

03

Двухфазное течение в коротких горизонтальных прямоугольных микроканалах высотой 300 μm

© Е.А. Чиннов^{1,2}, Ф.В. Роньшин^{1,2}, О.А. Кабов^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет

E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2015 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в узком коротком горизонтальном канале прямоугольного сечения шириной 10, 20 и 30 μm , высотой 300 μm . Изучены особенности формирования двухфазного потока. Показано, что с увеличением ширины канала растут области вспененного и пузырькового режимов, сжимая область струйного режима течения. Границы областей кольцевого и раздельного режимов течения практически не меняются.

В настоящее время происходит бурное развитие микроэлектроники, что вызывает миниатюризацию систем охлаждения. Существующие системы охлаждения не позволяют обеспечить современные требования по отводу тепла от высокотемпературных источников в электронном и микроэлектронном оборудовании. При уменьшении толщин плоских каналов отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально его минимальному поперечному размеру, что обуславливает высокую интенсивность теплообмена в микросистемах. Такие системы оказываются значительно более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов более 1 mm , и получают все

более широкое распространение как в микроэлектронике, так и в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике.

Обзор публикаций по двухфазному течению в каналах различной конфигурации был представлен в работах [1,2]. Показано, что в большинстве работ используются длинные микроканалы (длинными являются каналы, длина которых на порядок и более превосходит максимальный поперечный размер, в данном случае ширину), 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. В коротких каналах существенное влияние на структуру двухфазного потока оказывает начальный участок, в то время как в длинных каналах начальный участок практически не влияет на режимы течения. Несмотря на актуальность исследования двухфазных течений в коротких каналах, количество публикаций по этой теме весьма ограничено. В работах [3,4] изучались газожидкостные течения в коротких горизонтальных миниканалах 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] была проанализирована структура двухфазного потока в канале высотой 200 мкм. На структуру двухфазного потока влияет большое количество параметров. В работе [6] рассматривалось влияние следующих факторов на границы двухфазного течения в микроканалах: геометрии входных участков, диаметра (поперечный размер) каналов, формы сечения каналов, гидрофильности поверхностей стенок каналов, величины коэффициентов поверхностного натяжения и вязкости жидкости. Было показано, что режимы течения в значительной степени зависят от условий ввода фаз в канал. Важным фактором является геометрия канала, его ширина и отношение сторон.

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 создания систем охлаждения сверхвысокопроизводительной электроники, где требуется отведение тепловых потоков более 1000 W/cm².

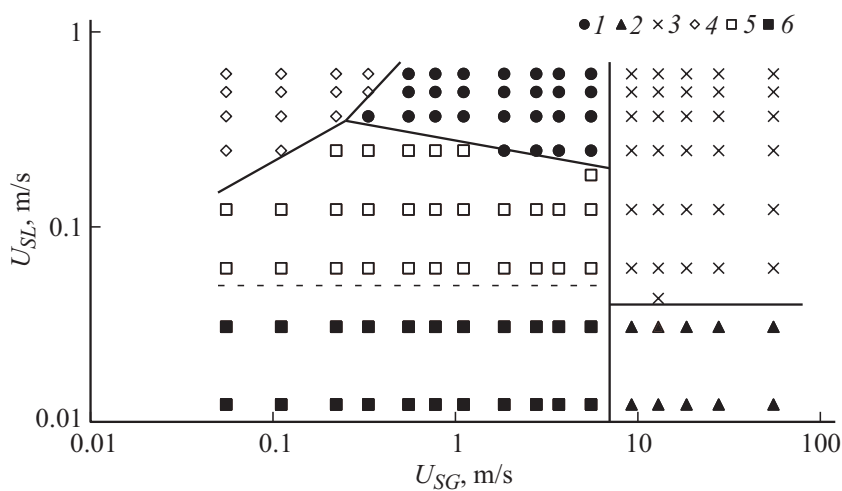


Рис. 1. Режимная карта двухфазного течения в канале сечением 0.3×30 mm. Режимы течений: 1 — вспененный, 2 — раздельный, 3 — кольцевой, 4 — пузырьковый, 5 — пульсирующий струйный, 6 — стационарный струйный.

Целью данной работы является изучение двухфазного потока в прямоугольном микроканале длиной 80 mm, высотой 300 μ m, с разной шириной 10, 20 и 30 mm.

Описание установки и устройства микроканала представлено в работе [5]. Для регистрации пленок жидкости на нижней или верхней стенках канала и определения режима двухфазного течения использовался шпирен-метод [3]. Видеозапись с разрешением от 720×576 до 1920×1080 пикселей осуществлялась со скоростью 25 fps. Ширина кадра, как правило, превосходила ширину канала.

Исследованы основные режимы течения двухфазного потока и определены границы между ними, построены режимные карты процесса для каждого из каналов. На рис. 1 представлена режимная карта двухфазного течения в канале шириной 30 mm. 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

1* Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 17

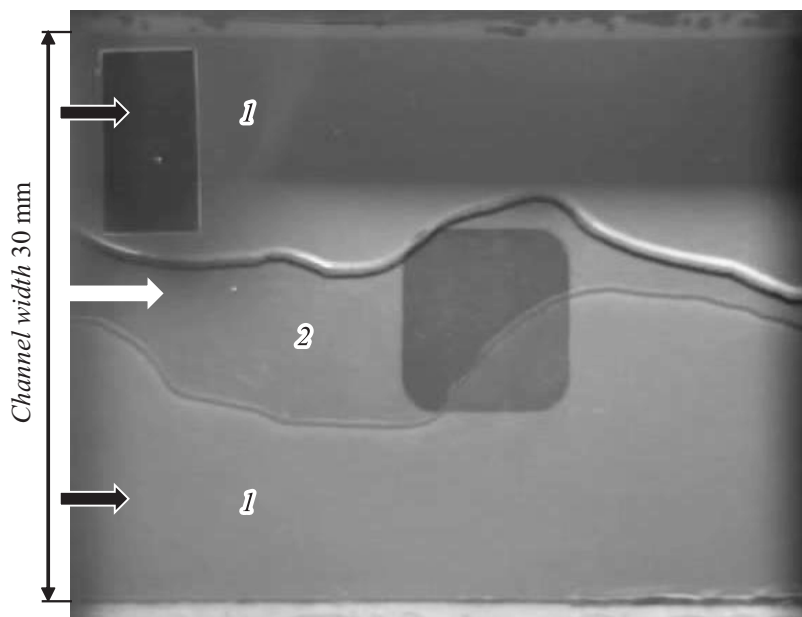


Рис. 2. Шлирен-фотография струйного режима в канале сечением 0.3×30 mm при $U_{SG} = 0.22$ m/s, $U_{SL} = 0.12$ m/s, вид сверху. 1 — жидкость, 2 — несмоченная область на верхней стенке канала. Черные стрелки — направление движения жидкости, белая стрелка — направления движения газа.

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 (рис. 2). Возмущения на поверхности жидкости не возникали. Стационарный струйный режим наблюдался при малых приведенных скоростях жидкости и газа, когда газовый поток занимал не более половины сечения канала. 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 ($U_{SL} > 0.05$ m/s) на верхней стенке канала образовывалась пленка за счет набросов жидкости с боков канала, формировался пульсирующий струйный режим. В пульсирующем струйном режиме жидкость, движущаяся по бокам канала, занимает большую его часть. В области ввода жидкости в канал центр канала занимает газ. В определенный момент жидкость выбрасывается с боков 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. Струйный режим является специфическим для плоских коротких миниканалов. 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, наступали снарядный или пузырьковый режимы течения.

При пузырьковом режиме течения по каналу движется жидкость, содержащая много небольших пузырьков газа. Размер и количество пузырьков изменяются в зависимости от расходов жидкости и газа, но их поперечный размер существенно меньше ширины канала. С увеличением приведенных скоростей жидкости и газа увеличивается частота движения пузырей. При дальнейшем увеличении приведенной скорости газа начинают появляться разрывы в перемычках жидкости, разделяющих пузыри, происходит переход к вспененному режиму течения. Этот режим характерен для вертикальных каналов [7], где он обусловлен гравитацией, а также наблюдается в широких горизонтальных микроканалах высотой менее 1 mm. Данный режим подробно рассмотрен в работе [5]. Вспененный режим занимает значительную область на карте. Переход от пузырькового (сплошные заполненные перемычки жидкости) к вспененному режиму сопровождался появлением разрывов в перемычках. Переход от струйного режима к вспененному, наоборот, сопровождался 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 пульсаций жидкости, движущейся у боковых сторон канала под действием газового потока.

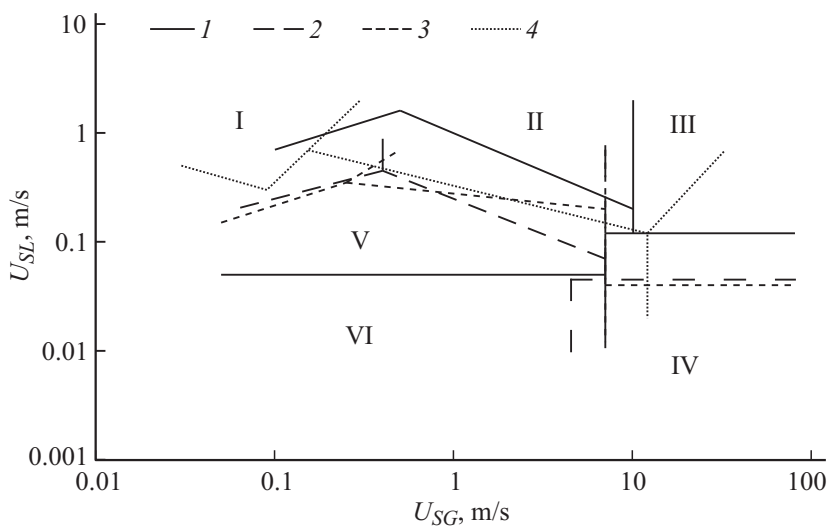


Рис. 3. Сравнение режимных карт для каналов сечением: 1 — 0.3×10 mm, 2 — 0.3×20 mm, 3 — 0.3×30 mm, 4 — 0.3×40 mm. Режимы течений: I — пузырьковый, II — вспененный, III — кольцевой, IV — раздельный, V — пульсирующий струйный, VI — стационарный струйный.

При увеличении приведенной скорости газа происходил переход к кольцевому режиму течения, сплошные заполненные перемычки жидкости исчезали. Причиной перехода являлось увеличение частоты боковых пульсаций, вследствие чего на верхней стенке канала также появлялась пленка жидкости. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока. В таком режиме газ занимает значительно больший объем, чем жидкость.

При уменьшении приведенной скорости жидкости пленка на верхней стенке канала не образовывалась, происходил переход к раздельному режиму течения. 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 в микроканалах характерен только для некруглых каналов, так как в круглых трубах малого диаметра

пленка замыкается, образуя кольцевой режим [8]. В раздельном режиме газ занимал практически всю ширину канала. Только в узкой области по боковым сторонам канала жидкость заполняла всю его высоту. В таком режиме газ движется в центре канала, занимая большую часть его сечения. Под действием газового потока жидкость распространяется в виде гладкой пленки на нижней стенке канала и у боковых стенок.

На рис. 3 представлено сравнение режимных карт каналов сечением 0.3×10 , 0.3×20 , 0.3×30 и 0.3×40 mm. Видно, что с увеличением ширины канала растет область вспененного и пузырькового режимов (границы сдвигаются в сторону более низких приведенных скоростей жидкости), сжимая область струйного режима течения. С увеличением ширины канала возрастает неустойчивость двухфазного потока к возмущениям в области входа жидкости в канал. В случае широких каналов значительная часть жидкости может поступать в канал не только по бокам, но и в центральной его части, способствуя перемешиванию газожидкостного потока. В результате переход от струйного к вспененному режиму происходит при меньших приведенных скоростях жидкости. Граница между пульсирующим струйным и стационарным струйным режимами не менялась для всех каналов. Области кольцевого и раздельного режимов течения меняются незначительно.

В заключение следует отметить, что для каналов с прямоугольным сечением и высотой $300 \mu\text{m}$ были обнаружены особенности струйного режима, выделены два подрежима: стационарный и пульсационный. Проведено сравнение режимных карт для каналов высотой $300 \mu\text{m}$, шириной 10, 20 и 30 mm и определено, что ширина канала оказывает существенное влияние на границы между режимами. С увеличением ширины канала растет область вспененного и пузырькового режимов, сжимая область струйного режима течения. Границы области кольцевого и раздельного режимов течения практически не меняются.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 14-19-01755).

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.
- [2] Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А. // Теплофизика и аэродинамика. 2015. Т. 22. № 3.

- [3] *Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.* // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. 19. № 3/4. P. 44–47.
- [4] *Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V., Markovich D.M., Kabov O.A.* // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. N 1. P. 199–205.
- [5] *Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Кабов О.А.* // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 710–717.
- [6] *Ребров Е.В.* // ТОХТ. 2010. Т. 44. № 4. С. 371–383.
- [7] *Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S.* // Int. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25. № 3. P. 411–432.
- [8] *Varajas A.M., Panton R.L.* // Int. J. Multiphase Flow. 1993. V. 19. № 2. P. 337–346.