

03

Режимы двухфазного течения в плоском коротком микроканале

© Е.А. Чиннов, О.А. Кабов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, Россия
Исследовательский центр Микрогравитации Свободного университета
г. Брюсселя, Бельгия
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2007 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в узком коротком горизонтальном канале прямоугольного сечения и высотой $300\ \mu\text{m}$. Показано, что режимы двухфазного течения в исследуемом канале существенно отличаются от классических режимов течения в протяженных каналах большого сечения. Обнаружен струйный режим течения, который возникает вследствие уменьшения длины и высоты канала.

PACS: 47.61.Jd

В настоящее время наблюдается существенный рост интереса к капиллярной гидродинамике и теплообмену в микросистемах, вызванный бурным развитием электроники и медицины, а также миниатюризацией устройств в различных областях техники, например в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии содержится в [1].

В большинстве опубликованных работ рассматриваются относительно длинные каналы. До исследуемой зоны длина течения двухфазного потока превосходит высоту канала в сотни и тысячи раз. В биочипах, системах охлаждения микроэлектроники и других жидкостных микросистемах (мини-холодильники . . .) длина каналов весьма ограничена. На борту космических аппаратов и международной космической станции также существуют жесткие ограничения на размеры используемых и исследуемых систем.

Хотя к настоящему времени исследования двухфазных течений в круглых трубах выполнены для весьма малых диаметров до $20\ \mu\text{m}$ [2],

а в вертикальных щелевых каналах — до толщины, равной $300\ \mu\text{m}$ [3], горизонтальные щелевые каналы с высотой менее $2\ \text{mm}$ остаются слабо изученными. Исследования двухфазных течений в коротких микроканалах еще более ограничены. В работе [4] изучались характеристики двухфазного течения водо-воздушной смеси в горизонтальном коротком канале $65\ \text{mm}$, длиной $170\ \text{mm}$ и высотой $2\ \text{mm}$. Приведенная скорость газа изменялась от $0,8 \cdot 10^{-2}$ до $15\ \text{m/s}$, а жидкости — от $4 \cdot 10^{-4}$ до $2,4 \cdot 10^{-2}\ \text{m/s}$. Жидкость подавалась в поток газа с нижней стороны щелевого канала из сопла высотой $200\ \mu\text{m}$. Из-за малого диапазона изменения приведенной скорости жидкости наблюдались только отдельные гладкий и волновой режимы течения. Волны на границе раздела газ–жидкость могли иметь двухмерный или трехмерный характер.

Целью данной работы является исследование режимов двухфазных течений в коротком (длиной $80\ \text{mm}$) горизонтальном канале шириной $40\ \text{mm}$ и высотой $300\ \mu\text{m}$. В качестве жидкости используется дистиллированная вода, а в качестве газа — азот.

Основной частью рабочего участка являлась пластина из нержавеющей стали длиной $135\ \text{mm}$ и шириной $60\ \text{mm}$, которая устанавливалась в основание из текстолита. Сверху пластина закрывалась крышкой из оптического стекла. Плоские направляющие вдоль течения создавали канал шириной $40\ \text{mm}$. Стенд включал два циркуляционных контура по жидкости и газу, которые управлялись компьютером. Жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса подавалась в канал через плоское сопло с зазором $300\ \mu\text{m}$, равным высоте канала. Сопло располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ поступал в канал из баллона через плоское сопло такого же размера ($300\ \mu\text{m}$), установленного в верхней крышке. В этом случае газ и жидкость подавались в одном вертикальном сечении с углом наклона к плоскости канала 15 градусов. В части опытов газ подавался вдоль пластины из нержавеющей стали на расстоянии $40\ \text{mm}$ от входа жидкости. Регистрация двухфазных течений осуществлялась цифровыми видео- и фотокамерами с использованием шлирен-метода с отражением оптического луча от границы раздела газ–жидкость [5]. Нижняя поверхность канала была покрыта абсорбирующим излучение покрытием. Метод позволял кодировать деформации границы раздела газ–жидкость в оттенках серого цвета и имел чувствительность порядка $0,1\ \mu\text{m}$.

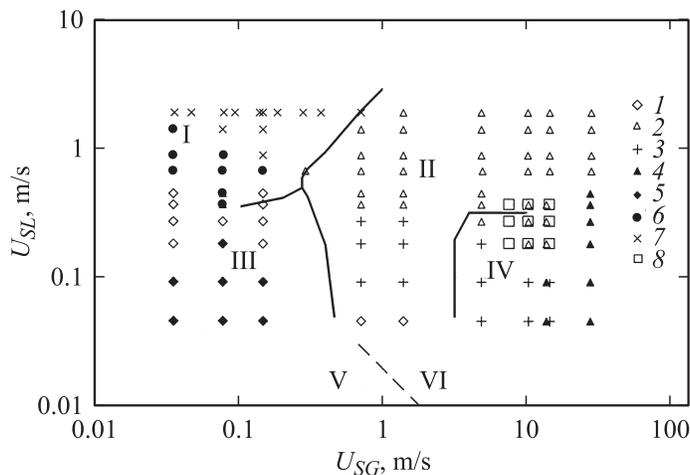


Рис. 1. Карта режимов двухфазных течений в горизонтальном канале шириной 40 mm, длиной 80 mm и высотой 0.3 mm: 1 — прерывистый, 2 — вспененный, 3 — струйный, 4 — капельно-кольцевой, 5 — снарядный, 6 — пузырьковый, 7 — струйно-пузырьковый, 8 — кольцевой. Данные для вертикального канала шириной 12 mm, длиной 260 mm и толщиной 0.3 mm [3]: I — пузырьковый, II — вспененный, III — снарядный, IV — капельно-кольцевой. Данные для горизонтального канала шириной 65 mm, длиной 170 mm и высотой 2 mm [4]: V — гладкий раздельный, VI — волновой пленочный.

На рис. 1 показана карта режимов двухфазного течения в исследуемом горизонтальном канале, на которой также представлено сравнение с данными работы [3] — сплошные линии и работы [4] — штриховая линия. В качестве координат традиционно 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 основные режимы течения двухфазной смеси в канале: пузырьковый, снарядный, прерывистый, струйный, кольцевой, капельно-кольцевой, вспененный и струйно-вспененный.

При пузырьковом режиме происходит движение пузырей, размер которых существенно меньше ширины канала. Пузыри отделены тонкой пленкой жидкости от верхней и нижней стенок канала и в отличие от каналов большего размера и вертикально расположенных каналов

имеют более сложную форму и широкий разброс по размерам. Наиболее существенно различие с данными работы [3] для вертикального канала, где наблюдались пузыри с характерной формой в виде сегмента круга. Снарядный режим наступает, когда пузырь заполняет большую часть канала по ширине. Область снарядного режима течения, обычно занимающая одно из важнейших мест в классических двухфазных потоках, в узком и коротком канале значительно сужается, что, по-видимому, вызвано изменением баланса сил инерции и поверхностного натяжения. В этом случае газовый пузырь достигает размеров, больших половины ширины и длины канала. Фактически в коротком канале данной конфигурации может находиться только один такой пузырь. Прерывистый режим характеризуется наличием хотя бы одной перемычки жидкости, разделяющей газовый поток в центральной части канала. Область этого режима расположена между снарядным и пузырьковым режимами.

При струйном режиме газовая струя занимает центральную часть канала по всей его длине. Этот режим является одним из основных для короткого канала и существует при изменении приведенной скорости газа на два порядка. Стационарный струйный режим наблюдается при малых приведенных скоростях жидкости и газа и характеризуется наличием газового ядра сложной формы. При более высоких приведенных скоростях жидкости и газа течение теряет устойчивость, газовая струя расширяется и сужается с достаточно высокой частотой (рис. 2). Отличительной чертой от каналов большей толщины является наличие мелких капель на нижней стенке канала при малых приведенных скоростях жидкости в снарядном, прерывистом и струйном режимах. Подобный эффект наблюдался для снарядного режима в работе [3] для вертикального прямоугольного канала с толщиной 0.3 mm. При дальнейшем увеличении приведенной скорости жидкости струйный режим становится еще более неустойчивым. Неустойчивость течения характеризуется распадом одиночной струи или взаимодействием нескольких струй газа между собой, что приводит к перемешиванию газа и жидкости. Наступает вспененный режим. Этот режим является основным для вертикального прямоугольного канала с толщиной 0.3 mm [3]. Как видно из рис. 1, область, соответствующая вспененному режиму для исследуемого канала, совпадает с аналогичной областью для вертикального канала.

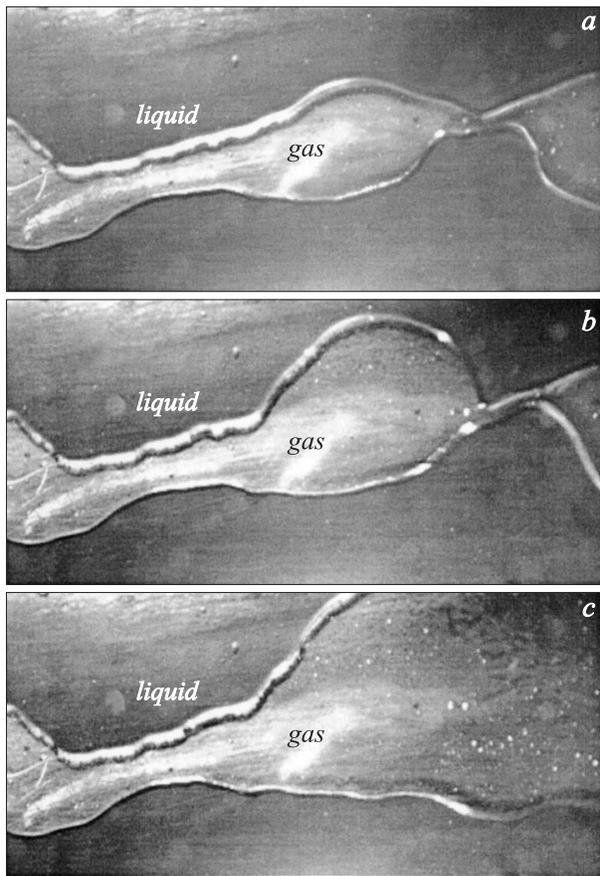


Рис. 2. Фотографии струйного режима течения при $U_{SL} = 0.09$ m/s, $U_{SG} = 0.7$ m/s. Время между кадрами 200 ms.

Другой особенностью исследуемого короткого горизонтального канала является наличие струйно-пузырькового режима при малых приведенных скоростях газа и высоких приведенных скоростях жидкости. В этом режиме наблюдаются тонкие струи в начальной части канала, которые дробятся на пузыри. При увеличенной приведенной скорости

газа начинается взаимодействие между струями и происходит переход к вспененному режиму. В кольцевом режиме пленка жидкости находится на верхней и нижней сторонах канала, хотя изначально подается на нижнюю сторону канала. Кольцевой режим образуется в результате выброса жидкости на верхнюю стенку с боковых стенок канала. В капельно-кольцевом режиме происходит частичное осушение верхней и нижней поверхностей канала, жидкость движется преимущественно в виде капель.

Таким образом, установлено, что режимы двухфазного течения в узких и коротких каналах существенно отличаются от классических режимов течения в протяженных каналах большого сечения. Зарегистрированы новые режимы течения (прерывистый, струйный и струйно-пузырьковый), которые могут быть связаны с новыми типами неустойчивости при течении двухфазной смеси в горизонтальных прямоугольных каналах малой длины и высоты. По-видимому, струйный режим, не обнаруженный при течении двухфазного потока в протяженных каналах, возникает в результате уменьшения длины и высоты канала, а формирование кольцевого и вспененного режимов происходит в результате достижения условий неустойчивости струйного режима. Известные карты режимов двухфазного течения в протяженных каналах и существующие методики расчета границ этих режимов должны применяться с большой осторожностью к коротким каналам, имеющим место в быстро развивающихся мини- и микросистемах. Для понимания закономерностей формирования двухфазных режимов необходимо детальное исследование устойчивости струйного режима. В отличие от данных работы [4] для горизонтального канала высотой 2 mm отдельные режимы с пленкой жидкости на нижней части канала не обнаружены. Отдельные режимы также не были обнаружены в микро- и мини-трубах диаметром менее 2 mm. Таким образом, возникает вопрос о возможности существования таких режимов в плоских узких и коротких каналах. Этот вопрос является принципиальным для создания пленочных систем охлаждения с использованием микроканалов [4].

Работа поддержана грантами СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111) и президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-6749.2006.8.

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.
- [2] Serizawa A., Feng Z., Kawara Z. // Exp. Thermal Fluids Science. 2002. V. 26. P. 703–714.
- [3] Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S. // Int. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25. P. 411–432.
- [4] Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V. et al. // Int. Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103–112.
- [5] Scheid B., Kabov O.A., Minetti C. et al. // 3rd European Thermal Sciences Conference. September 10–13, 2000. Heidelberg, Germany. V. 1. P. 651–657.