

УДК 532.529:536.24

## **Влияние высоты канала на характеристики двухфазного течения в мини- и микроканалах с Т-смесителем\***

**Ф.В. Роньшин<sup>1,2</sup>, Ю.А. Дементьев<sup>1,2</sup>, Д.Ю. Кочкин<sup>1</sup>, Е.А. Чиннов<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: f.ronshin@gmail.com

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в трех горизонтальных каналах прямоугольного сечения: 0,23×1 мм, 0,51×1 мм и 1×1 мм. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, в качестве газа — азот. В работе подробно рассмотрены особенности формирования двухфазного потока. Изучено влияние высоты прямоугольного канала на границы режимов двухфазного течения. Обнаружено, что область пузырькового режима практически не подвержена влиянию высоты канала, однако с уменьшением последней существенно уменьшается область снарядного режима, при этом расширяется область снарядно-кольцевого режима течения. Детально изучены характеристики снарядного режима течения. Исследованы зависимости длины газовых снарядов и жидкостных перемычек от приведенной скорости жидкости, приведенной скорости газа, а также высоты канала. Проведено сравнение с известными корреляциями и показано, что они описывают экспериментальные данные в узком диапазоне параметров и с уменьшением высоты прямоугольного канала разброс данных возрастает.

**Ключевые слова:** двухфазное течение, Т-смеситель, снарядный режим, длина снаряда.

### **Введение**

Мини- и микроканальные теплообменные системы получили широкое распространение в микроэлектронике, аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Двухфазные течения в каналах малого сечения используются в медицинских устройствах, мембранных топливных элементах и испарительно-конденсационных системах термостабилизации космических аппаратов. Для повышения эффективности процессов тепло- и массообмена в мини- и микросистемах необходимо применение новых методов, основанных на результатах фундаментальных исследований процессов тепло- и массообмена, включающих высокие тепловые нагрузки, вторичные и закрученные течения, тонкопленочные течения с развитой контактной линией.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РФ № 21-79-10357.

Для понимания механизмов теплообменных процессов необходимо иметь представление о структуре двухфазного течения в исследуемых каналах. Существует значительное количество работ по изучению двухфазного течения. В литературе представлена различная классификация каналов по их поперечным размерам. Обзор исследований режимов газожидкостного течения в мини- и микроканалах проводился в работах [1–3]. В публикациях [4, 5] был выполнен детальный обзор статей, посвященных в основном течению в круглых микротрубах. В большинстве известных работ рассматривались режимы течения и градиенты давления.

Встречаются различные классификации мини- и микроканальных систем, описанные, например, в работе [3]. Одной из наиболее распространенных является классификация, представленная авторами [6]. Здесь выделены следующие размеры каналов в зависимости от гидравлического диаметра  $D_h$ : конвекционный канал —  $D_h > 3$  мм, мини-каналы —  $3 \text{ мм} \geq D_h > 0,2$  мм, микроканалы —  $0,2 \text{ мм} \geq D_h > 0,01$  мм. Данная классификация разработана для воды и не учитывает влияние капиллярных эффектов. Относительное влияние капиллярных и гравитационных сил можно описывать с помощью критерия Бонда (Этвеша) или используя отношение диаметра канала  $D_h$  к капиллярной постоянной  $l_c$ . В работах [1, 7] приведены классификации каналов в зависимости от капиллярной постоянной, переход от мини- к микроканалам определяется при  $D_h \sim 0,1l_c$ .

В работе [8] было выполнено подробное исследование структуры двухфазного потока в цилиндрических капиллярах. Как и в других современных работах, в своем исследовании авторы при построении режимных карт использовали размерные величины приведенных скоростей жидкости и газа. В работах [8, 9] были построены карты режимов течения двухфазных воздушно-водяных потоков для труб диаметром 1, 1,6 и 2 мм. Здесь были выделены волновой (раздельный), пробковый, снарядный, кольцевой, пузырьковый и дисперсный режимы течения. Если в трубках диаметром 1,6 и 2 мм выделена область волнового (раздельного) режима течения, то в капилляре с  $D = 1$  мм, как и в исследовании [10], раздельный режим не был обнаружен. Эти режимы течения наблюдались и для прямоугольных каналов близкого размера [11]. В работе [12] были получены карты режимов течения для хладонов R134a и R245fa, а в работе [13] — для адиабатного двухфазного потока «вода–азот» на основании метода двулучевого лазерного сканирования. Известны работы, в которых для измерения локальной толщины пленки жидкости использовались методы лазерно-индуцированной флуоресценции (micro-LIF) [14] и конфокального лазерного смещения [15], обеспечивающие высокое пространственное разрешение без внесения гидродинамических возмущений в объект исследования. В работе [16] изучались гидродинамика и массообмен при растворении двуокиси углерода в воде для серпантинного микроканала прямоугольного сечения.

В работе [17] проводилось исследование влияния высоты канала на структуру двухфазного потока. Для регистрации двухфазного течения использовались Шлирен- и LIF-методы. Были обнаружены новые режимы течения — струйный и вспененный — и получены следующие результаты. С увеличением высоты канала уменьшилась область струйного режима (граница между струйным и раздельным режимами сдвинулась в сторону более низких приведенных скоростей газа), за счет чего существенно увеличилась область раздельного течения. Область кольцевого режима уменьшается с увеличением высоты канала (граница между кольцевым и раздельным режимами сдвигается в область более высоких приведенных скоростей жидкости). С уменьшением высоты горизонтальных каналов область вспененного режима возрастает. При этом граница между вспененным

и кольцевым режимами в зоне высоких приведенных скоростей жидкости остается практически неизменной. Обратная тенденция наблюдалась для раздельного режима, область которого убывает с уменьшением высоты горизонтальных каналов. Однако в отличие от цилиндрических труб эта область не исчезает.

Исследование режимов течения двухфазного потока и образования капле-мостиков в щелевых горизонтальных каналах прямоугольного сечения высотой 100 и более микрометров представлено в работах [18, 19]. В работе [16] впервые было показано, что в указанных каналах существуют режимы течения, в которых происходит образование капле-мостиков при малых значениях приведенных скоростей жидкости и газа. Подробное экспериментальное исследование течения газовойдынного потока в коротком горизонтальном канале прямоугольного поперечного сечения высотой от 100 до 500 мкм и шириной 9–40 мм было выполнено авторами [20].

Границы режимов газожидкостного течения в микроканалах значительно зависят от условий ввода фаз в канал. В работе [4] анализировалось влияние на эти режимы разных геометрий входных участков. В работах [4, 21] было показано, что границы режимов газожидкостного течения в микроканалах значительно зависят от условий ввода фаз в канал. В работе [21] использовалось несколько начальных участков. Газ двигался вдоль микроканала, а жидкость подавалась с двух его сторон. Изменялся угол подвода жидкости. При различных условиях подачи жидкости границы режимов газожидкостного течения сдвигаются на режимной карте. Установлено, что хотя качественно характер режимной карты сохраняется, однако на положение границ режимов двухфазного течения существенное влияние оказывают особенности формы смесителя и входного участка [22].

Существует значительное количество работ по исследованию длин снарядов и жидкостных перемычек в различных системах. Одним из наиболее простых и популярных является подход, представленный в работе [23]. В ней описан процесс формирования газовых снарядов при малых капиллярных числах ( $Ca > 0,01$ ). Идея состоит в том, что при таких числах при формировании газовых снарядов отрыв пузыря определяется не касательными напряжениями, а перепадом давления в области формирования пузыря. Когда дисперсная фаза на входе полностью перекрывает несущую фазу, наступает блокировка. Отрыв пузыря происходит в момент, когда давление в несущем потоке достигает критического уровня. Данный механизм назван режимом «сжатия» (squeezing). Длина снаряда в этом случае определяется шириной канала, соотношением расходов газа и жидкости, и не зависит от свойств жидкости:

$$L_{\text{bub}} = \left( 1 + \alpha \frac{Q_G}{Q_L} \right) w, \quad (1)$$

где  $L_{\text{bub}}$  — длина снаряда,  $Q_G$  — объемный расход газа,  $Q_L$  — объемный расход жидкости,  $w$  — ширина канала с дисперсионной фазой,  $\alpha$  — константа, близкая к единице. Длину жидкостной перемычки в этом случае можно определить согласно [24] следующим образом:

$$L_{\text{sl}} = \left( 1 + \alpha \frac{Q_G}{Q_L} \right) \left( \frac{1 - \varepsilon_G}{\varepsilon_G} \right) w, \quad (2)$$

где  $L_{\text{sl}}$  — длина жидкостной перемычки,  $\varepsilon_G = \left( \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \right)$  — объемное газосодержание.

В работе [25] проводилось численное исследование формирования газовых снарядов в микрочанале диаметром 1 мм с использованием подхода [23] для определения длин газовых снарядов и жидкостных перемычек. В результате найдена константа  $\alpha = 0,57$  для полученных данных.

В работе [26] выполнялось численное исследование снарядного режима в квадратных мини- и микрочаналах размером от 0,25 до 3 мм с Т-смесителем. Были предложены следующие корреляции для определения длин газовых снарядов и жидкостных перемычек в диапазоне  $0,09 < \varepsilon_G < 0,91$ ,  $15 < Re < 1500$ ,  $0,0003 < Ca < 0,01$ :

$$L_{\text{bub}} = 1,637 \varepsilon_G^{0,107} (1 - \varepsilon_G)^{-1,05} Re_{\text{bub}}^{-0,075} Ca_{\text{bub}}^{-0,0687} d_h, \quad (3)$$

$$L_{\text{sl}} = 1,637 \varepsilon_G^{0,893} (1 - \varepsilon_G)^{-0,05} Re_{\text{bub}}^{-0,075} Ca_{\text{bub}}^{-0,0687} d_h, \quad (4)$$

где  $d_h$  — гидравлический диаметр,  $Re_{\text{bub}} = \rho_L U_{\text{bub}} d_h / \mu_L$  — число Рейнольдса снаряда,  $\rho_L$  — плотность жидкости,  $U_{\text{bub}}$  — скорость пузыря,  $\mu_L$  — динамическая вязкость жидкости,  $Ca_{\text{bub}} = \mu_L U_{\text{bub}} / \sigma$  — капиллярное число снаряда,  $\sigma$  — поверхностное натяжение.

В работе [27] проводилось численное и экспериментальное исследование формирования снарядов в канале сечением 1,69×0,07 мм с параллельным вводом газа и жидкости. Для определения длин газовых снарядов была предложена следующая корреляция:

$$L_{\text{bub}} = (1 + Q_G / Q_L) d_h. \quad (5)$$

Несмотря на значительное количество представленных работ по двухфазным течениям в микрочаналах, исследователи, как правило, концентрируются на переходах между режимами, при этом описание режимов носит качественный характер. Целью настоящей работы является изучение влияния высоты прямоугольного канала на переходы между режимами, а также детальное исследование характеристик снарядного режима течения при помощи автоматизированной методики анализа. В работе выбраны мини- и микрочаналы фиксированной ширины (1 мм) и различной высоты (0,23–1 мм) для определения наиболее достоверных корреляций длин газовых снарядов и жидкостных перемычек в указанных каналах.

### Экспериментальная установка и методики измерений

Схема экспериментальной установки для исследования двухфазного потока в мини- и микрочаналах приведена на рис. 1. Канал представляет собой полость в пластине (вставке), изготовленной из прозрачного фотополимерного материала, к которой сверху прижато оптическое стекло. Эта вставка вместе с оптическим стеклом помещалась в опорные рамки, которые стягивались друг с другом винтами и обеспечивали плотное прижатие стекла к вставке. Вставка изготавливалась из прозрачной фотополимерной смолы на 3D-принтере ANYCUBIC® Photon по технологии DLP. Процесс изготовления детально описывался в работе [22]. В основании канала находятся отверстия под резьбовые фитинги, через которые в канал подаются газ и жидкость. Подводящие каналы располагаются перпендикулярно продольной оси основного канала, формируя Т-смеситель. Профиль полости каналов измерялся при помощи точечного конфокального сенсора IFS2405-3 компании Micro-Epsilon®, который был установлен на систему позиционирования для перемещения поперек канала. Ширина всех каналов (подводных и исследуемых) во всех

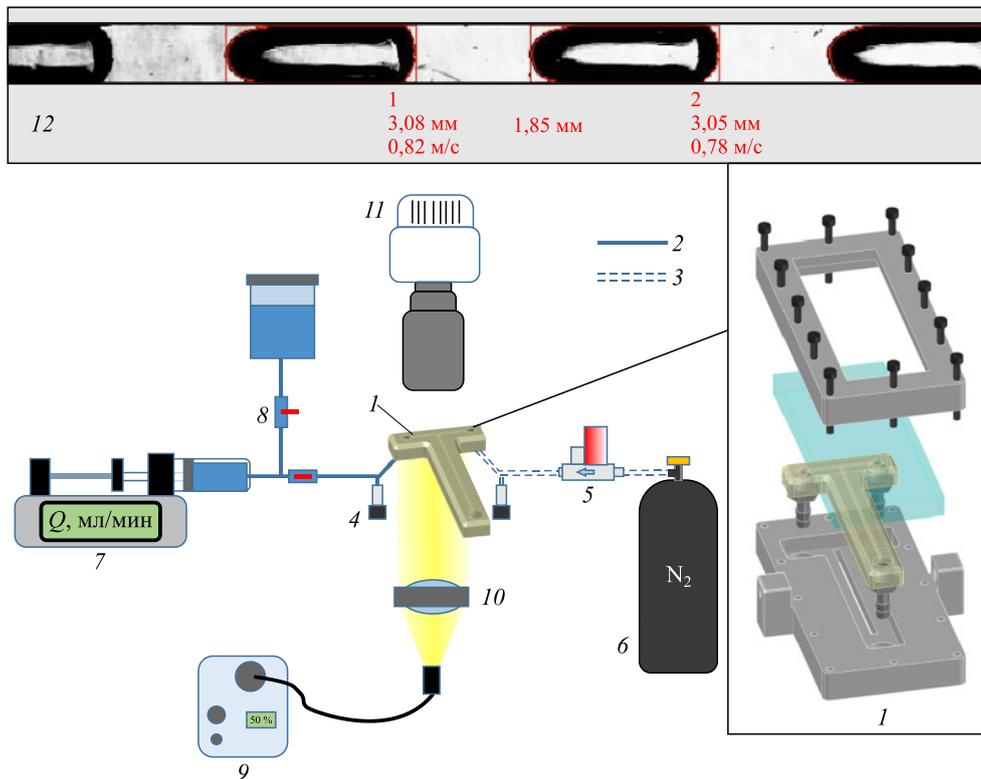


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — рабочий участок, 2 — жидкостный контур, 3 — газовый контур, 4 — датчики давления, 5 — регулятор расхода Bronkhorst, 6 — баллон с рабочим газом (азот), 7 — шприцевой насос Cole-Parmer, 8 — система дозирования жидкости, 9 — источник света, 10 — коллимирующая линза, 11 — скоростная камера Phantom, 12 — экспериментальные изображения, обработанные с помощью разработанной методики (красным прямоугольником указана область снаряда, в которой выделен его контур, цифры под снарядом обозначают его номер, длину и скорость, размер жидкостной переемычки указан между данными для снарядов).

случаях составляла 1 мм, в то время как высота каналов варьировалась от 230 мкм до 1 мм. Отклонения размеров канала не превышали 3 и 5 % мкм по высоте и ширине соответственно.

В качестве компонентов двухфазного потока использовались сверхчистая вода Milli-Q® и азот высокой чистоты. Жидкость подавалась шприцевым насосом ColeParmer® EW-74905-54, который обеспечивал точный контроль расхода жидкости (точность  $\pm 0,4\%$ ). Кроме того, экспериментальная установка оснащена системой заправки шприца, которая состоит из резервуара с рабочей жидкостью и клапанов для управления потоками. Газ подавался из баллона со сжатым азотом через регулятор расхода Bronkhorst® EL-FLOW F-211CV. Перепад давления в канале измерялся с помощью датчиков давления BD Sensors® DMP 331, установленных перед входами в канал газа и жидкости, а также датчика, установленного на выходе из канала.

Визуализация двухфазного потока в каналах осуществлялась теньвым методом с использованием высокоскоростной камеры Phantom® VEO 410. Свет от источника Olympus® KL 2500 LED проходил через линзу, чтобы обеспечить равномерное освещение исследуемой области. Затем через прорезь в нижней опорной рамке свет проходил сквозь прозрачное основание канала. После прохождения через канал он попадал в объектив камеры, визуализируя межфазную границу. Скорость съемки составляла до 5000 кадров в секунду при пространственном разрешении 28 мкм/пиксель.

Для обработки полученных изображений был разработан алгоритм, работающий посредством бинаризации изображения на основе анализа яркости и градиента. На каждом изображении определяются геометрические размеры и координаты всех газовых снарядов и жидкостных перемычек, при этом масштаб определяется шириной канала. Следует отметить, что область отслеживания объектов измерения начинается на расстоянии 10 мм от смесителя, когда их форма становится стабильной. В свою очередь, скорость пузырей определяется по разнице координат на двух последовательных изображениях. Частота съемки выбиралась таким образом, чтобы при максимальной скорости пузырьков их смещение между соседними кадрами было как минимум на порядок меньше их геометрических размеров, что позволило бы идентифицировать одни и те же снаряды на разных кадрах. В большинстве экспериментов скорость съемки составляла 1000 кадров в секунду, однако при максимальных расходах скорость съемки увеличивалась до 5000 кадров в секунду. Таким образом, во время обработки изображений программа отслеживала каждый снаряд и перемычку, определяя их скорость и длину. Изображения во время обработки записывались в видеофайл, чтобы пользователь мог контролировать процесс обработки. Точность данного метода ограничена пространственным разрешением полученных изображений. Пример обработанных изображений показан на рис. 1.

На основе экспериментальных данных исследовано пять режимов течения, характерных для потоков в мини- и микроканалах с Т-образным смесителем: параллельный, снарядный, пузырьковый, снарядно-кольцевой и вспененный. При малых приведенных скоростях жидкости и приведенных скоростях газа от 0,2 до 10 м/с в мини-канале 1×1 мм наблюдается параллельный режим (рис. 2). Для этого режима характерно раздельное течение жидкости и газа вдоль боковых стенок канала. С увеличением приведенной скорости жидкости межфазная граница деформируется, увеличивается область, занимаемая жидкостью, и наоборот: с увеличением приведенной скорости газа увеличивается газосодержание. При высоких приведенных скоростях жидкости и малых приведенных скоростях газа наблюдается пузырьковый режим. Этот режим характеризуется движением мелких пузырьков, длина и ширина которых меньше или равна ширине канала. Пузырьки имеют как периодическую структуру с фиксированным размером пузырька и расстоянием между ними, так и аperiodическую структуру. При приведенных скоростях жидкости

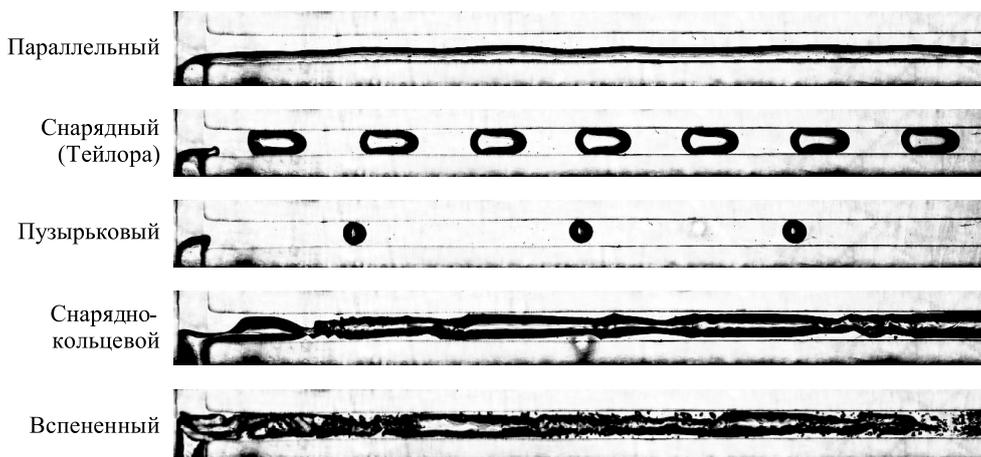


Рис. 2. Характерные режимы течения.

от 0,2 до 1 м/с и приведенных скоростях газа от 0,1 до 1 м/с наблюдается снарядный режим течения. Этот режим характеризуется движением вытянутых пузырей газа по каналу. Ширина пузыря равна ширине канала, а длина превышает ширину канала. Как правило, «снаряды» имеют периодическую структуру, то есть длина, скорость снарядов и перемычек равны. Также присутствуют переходные режимы, когда снаряды аperiodичны. В этом случае снаряды имеют разную длину и/или разные скорости, но не сливаются. Скорости снаряда могут изменяться со временем. С увеличением расхода газа наблюдается снарядно-кольцевой режим течения. В этом режиме течения снаряды начинают сливаться, образуя сложную форму потока. Между снарядами образуется так называемое «горло», где пленка жидкости утолщается, а газовое ядро становится меньше в сечении. Данный режим можно выделить как переходной. Наконец, при высоких приведенных скоростях жидкости и газа имеет место вспененный режим. В этом режиме снаряды распадаются на множество мелких пузырьков из-за развития неустойчивости. Течение газа в таком потоке более хаотичное, а жидкость движется преимущественно вдоль боковых стенок канала.

На рис. 3 показана режимная карта для канала  $0,23 \times 1$  мм, где приведенная скорость газа  $U_{SG}$  отмечена на оси абсцисс, а приведенная скорость жидкости  $U_{SL}$  — на оси ординат. Сплошными линиями указаны границы режимов. При малых приведенных скоростях жидкости и газа наблюдается параллельный режим. При увеличении приведенной скорости жидкости происходит переход к снарядному режиму течения, а при дальнейшем увеличении приведенной скорости жидкости пузырьки уменьшаются до тех пор, пока их размеры не достигнут ширины канала — происходит переход к пузырьковому режиму течения. При средних и высоких приведенных скоростях жидкости размер пузырьков увеличивается с увеличением приведенной скорости газа. При достижении критического значения газосодержания происходит коалесценция: пузыри сливаются, образуя снарядно-кольцевой режим. Если приведенная скорость газа увеличивается далее, происходит отрыв мелких пузырьков газа из-за вихревой неустойчивости, в результате

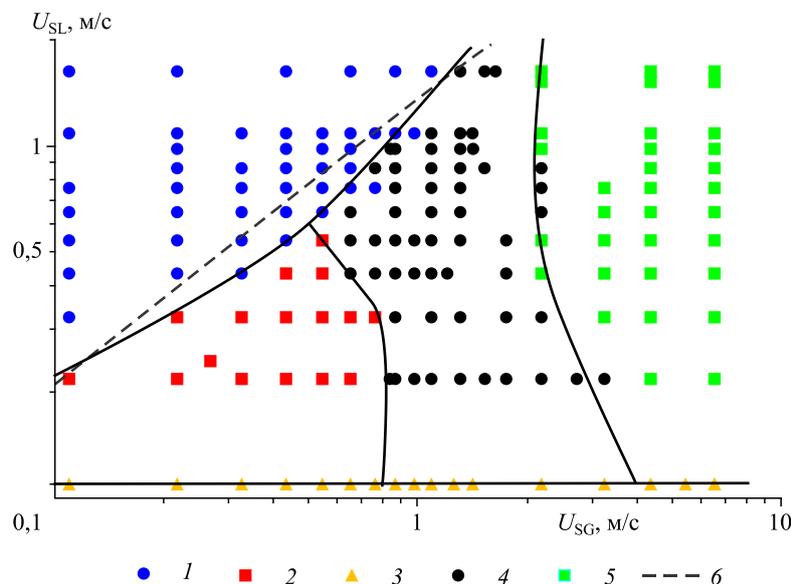


Рис. 3. Режимная карта двухфазного течения в канале сечением  $0,23 \times 1$  мм. Режимы: 1 — пузырьковый, 2 — снарядный, 3 — параллельный, 4 — снарядно-кольцевой, 5 — вспененный; 6 — корреляция [28].

чего происходит переход к вспененному режиму. Рисунок позволяет сравнить границы между режимами пузырькового и снарядного течения с корреляцией [28], разработанной для мини-каналов с Т-смесителем. Корреляция выведена с использованием нелинейной регрессии для десяти представленных в литературе карт с экспериментальным переходом между режимами. Переход определяется уравнением

$$(U_{SG})_{Tr} = 4,9 \cdot 10^{-8} We_L^{0,62} (\mu_G / \mu_L)^{-3,94}, \quad (6)$$

где  $We_L = \rho_L U_{SL}^2 d_h / \sigma = 9,9 \cdot 10^{-3} - 91$ ,  $\mu_G / \mu_L = 1,8 \cdot 10^{-2} - 2,1 \cdot 10^{-2}$ ,  $(U_{SG})_{Tr} = 3,5 \cdot 10^{-3} - 4,2$  м/с.

В работе также проведено исследование влияния высоты канала на режимы двухфазного течения. На рис. 4 представлена сравнительная режимная карта для мини-каналов сечением  $1 \times 1$  мм,  $0,51 \times 1$  мм,  $0,23 \times 1$  мм. Можно видеть, что с уменьшением высоты канала существенно уменьшается область снарядного режима течения за счет расширения области снарядно-кольцевой режима. Граница параллельного режима течения практически совпадает для каналов сечением  $0,51 \times 1$  мм и  $0,23 \times 1$  мм, а для мини-канала сечением  $1 \times 1$  мм она сдвигается в сторону более высоких приведенных скоростей газа, расширяя область параллельного режима течения.

Важным фактором, определяющим структуру и границы режимов двухфазного течения в мини-каналах, является условие ввода фаз. В работах [29–31] исследовались каналы с Т-смесителем, где жидкость использовалась в качестве несущей фазы, в то время как газ подводился в поток жидкости под углом  $90^\circ$  (дисперсная фаза). В этих условиях межфазная граница в зоне смешения более стабильна, т.к. несущая фаза имеет установившийся профиль скорости. В настоящей работе фазы подводились под углом  $90^\circ$  относительно оси канала. В такой конфигурации полностью отсутствует развитый кольцевой режим, а режим течения может формироваться существенно дальше зоны смесителя. Более того, широкую область занимает параллельный режим. На рис. 5 приведено сравнение режимных карт с картами из публикаций [30] и [31] для круглых каналов диаметром 1,09 и 5,5 мм соответственно, а также из публикации [32] для канала  $0,15 \times 0,25$  мм

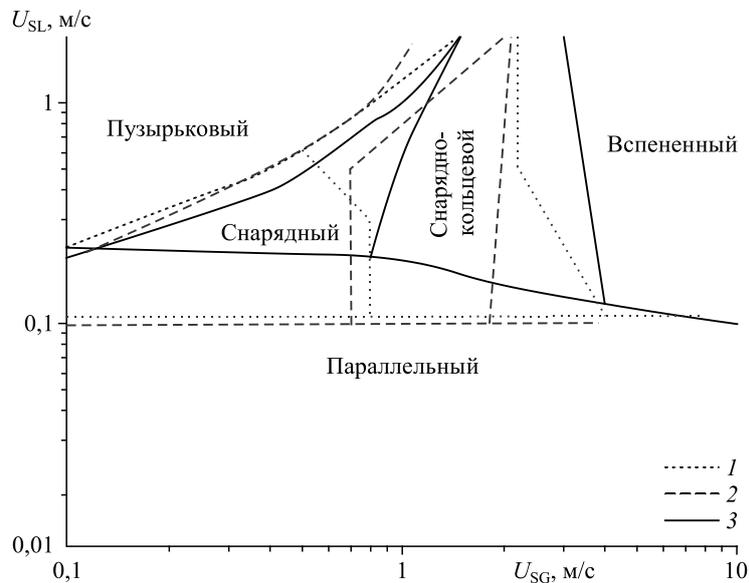


Рис. 4. Сравнение режимных карт для каналов сечением  $0,23 \times 1$  (1),  $0,51 \times 1$  (2),  $1 \times 1$  (3) мм.

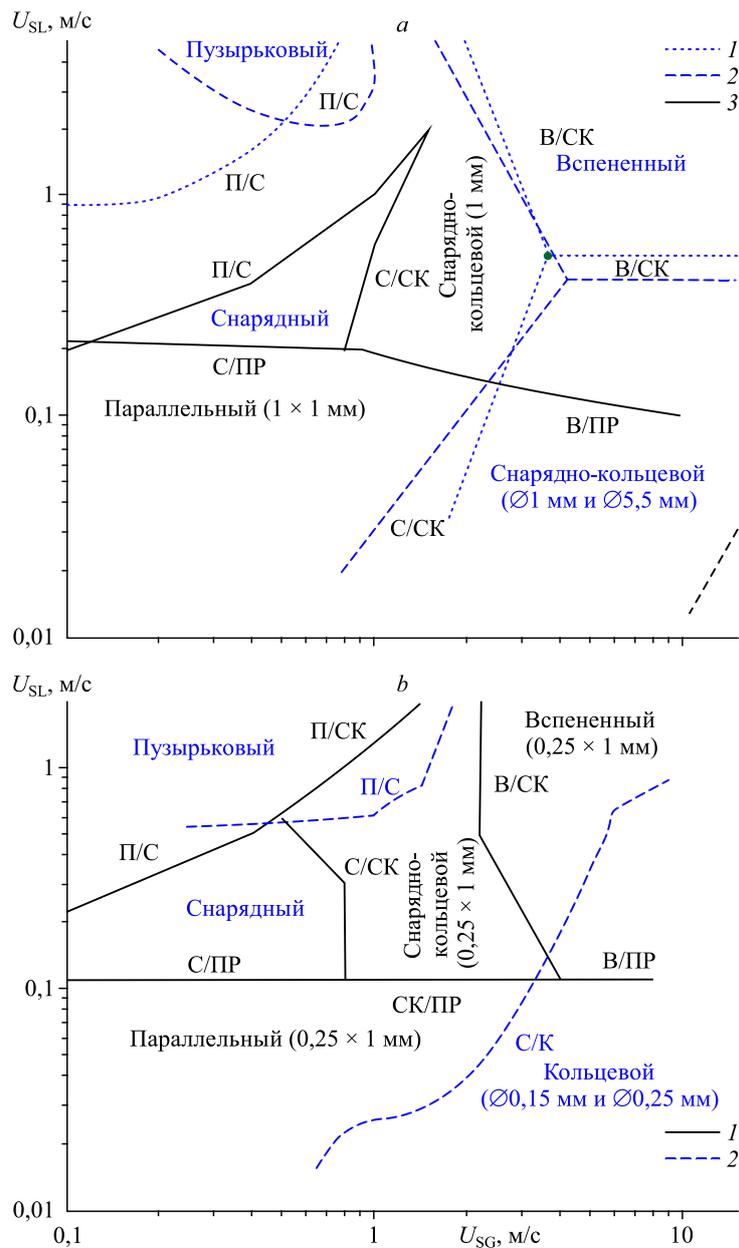


Рис. 5. Сравнение режимных карт канала сечением  $1 \times 1$  мм с круглыми каналами диаметром 1,9 мм [30] и 5,5 мм [31] (а), а также канала сечением  $0,23 \times 1$  мм с каналом сечением  $0,15 \times 0,25$  мм [32] (б).

Границы переходов от режима к режиму: П/С — от пузырькового к снарядному, П/СК — от пузырькового к снарядно-кольцевому, С/ПР — от снарядного к параллельному, С/СК — от снарядного к снарядно-кольцевому, С/К — от снарядного к кольцевому, В/ПР — от вспененного к параллельному, В/СК — от вспененного к снарядно-кольцевому, СК/ПР — от снарядно-кольцевого к параллельному;

а — данные для круглых каналов диаметром 1 мм (1) и 5,5 мм (2) из работ [30] и [31] соответственно и данные настоящей работы для каналов диаметром  $1 \times 1$  мм (3),

б: данные настоящей работы для канала диаметром  $0,23 \times 1$  мм (1) и работы [32] для канала  $0,15 \times 0,25$  мм (2).

с гидравлическим диаметром 0,187 мм. В работах [30] и [31] использовался Т-образный коннектор, где несущей фазой была вода, а дисперсной — азот или воздух.

Можно наблюдать, что линии перехода между пузырьковым и снарядным режимами течений лежат существенно выше данных, полученных авторами, в то время как линия пузырьково-снарядного перехода [32], где использовался Т-образный смеситель схожей геометрии, показывает хорошее количественное соответствие с результатами настоящей работы. Также можно отметить, что для данной конфигурации смесителя характерна широкая область вспененного течения, что не свойственно для круглых каналов, а также наличие параллельного режима течения и отсутствие кольцевого режима в исследуемом диапазоне скоростей. Следует отметить, что в работе [32] вспененного и параллельного режимов течения не наблюдалось, это свидетельствует о существенном влиянии высоты канала.

С помощью разработанного в среде Matlab® алгоритма проведено детальное исследование характеристик снарядов. Исследованы длины снарядов, жидкостных перемычек, а также их скорости. На рис. 6 показаны распределения размеров снарядов в микроканале сечением  $0,23 \times 1$  мм при  $U_{SL} = 0,3$  м/с,  $U_{SG} = 0,3$  м/с и  $U_{SL} = 0,3$  м/с,  $U_{SG} = 0,6$  м/с сверху и снизу соответственно. Рассчитаны параметры распределения: среднее значение и стандартное отклонение. При приведенной скорости газа  $U_{SG} = 0,3$  м/с режим близок к границе пузырькового режима. Наблюдаются два характерных пика размеров снарядов. При этом среднее значение размеров снарядов составляет 1,71 мм, а стандартное

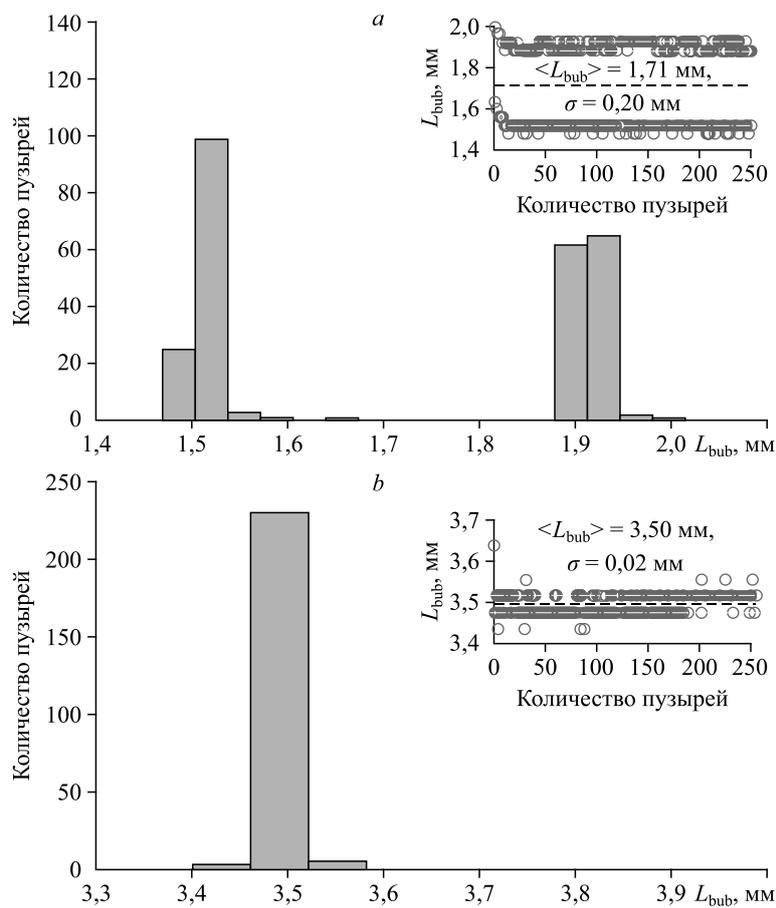


Рис. 6. Распределения размеров пузырей (гистограмма) в микроканале сечением  $0,23 \times 1$  мм при  $U_{SL} = 0,3$  м/с,  $U_{SG} = 0,3$  м/с (a) и  $U_{SL} = 0,3$  м/с,  $U_{SG} = 0,6$  м/с (b).

отклонение — 0,2 мм. С увеличением приведенной скорости газа разброс существенно уменьшается, практически все длины наблюдаемых снарядов совпадают. Среднее значение длины снаряда при этом увеличивается до 3,5 мм, а среднее отклонение уменьшается на порядок — до 0,02 мм, что близко к погрешности метода обработки.

На рис. 7 представлены зависимости длины газового снаряда от приведенной скорости жидкости для мини-канала высотой 1 мм (рис. 7а) и для микроканала высотой 0,23 мм (рис. 7б), а также сравнение с основными корреляциями. Можно видеть, что для мини-канала высотой 1 мм данные лежат наиболее близко к корреляции [26]. В случае микроканала высотой 0,23 мм данные для низких приведенных скоростей жидкости существенно отличаются от корреляций. Последнее может быть связано с тем, что эта высота находится на границе снарядного режима течения. Для более высоких приведенных скоростей жидкости данные наилучшим образом согласуются с корреляцией [26]. Корреляция [25] лучше описывает данные для микроканала высотой 0,23 мм, однако следует отметить, что в этом случае высота канала не оказывает влияния на длины газовых снарядов. Существенные отличия могут быть связаны с широким диапазоном скоростей жидкости и, следовательно, капиллярного числа. Для мини-канала высотой 1 мм указанный диапазон составляет  $0,09 < Ca < 0,015$ , а для микроканала высотой 0,23 мм —  $0,011 < Ca < 0,015$ . Указанные диапазоны выходят за пределы корреляций  $Ca < 0,01$ . В этом случае процесс формирования пузыря невозможно точно описать с помощью механизма блокировки – сжатия.

Зависимость длины газового снаряда от приведенной скорости газа, а также сравнение с основными корреляциями представлена на рис. 8 для мини-канала высотой 1 мм (рис. 8а) и микроканала высотой 0,23 мм (рис. 8б). Для мини-канала высотой 0,23 мм при малых скоростях газа наблюдалось два близких характерных размера пузырей, которые на рисунке обозначены как пик 1 и пик 2. Можно видеть, что для обоих микроканалов при небольших приведенных скоростях газа данные лежат близко к литературным корреляциям. С увеличением приведенной скорости газа расхождение с корреляциями существенно растет. Для мини-канала высотой 1 мм корреляция [26] лежит наиболее близко к полученным данным. Для микроканала высотой 0,23 мм наиболее близко к данным расположена корреляция [25], однако она не учитывает влияния высоты канала. Диапазон капиллярного числа для мини-канала высотой 1 мм составляет  $0,007 < Ca < 0,02$ ,

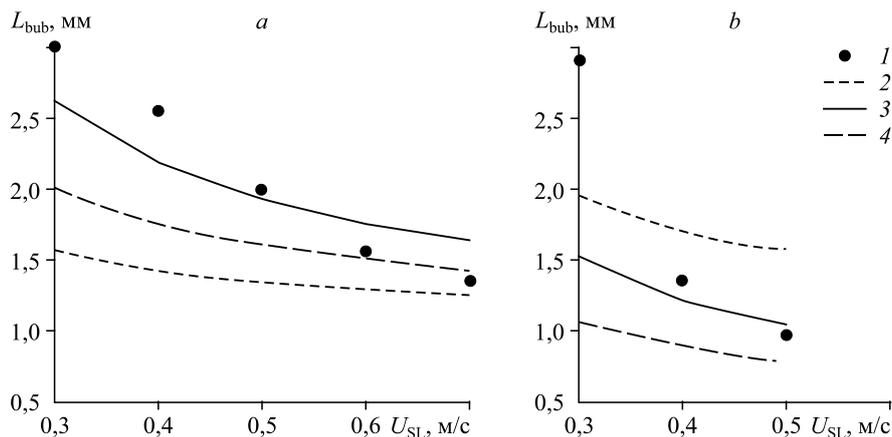


Рис. 7. Влияние скорости жидкости на длину газовых снарядов для мини-канала сечением  $1 \times 1$  мм (а) и  $0,23 \times 1$  мм (б).

1 — данные по среднему значению  $\langle L \rangle$  настоящей работы,  
2–4 — корреляции работ [25–27] соответственно.

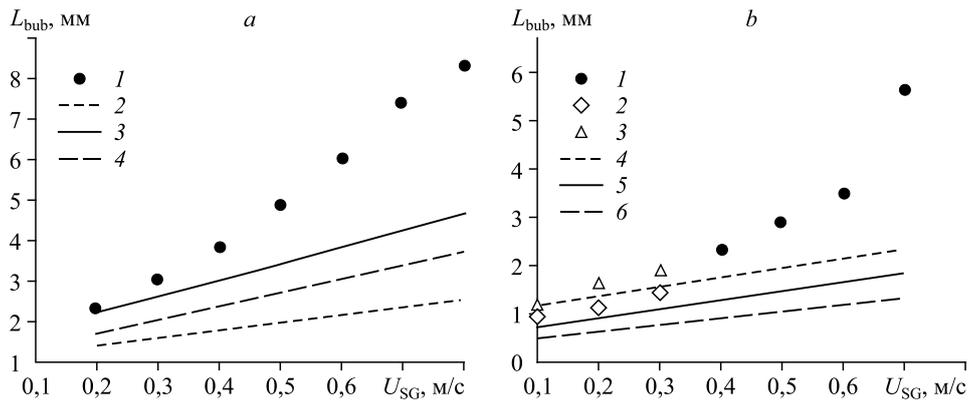


Рис. 8. Влияние скорости газа на длину газовых снарядов для мини-каналов сечением  $1 \times 1$  мм (а) и  $0,23 \times 1$  мм (б).

а: 1 — данные по  $\langle L \rangle$  настоящей работы, 2–4 — корреляции из работ [25–27] соответственно;  
 б: 1 — данные по  $\langle L \rangle$  настоящей работы, 2, 3 — пик 1 и пик 2, 4–6 — корреляции из работ [25–27] соответственно.

а для микроканала высотой 0,23 мм —  $0,005 < Ca < 0,015$ . Корреляции при этом описывают только минимальные значения диапазона. При высоких капиллярных числах необходимо также учитывать касательные напряжения, которыми в подходе [23] пренебрегается.

На рис. 9 представлена зависимость длины газового снаряда от высоты канала при  $U_{SG} = 0,2$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с (рис. 9а) и  $U_{SG} = 0,3$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с (рис. 9б). Можно отметить, что полученные данные лежат наиболее близко к корреляции [26] и при уменьшении высоты канала разброс увеличивается. Корреляция [25] расположена наиболее близко к данным для микроканала 0,23 мм, а значения длин снарядов, описанных этой корреляцией, определяются только шириной канала, его высота влияния не оказывает. При этом в обоих случаях капиллярные числа имеют довольно малые значения: при  $U_{SG} = 0,2$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с для всех каналов  $Ca \sim 0,007$ , а при  $U_{SG} = 0,3$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с —  $Ca \sim 0,009$ . Можно видеть, что с увеличением капиллярного числа экспериментальные данные начинают отклоняться от корреляций. Для микроканала высотой 0,23 мм данные, полученные для меньшего капиллярного числа, также отклоняются от корреляций.

На рис. 10 представлена зависимость длины жидкостной перемычки от приведенной скорости газа для мини-каналов высотой 1 мм и 0,23 мм. Также на рисунке приведено

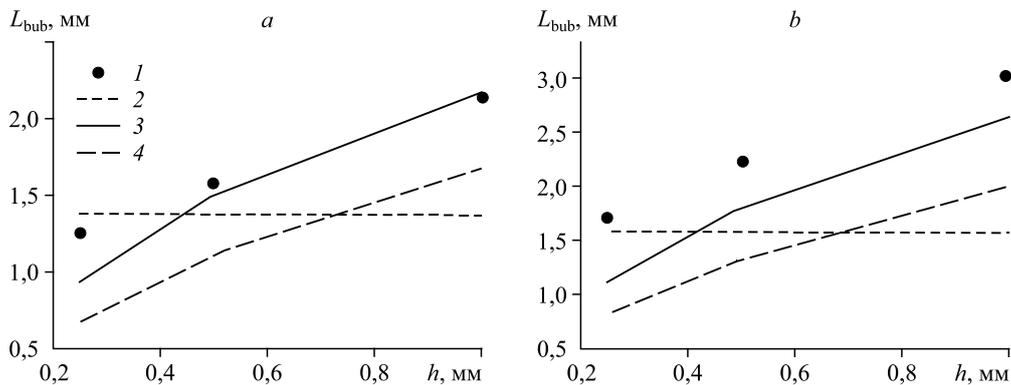


Рис. 9. Влияние высоты канала на длину газовых снарядов при  $U_{SG} = 0,2$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с (а) и  $U_{SG} = 0,3$  м/с,  $U_{SL} = 0,3$  м/с (б).

Обозначения см. на рис. 8.

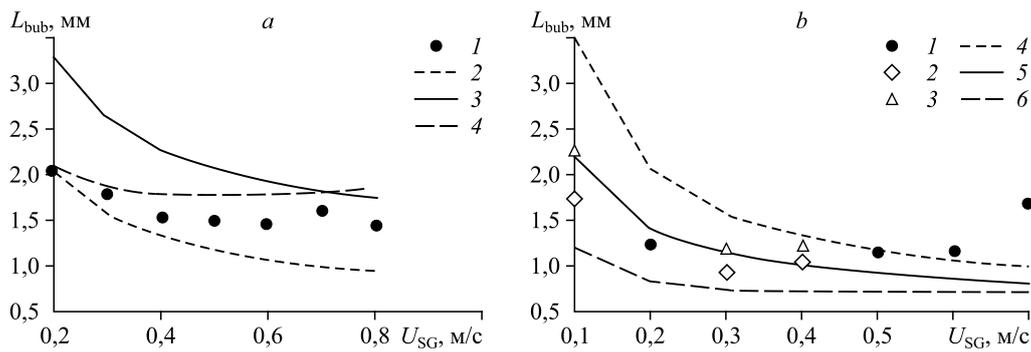


Рис. 10. Влияние скорости газа на длину жидкостных перемычек для мини-каналов сечением  $1 \times 1$  мм (а) и  $0,23 \times 1$  мм (б).

а: 1 — данные по  $\langle L \rangle$  настоящей работы, 2–4 — корреляции из работ [25, 26 и 33] соответственно;  
 б: 1 — данные по  $\langle L \rangle$  настоящей работы, 2, 3 — пик 1 и пик 2, 4–6 — корреляции из работ [25–27] соответственно.

сравнение с известными корреляциями. Для мини-канала высотой 1 мм полученные данные лежат между корреляциями [25] и [33], а для микроканала 0,23 мм данные наиболее близки к корреляции [26]. Можно отметить, что все корреляции качественно описывают экспериментальные данные, но количественно ни одна из корреляций корректно не описывает влияние высоты канала на длины жидкостных перемычек. Все они описывают экспериментальные данные только в узком диапазоне параметров.

### Заключение

Проведено комплексное исследование влияния высоты мини- и микроканалов на режимы двухфазного течения, а также на переходы между ними. Показано, что высота канала существенно влияет на границы снарядного, снарядно-кольцевого и вспененного режимов течения. При этом граница пузырькового режима течения практически не изменяется, граница параллельного режима течения меняется несущественно. Проведено детальное исследование характеристик снарядного режима течения в зависимости от высоты канала. Исследованы длины газовых снарядов и жидкостных перемычек. Показано, что традиционный подход с использованием модели блокировки–сжатия не описывает влияние высоты прямоугольного канала. При низких числах капиллярности ( $Ca > 0,01$ ) данные наилучшим образом описываются корреляцией [26], которая разработана для квадратных мини- и микроканалов на основе численных расчетов. Однако с уменьшением высоты каналов при переходе к микроканалам точность корреляции падает. Для большого числа капиллярности ( $Ca > 0,01$ ) все предложенные корреляции плохо описывают экспериментальные данные. Объясняется это тем, что во всех корреляциях использовались близкие приближения, основанные на модели [23]. При больших скоростях и, соответственно, больших числах капиллярности необходимо также учитывать трение на стенке.

### Список литературы

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 5. С. 777–795.
2. Saisorn S., Wongwises S. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in a horizontal circular micro-channel // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. Vol. 32, No. 3. P. 748–760.
3. Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А. Режимы двухфазного течения в микро-и мини-каналах (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 275–297.
4. Ребров Е.В. Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44, № 4. С. 371–383.

5. Shao N., Gavriilidis A., Angeli P. Flow regimes for adiabatic gas–liquid flow in microchannels // *Chemical Engng Sci.* 2009. Vol. 64, No. 11. P. 2749–2761.
6. Kandlikar S.G., Grande W.J. Evolution of microchannel flow passages: thermohydraulic performance and fabrication technology // *Heat transfer engineering.* 2003. Vol. 24, No. 1. P. 3–17.
7. Роньшин Ф.В. Двухфазные течения в коротких прямоугольных микроканалах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Новосибирск, 2018. 182 с.
8. Barajas A.M., Pantón R.L. The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes // *Intern. J. of Multiphase Flow.* 1993. Vol. 19, No. 2. P. 337–346.
9. Damianides C.A., Westwater J.W. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes // *Proc. Second UK National Conf. on Heat Transfer, Glasgow, 14–16 Septembe.* Mechanical Engng Publications, London, 1988. P. 1257–1268.
10. Suo M., Griffith P. 1964. Two-phase flow in capillary tubes // *J. Basic Eng.* Vol. 86. P. 576–582.
11. Cornwell K., Kew P.A. Boiling in small parallel channels // *Energy Efficiency in Process Technology.* 1993. P. 624–638.
12. Revellin R., Thome J.R. A new type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels // *J. of Micromechanics and Microengineering.* 2007. Vol. 17, No. 4. P. 788–796.
13. Козулин И.А., Кузнецов В.В. Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // *Прикл. механика и техн. физика.* 2011. Т. 52, № 6. С. 129–139.
14. Bartkus G.V., Kuznetsov V.V. Experimental studying of local characteristics of gas-liquid flow in microchannels by optical methods // *AIP Conference Proceedings.* AIP Publishing LLC. 2018. Vol. 1939, No. 1. P. 020001-1–020001-6.
15. Fries D.M., Waelchli S., Von Rohr P.R. Gas–liquid two-phase flow in meandering microchannels // *Chemical Engng J.* 2008. Vol. 135. P. S37–S45.
16. Zhang P., Yao C., Ma H., Jin N., Zhang X., Lü H., Zhao Y. Dynamic changes in gas-liquid mass transfer during Taylor flow in long serpentine square microchannels // *Chemical Engng Sci.* 2018. Vol. 182. P. 17–27.
17. Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Кабов О.А. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале // *Теплофизика высоких температур.* 2014. Т. 52, № 5. С. 710–717.
18. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Образование капель в микроканалах // *Письма в Журн. техн. физики.* 2011. Т. 37, № 14. С. 47–53.
19. Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А., Дементьев Ю.А., Кабов О.А. Мостиковый режим течения в микроканалах // *Докл. РАН. Физика, технические науки.* 2021. Т. 499, № 1. С. 43–47.
20. Чиннов Е.А., Ron'shin F.V., Kabov O.A. Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels // *Intern. J. of Multiphase Flow.* 2016. Vol. 80. P. 57–68.
21. Haverkamp V., Hessel V., Löwe H. Hydrodynamics and mixer-induced bubble formation in microbubble columns with single and multiple channels // *Chem. Eng. Technol.* 2006. Vol. 29, No. 9. P. 1015–1026.
22. Ronshin F., Dementyev Y., Kochkin D., Eloyan K., Vozhakov I. Investigation of two-phase flow regimes in square minichannels with different mixers created using additive technologies // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2022. Vol. 132. P. 110565-1–110565-11.
23. 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 on a Chip.* 2006. Vol. 6, No. 3. P. 437–446.
24. Liu H., Vandu C.O., Krishna R. Hydrodynamics of Taylor flow in vertical capillaries: flow regimes, bubble rise velocity, liquid slug length, and pressure drop // *Industrial & Engng Chemistry Research.* 2005. Vol. 44, No. 14. P. 4884–4897.
25. Shao N., Salman W., Gavriilidis A., Angeli P. CFD simulations of the effect of inlet conditions on Taylor flow formation // *Intern. J. of Heat and Fluid Flow.* 2008. Vol. 29, No. 6. P. 1603–1611.
26. Qian D., Lawal A. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel // *Chemical Engng Sci.* 2006. Vol. 61, No. 23. P. 7609–7625.
27. Xiong R., Chung J.N. An experimental study of the size effect on adiabatic gas-liquid two-phase flow patterns and void fraction in microchannels // *Phys. of Fluids.* 2007. Vol. 19, No 3. P. 033301-1–033301-26.
28. Haase S., Bauer T., Graf E. Gas–liquid flow regime prediction in Minichannels: a dimensionless, universally applicable approach // *Industrial & Engng Chemistry Research.* 2020. Vol. 59, No. 9. P. 3820–3838.
29. Lim A.E., Lim C.Y., Lam Y.C., Lim Y.H. Effect of microchannel junction angle on two-phase liquid-gas Taylor flow // *Chemical Engng Sci.* 2019. Vol. 202. P. 417–428.
30. 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 // *Intern. J. of Multiphase Flow.* 1999. Vol. 25, No. 3. P. 377–394.
31. Chung P.M.Y., Kawaji M. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels // *Intern. J. of Multiphase Flow.* 2004. Vol. 30, No. 7–8. P. 735–761.
32. Waelchli S., von Rohr P.R. Two-phase flow characteristics in gas–liquid microreactors // *Int. J. Multiphase Flow.* 2006. Vol. 32. P. 791–806.
33. Kreutzer M.T. Hydrodynamics of Taylor flow in capillaries and monolith reactors. Delft University Press, 2003. 208 p.

*Статья поступила в редакцию 20 апреля 2022 г.,  
после доработки — 16 мая 2022 г.,  
принята к публикации 17 июня 2022 г.*