

03;07

Неустойчивость двухфазного течения в прямоугольном микроканале

© Е.А. Чиннов, В.В. Гузанов, 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 2 февраля 2009 г.

Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазного потока в прямоугольном коротком горизонтальном канале высотой $440\ \mu\text{m}$. Использование флуоресцентного метода позволило зарегистрировать и количественно определить характеристики течения жидкости в каналах. Обнаружены существенные отличия режимов двухфазного течения в исследуемых каналах от классических режимов течения в протяженных каналах большого сечения. Показано, что формирование режимов двухфазного течения и переход между ними определяются неустойчивостью газожидкостного течения в боковых частях каналов.

PACS: 47.61.Jd

Миниатюризация устройств в различных областях техники, например в аэрокосмической индустрии, электронике, транспорте, энергетике и медицине вызывает существенный рост интереса к гидродинамике газожидкостных течений и теплообмену в микросистемах и микроканалах. К настоящему времени исследования двухфазных течений в круглых трубах выполнены до диаметра, равного $20\ \mu\text{m}$ [1], а в вертикальных щелевых каналах до толщины, равной $300\ \mu\text{m}$ [2]. Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии содержится в [3], где показано, что 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 и системах охлаждения микроэлектроники длина каналов весьма ограничена. На борту космических аппаратов и международной космической станции также существуют

жесткие ограничения на размеры используемых и исследуемых систем. Несмотря на актуальность, исследования двухфазных течений в коротких каналах весьма ограничены. Так, например, в работе [4] изучались характеристики двухфазного течения водовоздушной смеси в горизонтальном коротком канале шириной 65 mm, длиной 170 mm и высотой 2 mm. 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. Исследование режимов двухфазных течений в коротких (длиной 80 mm) горизонтальных каналах шириной 40 mm и высотой 1 mm и 300 μ m выполнено в [5,6]. В случае канала высотой 1 mm газ подавался вдоль пластины из нержавеющей стали на расстоянии 40 mm до участка входа жидкости. В канал высотой 300 μ m газ поступал из баллона через плоское установленное в верхней крышке сопло такого же размера. В этом случае газ и жидкость подавались с углом наклона к плоскости канала 15°. Регистрация двухфазных течений осуществлялась цифровыми видео- и фотокамерами с использованием шпирен-метода с отражением оптического луча от границы раздела газ–жидкость. Обнаружены 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. Однако сам механизм неустойчивости остался невыясненным, поскольку используемые методы не смогли зарегистрировать сложные движения жидкости внутри канала.

Целью данной работы является исследование неустойчивости режимов двухфазных течений в коротком (длиной 80 mm) горизонтальном канале шириной 30 mm и высотой 440 μ m. Новая модификация метода лазерно-индуцированной флуоресценции (основы метода и пример его применения для измерения мгновенного распределения толщины пленки жидкости со свободной границей приведены в работе [7]) применена для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением флуорофора Родамин 6 G, а в качестве газа — азот.

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

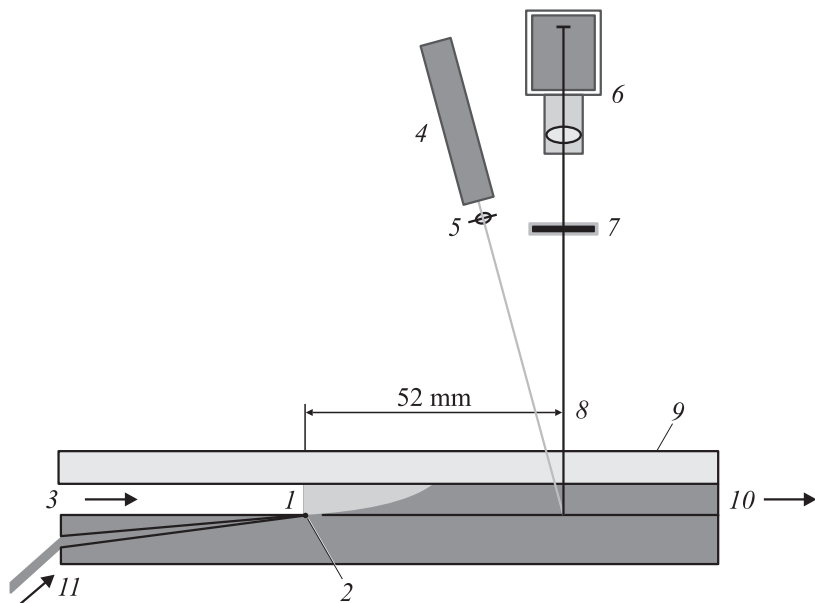


Рис. 1. Схема установки: 1 — канал, 2 — плоское сопло для подачи жидкости, 3 — ввод газа в канал, 4 — лазер, 5 — цилиндрическая линза, 6 — цифровая камера, 7 — светофильтр, 8 — зона измерения, 9 — стекло, закрывающее канал, 10 — выход газожидкостной смеси, 11 — ввод жидкости.

канал (1) шириной 30 mm и высотой 0.44 mm (рис. 1). 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 $300 \mu\text{m}$ (2). Сопло располагалось в пластине из нержавеющей стали в нижней части рабочего участка. Газ подавался в центральную часть канала (3). Для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах был использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции, который основан на переизлучении флуорофором поглощенного света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом. Схема расположения аппаратуры для реализации метода также приведена на рис. 1. Для создания опорного излучения использовался лазер (4) серии Agies

мощностью 50 mW с длиной волны 532 nm. С помощью цилиндрической линзы (5) лазерный луч разворачивался в линию, которая располагалась поперек газожидкостного потока на расстоянии 52 mm от места ввода жидкости в канал. Переизлучаемый флуоресцентный свет фиксировался цифровой камерой (6), оснащенной ступенчатым светофильтром низких частот (7), пропускающим переизлученный флуорофором свет и отсекающим излучение лазера. Для регистрации сигнала в этом методе использована высокоскоростная цифровая камера VS-Ld-751 с линейным ПЗС-датчиком SONY ILX-751A. Камера позволяет с высокой частотой дискретизации (до 2.1 kHz) оцифровывать получаемый сигнал. Локальная толщина слоя жидкости в канале восстанавливалась по локальной яркости полученного изображения. Калибровка измерительной системы производилась в условиях эксперимента по локальной интенсивности свечения плоскопараллельных слоев рабочей жидкости в полностью заполненном канале.

В качестве основных параметров эксперимента 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. Как и в работе [6], были определены основные режимы течения двухфазного потока и построена режимная карта процесса (рис. 2). С использованием флуоресцентного метода получены зависимости распределения жидкости в поперечном сечении канала от времени. На рис. 2 показаны характерные для разных режимов зависимости яркости свечения флуорофора (пропорционального толщине пленки) от времени (вид сверху). Масштаб изменения времени приведен на одном из изображений. Ширина изображения соответствовала ширине канала. Зарегистрированы снарядный и пузырьковый режимы течения. Стационарный струйный режим, как и в работе [5], наблюдался при малых приведенных скоростях жидкости и газа. В области невысоких приведенных скоростей жидкости, при увеличении приведенной скорости газа, происходил переход к разделенному течению жидкости. В этом случае часть жидкости двигалась по нижней стенке канала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. В отличие от струйного режима при разделенном 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 потере устойчивости двухфазного потока в указанных режимах. Наблюдались нарастающие пульсации газовой струи, подобные приведенным в [5,6]. На начальном

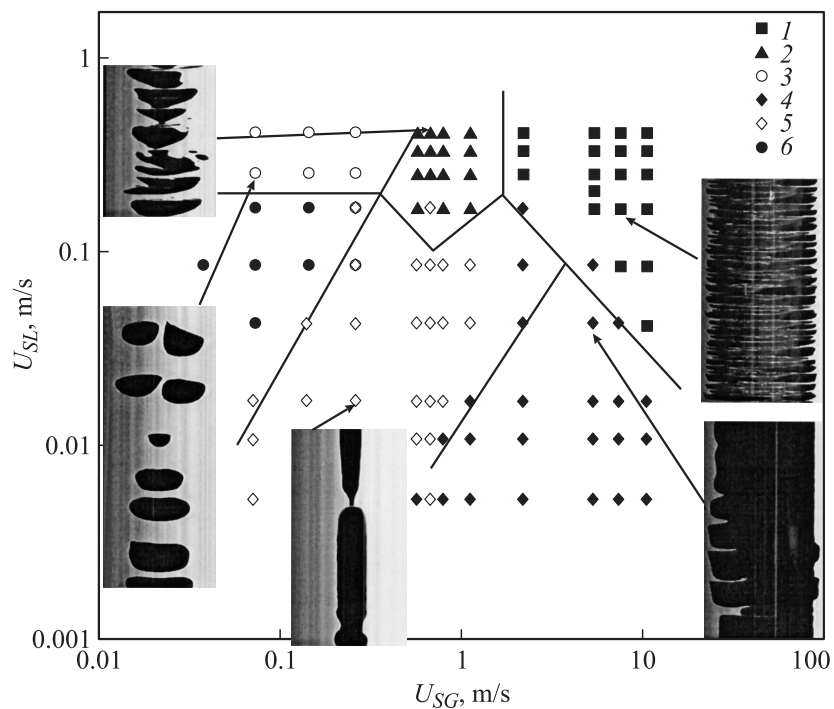


Рис. 2. Карта режимов двухфазных течений в горизонтальном канале шириной 30 мм, длиной 80 мм и высотой 0.44 мм. Экспериментальные данные по режимам течения: 1 — кольцевой, 2 — вспененный, 3 — пузырьковый, 4 — раздельный, 5 — струйный, 6 — снарядный.

этапе развития возмущений после длительного периода ожидания от 5 до 10 с происходило схлопывание струи (жидкость с боковых сторон канала соединялась). Далее струя резко, с периодом 0.4 с расширялась и сужалась несколько раз до полного затухания колебаний. В области раздельного течения жидкости первые возмущения также возникали после значительного периода ожидания.

На рис. 3, а показано восстановленное изменение толщины жидкости H в канале во времени по приведенному на рис. 2 (в правом нижнем углу) изменению яркости свечения флуорофора для раздельно-

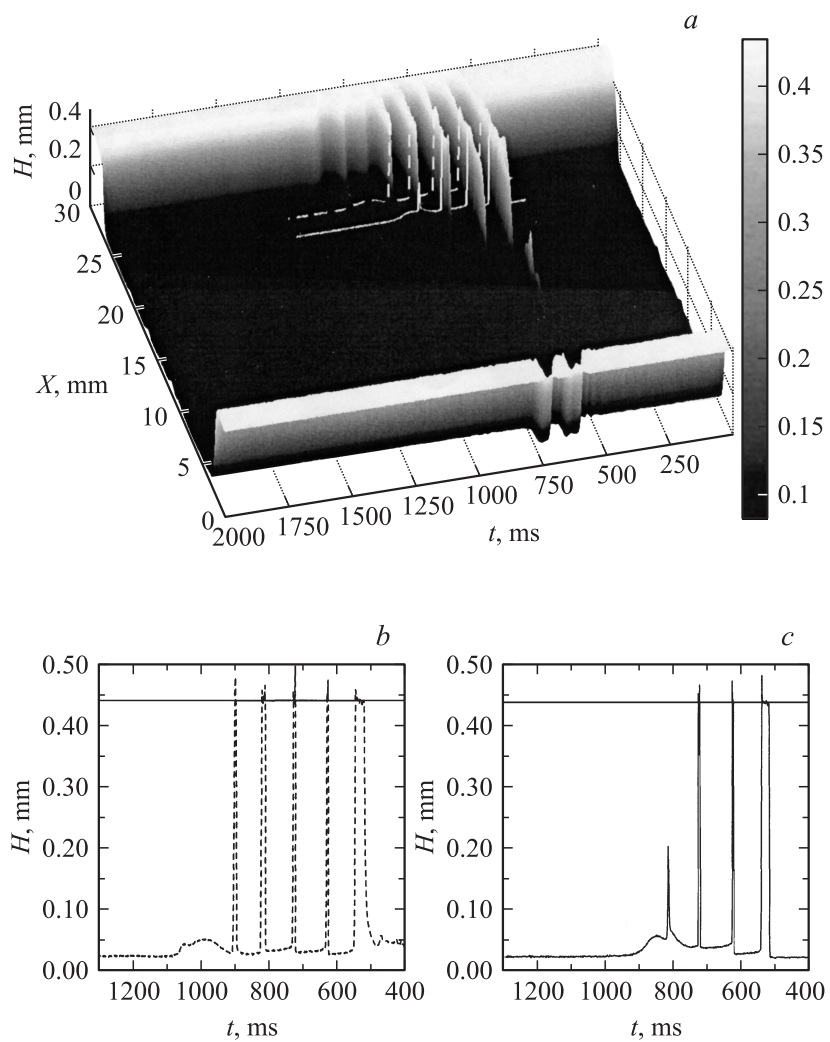


Рис. 3. Изменение толщины жидкости во времени в поперечном сечении канала при $U_{SL} = 6.4$ m/s, $U_{SG} = 0.042$ m/s: a — для всей ширины канала, b — в сечении $X = 25.4$ mm, c — в сечении $X = 23.6$ mm.

го течения жидкости. Перед возникновением возмущения происходило увеличение слоя жидкости на одной из боковых сторон канала. Среднее время развития возмущения составляло 0.7 s, время ожидания — 5.3 s, а период между затухающими выбросами жидкости составлял 91 ms. На противоположной боковой стороне канала появлялись изменения на границе жидкости, полностью заполняющей канал, которые, по-видимому, связаны с развитием возмущения. Максимальная амплитуда возмущения составляла 11.7 mm и практически достигала середины канала. На рис. 3, *b* и *c* приведены изменения высоты жидкости во времени по линиям, показанным на рис. 3, *a*. Видно, что для сечения (обозначенного пунктирной линией), более близко расположенного к боковой стороне канала (расстояние от левой стенки $X = 4.6$ mm), проходящие возмущения полностью заполняют высоту канала 0.44 mm. В области прохождения границы раздела фаз восстановленные значения толщины жидкости могут превосходить толщину канала, что вызвано оптическими искажениями. Величина возможной ошибки в определении толщины слоя жидкости не превышает 40 μm , что менее 10% от толщины канала. В сечении (обозначенном сплошной линией, расположенной на расстоянии 6.4 mm, от левой стенки канала, рис. 3, *c*) зарегистрировано не пять, а четыре возмущения, причем последнее уже не заполняет всю высоту канала. После прохождения возмущений видно увеличение остаточной толщины пленки жидкости. Из данных по видеорегистрации процесса следует, что на верхней стенке канала в результате прохождения возмущения появляется тонкая пленка жидкости. Однако делать выводы о количественном значении толщины этой пленки невозможно при данной реализации метода измерений.

При более высоких приведенных скоростях жидкости течение становится еще более неустойчивым. Время ожидания сокращается, частота пульсаций возрастает. Переход от струйного к пузырьковому течению (рис. 2) характеризуется распадом одиночной струи на отдельные пузыри. Как видно из рис. 2, в пузырьковом режиме частота следования пузырей составляет 10–25 Hz, а время прохождения жидкой перемычки между пузырями может достигать 10 ms (минимальное деление шкалы на изображении в левом нижнем углу). Частота пульсаций струй, как правило, менее 10 Hz. Во вспененном режиме частота пульсаций может составлять 100 Hz.

При увеличении приведенной скорости жидкости отдельный режим преобразуется в кольцевой в результате увеличения частоты пульсаций

и выброса жидкости на верхнюю стенку с боковых стенок канала. Кольцевой режим в точке измерения наступает при частоте пульсаций жидкости в боковой части канала в 20–30 Hz, а максимальные значения частоты пульсаций в кольцевом режиме в исследованном диапазоне параметров достигают 300–400 Hz.

Можно заключить, что определяющее влияние на переход между различными режимами двухфазного течения в коротких прямоугольных каналах оказывает неустойчивость течения жидкости в окрестности из боковых стенок.

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

Список литературы

- [1] *Srizawa A., Feng Z., Kawara Z.* // Exp. Thermal Fluids Science. 2002. V. 26. P. 703–714.
- [2] *Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S.* // Int. J. Multiphase Flow. 1999. V. 25. P. 411–432.
- [3] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 5. С. 777–795.
- [4] *Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V. et al.* // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103–112.
- [5] *Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.* // Microgravity science and technology. 2007. V. 19. N 3/4. P. 44–47.
- [6] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 16. С. 41–47.
- [7] *Alekseenko S.V., Antipin V.A., Guzanov V.V. et al.* // Phys. Fluids. 2005. V. 17. P. 121704.