УДК 532.54 DOI: 10.15372/PMTF202215175

ВЛИЯНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКИХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА

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

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

** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mails: therfmig@gmail.com, yagodnitsinaaa@gmail.com, bilsky@itp.nsc.ru

Исследовано влияние синусоидальных пульсаций расхода дисперсной фазы на характеристики течения несмешивающихся жидкостей с высокой вязкостью в T-образном микроканале. Визуализированы режимы течения в невозмущенном потоке и с наложением внешних возмущений с различными частотой и амплитудой. Предложен безразмерный комплекс, описывающий переход от параллельного режима к снарядному вследствие внешних пульсаций для фиксированного числа капиллярности несущей фазы. При наложении возмущений на снарядный режим течения обнаружены стабилизация потока и уменьшение разброса значений генерируемых снарядов на частоте, равной собственной частоте отрыва снарядов в невозмущенном потоке. Показано, что при уменьшении частоты возмущений средняя длина снарядов, а также разброс ее значений увеличиваются.

Ключевые слова: микроканалы, потоки жидкость — жидкость, снарядный режим, устойчивость параллельного течения, внешние возмущения, пульсации

Введение. Изучение микрогидродинамических систем представляет большой интерес, что обусловлено экстремально высоким значением отношения площади поверхности к объему устройства, позволяющим в значительной степени интенсифицировать процессы тепло- и массообмена. Двухфазные и двухжидкостные течения используются в различных микроканальных устройствах для решения задач химии, медицины, биологии и т. д. [1–3]. Для двухфазных микроканальных систем контроль над процессом генерации капель или снарядов является практической проблемой. Создание капель с контролируемой низкой дисперсностью и управление их размером являются важным фактором в работе конечных микроканальных устройств. Как правило, для генерации капель используются так называемые пассивные методы, основанные на применении особой геометрии канала. Например, часто используются Т-образные каналы либо каналы с фокусировкой потока. Характеристики снарядного и капельного режимов при течении газ — жидкость и жидкость — жидкость в микроканалах зависят от множества параметров, таких как физические свойства жидкостей (вязкость, плотность, межфазное натяжение), геометрия и размеры микроканала, смачиваемость стенок микроканала. При малых значениях капиллярных чисел длина снарядов может быть описана формулой Гарстецкого [4], в дальнейшем модифицированной

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-79-10307).

[©] Ковалев А. В., Ягодницына А. А., Бильский А. В., 2023

для более высоких капиллярных чисел [5]. Однако область ее применимости ограничена, например в случае смачивания стенок микроканала дисперсной фазой [6]. В случае прямоугольной геометрии канала при малых капиллярных числах ручейковое течение несущей фазы в углах микроканала приводит к значительному занижению значений длины снарядов [7]. В работе [8] показано, что при увеличении вязкости дисперсной фазы длина снарядов также увеличивается. При этом капиллярное число не является единственным определяющим параметром для построения зависимости длины снарядов от параметров течения для жидкостей с различными физическими свойствами. Кроме того, из модели Гарстецкого следует, что минимальная длина снарядов снизу ограничена размерами канала, а сверху — переходом к параллельному режиму. Соответственно получать заданные длины в широком диапазоне их значений невозможно. Даже существенная модификация геометрии T-области и добавление сужающихся участков позволяют уменьшить размер капель лишь на 20 % [9].

Таким образом, в силу физической сложности процессов установления течений газ жидкость или жидкость — жидкость в микроканалах построение корреляционных зависимостей, описывающих длину снарядов в широком диапазоне параметров течения и свойств рабочих жидкостей, в настоящее время малодостижимо, а надежное управление характеристиками получаемых пассивными методами капель и снарядов не представляется возможным [10]. В силу этого применяются и исследуются активные методы генерации капель. Одним из наиболее простых в реализации методов является создание пульсаций с помощью пьезоэлементов. В работе [11] пьезоактуатор использовался для возмущения потока несмешивающихся жидкостей в Т-образном микроканале. Показана возможность генерации капель с очень высокой степенью однородности по сравнению с их генерацией пассивными методами. В работе [12] также предложена система на основе пьезоактуатора для контролируемой генерации капель с частотой до 2.5 Гц. Комплексные исследования влияния акустических возмущений, создаваемых пьезоэлементом, на течение несмешивающихся жидкостей в микроканале с фокусировкой потока проведены в [13], где исследовано влияние вязкости несущей фазы и частоты возмущений на процесс генерации капель в выдавливающем режиме. В случае более вязкой несущей фазы влияние возмущений на поток было более слабым вследствие диссипации части энергии за счет вязкости. Также путем анализа полей скорости в области формирования, полученных методом micro-PIV, установлено, что на этапе роста в капле реализуются вихри, которые меняют направления вращения в зависимости от фазы наложенного возмущения. Это способствует отрыву капель с периодичностью, синхронизированной с сигналом возмущения. В работах [14, 15] для генерации капель в системе несмешивающихся жидкостей с низким межфазным натяжением (неорганическая двухфазная система ATPS) использовался пьезоактуатор. Исследовался сигнал возмущений в виде меандра, были получены зависимости размера капель от частоты и предложена формула для оценки размера капель. В работе [16] изучались механизм образования пузырей и характеристики снарядного потока в прямоугольном микроканале в условиях пульсирующей подачи газа. Установлено, что динамическое давление и напряжение сдвига в Т-образном смесителе увеличиваются с увеличением частоты пульсаций. Средняя длина жидких перемычек также увеличивается при использовании пульсаций. Снарядное течение трансформируется в волновое, когда энергия пульсаций, подводимая в систему, достигает критического значения. Скорость снарядов периодически изменяется во времени с частотой, равной частоте пульсаций.

Несмотря на наличие ряда работ, посвященных исследованию способов активной генерации капель в течениях газ — жидкость и жидкость — жидкость в микроканалах, устойчивость параллельного режима течения при наложении пульсаций расхода фаз изучена недостаточно. В то же время при высокой вязкости несущей и дисперсной фаз область

Жидкость	ρ , г/см ³	μ , мПа · с	Oh	σ , мH/м	λ
Силиконовое масло 85 %-й водный раствор глицерина	$0,968 \\ 1,222$	$\begin{array}{c} 193 \\ 130 \end{array}$	$1,84 \\ 1,10$	40	$0,\!67$

Физические свойства жидкостей

существования снарядного режима течения очень мала [17], и получение снарядов заданной длины в широких диапазонах ее значений с помощью пассивных методов становится невозможным.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния синусоидальных пульсаций расхода дисперсной фазы на характеристики течения несмешивающихся жидкостей с высокой вязкостью в микроканале Т-типа.

Экспериментальная установка. В качестве рабочих жидкостей использовалось силиконовое масло вязкостью 0,193 Па · с = 200 сСт (несущая фаза) и водный раствор глицерина с объемной концентрацией 85 % (дисперсная фаза). Измеренные физические характеристики жидкостей, а также число Онезорге Oh = $\mu/(D_h\rho\sigma)^{0.5}$ для каждой фазы представлены в таблице (ρ — плотность, μ — вязкость, σ — межфазное натяжение, $\lambda = \mu_d/\mu_c$ — отношение вязкостей).

Расходы жидкостей варьировались в диапазонах 2 мкл/мин $\leq Q_c \leq 16$ мкл/мин и 1 мкл/мин $\leq Q_d \leq 24$ мкл/мин, что соответствовало приведенным скоростям фаз $0.37 \text{ мм/c} \leq U_c \leq 3.00 \text{ мм/c}$ и $0.8 \text{ мм/c} \leq U_d \leq 4.4 \text{ мм/c}$ $(U_i = Q_i/S; S - площадь сечения)$ выходного канала). Основными безразмерными параметрами в задаче являются число капиллярности Ca = $\mu U/\sigma$, число Вебера We = $\rho D_h U^2/\sigma$ и число Рейнольдса Re = $\rho D_h U/\mu$. В проведенных экспериментах числа Вебера были малы, максимальное значение достигалось в случае дисперсной фазы и составляло $We_d = 1.7 \cdot 10^{-4}$. Значения числа капиллярности изменялись в диапазонах $0,0019 \leq Ca_c \leq 0,0140, 6 \cdot 10^{-4} \leq Ca_d \leq 14 \cdot 10^{-3}$, значения числа Рейнольдса — в диапазонах $5 \cdot 10^{-4} \leq \text{Re}_c \leq 42 \cdot 10^{-4}, 5 \cdot 10^{-4} \leq \text{Re}_d \leq 12 \cdot 10^{-3}$. Эксперименты проводились в Т-образных микроканалах, выполненных из полиметилметакрилата (ПММА) методом микрофрезерования. После фрезерования пластина с каналом заклеивалась пластиной из ПММА, таким образом, материал всех внутренних стенок был одинаковым. Точность изготовления каналов методом микрофрезерования ограничена точностью позиционирования фрезы, поэтому реальные размеры канала были измерены непосредственно. Ширина выходного канала составляла 425 мкм, входных — 223 мкм, высота канала — 212 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру выходного канала $D_h = 283$ мкм. Шероховатость оценивалась с использованием объектива микроскопа с увеличением ×63, который обеспечивал разрешение изображений 0,24 мкм/пиксель. Измеренное отклонение ширины стенок микроканала от среднего значения не превышало 1 мкм на участке длиной порядка 250 мкм. Размеры шероховатостей стенок не превышали 2 мкм. Высота канала определялась фокусировкой объектива микроскопа на верхней и нижней стенках в 10 точках по длине канала, отклонение не превышало 3 мкм.

В качестве основной экспериментальной методики использовалась скоростная визуализация границы раздела фаз, наблюдаемой вследствие различия показателей преломления жидкостей. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Поток регистрировался скоростной камерой pco.1200 hs (частота съемки 1 ÷ 1000 Гц), подключенной к инвертированному микроскопу Zeiss Axio Observer.Z1 с объективами ×5 и ×10, на предметном столике которого был зафиксирован микроканал. Для освещения потока использовалась галогенная лампа. Визуализация потока проводилась в Т-области и в конце канала на расстоянии от Т-области, равном 50 калибрам.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — трубки с воздухом, 2 — компрессор, 3 — вакуумный насос, 4 — галогенная лампа, 5 — шприцевый насос, 6 — контроллер давления Elveflow OB1, 7 — расходомер, 8 резервуар с рабочей жидкостью, 9 — микроскоп, 10 — скоростная камера

Поток несущей фазы задавался с помощью шприцевого насоса KDS Gemini 88, поддерживающего постоянный объемный расход (относительная погрешность задания расходов равна 0,35 %). Для задания потока дисперсной фазы и управления внешними возмущениями использовался контроллер давления на основе пьезоактуаторов Elveflow OB-1, обеспечивающий постоянное давление на входе либо изменение давления в виде сигнала заданной формы с частотой до 25 Гц. К контроллеру давления через систему шлангов были подключены вакуумный насос и компрессор для обеспечения работы установки в диапазоне относительных давлений ($-0.09 \div 0.60$ МПа). Расход жидкости, находящейся под давлением контроллера, регулировался с помощью кориолисова расходомера Bronkhorst BFS, подключенного через систему обратной связи к контроллеру давления Elveflow OB-1. Система, состоящая из контроллера давления и расходомеров в комплекте с программным обеспечением Elveflow, позволяла управлять как расходом, так и давлением. Давление, необходимое для поддержания целевого сигнала расхода, регулировалось с использованием PID-алгоритма [18]. Зависимости задаваемого сигнала расхода и соответствующего давления на выходе из контроллера представлены на рис. 2 для случая возмущений, наложенных на параллельный режим течения с расходами фаз $Q_c = 2$ мкл/мин, $Q_d = 4$ мкл/мин (период пульсаций равен T = 3 с). Для внесения возмущений в поток использовались пульсации расхода синусоидальной формы с заданной амплитудой, поддерживаемые с высокой точностью. Безразмерная амплитуда пульсаций расхода А задавалась как отношение максимального отклонения расхода от среднего значения в невозмущенном потоке к этому среднему значению: $A = \Delta Q_{\rm max}/Q_{mean}$. В экспериментах наблюдался как сдвиг фаз $\Delta \varphi$ между сигналами расхода и давления, так и рост необходимой амплитуды давления при увеличении частоты сигнала. Предположительно, это обусловлено достижением критических значений числа Уомерсли Wo.



Рис. 2. Зависимости давления на выходе из контроллера (a) и расхода через трубку (б) от времени в случае дисперсной фазы при $Q_c = 2$ мкл/мин, $Q_d = 4$ мкл/мин, T = 3 с, A = 1

Результаты исследования. Для построения исходной карты режимов течения был визуализирован поток без наложения внешних возмущений. В рассматриваемом диапазоне скоростей наблюдались два качественно различных режима: снарядный и параллельный. Карта режимов и соответствующие перепады давления, подаваемые на вход резервуара с дисперсной фазой, также представлены на рис. 3. Карта режимов построена по приведенным скоростям потока $U_i = Q_i/S$, рассчитанным как расход *i*-й фазы, отнесенный к площади сечения выходного канала S. Снарядный режим существовал в области меньших скоростей потока. Для фиксированной скорости несущей фазы Uc значения критической скорости U_d составляли $0.5 \div 1.0$ мм/с. Обнаружено, что давление, поддерживаемое в дисперсной фазе, линейно зависит от расхода и как следствие от приведенной скорости данной фазы, и переход от снарядного режима к параллельному не оказывает влияния на данную зависимость. Следует отметить, что при используемой в работе конфигурации эксперимента нулевому расходу дисперсной фазы Q_d через микроканал соответствовало гидростатическое давление $P_d \approx 0,001$ МПа, так как микроканал расположен выше входных трубок и расходомера. Это добавочное давление появляется как в уравнении для линейной зависимости на рис. 3, так и в случае пульсаций давления на рис. 2.

Наложение внешних возмущений исследовалось по отдельности для параллельного и снарядного режимов. В случае параллельного режима пульсации могут существенно влиять на его устойчивость, что является основным предметом исследования. Расход дисперсной фазы задавался в виде синусоиды с периодами от 1 до 10 с и различными амплитудами. Амплитуды выбирались таким образом, чтобы сохранялось среднее значение расхода



Рис. 3. Характерные картины режимов течения в Т-области (a, e) и в конце канала (b, e), а также карты режимов без наложения (d) и с наложением (e) внешних возмущений в дисперсной фазе:

 $a,\ b$ — снарядный режим пр
и $U_c=3,7$ мм/с, $U_d=1,85$ мм/с, $e,\ c$ — параллельный режим пр
и $U_c=3,7$ мм/с, $U_d=7,4$ мм/с; 1— снарядный режим, 2— параллельный режим

в невозмущенном сигнале. Далее во всех экспериментах использовались сигналы с амплитудами A = 1, A = 2. Для каждой точки, соответствующей параллельному режиму (см. рис. 3), были проведены серии экспериментов с наложением пульсаций расхода, имеющих различные частоту и амплитуду. В зависимости от параметров сигнала возможна потеря устойчивости параллельного режима течения. При этом установлено, что пульсации затухают вниз по потоку микроканала тем быстрее, чем больше их частота. При уменьшении частоты и увеличении амплитуды переход от параллельного режима к снарядному был достигнут в каждой исследуемой точке.

Определяющим параметром для однофазных пульсирующих потоков является число Уомерсли Wo, представляющее собой отношение частоты пульсаций к вязкости среды:

Wo =
$$D_h \sqrt{2\pi f \rho / \mu}$$

(f — частота пульсаций). В случае Wo < 1 эффектами, обусловленными реакцией осредненного потока на частоту пульсаций, можно пренебречь. Число Уомерсли, рассчитанное для дисперсной фазы по диаметру подводящей трубки (0,8 мм), варьировалось в диапазоне 0,07 < Wo_d < 0,31, соответственно при Wo > 1 указанные эффекты не должны



Рис. 4. Зависимости стандартных отклонений расхода (a) и давления (b), нормированных на их расчетные значения для синусоиды с заданной амплитудой, от числа Уомерсли для воздуха при различных значениях расхода несущей и дисперсной фаз:

 $1-Q_c=2$ мкл/мин, $Q_d=8$ мкл/мин, $2-Q_c=8$ мкл/мин, $Q_d=8$ мкл/мин, $3-Q_c=4$ мкл/мин, $Q_d=4$ мкл/мин, $4-Q_c=4$ мкл/мин, $Q_d=8$ мкл/мин, $5-Q_c=2$ мкл/мин, $Q_d=4$ мкл/мин

проявляться в рассматриваемом микроканальном потоке. Тем не менее в экспериментах с увеличением частоты наблюдалось как отставание сигнала расхода от сигнала давления, так и увеличение амплитуды давления для поддержания фиксированной амплитуды и среднего значения расхода. Возможно, это обусловлено тем, что влияние высокочастотных пульсаций имеет место в трубках, воздух из которых сначала откачивается вакуумным насосом, а затем вновь закачивается в них под давлением. Число Уомерсли для этого случая (диаметр воздушных трубок равен 2 мм) варьировалось в диапазоне $0.46 < Wo_{air} < 2.07$. Таким образом, при достижении границы Wo = 1 амплитуда пульсаций давления, подаваемого на вход резервуара с жидкостью, начинала существенно увеличиваться. На рис. 4 приведены зависимости от числа Уомерсли Wo_{air} для воздуха измеренных стандартных отклонений сигналов возмущения расхода $SD(Q_d)$ и давления $SD(P_d)$, нормированных на значения, рассчитанные для синусоиды заданной амплитуды. Для измерения стандартных отклонений сигналов регистрировалось не менее 10 периодов, расчетное значение стандартного отклонения вычислялось в виде $\sigma(P) = 2^{-0.5} A P_0$, $\sigma(Q) = 2^{-0.5} A Q_0 (P_0, Q_0 - Q_0)$ давление и расход в невозмущенном потоке). На рис. 4 видно, что для расхода измеренные значения отклонений хорошо согласуются со значениями для идеальной синусоиды. Погрешность, обусловленная неточностью задания сигнала, не превышает 15 %. При малых значениях Wo_{air} стандартное отклонение давления оказывается меньше расчетного и увеличивается с увеличением Wo_{air}. Зависимость отклонения давления от числа Wo_{air} имеет степенной вид с показателем, равным четырем. В работе [19] приведено отношение $Q_{\rm max}/Q_{\rm mean} \sim k/{\rm Wo}^2$ при заданном градиенте давления. В данном случае можно предположить, что отклонения давления будут увеличиваться пропорционально квадрату Wo_{air}; четвертая степень объясняется тем, что рассматривается не абсолютное значение отклонений, а среднеквадратичное.



Рис. 5. Карта устойчивости параллельного режима к воздействию внешних пульсаций дисперсной фазы с различными частотами и амплитудой: 1 — сегментация потока, 2 — параллельный режим; штриховая линия — K_{*}

Установлено, что увеличение периода или амплитуды возмущений, при прочих постоянных параметрах, приводит к потере устойчивости параллельного режима. При фиксированных периоде и частоте к неустойчивости приводит уменьшение скорости дисперсной фазы U_d либо увеличение скорости несущей фазы U_c . На основе данных наблюдений составлена карта режимов в безразмерных параметрах, учитывающих все указанные выше факторы (рис. 5). По оси абсцисс откладывалось число капиллярности для несущей фазы Ca_c , зависящее в данном случае только от скорости потока U_c , а по оси ординат параметр $K = 10^{-6} AT \sigma^2 / (w \mu^2 U_d)$ (T — период возмущений; w — характерный размер, в данном случае ширина канала; σ — межфазное натяжение; μ — вязкость дисперсной фазы; свободный множитель 10⁻⁶ выбран для удобства). Данный параметр учитывает зависимости, найденные для амплитуды, периода и скорости потока, а также показывает, что увеличение межфазного натяжения способствует потере устойчивости, в то время как увеличение вязкости или ширины канала стабилизирует параллельный поток. Альтернативная форма данного параметра имеет вид $K = 10^{-6} (A/\text{Ca}_d^2) (T/T_0)$ (Ca_d — число капиллярности дисперсной фазы; $T_0 = w/U_d$ — характерное время потока дисперсной фазы). При сравнении периода пульсаций с вязкокапиллярным временем $t_{vc} = w\mu/\sigma$ параметр K принимает вид $K = 10^{-6} (A/Ca_d) (T/t_{vc})$. В физическом смысле параметр K представляет собой отношение амплитуды пульсаций А за период Т к устойчивости вязкого потока со свободной поверхностью, содержащее характерное время распространения возмущений t_{vc} [20]. Вязкость демпфирует возникающие возмущения и способствует устойчивости, а межфазное натяжение оказывает противоположное влияние. На рис. 5 видно, что для заданного числа капиллярности несущей фазы существует критическое значение параметра К, при котором параллельный режим течения теряет устойчивость. Установлено, что чем больше расход несущей фазы, тем менее устойчив параллельный режим к наложенным пульсациям. Критическое значение K_* уменьшается экспоненциально с увеличением числа капиллярности несущей фазы: $K_* = 1,95 \,\mathrm{e}^{-205,5\mathrm{Ca}_c}$. Таким образом, сдвиги на межфазной поверхности играют главную роль в устойчивости параллельного режима, что необходимо учитывать при проектировании микроканальных устройств с активной генерацией капель.



Рис. 6. Зависимость длины снарядов L/w (a) и L/L_0 (б) от частоты внешних возмущений, нормированной на частоту отрыва снарядов в невозмущенном потоке, при различных значениях амплитуды пульсаций: 1 — A = 1, 2 - A = 2; вертикальные отрезки — разброс значений

В данной работе также исследовалось влияние пульсаций на снарядный режим течения. В данном случае для сигнала возмущения выбирались значения частоты, кратные характерным значениям частоты срыва снарядов, которые в случае потоков жидкость жидкость находятся в диапазоне 0,1 ÷ 10,0 Гц. Влияние внешних возмущений с различными частотами и амплитудами A = 1; 2 на длину снарядов в случае снарядного режима при $Q_c = 4$ мкл/мин, $Q_d = 2$ мкл/мин показано на рис. 6. Видно, что наложение пульсаций, частота которых ниже характерной частоты срыва снарядов, приводит к увеличению длины снарядов, а также к значительному увеличению разброса значений длины. Увеличение амплитуды пульсаций с A = 1 до A = 2 не приводит к качественным различиям. При A = 2 максимальное увеличение средней длины снарядов достигало приблизительно 1,5L₀ (L₀ — длина снаряда в невозмущенном потоке). Для обоих исследуемых значений амплитуды была зафиксирована стабилизация снарядного режима при значениях частоты пульсаций, равных собственным частотам невозмущенного потока: $\omega = \omega_0$. Под стабилизацией в данном случае понимается уменьшение разброса значений средней длины снарядов. Поскольку скорость снарядов существенно меняется под действием периодических пульсаций, стабилизация может способствовать улучшению перемешивания и массообмена в снарядном режиме течения и генерации снарядов с заданной длиной.

При уменьшении характерной частоты увеличение разброса длины снарядов может происходить вследствие генерации конечного числа длин снарядов. Случай генерации снарядов, длины которых соответствуют двум заданным гармоникам, представлен на рис. 7, 8. Видно, что частота пульсаций равна половине собственной частоты невозмуценного снарядного режима: $\omega = \omega_0/2$. В этом случае длины генерируемых снарядов расположены симметрично длинам снарядов в случае $\omega = \omega_0$, а с увеличением амплитуды расходятся от исходного распределения. При этом в случае $\omega = \omega_0$ разброс длин снарядов уменьшается по сравнению со случаем невозмущенного потока. Следует отметить, что в рассматриваемом случае средняя длина в невозмущенном потоке меньше, чем в случае возмущений с частотой $\omega = \omega_0$. Это может быть обусловлено погрешностями, возникающими при определении собственной частоты.



Рис. 7. Зависимость длины снарядов от времени в случае $\omega = \omega_0/2$ (*a*) и характерные формы снарядов в случае $\omega = \omega_0/2$ (*б*): 1 — A = 1, 2 - A = 2; штриховая линия — длина в невозмущенном потоке L_u



Рис. 8. Распределения длины снарядов при различных значениях параметров сигнала возмущения (каждая выборка включает более 50 снарядов): $a - L = 720 \div 1000$ мкм, $\delta - L = 650 \div 1350$ мкм; 1 - A = 1, $\omega = \omega_0$, 2 - A = 1, $\omega = \omega_0/2$, 3 - A = 2, $\omega = \omega_0/2$, 4 — невозмущенный поток

При дальнейшем уменьшении частоты возмущений число гармоник, соответствующих различным значениям длины снарядов, увеличивается. В диапазоне малых частот длина снарядов полностью определяется пульсационной составляющей расхода, и ее изменение со временем повторяет форму сигнала. Увеличение средней длины снарядов при уменьшении частоты возмущений объясняется изменением механизма формирования. Часть снарядов формируется в случае, когда расход дисперсной фазы близок к нулю, при этом ручейковые течения в углах прямоугольного канала приводят к увеличению размеров снарядов в каналах Т-образной геометрии [7].

Заключение. В работе исследовано влияние синусоидальных пульсаций расхода дисперсной фазы на характеристики течения несмешивающихся жидкостей с высокой вязкостью в Т-образном микроканале. Визуализированы режимы течения в невозмущенном потоке и с наложением внешних возмущений с различными частотой и амплитудой. Установлено, что давление и расход в дисперсной фазе связаны линейно, а переход от снарядного режима к параллельному не оказывает влияния на данную зависимость в случае невозмущенного потока. При наложении возмущений амплитуда пульсаций давления увеличивалась с частотой, необходимой для поддержания заданной амплитуды расхода, что свидетельствует о влиянии на течение числа Уомерсли. Показано влияние возмущений на устойчивость параллельного режима. Для всех найденных в невозмущенном потоке значений расходов путем наложения пульсаций расхода дисперсной фазы получены сегментированные течения. Обнаружено, что увеличение периода или амплитуды возмущений (при прочих постоянных параметрах) приводит к потере устойчивости параллельного режима, а при фиксированных значениях периода и частоты к неустойчивости приводит уменьшение скорости дисперсной фазы либо увеличение скорости несущей фазы. На основе этого предложен безразмерный комплекс $K \sim (A/\operatorname{Ca}_d)(T/t_{vc})$, описывающий переход от параллельного режима к снарядному вследствие внешних пульсаций для фиксированного числа капиллярности несущей фазы. В случае наложения возмущений на снарядный режим течения выявлено уменьшение разброса значений длины генерируемых снарядов при частоте, равной собственной частоте отрыва снарядов в невозмущенном потоке ($\omega = \omega_0$). Показано, что при уменьшении частоты возмущений средняя длина снарядов и разброс ее значений увеличиваются.

Данные об устойчивости параллельного режима и о безразмерном параметре, определяющем переход для заданных значений скоростей потока и характеристик сигнала возмущения, позволят расширить область существования снарядного режима путем использования активных методов управления. Зависимости, обнаруженные в снарядном режиме, могут применяться для генерации снарядов заданной длины при наложении внешних возмущений и требуют дальнейшего исследования для различных комбинаций несмешивающихся жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

- Abdollahi A., Sharma R. N., Vatani A. Fluid flow and heat transfer of liquid liquid two phase flow in microchannels: A review // Intern. Comm. Heat Mass Transfer. 2017. V. 84. P. 66–74. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.03.010.
- Suea-Ngam A., Howes P. D., Srisa-Art M., Demello A. J. Droplet microfluidics: From proof-of-concept to real-world utility? // Chem. Comm. 2019. V. 55, N 67. P. 9895–9903. DOI: 10.1039/c9cc04750f.
- Wang K., Li L., Xie P., Luo G. Liquid liquid microflow reaction engineering // Reaction Chem. Engng. 2017. V. 2, N 5. P. 611–627. DOI: 10.1039/c7re00082k.
- Garstecki P., Fuerstman M. J., Stone H. A., Whitesides G. M. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction — scaling and mechanism of break-up // Lab Chip. 2006. V. 6, N 3. P. 437–446. DOI: 10.1039/b510841a.
- Xu J. H., Li S. W., Tan J., Luo G. S. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: From squeezing to dripping // Microfluidics Nanofluidics. 2008. V. 5, N 6. P. 711–717. DOI: 10.1007/s10404-008-0306-4.
- Kovalev A. V., Yagodnitsyna A. A., Bilsky A. V. Experimental study of liquid liquid plug flow in a T-shaped microchannel // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754, N 9. 092001. DOI: 10.1088/1742-6596/754/9/092001.

- Korczyk P. M., van Steijn V., Blonski S., et al. Accounting for corner flow unifies the understanding of droplet formation in microfluidic channels // Nature Comm. 2019. V. 10, N 1. P. 1–9. DOI: 10.1038/s41467-019-10505-5.
- Nie Z., Seo M. S., Xu S., et al. Emulsification in a microfluidic flow-focusing device: Effect of the viscosities of the liquids // Microfluidics Nanofluidics. 2008. V. 5, N 5. P. 585–594. DOI: 10.1007/s10404-008-0271-y.
- 9. **Ли Ф. Л., Мяо Д. М.** Влияние конфигурации соединения на формирование микрокапли в Т-образном микроканале // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 2. С. 63–75.
- Zhu P., Wang L. Passive and active droplet generation with microfluidics: a review // Lab Chip. 2017. V. 17, N 1. P. 34–75. DOI: 10.1039/C6LC01018K.
- 11. Bransky A., Korin N., Khoury M., Levenberg S. A microfluidic droplet generator based on a piezoelectric actuator // Lab Chip. 2009. V. 9, N 4. P. 516–520. DOI: 10.1039/b814810d.
- Xu J., Attinger D. Drop on demand in a microfluidic chip // J. Micromech. Microengng. 2008.
 V. 18, N 6. 065020. DOI: 10.1088/0960-1317/18/6/065020.
- Cheung Y. N., Qiu H. Characterization of acoustic droplet formation in a microfluidic flowfocusing device // Phys. Rev. E. Statistic., Nonlinear, Soft Matter Phys. 2011. V. 84, N 6. P. 1–10. DOI: 10.1103/PhysRevE.84.066310.
- Ziemecka I., Van Steijn V., Koper G. J. M., et al. Monodisperse hydrogel microspheres by forced droplet formation in aqueous two-phase systems // Lab Chip. 2011. V. 11, N 4. P. 620–624. DOI: 10.1039/c0lc00375a.
- Moon B. U., Jones S. G., Hwang D. K., Tsai S. S. H. Microfluidic generation of aqueous two-phase system (ATPS) droplets by controlled pulsating inlet pressures // Lab Chip. 2015.
 V. 15, N 11. P. 2437–2444. DOI: 10.1039/c5lc00217f.
- Zhang Y., Zhang J., Tang Z., Wu Q. Regulation of gas-liquid Taylor flow by pulsating gas intake in micro-channel // Chem. Engng J. 2021. V. 417. 129055. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129055.
- 17. Yagodnitsyna A. A., Kovalev A. V., Bilsky A. V. Flow patterns of immiscible liquid liquid flow in a rectangular microchannel with T-junction // Chem. Engng J. 2016. V. 303. P. 547–554. DOI: 10.1016/j.cej.2016.06.023.
- Bechhoefer J. Feedback for physicists: A tutorial essay on contro // Rev. Modern Phys. 2005.
 V. 77, N 3. P. 783–836. DOI: 10.1103/RevModPhys.77.783.
- 19. Womersley J. R. Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known // J. Physiology. 1955. V. 127, N 3. P. 553–563. DOI: 10.1113/jphysiol.1955.sp005276.
- Montanero J. M., Gañán-Calvo A. M. Dripping, jetting and tip streaming // Rep. Progr. Phys. 2020. V. 83. 097001.

Поступила в редакцию 21/VII 2022 г., после доработки — 13/X 2022 г. Принята к публикации 27/X 2022 г.