

УДК 66.071.5+532.529

© Р. Ш. Абиев, С. Д. Светлов

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В КАНАЛАХ МИКРОФЛЮИДНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СМЕСИТЕЛЕЙ (ДИСПЕРГАТОРОВ) СООСНОГО И СООСНО-СФЕРИЧЕСКОГО ТИПОВ

В статье описаны результаты экспериментального исследования гидродинамических режимов работы микро-масштабных смесителей-диспергаторов соосного и соосно-сферического типов. Построены карты режимов течений в канале диаметром 2 мм, оснащенный такими смесителями. Показано, что учет геометрии соосно-сферического смесителя позволяет совместить линии перехода режимов с таковыми для соосного смесителя. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися данными исследований классических смесителей.

Кл. сл.: микрореактор, микрофлюидика, диспергатор, снарядный режим, микромиксер, карта режимов

ВВЕДЕНИЕ

Развитие тонких химических технологий, а также аналитических приборов последних лет привело к появлению особых типов оборудования — микроаппаратов (для проведения технологических процессов) и сходных с ними по принципу действия микрофлюидных устройств (для аналитических целей). Чаще всего эти устройства применяются для процессов в системах жидкость—жидкость (капельная микрофлюидика, получение биотоплива и др.) и жидкость—газ (сегментация анализируемых проб, проведение реакций гидрирования и др.).

Основной особенностью микрореакторов является наличие упорядоченного режима течения в них при реализации так называемого тейлоровского (сегментированного, снарядного) режима. Этот режим является самым эффективным с точки зрения массообмена благодаря отличному перемешиванию как в дисперсной фазе, так и в сплошной. На сегодняшний день моделированию и поддержанию снарядного режима течения посвящено большое количество работ (см., например, [1–6]).

Как известно, режим течения в микроканалах зависит от диаметра канала, физических свойств фаз, смачиваемости поверхности канала, расхода фаз, конфигурации смесителя (диспергатора). Многие исследования направлены на определение области расходов устойчивого снарядного режима в зависимости от диаметра канала и свойств фаз [7, 8].

Однако до сих пор, на наш взгляд, проблеме влияния формы и размеров микросмесителя на режим течения многофазной среды в мини- и микроканалах, уделено недостаточно внимания.

В большинстве работ используются так называемые Т-образные смесители, значительно реже рассматриваются Х- и Y-образные. По нашему мнению, все перечисленные конфигурации не являются оптимальными. Для поиска оптимальной геометрии смесителя (диспергатора) необходимо целенаправленное создание условий, способствующих формированию элементов структуры течения (капель, пузырей) с заданными размерами и с заданной периодичностью.

Действительно, в рамках существующей технологической либо измерительной задачи, в которой известны реагирующие вещества, необходимая скорость течения смеси по каналам для обеспечения заданной производительности, мы можем создавать снарядный режим течения только посредством особой геометрической конфигурации диспергатора.

Некоторые исследования [7] показывают, что область существования тейлоровского режима тем шире, чем меньше диаметр канала, что объясняется усилением капиллярных эффектов. В действительности, уменьшение поперечного сечения вызывает увеличение общих затрат, связанных с разделением образующихся смесей. Хотя в настоящее время проблемы разделения в микромасштабах считаются решенными, это все же увеличивает затраты необходимостью установки и обслуживания сепарационного оборудования.

В мини- (или милли-) каналах проблема создания снарядного режима является актуальной на сегодняшний день. Согласно [7], критическим размером для милликаналов является диаметр 2 мм. В таких каналах образуются достаточно

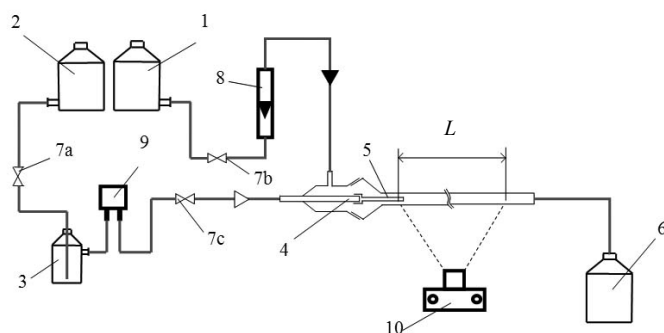


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1, 2 — емкости с дистиллированной водой; 3 — ресивер для воздуха; 4 — исследуемый смеситель; 5 — сопло для ввода газа; 6 — емкость-сборник; 7a(b, c) — вентили; 8 — ротаметр; 9 — расходомер для газа; 10 — цифровая фотокамера

грубые (с позиции размеров капель или пузырей) смеси, хорошо разделяемые отстаиванием, и в то же время проявляются основные преимущества микроакторной техники.

Целью данной работы являлась разработка новых типов смесителей (диспергаторов) — соосного и соосно-сферического — и их сравнительное исследование с позиций обеспечения тейлоровского (снарядного) режима течения.

ПРИБОРЫ И МАТЕРИАЛЫ

Схема установки и описание ее принципа действия

Для сравнения гидродинамических характеристик смесителей была спроектирована и изготовлена лабораторная установка, представленная на рис. 1. Схема исследованных смесителей показана на рис. 2.

Сплошная фаза (дистиллированная вода) подавалась в исследуемый смеситель 4 из емкости 1

в боковой патрубке (в кольцевой канал). Расход воды определялся с помощью ротаметра 8 и регулировался вентилем 7b. Дисперсная фаза (воздух) подавалась из ресивера 3, давление в котором создавалось столбом воды из емкости 2, расход которой регулировался с помощью вентиля 7a. Расход воздуха регулировался вентилем 7c и определялся с помощью расходомера 9 типа Honeywell AWM 43300V, подключенного к АЦП L-Card E14-140. Воздух подавался в центральное сопло 5, выполненное в виде иглы с наружным диаметром 0.47 мм. В смесителе происходило образование пузырей, от размеров и периодичности отрыва которых зависел режим течения газожидкостной смеси, тип которого определялся по фотоснимкам, фиксируемым при помощи 10, цифровой фотокамеры высокого разрешения Cannon 20D, на участке наблюдения длиной $L = 100$ мм. После прохождения канала газожидкостная смесь собиралась в емкости 6. Диаметр канала (стеклянной трубки) составлял $d = 2$ мм, а диаметр сферического расширения — $ds = 2.5$ мм.

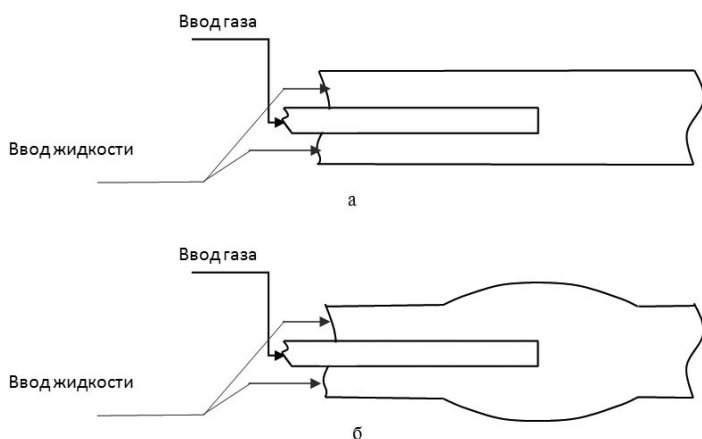


Рис. 2. Схемы исследованных диспергаторов. а — соосный (CC); б — соосно-сферический (CS)

Методика измерений

Для построения карты режимов течений требовалось определить режим течения в канале (выходные переменные) при различных соотношениях расходов фаз (входные переменные) и известных свойствах сред и геометрии микроканала (фиксированные параметры). Для этого при постоянном расходе жидкости варьировали расход газовой фазы и для каждого соотношения расходов производили фотографирование режима течения в канале. При помощи вентиля 7а устанавливали заданный расход воды в ресивер 3. Вентилем 7с задавали минимальный расход воздуха. При каждом фиксированном расходе воздуха расход воды изменяли в пределах от 0 до 100 делений ротаметра с шагом в 10 делений. По полученным фотографиям определяли режим течения при соответствующем соотношении расходов. Полученные данные наносили на диаграмму, по осям которой откладывали скорости фаз.

Физические свойства используемых фаз при рабочих условиях представлены в таблице.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение карт режимов соосных смесителей

Построенные карты режимов для соосных смесителей представлены на рис. 3 и 4, на которых указаны области существования снарядного режима течения. Точками различной формы обозначены соответствующие режимы течения. Расход газа измерялся при помощи электронного расходомера Honeywell, объем полученных данных достиг более 60 000 точек. После прореживания данных были отобраны и представлены точки, отражающие размер области каждого из режимов. Фотографии соответствующих режимов течений представлены на рис. 5.

Физические свойства используемых фаз при рабочих условиях

Фаза	Температура t , °C	Плотность ρ , кг/м ³	Динамическая вязкость μ , мПа·с	Поверхностное натяжение на границе фаз σ , Н/м
Вода	18	998	1.002	0.07275
Воздух		1.258	0.01812	

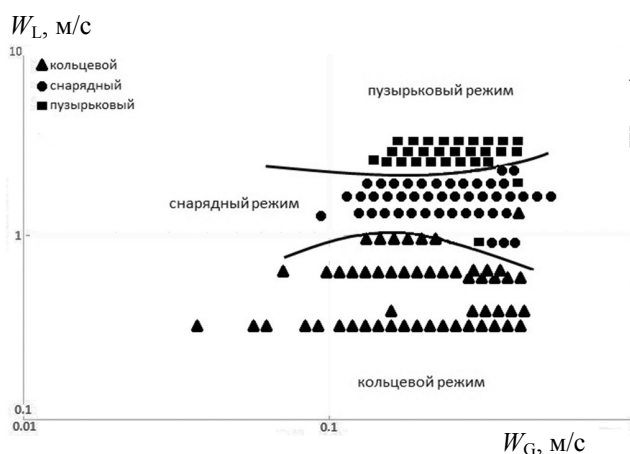


Рис. 3. Карта режимов течения в канале с соосным цилиндрическим смесителем

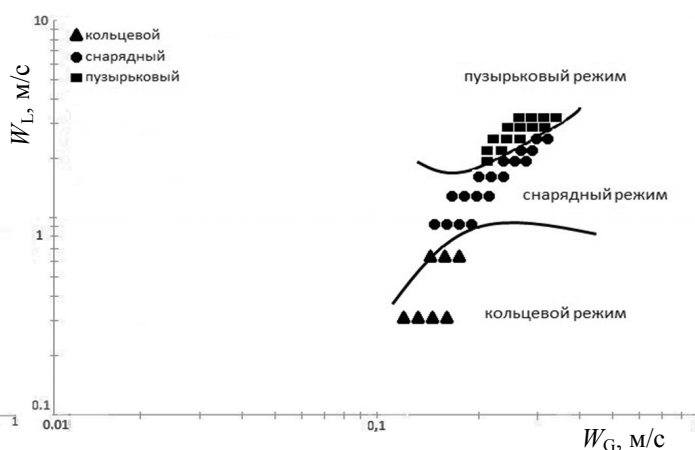


Рис. 4. Карта режимов течения в канале с соосным смесителем со сферическим расширением

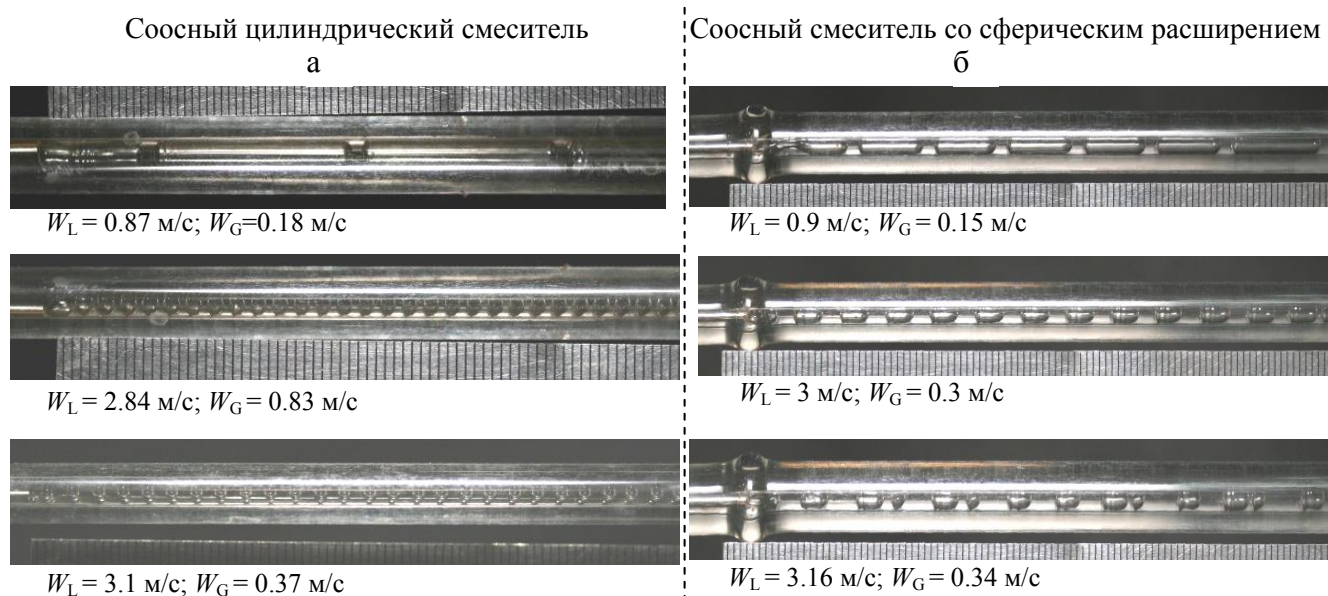


Рис. 5. Фотографии двухфазного течения в канале.
а — течение в соосном цилиндрическом смесителе; б — течение в соосном смесителе со сферическим расширением

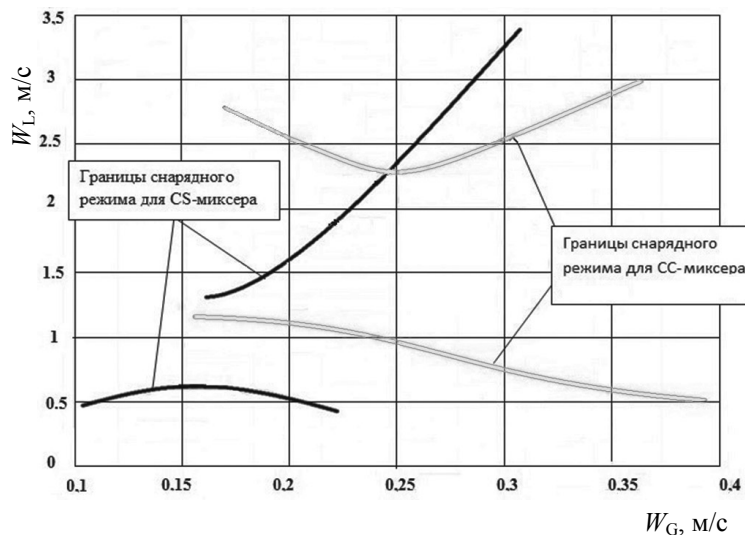


Рис. 6. Сравнение карт режимов соосных CS и CC смесителей.

W_G , W_L — приведенные скорости для газовой и жидкой фаз соответственно

Приведенные скорости течения фаз были рассчитаны по формуле

$$W_i = \frac{Q_i}{S_j}, \quad (1)$$

где W_i — скорость i -й фазы, м/с; Q_i — расход i -й фазы, м³/с; S_j — площадь сечения, м²; $i = L, G$ — для жидкой и газовой фаз соответственно; $j = CC, CS$ — для сечения канала без расширения и со сферическим расширением соответственно.

На рис. 6 приведено сравнение областей снарядного режима течения для соосного смесителя

(CC — coaxial cylindrical) и соосного смесителя со сферическим расширением (CS — coaxial spherical), из которого следует, что границы режимов для смесителей существенно различаются. Как видно из рис. 6, границы снарядного режима CS-миксера шире в областях высоких и низких скоростей воздуха. В диапазоне средних скоростей наблюдается почти одинаковый размер области снарядного режима. Проанализируем полученные результаты.

В области низких приведенных скоростей жидкой и газовой фаз ($W_G = 0.15$ – 0.2 м/с, $W_L = 0.5$ –

1 м/с) в СС-миксере наблюдается снарядный режим течения с длинными снарядами (около 30 мм, см. рис. 5), тогда как в СS-миксере снаряды значительно короче (до 12 мм). При еще более низких скоростях воздуха снарядный режим в канале с СС-миксером переходит в снарядно-кольцевой, но в СS-миксере все еще сохраняется снарядный режим с разделенными пузырями газа. Это свидетельствует о наличии дополнительного разрушающего воздействия на струи газа, истекающего из сопла в СS-миксере. Однако данный механизм требует дальнейшего детального изучения и моделирования.

Рассматривая область больших приведенных скоростей, следует отметить, что признаком перехода от пузырькового к снарядному режиму по мере роста размера пузырей считался момент касания сферическим пузырьком стенок капилляра, т. е. критерием перехода являлось равенство диаметра пузырька диаметру капилляра.

Мы предположили, что смещение верхней границы снарядного режима происходит из-за снижения фактической приведенной скорости фаз в области сферического расширения потока. Для проверки этого предположения скорости фаз для СС-миксера были приведены к диаметру сферического расширения в СS-миксере:

$$\bar{W}_{cc} = \frac{W_{cc} \cdot S_{cc}}{S_{cs}}, \quad (2)$$

где W_{cc} — скорость, приведенная к диаметру

цилиндрического канала, м/с; \bar{W}_{cc} — скорость, приведенная к диаметру сферического расширения, м/с. Путь "миграции" некоторых точек границы снарядного и пузырькового режимов согласно формуле (1) показан на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что точки границы снарядного и пузырькового режимов для СС-миксера после пересчета почти полностью совпадают с границей для СS-миксера, что подтверждает наше предположение.

Однако для еще больших расходов газовой фазы зона снарядного режима СS-миксера расширяется в область больших расходов жидкости. Объяснение этому можно найти в механизме образования пузырей, описанном в [8]. Согласно этому механизму, при образовании упорядоченного снарядного режима фазы поочередно перекрывают сечение канала, что вызывает отрыв пузырей. При этом объем пузыря, перекрывшего сечение канала, определяет объем образованного из него снаряда. В [8] такой механизм рассмотрен для СС-миксера и совпадает с полученными нами данными.

Рассмотрим действие этого механизма в СS-миксере. Схема образования пузыря представлена на рис. 8. Стадия роста пузыря продолжается до касания им стенок. В области сферического расширения этот процесс протекает дольше, при этом объем образовавшегося пузыря больше, чем при его формировании в гладком канале. Вследствие этого переход от снарядного режима течения к пузырьковому в СS-миксере происходит при больших расходах фаз, чем в СС-миксере.

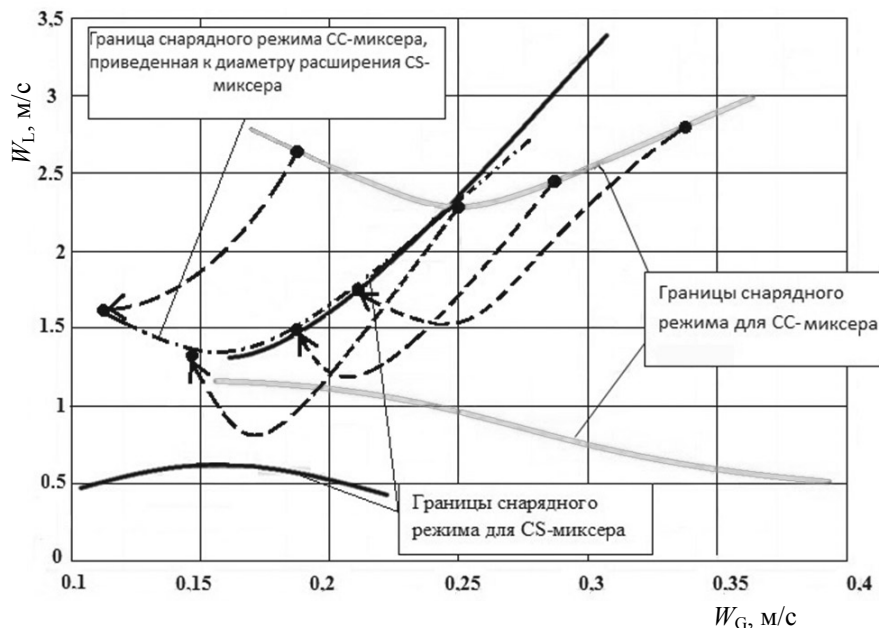


Рис. 7. Схема смещения приведенной границы снарядного режима СС-миксера

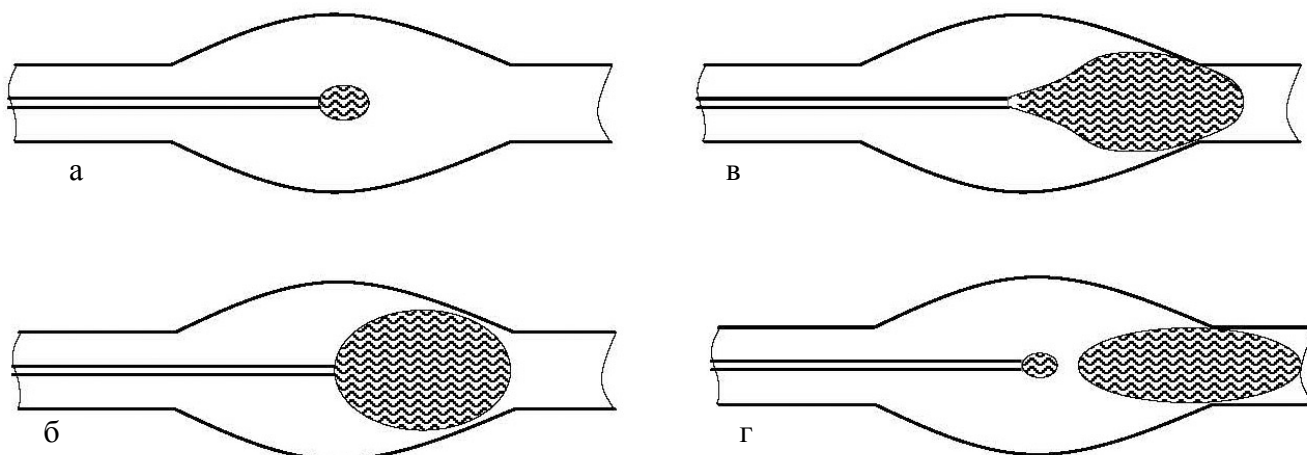


Рис. 8. Схема образования пузыря в CS-миксере.
а — зарождение; б — рост; в — касание стенок; г — отрыв

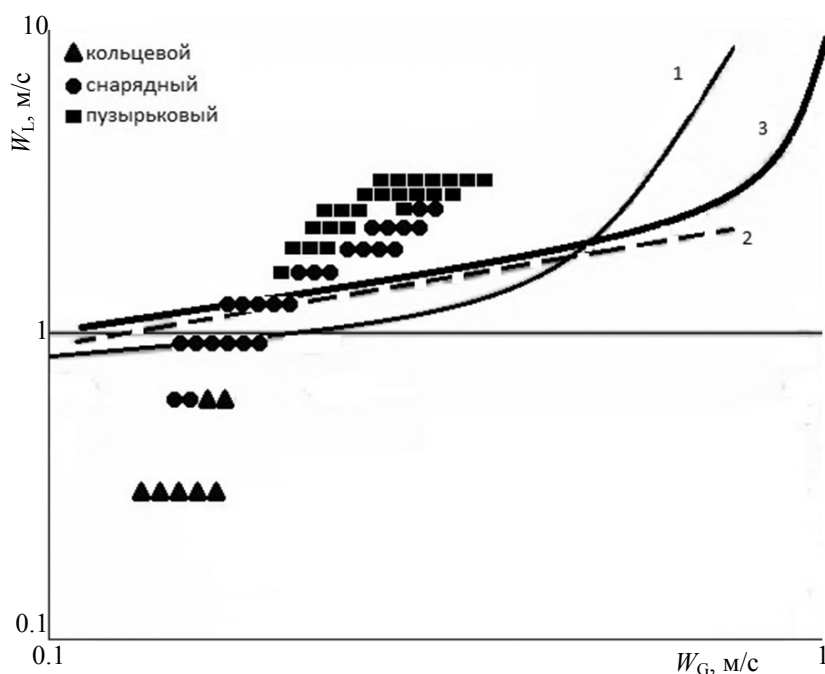


Рис. 9. Сравнение карты режимов течений CS-миксера с данными исследований классических смесителей.

1 — из [10], 2 — из [12], 3 — из [11]

Сравнение карт режимов классических смесителей и соосного сферического

Результаты сравнения CS-миксера с классическими смесителями (Т-, Y-, X-образными) путем наложения карт режимов друг на друга представлены на рис. 9. Анализ графиков на рис. 9 позволяет говорить о расширении интервала снарядного режима вдоль оси приведенной скорости жидкости в область больших скоростей. Однако границы, приведенные в работах [10–12] и указанные

на рис. 9, характеризуют границы не только снарядного режима, но и других, перемежающихся (переходных, *intermittent*) подрежимов. В связи с этим наблюдается сильное различие между нижней границей перемежающихся режимов и снарядным режимом. К сожалению, уточнение этих границ требует дополнительного исследования, однако уже сейчас на основании полученных данных, можно заключить: CS-миксер обладает положительным эффектом на диапазон расходов, при котором наблюдается снарядный режим течения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального исследования смесителей построены карты режимов течения в канале, оснащённом СС- и СS-миксерами. Проведен анализ полученных результатов с использованием известных механизмов образования снарядного режима. Проведено сравнение положения границ режимов в СS-миксере с данными для Т-, Y- и X-образных смесителей. Полученные данные показывают, что рассмотренная конфигурация смесителя (диспергатора) обеспечивает расширение области снарядного режима течения по сравнению с классическими диспергаторами. Целью будущих исследований станет создание оптимальной конфигурации СS-смесителя, а также детальное изучение механизма дробления дисперсной фазы в нем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pohorecki R., Sobieszuk P., Kula K. et al.* Hydrodynamic regimes of gas—liquid flow in a microreactor channel // *Chem. Eng. J.* 2008. Vol. 135, Supplement 1. P. S185–S190.
2. *Pohorecki R., Kula K.* Simple mechanism of bubble and slug formation in Taylor flow in microchannels // *Chem. Eng. Res. and Design.* 2008. Vol. 86. P. 997–1001.
3. *Kashid M.N., Agar D.W.* Hydrodynamics of liquid—liquid slug flow capillary microreactor: Flow regimes, slug size, and pressure drop // *Chem. Eng. J.* 2007. Vol. 131. P. 1–13.
4. *Абиев Р.Ш.* Моделирование гидродинамики снарядного режима течения газожидкостной системы в капиллярах // *Теор. основы хим. технол.* 2008. Т. 42, № 2. С. 115–127.
5. *Абиев Р.Ш.* Метод расчета объемного газосодержания и относительной длины пузырей при снарядном режиме течения в капиллярах // *Теор. основы хим. технол.* 2010. Т. 44, № 1. С. 88–103.
6. *Abiev R.S.* Bubbles velocity, Taylor circulation rate and mass transfer model for slug flow in milli and micro channels // *Chem. Eng. J.* 2013. Vol. 227. P. 66–79.
7. *Chen L., Tian Y.S., Karayiannis T.G.* The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2006. Vol. 49. P. 4 220–4 230.
8. *Kashid M.N., Kowaliński W., Renken A. et al.* Analytical method to predict two-phase flow pattern in horizontal micro-capillaries // *Chem. Eng. Sci.* 2012. Vol. 74. P. 219–232.
9. *Zhao T.S.* Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels // *International Journal of Multiphase Flow.* 2001. Vol. 27. P. 765–782.
10. *Vaillancourt M.P. et al.* Two-phase flow transitions in microchannels // *Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow.* 2004. Yokohama, Japan. 30.05–04.06.2004. Paper no. 181.
11. *Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L.* Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I: two-phase flow patterns // *Int. J. Multiphase Flow.* 1999. Vol. 25. P. 377–394.
12. *Fukano T. et al.* Flow patterns and pressure drop in isothermal gas-liquid cocurrent flow in a horizontal capillary tube // *ANS Proceedings of the National Heat Transfer Conference: Technical Session.* 1989. P. 153–161.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт

Контакты: *Абиев Руфат Шовкетович*,
rufat.abiev@gmail.com

Материал поступил в редакцию: 26.09.2014

FLOW REGIMES OF GAS-LIQUID MIXTURE IN THE CHANNELS OF MICROFLUIDIC DEVICES BY USE OF MIXERS (DISPERSER) WITH COAXIAL AND COAXIAL-SPHERICAL SHAPES

R. Sh. Abiev, S. D. Svetlov

Saint-Petersburg State Technological Institute, RF

This article describes the results of an experimental study of the hydrodynamic modes of two phase flows in microreactor mixers — dispersers with coaxial and coaxial-spherical shapes. The maps of flow regimes in a channel with a diameter of 2 mm equipped with such mixers has been plotted and rebuild. Corrected map which

takes into account geometrical properties of coaxial-spherical mixer (dispenser) coincides quite good with the same for the coaxial mixer. The results obtained here are compared with data from previous studies of classical mixers.

Keywords: microreactor, microfluidics, micro dispenser, slug, micromixer, flow map

REFERENCES

1. Pohorecki R., Sobieszuk P., Kula K. et al. Hydrodynamic regimes of gas—liquid flow in a microreactor channel. *Chem. Eng. J.*, 2008, vol. 135, supplement 1, pp. S185–S190.
2. Pohorecki R., Kula K. Simple mechanism of bubble and slug formation in Taylor flow in microchannels. *Chem. Eng. Res. and Design.*, 2008, vol. 86, pp. 997–1001.
3. Kashid M.N., Agar D.W. Hydrodynamics of liquid—liquid slug flow capillary microreactor: Flow regimes, slug size, and pressure drop. *Chem. Eng. J.*, 2007, vol. 131, pp. 1–13.
4. Abiev R.S. Bubbles velocity, Taylor circulation rate and mass transfer model for slug flow in milli and micro channels. *Chem. Eng. J.*, 2013, vol. 227, pp. 66–79.
5. Chen L., Tian Y.S., Karayiannis T.G. The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, 2006, vol. 49, pp. 4 220–4 230.
6. Kashid M.N., Kowaliński W., Renken A. et al. Analytical method to predict two-phase flow pattern in horizontal micro-capillaries. *Chem. Eng. Sci.*, 2012, vol. 74, pp. 219–232.
7. Zhao T.S. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, vol. 27, pp. 765–782.
8. Vaillancourt M.P. et al. Two-phase flow transitions in microchannels. *Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow*, 2004, Yokohama, Japan, 30.05–04.06.2004, Paper no. 181.
9. Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I: two-phase flow patterns. *Int. J. Multiphase Flow*, 1999, vol. 25, pp. 377–394.
10. Fukano T. et al. Flow patterns and pressure drop in isothermal gas-liquid cocurrent flow in a horizontal capillary tube. *ANS Proceedings of the National Heat Transfer Conference: Technical Session*, 1989, pp. 153–161.

Contacts: *Abiev Rufat Shovketovich*,
rufat.abiev@gmail.com

Article arrived in edition: 26.09.2014