

УДК 532.529:536.24

Особенности течения двухфазного потока в прямоугольном микроканале высотой 300 мкм*

Е.А. Чиннов^{1,2}, Ф.В. Роньшин², О.А. Кабов^{1,2,3}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в узком коротком горизонтальном канале прямоугольного сечения шириной 10 мм и высотой 300 микрон. Подробно изучены особенности струйного режима течения. Показано, что с увеличением приведенной скорости жидкости частота пульсаций струи возрастает, отношение смоченной площади верхней стенки канала к площади верхней стенки канала, смоченной жидкостью, уменьшается.

Ключевые слова: двухфазное течение, плоский микроканал.

Развитие теплообменников с микро- и наноразмерами показывает, что такие системы оказываются значительно более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов более 1 мм. Существующие системы охлаждения не позволяют обеспечить современных требований по отводу тепла от высокотемпературных источников в электронном и микроэлектронном оборудовании. 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 промышленности, транспорте и энергетике.

Опубликовано большое количество работ по исследованию двухфазного течения. Обзор публикаций по двухфазному течению в каналах различной конфигурации был представлен в работе [1]. 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. В работах [2, 3] изучались газожидкостные течения в коротких горизонтальных микроканалах

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-01755).

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 [4] была проанализирована структура двухфазного потока в канале высотой 200 мкм. На структуру двухфазного потока влияет большое количество параметров. В работе [5] рассматривалось влияние параметров течения таких, как входной участок, 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.

Из анализа опубликованной литературы можно заключить, что количество публикаций по микроканалам высотой 300 мкм и менее крайне ограничено, хотя такие каналы являются наиболее перспективными для охлаждения сверхвысокопроизводительной электроники, где требуется отведение тепловых потоков более 1000 Вт/см^2 .

В настоящей работе использовался микроканал высотой 300 мкм, шириной 10 мм и длиной 80 мм. Описание установки и устройства микроканала представлено в работе [4]. Для регистрации пленок жидкости на нижней и верхней стенках канала и соответственно определения режимов двухфазного течения использовался Шлирен-метод [2]. Видеозапись с разрешением от 720×576 до 1920×1080 пикселей осуществлялась со скоростью 25 кадров в секунду. Ширина кадра, как правило, превосходила ширину канала. Исследованы основные режимы течения двухфазного потока и определены границы между ними, построена режимная карта процесса для исследуемого канала (рис. 1). В качестве координат использованы приведенные скорости газа U_{SG} и жидкости U_{SL} , которые определялись как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. Выделены следующие основные режимы течения: пузырьковый, струйный, раздельный, вспененный и кольцевой. Для струйного режима выделено два подрежима: стационарный и пульсирующий.

При очень малых приведенных скоростях жидкости газ двигался в центральной части канала, а основная часть жидкости перемещалась по его периферии вдоль боковых стенок. Струйный режим наблюдался при малых приведенных скоростях жидкости и газа, когда газовый поток занимал не более половины сечения канала. Для канала сечением $0,3 \times 10 \text{ мм}^2$ можно выделить несколько характерных подрежимов струйного режима. В стационарном струйном режиме жидкость двигается по бокам канала, а остальное

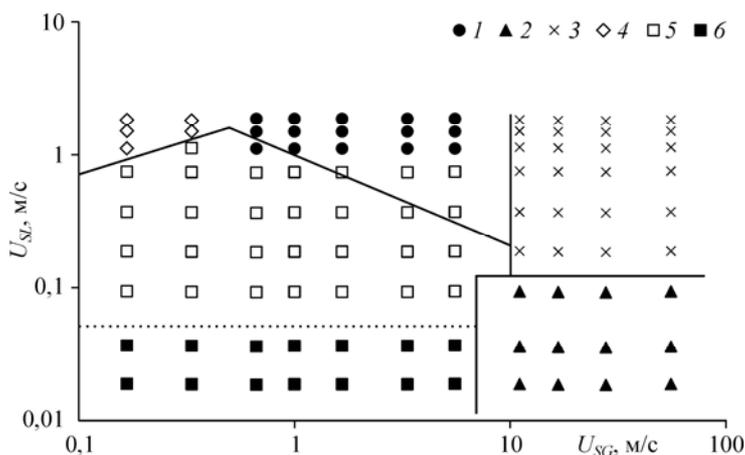


Рис. 1. Режимная карта двухфазного течения в канале сечением $0,3 \times 10 \text{ мм}^2$. Режимы течений: 1 — вспененный, 2 — раздельный, 3 — кольцевой, 4 — пузырьковый, 5 — пульсирующий струйный, 6 — стационарный струйный.

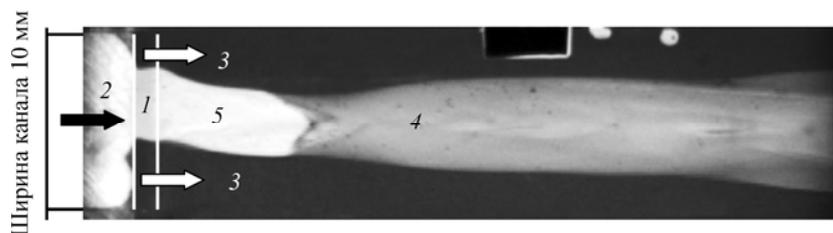


Рис. 2. Шлирен-фотография струйного режима в канале $0,3 \times 10 \text{ мм}^2$ при $U_{SG} = 3,3 \text{ м/с}$, $U_{SL} = 0,092 \text{ м/с}$, вид сверху.

1 — щель в нижней стенке канала для входа жидкости в канал, 2 — вход газа в канал, 3 — жидкость, 4 — пленка жидкости на верхней стенке канала, 5 — несмооченная область на верхней стенке канала. Черная стрелка — направление движения газа, белые стрелки — направления движения жидкости.

пространство занимает газ. Верхняя стенка канала при таком режиме не смачивается. При увеличении приведенной скорости жидкости жидкость, движущаяся по боковым частям канала, занимала больший объем, а осушенная область уменьшалась. При достаточно высоких приведенных скоростях жидкости ($U_{SL} > 0,05 \text{ м/с}$) на верхней стенке канала образовывалась пленка за счет набросов жидкости с его боковых сторон (рис. 2), формировался пульсирующий струйный режим. В пульсирующем струйном режиме жидкость, движущаяся по боковым стенкам канала занимает большую его часть. В области ввода жидкости в канал центр канала занимает газ. В определенный момент жидкость выбрасывается с боковых сторон и формирует пленку на верхней стенке канала. Далее пленка движется вдоль канала, увлекаемая потоком газа, и через определенное время этот процесс повторяется, образуется пульсирующая струя. Характерные частоты пульсаций в Гц приведены в таблице. Видно, что при увеличении приведенной скорости жидкости частота характерных пульсаций в основном возрастает, а при изменении приведенной скорости газа или возрастает слабо и немонотонно для $U_{SL} = 0,092 \text{ м/с}$, или практически не имеет тенденции к росту при $U_{SL} = 0,37 \text{ м/с}$.

На рис. 3 представлена зависимость отношения площади верхней стенки канала, не смоченной жидкостью, к площади верхней стенки канала, смоченной жидкостью (S), от приведенной скорости жидкости (U_{SL}). Указанная зависимость построена для всего исследованного диапазона изменения приведенных скоростей газа ($0,17 \text{ м/с} < U_{SG} < 6 \text{ м/с}$) в струйном режиме течения. Из графика видно, что площадь несмооченной области сокращается с увеличением приведенной скорости жидкости. При увеличении приведенной скорости жидкости частота пульсаций возрастала, происходил переход от пульсирующего струйного режима к вспененному режиму. В таком режиме частота пульсаций была настолько высока, что возникала сложная структура течения, состоящая из сплошных и разорванных перемычек жидкости. Подробный анализ структуры вспененного режима для канала высотой 200 мкм приведен в работе [4]. В этом режиме происходило взаимодействие между боковыми выбросами жидкости, приводящее к образованию пены.

Таблица

Частоты пульсаций струйного режима в канале $0,3 \times 10 \text{ мм}^2$

$U_{SL} \backslash U_{SG}$	0,17 м/с	0,33 м/с	0,67 м/с	1 м/с	1,67 м/с	3,33 м/с	5,56 м/с
0,092 м/с	0,67 Гц	0,75 Гц	0,67 Гц	1 Гц	1,11 Гц	0,82 Гц	1,17 Гц
0,18 м/с	0,73 Гц	1,57 Гц	1 Гц	0,78 Гц	1,86 Гц	1,9 Гц	3,29 Гц
0,37 м/с	2 Гц	2,6 Гц	2,78 Гц	1,56 Гц	1,78 Гц	2,22 Гц	—

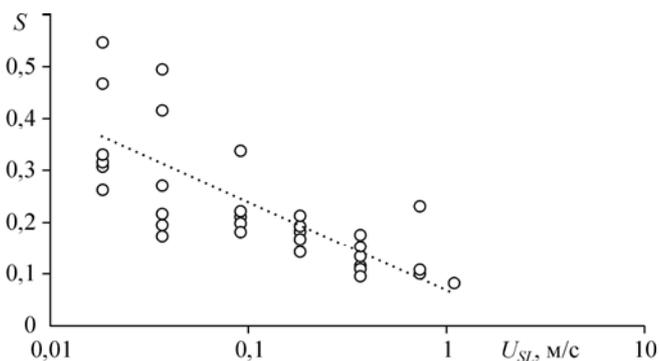


Рис. 3. Зависимость отношения несмоченной площади верхней стенки канала к площади верхней стенки канала, смоченной жидкостью, от приведенной скорости жидкости для струйного режима.

В области невысоких приведенных скоростей жидкости при увеличении приведенной скорости газа происходил переход от струйного к раздельному течению жидкости. В этом режиме часть жидкости двигалась по нижней стенке канала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. При раздельном режиме газ занимал практически всю ширину канала. Только в узкой области по боковым сторонам канала жидкость заполняла всю его высоту. Увеличение приведенной скорости жидкости приводило к появлению возмущений в боковой части канала и росту их интенсивности. При увеличении приведенной скорости жидкости пленка образовывалась на верхней стенке канала, происходил переход к кольцевому режиму. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, а в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока. Газ занимает значительно большую часть объема канала, чем жидкость. По сравнению с раздельным режимом в кольцевом режиме пленка покрывает большую часть верхней стенки канала и, соединяясь с нижней пленкой, образует кольцо.

В заключение следует отметить, что в канале с прямоугольным сечением высотой 300 мкм и шириной 10 мм были обнаружены особенности струйного режима, выделены два подрежима: стационарный и пульсационный. Показано, что с увеличением приведенной скорости жидкости частота пульсаций струи возрастает, а не смоченная жидкостью площадь верхней стенки канала уменьшается.

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. Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V. Two-phase flow in short rectangular mini channel // Microgravity science and technology. 2007. Vol. 19, No. 3/4. P. 44–47.
3. Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V., Markovich D.M., Kabov O.A. Regimes of two-phase flow in short rectangular channel // Microgravity sci. and technology. 2009. Vol. 21, No. 1. P. 199–205.
4. 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.
5. Ребров Е.В. Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44, № 4. С. 371–383.

Статья поступила в редакцию 21 июля 2014 г.,
после доработки — 4 августа 2014 г.