами [5]. Перспективными являются также системы для биологических анализов, основанные на микрофлюидных устройствах, эффективность которых может на порядки превышать традиционные подходы [6].

Очевидно, что конечный результат конкретного технологического процесса определяется режимами течения двухкомпонентной жидкости в канале. Основной сложностью, на настоящий момент, является отсутствие обобщения научных результатов, позволяющего однозначно предсказать режим и параметры потока двухкомпонентной жидкости, которые определяются большим числом факторов, влияющих на процесс. В частности в литературе не представлено исчерпывающее исследование таких параметров, как плотность, вязкость, межфазное натяжение. Исследование влияния контактного угла смачивания также отсутствует. Более того, в большинстве работ одна из жидких фаз не смачивает канал, что делает ее дисперсной фазой. Это, с одной стороны, позволяет проводить аналогии с газожидкостными потоками в каналах. С другой стороны, ситуации, когда обе жидкости смачивают канал остаются очень слабо изученными.

Данная работа посвящена изучению режимов течения несмешивающихся жидкостей в прямых микроканалах прямоугольного сечения. Эксперименты были проведены для нескольких наборов жидкостей с различными свойствами (вязкость, плотность, межфазное натяжение, контактный угол смачивания). Представлены результаты визуализации течения, результаты измерения скорости и размера снарядов. Данные обобщены в режимные карты.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рабочими жидкостями были вода, керосин, парафиновое масло и касторовое масло. Не все физические характеристики органических жидкостей регламентируются стандартами производства и имеют иногда большие диапазоны разрешенных отклонений. Поэтому плотность и вязкость рабочих жидкостей были измерены непосредственно. Для измерения вязкости использовались вискозиметры капиллярного типа для

воды и керосина и ротационного типа для парафинового и касторового масла (погрешности 1% и 3%, соответственно). Плотность измерялась взвешиванием известного объема жидкости (погрешность измерения 1%). Поверхностное натяжение жидкостей и межфазное поверхностное натяжение измерялись на приборе DSA. Полученные физические свойства жидкостей представлены в Таблице 1.

Таблица 1 Свойства жидкостей

Свойство	Керосин	Вода	Парафин. масло	Касторовое масло
Плотность, кг/м^3	745	997	845	935
Вязкость, мПа*с	0.820	0.894	110	650
Межфазное натяжение, мН/м	45	48	14	

Микроканал был изготовлен MicroLiquid (Испания) из полимера SU-8. Специальная обработка каналов гидрофобными или гидрофильными веществами не проводилась. Размер входных микроканалов 200x200 мкм, размер выходного канала 200x400 мкм. Длина выходного канала была 22,5 мм, входного 11,5 мм.

Для регистрации картин течения использовалась скоростная камера pco.1200 hs, подключенная к инвертированному микроскопу Zeiss Axio Oberver.Z1 с объективом 5x. Частота съемки варьировалась от 5 до 1000 Гц. Освещение потока осуществлялось с помощью галогенной лампы. Течение было организовано шприцевым насосом KDS Gemini 88 с двумя независимыми шприцами. В ходе визуализации картины течений фиксировались в двух областях микроканала: в области натекания двух жидкостей и до 15 мм от начала канала, что составляет 56 калибров канала. Фотография экспериментальной установки представлена на Рис. 1.

Рис. 1 Фотография экспериментальной установки для визуализации режимов течения

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ РЕЖИМОВ

Для каждого набора жидкостей была проведена визуализация режимов течения в следующих диапазонах чисел Вебера:

- вода – керосин $2{,}2\cdot10^{-8}<We_w<6{,}4$ и $7{,}7\cdot10^{-7}<We_k<4{,}8$;
- вода – парафиновое масло $2{,}2\cdot10^{-8}<We_w<2{,}2$ и $1{,}8\cdot10^{-8}<We_p<0{,}01$;
- парафиновое масло – касторовое масло $1{,}7\cdot10^{-9}<We_p<0{,}01$ и $2\cdot10^{-9}<We_c<0{,}01$.

Для малых чисел Вебера по керосину $10^{-6}<We_k<10^{-2}$ и по воде $10^{-8}<We_w<10^{-3}$ характерен снарядный режим течения (снаряды воды в несущей фазе - керосине) (Рис. 2b). При увеличении расхода воды реализуется скользяще-снарядный режим течения (скользящие снаряды керосина в несущей фазе - воде) (Рис. 2d). Параллельный режим течения существует в широком диапазоне чисел Вебера $10^{-4}<We_k<1$ и по воде $10^{-4}<We_w<1$ (Рис. 2a). При большом расходе керосина и малом расходе воды реализуется дисперсный (капельный) режим течения с малой концентрацией полидисперсных капель воды (Рис. 2c). Ривулетный режим течения (Рис. 2e) существует при больших числах Вебера одной из жидкостей. Причем ривулет (ручеек) может быть как керосиновый, так и водяной, при этом он является стационарным. Мы считаем, что данный режим течения реализуется в области существования кольцевого режима течения, который не наблюдался в наших экспериментах, поскольку обе жидкости смачивают канал. Наличие ривулетного течения вместо кольцевого является одной из особенностей данных экспериментов. При числах Вебера $We_k \sim We_w \sim 1$ был обнаружен новый режим параллельного течения, при котором форма межфазной границы имеет периодическую волновую структуру (Рис. 2f). При этом межфазная граница является стационарной не только в области натекания жидкостей, но и в конце канала. Режим является стационарным до $We_w<6$. При дальнейшем увеличении расходов жидкости течение теряет устойчивость. Из-за характерной формы межфазной границы данному режиму было дано название «серпантинный».

Для каждой пары жидкостей были построены карта режимов по числам Вебера. Сравнение трех карт режимов для течений керосин-вода, парафиновое масло-вода и парафиновое масло – касторовое масло (Рис. 3) показало, что карты являются подобными. Для всех трех комбинаций присутствуют параллельный, снарядный, скользяще-снарядный режимы течения. Их относительное расположение на картах является подобным для выбранных нами неслучайным образом осей абсцисс и ординат. Отсутствие произвола в выборе чисел Вебера для осей абсцисс и ординат может означать, что даже если обе

жидкости смачивают канал, в конкретной их комбинации одна из жидкостей проявляет свойства дисперсной фазы (отложенная по оси ординат), а вторая – несущей (ось абсцисс).

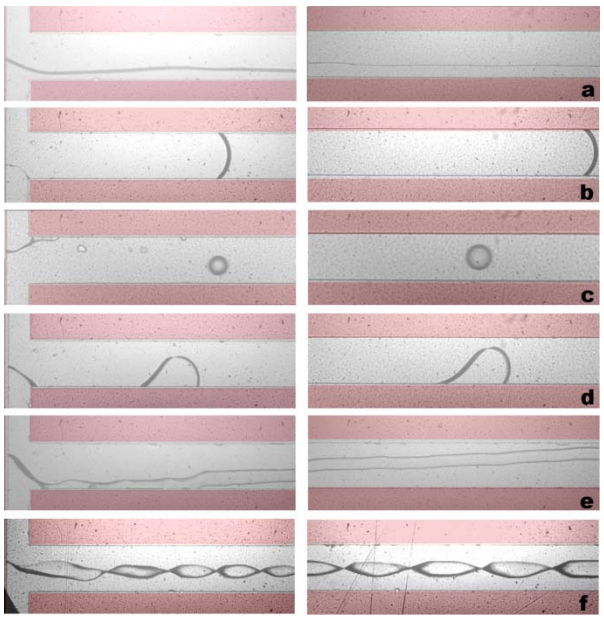

Рис. 2 Визуализация режимов течения керосин-вода в начале и конце канала a) параллельный режим We_k = 1.1e-2, We_w = 2.4e-6 b) снарядный режим We_k = 1.1e-4, We_w = 4e-7 c) капельный режим We_k = 1.1, We_w = 2.6e-5 d) скользяще-снарядный режим We_k = 1.1e-4, We_w = 0.43 e) ривулетный режим We_k = 1.1e-2, We_w = 4.1 f) серпантинный режим We_k = 3.1, We_w = 4.1

В частности это может приводить к тому, что такие режимы, как капельный и скользяще-снарядный могут существовать только для одной из жидкостей в паре. Именно для этих режимов силы межфазного взаимодействия являются доминирующими. Напротив, для параллельного или ривулетного режима течений, где силы межфазного взаимодействия не являются определяющими, ни одна из фаз не может быть названа дисперсной.

Сравнивая полученные карты режимов для разных наборов жидкостей, мы видим подобие по относительному расположению режимов на карте. Однако видно, что границы режимов сдвинуты в область меньших чисел Вебера для течений парафиновое масло-вода и парафиновое масло – касторовое масло по сравнению с течением керосин-вода. То есть карты, построенные по числам Вебера, не являются универсальными. Действительно, число Вебера не учитывает вязкость жидкостей и смачиваемость каналов, которые, очевидно, являются важными параметрами.

Карты же, построенные по приведенной скорости, вообще не учитывают ни один из параметров, отвечающих за механизмы образования капель и снарядов в микроканале, таких как отношение вязких сил, сил поверхностного натяжения и инерционных сил и не могут претендовать на универсальность.

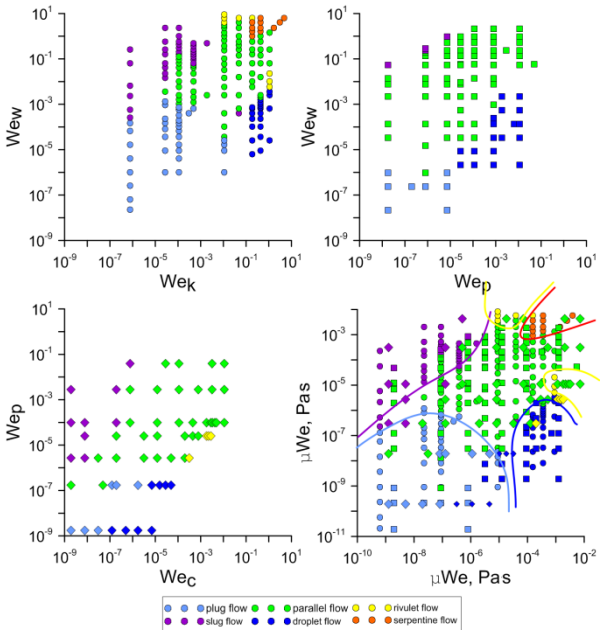

Рис. 3 Карты режимов течения. Вверху слева: керосин-вода, справа: парафиновое масло-вода. Внизу слева: парафиновое масло – касторовое масло, справа: сравнение карты режимов для систем керосин-вода (круглые маркеры), парафиновое масло-вода (квадратные маркеры) и парафиновое масло – касторовое масло (ромбы) в координатах u*We.

Для того чтобы обобщить полученные результаты мы изменили безразмерный параметр для построения карты режимов. Новый параметр получен умножением числа Вебера на вязкость жидкости и имеет размерность Па*с. На Рис. 3 представлена общая карта режимов для трех пар жидкостей, построенная в координатах u*We. Видим, что в целом области существования всех режимов для всех пар жидкостей совпадают. Таким образом, можно заключить, что новый параметр u*We обладает большей степенью универсальности, чем просто We.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена визуализация режимов течения жидкость-жидкость в прямом микроканале прямоугольного сечения, а также в области натекания жидкостей в микроканале Т-типа. Для трех наборов несмешивающихся жидкостей керосин – вода, и парафиновое масло – вода и парафиновое масло – касторовое масло получены режимы течения в широком диапазоне чисел Вебера, включающем режимы с доминированием капиллярных сил и сил инерции. Выбор жидкостей обусловлен их различными физическими свойствами. Вода и керосин обладают близкими плотностями и вязкостями. Парафиновое масло в комбинации с водой дает течение вязкой и невязкой жидкостей. Парафиновое и касторовое масло отличаются по вязкости между собой и на два порядка более вязкие, чем вода и керосин. При этом, все жидкости в большей или меньшей степени смачивают канал. Были зафиксированы основные режимы течения, а именно: параллельный (расслоенный), в том числе, с волновой границей; снарядный; скользящеснарядный; дисперсный (капельный); ривулетный.

Следствием, того, что обе жидкости смачивают канал этого, является существование ривулетного и отсутствие кольцевого режима течения. При больших числах Вебера был обнаружена новая разновидность параллельного режима течения, в котором форма межфазной границы имеет периодическую волновую структуру. При этом межфазная граница является стационарной не только в области натекания жидкостей, но и в конце канала. Данному режиму было дано название «серпантинный» режим.

Для всех трех наборов жидкостей построены карты режимов в координатах чисел Вебера. Показано, что взаимное расположение областей существования разных режимов совпадает. При этом выбор осей для построения карты режимов не может быть произвольным. По оси абсцисс должна быть отложена несущая фаза (та, которая лучше смачивает канал), а по оси ординат – дисперсная. Получившиеся режимные карты не могут быть обобщены путем простого наложения. Для построения обобщенной карты режимов нами было предложено использовать новый размерный критерий, полученный умножением числа Вебера на вязкость жидкости, имеющий размерность Па*с. Получившаяся карта режимов демонстрирует удовлетворительное совпадение всех режимов для всех пар жидкостей. Таким образом, можно заключить, что новый параметр u*We обладает большей степенью универсальности, чем просто число Вебера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christopher G.F. and Anna S.L. (2007) Microfluidic methods for generating continuous droplet streams, Journal of Physics D – Applied Physics, 40, R319-R336.
2. Ducry L. and Roberge D.M. (2005) Controlled Autocatalytic Nitration of Phenol in a Microreactor, Angewandte Chemie International Edition, 44, 7972 –7975.
3. Zhao Y., Chen G., Yuan Q. (2007) Liquid–liquid two-phase mass transfer in the T-junction microchannels AIChE J., 53, pp. 3042–3053.
4. Benavides, J., Aguilar, O., Lapizco-Encinas, B.H., Rito-Palomares, M. (2008) Extraction and purification of bioproducts and nanoparticles using Aqueous Two-Phase Systems Strategies, Chemical Engineering & Technology, 31(6) pp. 838-845.
5. Kashid, M.N., Agar, D.W. (2007) Hydrodynamics of liquid–liquid slug flow capillary microreactor: flow regimes, slug size and pressure drop, Chemical Engineering Journal 131, pp. 1–13.
6. Tran T.M., Lan F., Thompson C. S. and Abate A. R (2013) From tubes to drops: droplet-based microfluidics for ultrahigh-throughput biology, J. Phys. D: Appl. Phys., 46, 11, 114004