

УДК 532.529:536.24

## Исследование газо-водяного течения в горизонтальных прямоугольных каналах\*

Е.А. Чиннов<sup>1,2,3</sup>, Ф.В. Роньшин<sup>1,2</sup>, О.А. Кабов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>3</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в узких коротких горизонтальных каналах прямоугольного сечения высотой 1 миллиметр. Подробно изучены особенности формирования двухфазного потока. Показано, что с увеличением ширины канала растет область вспененного и пузырькового режимов, сжимаемая область струйного режима течения. Области кольцевого и раздельного режимов течения меняются незначительно.

**Ключевые слова:** двухфазное течение, плоский канал.

В настоящее время происходит революционное развитие теплообменных систем с микро- и наноразмерами, которые оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов 3–100 мм. При уменьшении толщины плоских каналов отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально его минимальному поперечному размеру, что обуславливает высокую интенсивность теплообмена в микросистемах. Такие системы получают все более широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Существующие системы охлаждения не соответствуют современным требованиям по отводу тепла от высокотемпературных источников в электронном и микроэлектронном оборудовании.

Существует значительное количество работ по исследованию двухфазного течения. Обзор публикаций по двухфазному течению в каналах различной конфигурации содержится в работах [1, 2]. Показано, что в большинстве работ используются длинные микроканалы, однако короткие каналы являются более перспективными для охлаждения миниатюрных устройств с высоким тепловыделением, таких как микрочипы. В теплообменниках на основе коротких микроканалов могут быть достигнуты достаточно малые перепады давлений. Несмотря на актуальность исследования двухфазных течений в коротких каналах количество публикаций по этой теме весьма ограничено. Выполненные

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.604.21.0053).

исследования двухфазного потока в мини- и микроканалах не всегда имеют однозначный характер, содержат противоречия и разные трактовки. В большинстве работ выделены следующие режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой, которые присутствуют во всех каналах. При небольших приведенных скоростях жидкости и газа наблюдается снарядный режим. Снарядный режим характеризуется проходящими вдоль канала большими пулеобразными пузырями. Поперечный размер пузырей почти совпадает с диаметром канала. При увеличении приведенной скорости жидкости происходит переход к пузырьковому режиму. В этом режиме по каналу движется жидкость, содержащая много небольших пузырьков газа. Размер и число пузырьков изменяются в зависимости от расходов жидкости и газа. При высоких приведенных скоростях жидкости и газа наблюдается кольцевой режим. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока.

В работах [3, 4] изучались газожидкостные течения в коротких горизонтальных микроканалах толщиной от 0,4 до 1 мм. Были обнаружены новые режимы течения (прерывистый, струйный и струйно-пузырьковый), которые могут быть связаны с неустойчивостью при течении двухфазной смеси в горизонтальных прямоугольных каналах малой высоты. В работе [5] проанализирована структура двухфазного потока в канале высотой 200 мкм. Было показано, что на структуру двухфазного потока влияет большое количество параметров.

Границы между режимами существенно отличаются в зависимости от условий эксперимента. Значительное влияние оказывают условия ввода газа и жидкости. Можно соединять трубы с помощью плавного Smooth-смесителя или ставить перпендикулярно каналу, используя Т-смеситель. При сравнении двух смесителей в работе [6] было обнаружено, что при переходе от Т-смесителя к плавному смесителю снарядный режим практически не сдвигается, область струйного режима значительно уменьшается, сужаются области снарядно-кольцевого и вспененного режимов, но в целом, характер режимной карты сохраняется. Также заметное влияние оказывают такие параметры канала, как размер и форма. При изменении размеров канала меняется и влияние сил на двухфазный поток. Для маленьких каналов уменьшение их диаметра способствует сдвигу границ между прерывистым и пузырьковым, снарядным и снарядно-кольцевым, снарядно-кольцевым и дисперсным режимами в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости и газа. Однако изменение размера канала практически не влияет на границу между снарядно-кольцевым и кольцевым, кольцевым и дисперсным режимами. Также проводилось много исследований в каналах различной формы. В основном использовались круглые, треугольные, квадратные и прямоугольные каналы. В каналах некруглого сечения наблюдалась тенденция, когда жидкость собиралась по углам канала. Это приводило к увеличению площади, занимаемой жидкостью по краям канала, и уменьшению площади ядра газового потока, из-за чего переход к кольцевому режиму происходил раньше. Были обнаружены новые режимы, не характерные для круглых каналов малого размера, например, раздельный. Также для больших каналов (> 1 мм) существенное влияние оказывает длина канала. С увеличением длины канала граница между пузырьковым и снарядным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей газа, в то время как граница между снарядным и кольцевым режимами сдвигается в противоположную сторону. Значительным оказывается и влияние параметров жидкости. С увеличением вязкости жидкости границы снарядного режима сдвигаются в область более высоких приведенных скоростей газа и жидкости. При увеличении поверхностного натяжения граница пузырькового режима сдвигается в область более низких значений приведенной скорости газа  $U_{SG}$ . Область струйно-снарядного режима существенно уменьшается при увеличении поверхностного натяжения. Область вспененного режима при уменьшении поверхностного натяжения сдвигается в сторону более высоких значений  $U_{SG}$ .

В работе [7] рассматривались такие факторы, влияющие на двухфазное течение, как геометрия входного участка, диаметр канала, форма сечения канала, гидрофильность поверхности стенки канала, поверхностное натяжение и вязкость жидкости. Было показано, что режимы течения в значительной степени зависят от условий ввода фаз в канал.

В работе [2] представлен обзор основных публикаций по исследованию двухфазного потока в прямоугольных микроканалах. Из анализа опубликованной литературы можно заключить, что количество публикаций по микроканалам высотой 1 мм и менее с отношением ширины к высоте канала более 10 крайне ограничено, хотя такие каналы являются наиболее перспективными для охлаждения сверхвысокопроизводительной электроники, где требуется отведение тепловых потоков более  $1000 \text{ Вт/см}^2$ .

Целью настоящей работы является исследование режимов двухфазного течения в коротком (длинной 80 мм) горизонтальном микроканале шириной от 10 до 29 мм и высотой 1 мм.

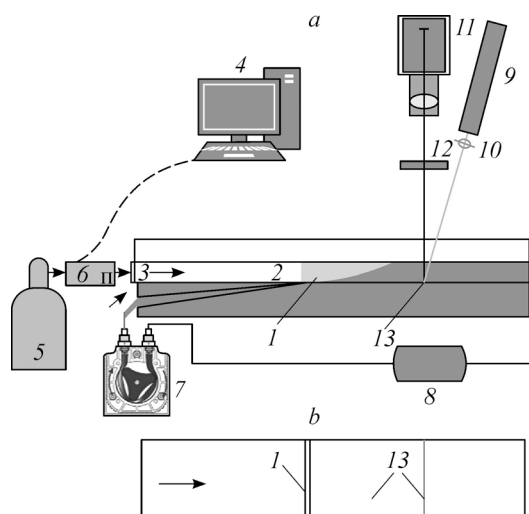
### Экспериментальная установка и методика измерений

На рис. 1 показан рабочий участок с исследуемым каналом и схема расположения аппаратуры для реализации используемых методик измерений. Стенд включал циркуляционный контур по жидкости, который управлялся компьютером. Газ подавался из баллона через расходомеры в канал, а затем извлекался в атмосферу. Используемый газ насыщался парами жидкости перед входом в рабочий участок. Жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса 7 подавалась через плоское сопло 1 в исследуемый канал 2. Сопло располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ подавался в центральную часть канала через входное отверстие 3, расположенное на расстоянии 40 мм от входа жидкости, где поток газа был стабилизирован. Для изменения высоты канала использовались боковые вставки.

Регистрация взаимодействия газожидкостных потоков осуществлялась в области 13 цифровыми видео- и фотокамерами. Для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах применялся метод лазерно-индуцированной флуоресценции [4, 8], который основывается на переизлучении флуорофором поглощённого света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением флуорофора Родамин 6G, а в качестве газа — азот или воздух. Для создания опорного излучения применялся лазер 9 серии Agies мощностью 50 мВт с длиной волны 532 нм. С помощью цилиндрической линзы 10 лазерный луч разворачивался в линию, которая располагалась поперек газожидкостного потока на расстоянии 52 мм от места ввода жидкости в канал, где режим двухфазного потока уже был сформирован. Переизлучаемый флуоресцентный свет фиксировался цифровой камерой VS-Ld-751 11, оснащенной ступенчатым светофильтром низких частот SONY ILX-751A 12, пропускающим переизлученный флуорофором свет и отсекающим излучение лазера. Камера позволяет с высокой частотой дискретизации (до 2,1 кГц)

Рис. 1. Экспериментальная установка.

*a* — схема установки, *b* — рабочий участок с исследуемым каналом; 1 — плоское сопло для подачи жидкости, 2 — канал, 3 — ввод газа в канал, 4 — компьютер, 5 — баллон с газом, 6 — расходомеры, 7 — высокоточный перистальтический насос, 8 — резервуар с жидкостью, 9 — лазер, 10 — цилиндрическая линза, 11 — цифровая камера с линейным датчиком, 12 — светофильтр, 13 — зона измерений.



оцифровывать получаемый сигнал. Калибровка измерительной системы проводилась в условиях эксперимента по локальной интенсивности свечения плоскопараллельных слоев рабочей жидкости в полностью заполненном канале. Сверху канал закрывался крышкой из оптического стекла.

С помощью флуоресцентного метода, использованного для регистрации изменения течения жидкости в канале во времени, получена новая информация, позволившая изучить характеристики вспененного и раздельного режимов течения и границы между режимами двухфазного течения. Исследования выполнены в каналах высотой 1 мм и шириной 10, 19 и 29 мм.

### Результаты

Экспериментально исследованы основные режимы течения двухфазного потока, определены границы между ними и построена режимная карта процесса для исследуемого канала высотой 1 мм (рис. 2). В качестве координат на рисунке использованы приведенные скорости газа  $U_{SG}$  и жидкости  $U_{SL}$ , которые определялись как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. Границы режимов течения для канала сечением  $1 \times 10$  мм обозначены сплошными линиями. Выделены следующие основные режимы течения: пузырьковый, снарядный, струйный, раздельный, вспененный и кольцевой.

Жидкость выходила из сопла 1 (рис. 1) и под действием капиллярных сил перемещалась в боковые части канала. Только при малых значениях приведенной скорости газа и достаточно высоких значениях приведенной скорости жидкости формирование пузырей происходило вблизи входа жидкости в канал. В случае снарядного режима ширина пузырей была близка к ширине канала.

При очень малых приведенных скоростях жидкости газ двигался в центральной части канала, а основная часть жидкости перемещалась по его периферии вдоль боковых стенок. Возмущений на поверхности жидкости не наблюдалось. Стационарный струйный режим наблюдался при малых приведенных скоростях жидкости и газа, когда газовый поток занимал не более половины сечения канала. Струйный режим является специфическим для плоских микрочаналов. Увеличение приведенной скорости жидкости приводило к увеличению частоты и амплитуды пульсаций и потере устойчивости струйного режима двухфазного потока. При малых приведенных скоростях газа амплитуда возмущений жидкости в боковых частях канала достигала его половины, образовывались устойчивые перемычки жидкости, наступал снарядный или пузырьковый режимы

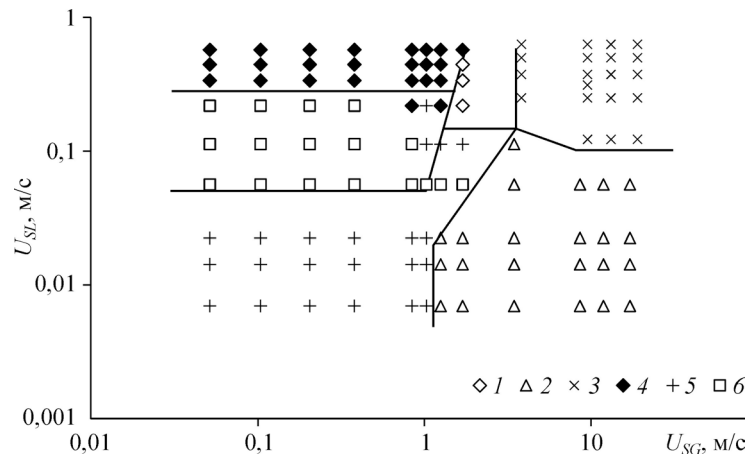


Рис. 2. Режимная карта двухфазного течения в канале сечением  $1 \times 10$  мм.

Режимы течений: 1 — вспененный, 2 — раздельный, 3 — кольцевой, 4 — пузырьковый, 5 — струйный, 6 — снарядный.

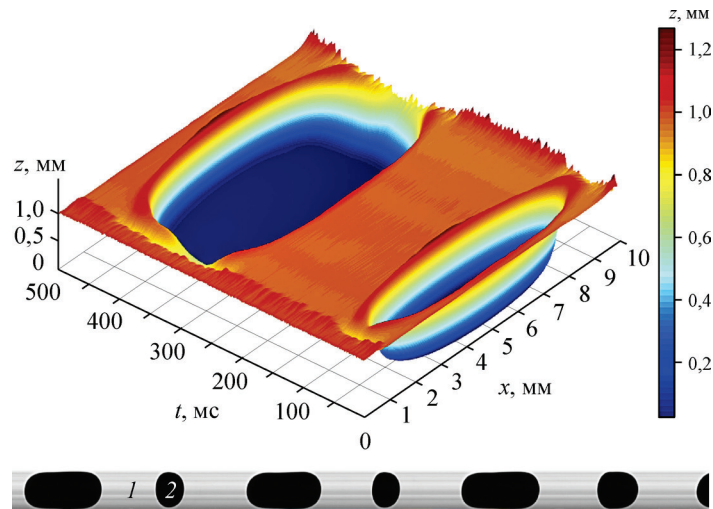


Рис. 3. Распределение жидкости в канале при  $U_{SG} = 0,05$  м/с,  $U_{SL} = 0,11$  м/с.  
1 — жидкость, 2 — пузырьки газа.

течения. При  $U_{SG} = 0,05$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с появляются устойчивые перемишки жидкости. Происходит переход к снарядному режиму.

При небольших приведенных скоростях жидкости и газа наблюдался снарядный режим. Снарядный режим характеризуется проходящими вдоль канала большими пулеобразными пузырями. Диаметр пузырей был порядка ширины канала. При  $U_{SL} = 0,11$  м/с;  $U_{SG} = 0,05$  м/с наблюдалось движение пар больших и маленьких пузырей с частотой  $\nu = 1,5$  Гц (рис. 3).

При увеличении приведенной скорости жидкости происходит переход к пузырьковому режиму. В этом режиме по каналу движется жидкость, содержащая много небольших пузырьков газа. Размер и количество пузырьков изменяются в зависимости от расходов жидкости и газа, но размеры пузырьков всегда остаются гораздо меньше ширины канала. С увеличением приведенных скоростей жидкости и газа увеличивается частота пузырей. На рис. 4а приведено распределение жидкости при  $U_{SL} = 0,56$  м/с,  $U_{SG} = 1,02$  м/с. В таком режиме наблюдалось 27 пузырьков за 2 секунды. При увеличении приведенной скорости газа до  $U_{SG} = 1,7$  м/с число перемишек увеличивается до 32 за 2 секунды (рис. 4б). В табл. 1 представлены характерные частоты для пузырькового режима.

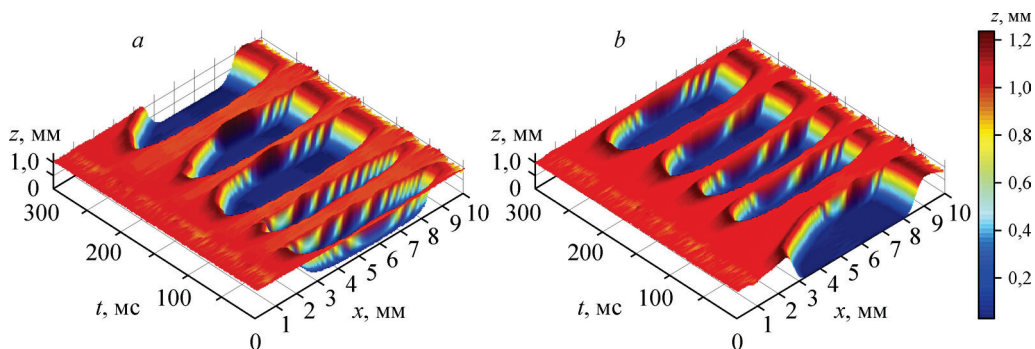


Рис. 4. Распределение жидкости в канале при пузырьковом режиме течения.  
а —  $U_{SG} = 1,02$  м/с,  $U_{SL} = 0,56$  м/с, б —  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,56$  м/с.

Таблица 1  
Характерные частоты для пузырькового режима

$U_{SL}$ , м/с	0,56	0,56
$U_{SG}$ , м/с	1,02	1,7
$\nu$ , Гц	13,5	16

При небольших приведенных скоростях жидкости и больших приведенных скоростях газа наблюдался раздельный режим. В этом режиме часть жидкости двигалась по нижней стенке канала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. Верхняя стенка канала была осушенной. Газ в таком режиме занимает больше половины сечения канала. Раздельный режим характерен только для некруглых микроканалов, т.к. в круглых каналах пленка замыкается, образуя кольцевой режим. На рис. 5а представлено раздельное течение при  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с. В раздельном режиме газ занимал практически всю ширину канала, только в узкой области по боковым сторонам канала жидкость целиком заполняла его высоту. В области раздельного течения жидкости возникали первые периодические возмущения при  $U_{SL} = 0,02$  м/с,  $U_{SG} = 3,42$  м/с (рис. 5б). Видно, что газ движется в центре канала, занимая большую часть его сечения. Под действием газового потока жидкость распространяется в виде гладкой пленки на нижней стенке канала. Основная часть жидкости за счет капиллярных сил собирается у боковых стенок канала. На одной из боковых стенок наблюдается волновое движение жидкости. При дальнейшем увеличении приведенной скорости газа частота периодических возмущений возрастает (рис. 5с, 5д). Увеличение приведенной скорости жидкости приводит к потере устойчивости двухфазного потока в указанном режиме.

В табл. 2 показаны частоты характерных пульсаций в зависимости от приведенных скоростей жидкости и газа. При  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с пульсаций не возникало. При увеличении приведенной скорости газа до 3,42 м/с возникали первые периодические возмущения у стенок канала. Видно, что с увеличением приведенной скорости жидкости значительно возрастает частота боковых пульсаций, при увеличении приведенной скорости газа частота боковых пульсаций возрастает незначительно.

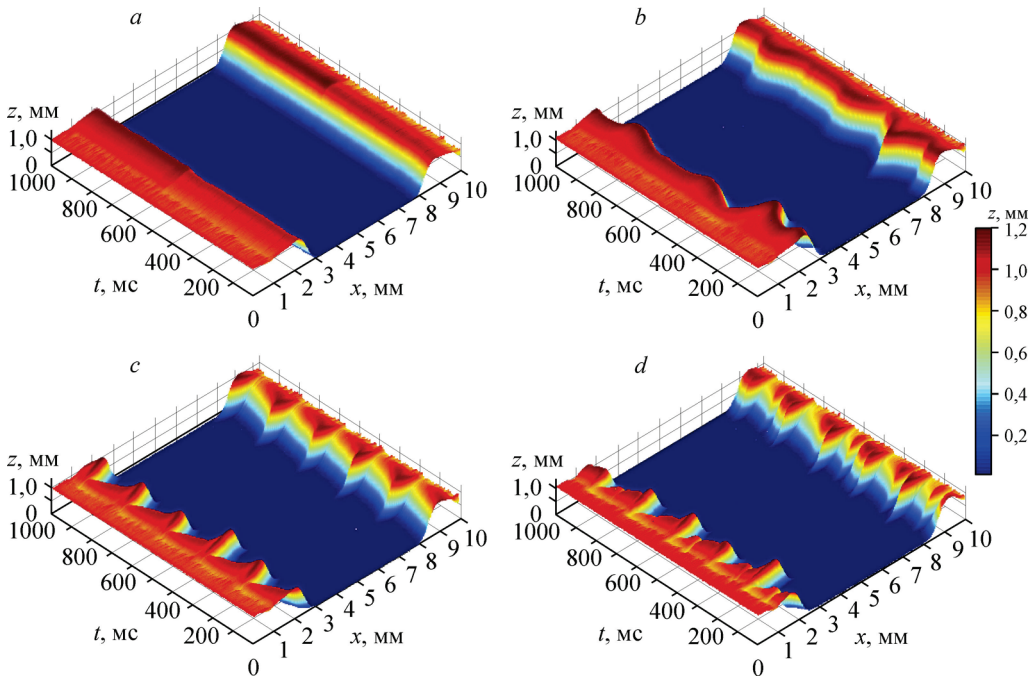


Рис. 5. Распределение жидкости в канале при различных приведенных скоростях жидкости и газа.  
 а —  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с, б —  $U_{SG} = 3,42$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с, в —  $U_{SG} = 8,51$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с,  
 д —  $U_{SG} = 11,91$  м/с,  $U_{SL} = 0,02$  м/с.

Таблица 2

## Характерные частоты для раздельного режима

$U_{SL}$ , м/с	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05
$U_{SG}$ , м/с	1,7	3,42	8,51	11,91	8,51	11,91
$\nu$ , Гц	-	2	2,5	3	7	7,5

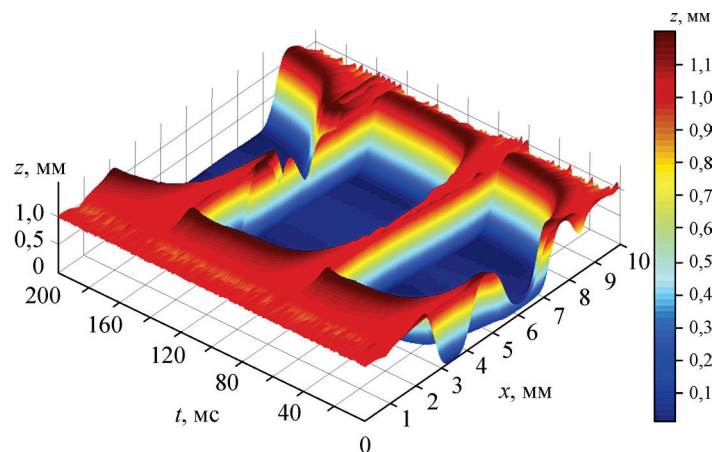
Таблица 3

## Характерные частоты для кольцевого режима

$U_{SL}$ , м/с	0,11	0,23	0,23	0,56	0,56
$U_{SG}$ , м/с	8,51	3,42	11,91	3,42	8,51
$\nu$ , Гц	14	14	32	18,5	34

При увеличении приведенной скорости жидкости происходил переход к кольцевому режиму. Причиной перехода являлось увеличение частоты боковых пульсаций, вследствие чего на верхней стенке канала также появлялась пленка жидкости. Переход от раздельного к кольцевому режиму течения определялся с использованием Шлирен-метода. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока. Газ занимает значительно больше объема, чем жидкость. Также возникают всплески у боковых стенок канала. В табл. 3 представлена частота всплесков при различных приведенных скоростях жидкости и газа. Видно, что при увеличении приведенных скоростей жидкости и газа частота всплесков существенно возрастает.

При больших приведенных скоростях жидкости наблюдался вспененный режим. Этот режим характерен для вертикальных каналов [2], где он обусловлен гравитацией, а также наблюдается в широких горизонтальных микроканалах, где он возникает вследствие капиллярных сил. Для этого режима характерно наличие разорванных перемычек. Существование вспененного режима, подробно рассмотренного в работе [5], обусловлено развитием неустойчивости струйного режима и увеличением частоты пульсаций жидкости, движущейся у боковых сторон канала под действием газового потока. Вспененный режим занимает значительную область на карте (рис. 2). Переход от пузырькового (сплошные заполненные перемычки жидкости) к вспененному сопровождался появлением разрывов в перемычках. Переход от струйного режима к вспененному сопровождался, наоборот, появлением сплошных заполненных перемычек, которые были устойчивы и число которых в канале превышало единицу. Существование вспененного режима обусловлено развитием неустойчивости струйного режима и увеличением частоты взаимодействия жидкости, поступающей с боковых сторон канала. При переходе к кольцевому режиму течения сплошные заполненные перемычки жидкости исчезают. На рис. 6 представлен вспененный режим при  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,23$  м/с, где видны разорванные

Рис. 6. Распределение жидкости в канале при  $U_{SG} = 1,7$  м/с,  $U_{SL} = 0,23$  м/с.

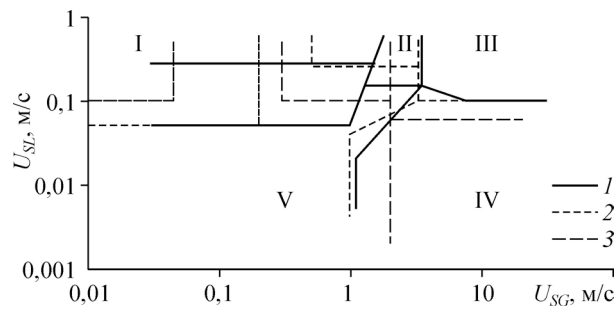


Рис. 7. Влияние ширины канала на границы режимов для каналов с разным сечением.

Режимы течений: I — пузырьковый, II — вспененный, III — кольцевой, IV — раздельный, V — струйный; сечения каналов:  $1 \times 10$  (1),  $1 \times 19$  (2),  $1 \times 29$  (3) мм.

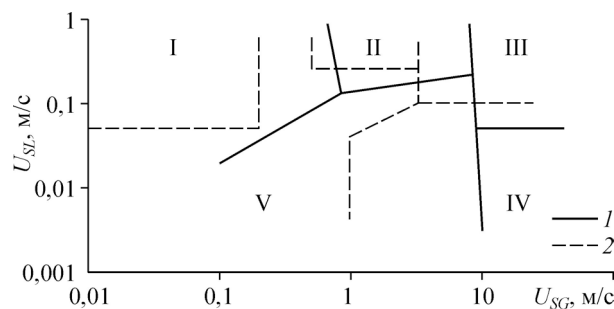


Рис. 8. Влияние высоты канала на границы режимов для каналов с разным сечением.

Режимы течений: I — пузырьковый, II — вспененный, III — кольцевой, IV — раздельный, V — струйный; сечения каналов:  $0,1 \times 20$  (1),  $1 \times 19$  (2) мм.

и сплошные перемычки жидкости. Частота появления сплошных либо разорванных перемычек составляла 11,5 Гц.

Результаты обработки данных всех выполненных экспериментов приведена на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлена сравнительная режимная карта каналов сечением  $1 \times 10$ ,  $1 \times 19$  и  $1 \times 29$  мм. Видно, что с увеличением ширины канала растет область вспененного и пузырькового режимов (сдвигаются в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости), сжимая область струйного режима течения. Области кольцевого и раздельного режимов течения меняются незначительно.

На рис. 8 представлена сравнительная режимная карта каналов сечением  $0,1 \times 20$  и  $1 \times 19$  мм. Из рис. 8 следует, что при увеличении высоты канала возрастает область раздельного режима, а область вспененного режима существенно уменьшается. Также при увеличении высоты канала существенно изменяет свое положение область струйного режима течения. Область кольцевого режима при изменении высоты канала практически не меняется. С увеличением высоты канала интенсивность формирования капель уменьшается.

### Заключение

Использование флуоресцентного метода позволило зарегистрировать и количественно определить основные характеристики (зависимость распределения жидкости в канале от времени, частоты следования пузырей и пульсаций жидкости, амплитуды пульсаций) течения двухфазного потока в прямоугольных коротких горизонтальных каналах высотой 1 мм. Выделены основные режимы двухфазного течения: пузырьковый,



снарядный, раздельный, вспененный, кольцевой. Определены границы между режимами и частоты характерных пульсаций. Показано, что изменение высоты и ширины горизонтального канала оказывает существенное влияние на границы между режимами.

#### 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. **Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.** Режимы двухфазного течения в микро- и миниканалах (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 275–297.
3. **Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.V.** Two-phase flow in short rectangular mini channel // Microgravity Science and Technology. 2007. Vol. 19, No. 3/4. P. 44–47.
4. **Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V.V., Markovich D.M., Kabov O.A.** Regimes of two-phase flow in short rectangular channel // Microgravity Science and Technology. 2009. Vol. 21, No. 1. P. 199–205.
5. **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.
6. **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, № 9. P. 1015–1026.
7. **Ребров Е.В.** Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44, № 4. С. 371–383.
8. **Alekseenko S.V., Antipin V.A., Guzanov V.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M.** Three-dimensional solitary waves on falling liquid film at low Reynolds numbers // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17. P. 121704-1–121704-4.

*Статья поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.,  
после доработки — 14 мая 2015 г.*