

03

Образование капель в микроканалах

© Е.А. Чиннов, О.А. Кабов

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

Поступило в Редакцию 4 февраля 2011 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока и образования капель в узких горизонтальных каналах прямоугольного сечения и высотой от 100 до 440 μm . Показано, что в указанных каналах существуют режимы течения, в которых происходит образование капель при малых значениях приведенных скоростей жидкости и газа. Определены разные режимы формирования как неподвижных капель жидкости на стенках каналов, так и движущихся капель в результате проявления неустойчивостей газожидкостного течения.

В настоящее время наблюдается рост интереса к капиллярной гидродинамике и теплообмену в микросистемах, вызванный 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]. Во многих работах формирование капель наблюдалось при переходе от кольцевого к капельно-кольцевому режиму при высоких приведенных скоростях газа более 10–20 m/s . В частности, этот эффект исследовался в горизонтальных прямоугольных каналах высотой 1 mm [2] и в вертикальных трубах с диаметром более 1 mm [3]. В более узких горизонтальных каналах мелкие капли на нижней стенке канала были обнаружены при малых приведенных скоростях жидкости в снаряжном, прерывистом и струйном режимах течения [4]. Подобное явление наблюдалось для снаряжного режима в работе [5] для вертикального прямоугольного канала с толщиной 0.3 mm . В горизонтальном прямоугольном канале с толщиной 0.2 mm [6]

обнаружена особенность двухфазного течения в виде образования капель и струек жидкости.

Целью данной работы является исследование течения двухфазного потока и основных режимов образования капель в узких горизонтальных каналах прямоугольного сечения и высотой от 100 до 440 μm .

Основной частью рабочего участка являлась пластина из нержавеющей стали длиной 135 mm и шириной 60 mm, которая устанавливалась в основание из текстолита. Сверху пластина закрывалась крышкой из оптического стекла. Плоские направляющие вдоль течения создавали каналы шириной 30–34 mm. Толщина этих направляющих определяла толщины исследуемых каналов. Стенд включал два циркуляционных контура по жидкости и газу, которые управлялись компьютером. Жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса подавалась в канал через плоское сопло. Сопло располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ поступал в канал на расстоянии 40 mm от входа жидкости. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, а в качестве газа — азот или воздух. Подробное описание установки содержится в [2,7].

Регистрация двухфазных течений осуществлялась цифровыми видео и фото камерами с использованием шлирен метода с отражением оптического луча от границы раздела газ–жидкость [2]. Нижняя поверхность канала была покрыта абсорбирующим излучение покрытием. Метод позволял кодировать деформации границы раздела газ-жидкость в оттенках серого. Для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах был использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции [7], который основан на переизлучении флуорофором поглощенного света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом.

На рис. 1 показаны карты режимов двухфазного течения в горизонтальных каналах толщиной 300 и 440 μm и шириной 30 mm. 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, струйный, кольцевой, отдельный и вспененный. Обнаружены режимы течения, в которых происходило образование капель при малых значениях приведенной скорости газа. Формирование капель при высоких приведенных скоростях газа в области перехода от кольцевого к капельно-кольцевому режиму не рассматривалось.

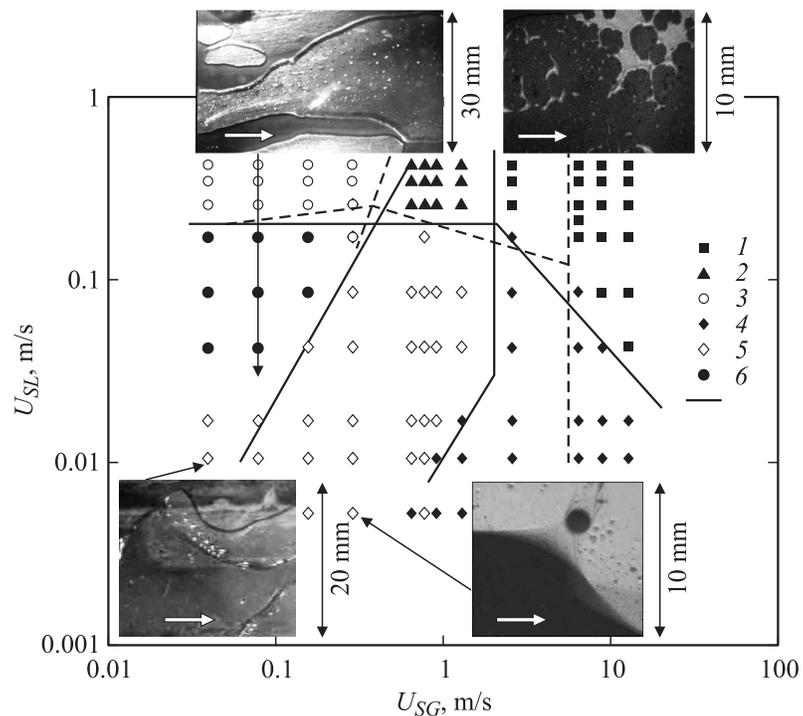


Рис. 1. Карта режимов двухфазных течений и областей образования капель в горизонтальных каналах шириной 30 mm и высотой 0.3 mm (штриховые линии) и 0.44 mm (сплошные линии). Экспериментальные данные для канала шириной 30 mm и высотой 0.44 mm: 1 — кольцевой, 2 — вспененный, 3 — пузырьковый, 4 — раздельный капельно-кольцевой, 5 — струйный, 6 — снарядный. Светлыми стрелками показано направление движения газожидкостного потока.

В канале толщиной $440\ \mu\text{m}$ при значениях приведенной скорости газа менее $0.05\ \text{m/s}$ и приведенной скорости жидкости менее $0.02\ \text{m/s}$ наблюдалось появление регулярных рядов капель, образующихся на нижней стенке канала (светлые точки на фотографии в нижнем левом углу на рис. 1). В этом случае через центральную часть канала проходил поток жидкости, периодически отделенный от жидкости в боковых частях канала газовыми прослойками или соединенный

перемычками жидкости. Движение газожидкостного потока на всех фотографиях рис. 1 происходило слева направо. После прохождения потока жидкости и разрушения перемычек на внутренней поверхности стенок канала образовывались ряды капель диаметром от 100 до 500 μm .

Образование мелких капель в том же диапазоне размеров на нижней стенке канала при малых приведенных скоростях жидкости в струйном режиме наблюдалось в канале с толщиной 0.3 mm (светлые точки на фотографии в верхнем левом углу на рис. 1). Как правило, капли возникали после достаточно быстрого перемещения двухфазной границы. Видеосъемка с использованием шпирен метода показала, что в этом случае наблюдался разрыв пленки, а ее остатки на поверхности стенки канала собирались в капли (на фотографии в верхнем правом углу на рис. 1 светлые места соответствуют каплям и остаткам пленки жидкости, а темные — осушенной внутренней поверхности стенок канала). Подобный эффект наблюдался для снарядного режима в работе [3] для вертикального прямоугольного канала с толщиной 0.3 mm при малых значениях приведенных скоростей жидкости и газа. Появление стационарных капель (существующих достаточно долго до смывания их сплошным потоком жидкости) в каналах 300 и 440 μm , по-видимому, связано с уменьшением характерной толщины пленок жидкости при уменьшении толщины каналов.

Как показано в работе [7], в канале толщиной 440 μm при раздельном режиме течения достаточно редкие возмущения могли приводить к отрыву части жидкости и выбросу ее в центр канала. Жидкостное образование могло иметь сложную форму с характерным размером, существенно превышающим толщину канала. Под действием потока газа жидкость перемещалась в сторону выхода. В канале высотой 300 μm при малых значениях приведенных скоростей жидкости, например, при $U_{SL} = 0.006 \text{ m/s}$, $U_{SG} = 0.5 \text{ m/s}$, было зарегистрировано появление подвижных капель (на шпирен фотографии в нижнем правом углу на рис. 1 темные области соответствуют жидкости, полностью заполняющей высоту канала, а светлые области — пленке на внутренней поверхности верхней стенки канала). После выброса жидкости в центр канала в результате возмущения и последующего ее возврата, часть жидкости отделялась в виде капли (черный круг с диаметром 1.5 mm), и по инерции перемещалась в сторону боковых стенок канала. Диаметр этих капель превышал толщину канала и, как правило, находился в

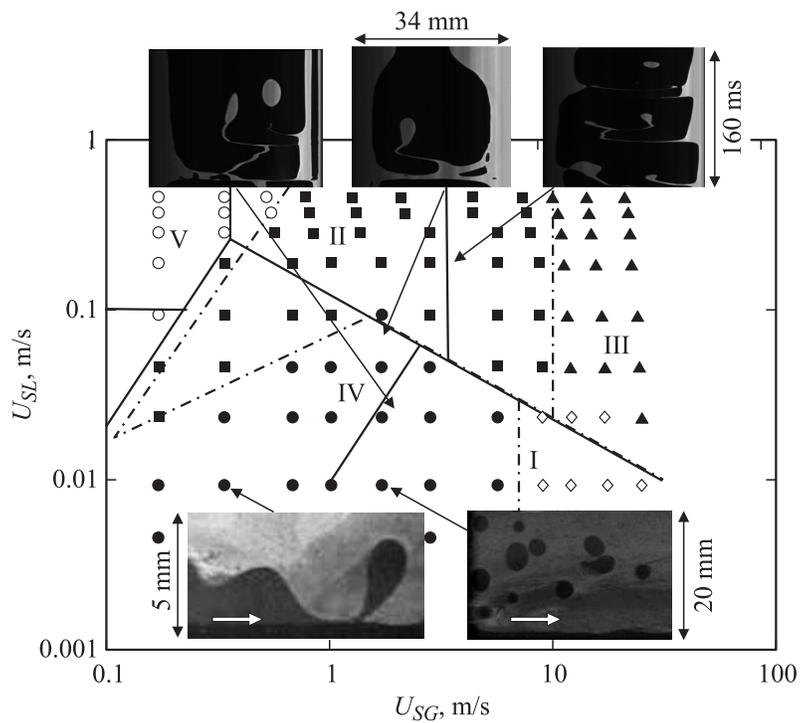


Рис. 2. Карта режимов двухфазных течений и областей образования капель в горизонтальных каналах высотой 0.1 mm и шириной 30 mm (штрихпунктирные линии), высотой 0.2 mm и шириной 34 mm (сплошные линии). Экспериментальные данные для канала шириной 30 mm и высотой 0.1 mm: I — раздельный, II — вспененный, III — кольцевой, IV — капельный, V — пузырьковый. Светлыми стрелками показано направление движения газожидкостного потока.

пределах от 1 до 5 mm, а форма за счет капиллярных сил оставалась близкой к кругу.

Если в канале 300 μm подвижные капли образовывались при крайне малых значениях приведенных скоростей жидкости, то в каналах 200 μm и менее капли наблюдались в широком диапазоне ее изменения. На рис. 2 показаны карты режимов двухфазного течения в горизонтальных каналах толщиной 100 и 200 μm . Экспериментальные данные приведены

для канала $100\ \mu\text{m}$. В верхней части рис. 2 показаны характерные для разных режимов течения в канале $200\ \mu\text{m}$ зависимости яркости свечения флуорофора (пропорционального толщине пленки) от времени (вид сверху). Отсчет времени осуществлялся от нижнего края фотографии, а соответствующий изображениям период времени составлял $160\ \text{ms}$. В отличие от шрилен фотографий светлые области соответствуют жидкости, полностью заполняющей высоту канала, а темные области — пленке на внутренней поверхности стенок канала. Ширина изображения соответствовала ширине канала $34\ \text{mm}$. Стрелками показаны места расположения этих данных на карте режимов. Видно, что капли (светлые замкнутые области) возникали в разных режимах двухфазного течения при изменении приведенной скорости жидкости от 0.033 до $0.16\ \text{m/s}$, в результате неустойчивости газожидкостного течения в боковых частях канала.

В горизонтальных каналах толщиной $100\ \mu\text{m}$ образование капель происходило еще более интенсивно. Помимо образования капель в результате неустойчивости газожидкостного течения в боковых частях канала (шлирен фотография в нижнем левом углу на рис. 2 при $U_{SL} = 0.009\ \text{m/s}$, $U_{SG} = 0.33\ \text{m/s}$) происходила их генерация в области входа жидкости в микроканал через сопло в нижней его части (шлирен фотография в нижнем правом углу на рис. 2). На шлирен фотографиях капли жидкости соответствуют темным областям. В результате возникала новая область двухфазного течения, в которой наблюдалось движение жидких капель по всему каналу, рис. 2.

Таким образом, можно заключить, что характерной особенностью газожидкостного течения в каналах высотой менее $500\ \mu\text{m}$ является образование капель жидкости. Можно выделить два режима: образование фиксированных капель на стенке канала в результате разрыва пленки или перемычек жидкости и возникновение подвижных капель в результате неустойчивости двухфазного течения. Детальное раскрытие механизмов образования капель в указанных режимах является предметом дальнейших исследований.

Работа поддержана грантами СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 64) и Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК № 14.740.11.0103).

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.
- [2] Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V. // Microgravity science and technology. 2007. V. 19. N 3/4, P. 44–47.
- [3] Mishima K., Hibiki T. // Int. J. Multiphase Flow. 1996. V. 22. N 4. P. 703.
- [4] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // Письма ЖТФ. 2008. Т. 34. № 16. С. 41–47.
- [5] Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S. // Int. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25. P. 411–432.
- [6] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. № 10. С. 52–58.
- [7] Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V. et al // Micro gravity science and technology. 2009. V. 21. S Issue 1, P. 199–205.