

03

Особенности двухфазного течения в прямоугольном 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: chinnov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2009 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольном коротком горизонтальном канале высотой $200\ \mu\text{m}$. Использование флуоресцентного и шлирен-методов позволило зарегистрировать и количественно определить характеристики течения жидкости в канале. Установлено существование раздельного режима течения. Обнаружена особенность двухфазного течения в исследуемом канале в виде образования капель и струек жидкости. Показано, что изменение высоты горизонтального канала оказывает существенное влияние на границы между режимами.

В настоящее время происходит революционное развитие теплообменных систем с микро- и наноразмерами, и эти системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов $3\text{--}100\ \text{mm}$. В работе [1] исследовалась теплоотдача к тонкой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в канале высотой $2\ \text{mm}$. Величина отводимых тепловых потоков достигла $250\ \text{W}/\text{cm}^2$. Однако остается не ясным, устойчиво ли раздельное течение с тонкой пленкой жидкости на нижней стенке канала и может ли оно существовать в микроканалах. В [2] исследованы карты режимов течения двухфазных воздушно-водяных потоков для труб диаметром 1 , 1.6 и $2\ \text{mm}$. Если в трубках диаметром 1.6 и $2\ \text{mm}$ выделена область раздельного режима течения, то в капилляре с диаметром $1\ \text{mm}$ раздельный режим не обнаружен. В канале высотой $300\ \mu\text{m}$ обнаружены новые режимы течения (прерывистый, струйный и струйно-пузырьковый), но раздельный режим зарегистрирован не был [3].

Целью данной работы является исследование режимов двухфазных течений в коротком (длиной 80 mm) горизонтальном канале шириной 34 mm и высотой 200 μm .

Стенд включал два циркуляционных контура по жидкости и газу, которые управлялись компьютером. Жидкость с помощью высокоточного перистальтического насоса подавалась в канал через плоское сопло, которое располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ подавался в центральную часть канала. Для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах был использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции, основанный на переизлучении флуорофором поглощенного света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением флуорофора Родамин 6G, а в качестве газа — азот. С помощью цилиндрической линзы лазерный луч разворачивался в линию, которая располагалась поперек газожидкостного потока, на расстоянии 52 mm от места ввода жидкости в канал. Переизлучаемый свет фиксировался цифровой камерой, оснащенной светофильтром, пропускающим переизлученный флуорофором свет и отсекающим излучение лазера. Камера позволяла с высокой частотой дискретизации (до 2.1 kHz) оцифровывать получаемый сигнал. Выделялись области канала, которые были полностью заполнены жидкостью, и области, в которых основную часть сечения канала занимал газ. Распределение жидкости по толщине канала в данной работе не анализируется. Более подробное описание установки и методики измерения содержится в [4]. Следует отметить, что флуоресцентный метод не позволяет выделить наличие одной или двух пленок жидкости на внутренних поверхностях канала. Для регистрации пленок жидкости на нижней и верхней стенках канала и соответственно условий перехода к раздельному и кольцевому режимам течения использовалась шпирентехника, описанная в [5].

Экспериментально исследованы основные режимы течения двухфазного потока, определены границы между ними и построена режимная карта процесса для исследуемого канала высотой 200 μm . На рис. 1 показана карта режимов двухфазного течения в исследуемом горизонтальном канале. Выделены основные режимы течения двухфазной смеси в канале: пузырьковый, снарядный, струйный, кольцевой, вспененный и раздельный (режимы обозначены залитыми значками 9–14, их границы — сплошными линиями). В качестве основных параметров

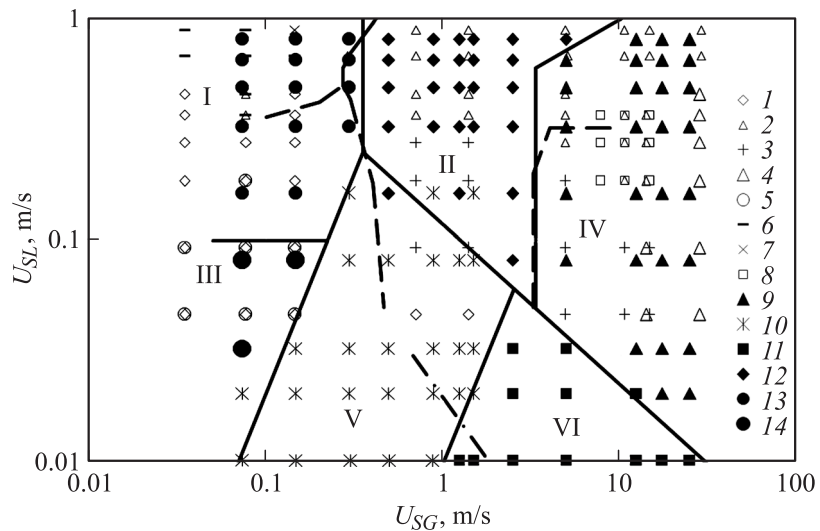


Рис. 1. Сравнение режимов двухфазных течений в прямоугольных каналах. Экспериментальные данные для горизонтального канала шириной 40 мм, длиной 80 мм и толщиной 0.3 мм [3]: 1 — прерывистый, 2 — вспененный, 3 — струйный, 4 — капельно-кольцевой, 5 — снарядный, 6 — пузырьковый, 7 — струйно-пузырьковый, 8 — кольцевой. Данные для горизонтального канала шириной 34 мм, длиной 80 мм и толщиной 0.2 мм (разделительные сплошные линии): 9 — кольцевой, 10 — струйный, 11 — разделительный, 12 — вспененный, 13 — пузырьковый, 14 — снарядный. Данные для вертикального канала шириной 12 мм, длиной 260 мм и толщиной 0.3 мм [6] (разделительные штриховые линии): I — пузырьковый, II — вспененный, III — снарядный, IV — капельно-кольцевой. Данные для горизонтального канала шириной 65 мм, длиной 170 мм и высотой 2 мм [7] (разделительные штрихпунктирные линии): V — гладкий, разделный, VI — волновой, разделный.

эксперимента традиционно использованы приведенные скорости газа U_{SG} и жидкости U_{SL} , которые опеределались как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. На рисунке представлено сравнение с данными работы [3] для горизонтального канала высотой 0.3 мм — значки без заливки (1–8), работы [6] для вертикального канала с зазором 0.3 мм — штриховые линии и работы [7] — штрихпунктирная линия.

Раздельный режим зарегистрирован при малых приведенных скоростях жидкости и высоких скоростях газа. Область приведенных скоростей жидкости примерно соответствует области, где наблюдался раздельный пленочный режим в канале высотой 2 mm [7]. В горизонтальном канале высотой 0.3 mm раздельный режим не был обнаружен, так как не были достигнуты достаточно низкие значения приведенных скоростей жидкости.

В целом, можно констатировать удовлетворительное соответствие границ между режимами для каналов с зазором менее 0.3 mm. Наибольшее отличие — в расположении границ между пузырьковым и струйным режимами для вертикального и горизонтального каналов.

На рис. 2 показаны зависимости яркости свечения флуорофора (пропорционального толщине жидкости) от времени (вид сверху). Светлые области соответствуют жидкости, полностью заполняющей высоту канала 0.2 mm, а темные — областям, в основном заполненным газом. Соответствующий изображению период времени составлял 1 s. Ширина изображения соответствовала ширине канала. Представлено распределение жидкости по ширине канала в зависимости от времени. Данные, полученные флуоресцентным методом, позволили определить область вспененного режима как чередование сплошных заполненных и разорванных перемычек жидкости. Переход от пузырькового (сплошные заполненные перемычки жидкости) к вспененному 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. На границе вспененного режима (рис. 2, *a*) регистрировалось 1–2 сплошных перемычек жидкости в секунду. С увеличением приведенной скорости жидкости количество перемычек увеличивалось до 2–4 в секунду, а при максимальной приведенной скорости жидкости их количество достигало 6–8 в секунду. 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 (рис. 2, *b*).

При переходе от раздельного режима к вспененному наблюдается появление капель и струек. Как видно из рис. 2, *a*, в центральной части канала значительное время, до 300 ms, присутствует капля жидкости.

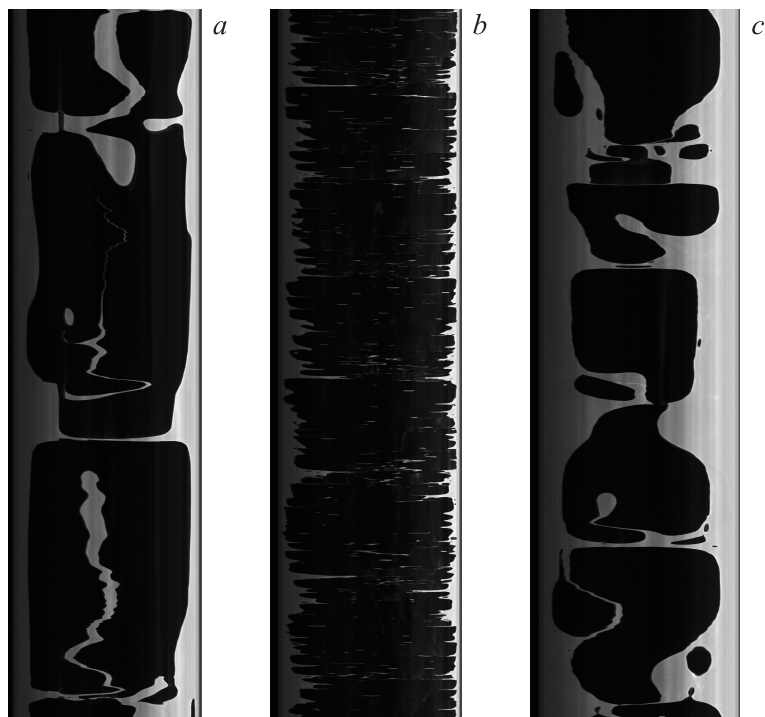


Рис. 2. Режимы двухфазного течения в рассматриваемом канале: *a* — переход от разделного режима к вспененному $U_{SG} = 2.45$ m/s, $U_{SL} = 0.033$ m/s, *b* — кольцевой режим $U_{SG} = 12.3$ m/s, $U_{SL} = 0.163$ m/s, *c* — вспененный режим $U_{SG} = 2.45$ m/s, $U_{SL} = 0.081$ m/s.

С увеличением приведенной скорости жидкости капли более быстро уносятся потоком, не задерживаясь в области измерений (рис. 2, *c*). В предыдущих работах [3–5] подобный механизм формирования капель зарегистрирован не был. В [3,6] для каналов с зазором 0.3 mm отмечен только факт появления мелких капель на стенках канала в области низких приведенных скоростей жидкости. В [8] показано, что в прямоугольном горизонтальном канале шириной 30 mm и высотой 0.44 mm при переходе от разделного режима к вспененному может происходить выброс значительных объемов жидкости в центральную

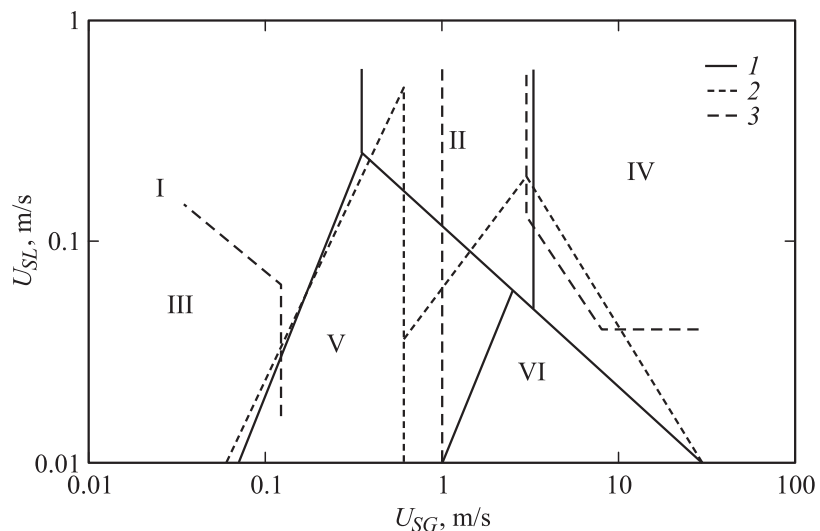


Рис. 3. Влияние высоты горизонтального канала на границы между режимами двухфазного течения. Режимы течения: I — пузырьковый, II — вспененный, III — снарядный, IV — кольцевой, V — струйный, VI — раздельный. Сечения горизонтальных каналов: 1 — $0.2 \times 34 \text{ mm}$, 2 — $0.42 \times 40 \text{ mm}$, 3 — $1 \times 40 \text{ mm}$.

часть канала. В большинстве случаев за счет влияния капиллярных сил возмущенная жидкость возвращается к боковым частям канала. С уменьшением высоты канала доля жидкости, идущая на образование капель, возрастает, а размер капель уменьшается.

Вспененный режим занимает значительную область на карте. Этот режим является также одним из основных для вертикального прямоугольного канала с толщиной 0.3 mm [6]. Как видно из рис. 1, область, соответствующая вспененному режиму для исследуемого канала, в значительной мере совпадает с аналогичной областью для вертикального канала с толщиной 0.3 mm и превосходит эту область для горизонтального канала с толщиной 0.3 mm , особенно при малых приведенных скоростях жидкости.

На рис. 3 показано сравнение данных для канала с зазором 0.2 mm с данными для горизонтальных каналов с большей высотой (0.42 и 1 mm). Для канала с высотой 1 mm область вспененного режима практически

отсутствует [5]. В горизонтальных каналах большей высоты этот режим также не был зарегистрирован [9]. С уменьшением высоты горизонтальных каналов область вспененного режима возрастает, достигая максимальной величины для канала с зазором 0.2 mm. При этом граница между вспененным и кольцевым режимом в зоне высоких приведенных скоростей жидкости остается практически неизменной.

Обратная тенденция наблюдается для раздельного режима, область которого убывает с уменьшением высоты горизонтальных каналов. Однако в отличие от цилиндрических труб эта область не исчезает, по крайней мере, до каналов высотой 200 μm .

Работа поддержана грантами СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 64), президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (ШН-6749.2006.8) и Европейского космического агентства (проект PRODEX SAFIR).

Список литературы

- [1] *Kabov O.A., Zaitsev D.V.* // *Multiphase Science and Technology*. 2009. V. 21. N 3. P. 249–266.
- [2] *Varajast A.M., Panton R.L.* // *Int. J. Multiphase Flow*. 1993. V. 19. N 2. P. 337.
- [3] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34. В. 16. С. 41–47.
- [4] *Чиннов Е.А., Гузанов В.В., Кабов О.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 14. С. 32–39.
- [5] *Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.* // *Microgravity science and technology*. 2007. V. 19. N 3/4. P. 44–47.
- [6] *Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S.* // *Int. J. Multiphase Flow*. 1999. V. 25. P. 411–432.
- [7] *Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V.* et al. // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2007. V. 28. P. 103–112.
- [8] *Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V.* et al. // *Micro gravity science and technology*. 2009. V. 21. Is. 1. P. 199–205.
- [9] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // *ТВТ*. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.