

УДК 532.529:536.24

Режимы двухфазного течения в микро- и миниканалах (обзор)*

Е.А. Чиннов, Ф.В. Роньшин, О.А. Кабов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*

E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Обзор посвящен анализу факторов, влияющих на границы двухфазных режимов в каналах разного поперечного сечения с минимальным размером менее капиллярной постоянной. Приведена классификация каналов по размеру. Данные по режимам двухфазного течения систематизированы и приведены в таблицах для круглых и прямоугольных каналов. Указано, что в большинстве работ выделены следующие режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой. Описаны режимы, встречающиеся в отдельных работах. Сохранена используемая для описания режимов терминология. Проанализированы основные факторы, влияющие на структуру двухфазного потока, такие как расходы газа и жидкости, параметры канала и входного участка, смачиваемость внутренней поверхности каналов, свойства жидкости, гравитационные силы. Показано, что развитие неустойчивостей двухфазного потока оказывает существенное влияние на формирование, эволюцию и смену режимов течения.

Ключевые слова: двухфазное течение, плоский канал, микроканал.

Введение

Развитие теплообменников с микро- и наноразмерами показывает, что такие системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов более 1 мм. Существующие системы охлаждения не позволяют обеспечить современных требований 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 микро-системах. Такие системы получают все более широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике.

Опубликовано значительное количество работ по исследованию двухфазного течения. В литературе имеется различная классификация каналов по их поперечным размерам. Например, в работе (Kandikar, 2003) выделены микроканалы с характерным размером 10–200 мкм, миниканалы с размером 200–3000 мкм и конвективные каналы с размером более 3 мм. Однако систематизация, не зависящая от физических процессов, происходящих в каналах, выглядит искусственно. Изменение режимов течения в большинстве выполненных экспериментов определяется в первую очередь влиянием капиллярных

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.604.21.0053).

и гравитационных сил. Относительное влияние капиллярных и гравитационных сил можно описывать, используя критерий Бонда (Этвеша) или отношение диаметра канала d к капиллярной постоянной l_σ . В работе (Чиннов, Кабов, 2006) приведена следующая классификация размеров каналов. 1. Крупномасштабные (конвективные) каналы $d > 5l_\sigma$, характеризующиеся отсутствием влияния капиллярных сил за счет кривизны канала. В этих условиях возможно проявление капиллярных эффектов на уровне других масштабов: пузыри, волны. 2. Гравитационно-капиллярные каналы $0,5l_\sigma < d < 5l_\sigma$, в которых проявляется совместное влияние капиллярных и гравитационных сил, но гравитационные силы превосходят капиллярные. При $d = 0,5l_\sigma$ происходит вырождение раздельного режима течения. 3. Капиллярно-гравитационные каналы (миниканалы) $0,1l_\sigma < d < 0,5l_\sigma$ с совместным влиянием капиллярных и гравитационных сил, когда капиллярные силы превосходят гравитационные. Каналы второго и третьего типов можно также называть минимасштабными. 4. Капиллярные каналы (микрочаналы) $d < 0,1l_\sigma$, где отсутствует действие гравитационных сил, а определяющее влияние оказывают капиллярные эффекты. Каналы этого типа можно называть микромасштабными.

В работе (Ребров, 2010) выделены три характерные группы течений в микроканалах: с преобладанием сил поверхностного натяжения, с преобладанием сил инерции и переходные между первыми двумя случаями. Характерным числом Этвеша для перехода от макро- к микроканалам было названо $Eo = 0,84$ (Bretherton, 1961), оно вычисляется по формуле

$$Eo = gL^2\Delta\rho/\sigma, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, L — характерный поперечный размер, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ — разность плотностей, σ — коэффициент поверхностного натяжения. Также выделено шесть режимов течений: пузырьковый, снарядный, струйно-снарядный, струйный, вспененный и капельно-кольцевой (рис. 1).

Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии и размера содержится в статье (Чиннов, Кабов, 2006). В публикациях (Ребров, 2010 и Shao et al., 2009) приведен детальный обзор статей, посвященных в основном течению в круглых микротрубах. Рассмотрено влияние размеров канала, свойств жидкости, смачиваемости и др. на режимы двухфазного течения. В работе (Ребров, 2010) проанализировано влияние на эти режимы геометрий разных входных участков. В работах (Haverkamp, 2006 и Ребров, 2010) показано, что границы режимов газо-жидкостного течения в микроканалах

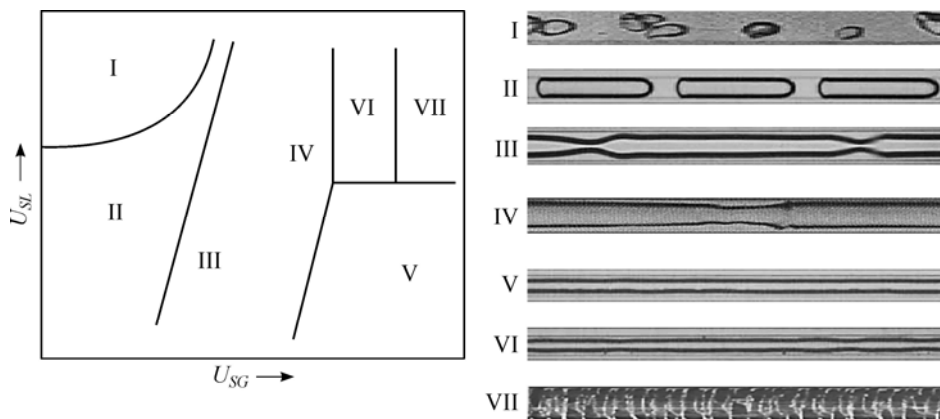


Рис. 1. Схематическое представление режимов течений в микроканалах (Ребров, 2010).

Режимы течения: I — пузырьковый, II — снарядный, III — струйно-снарядный, IV — снарядно-кольцевой, V — струйный, VI — вспененный, VII — капиллярно-кольцевой.

значительно зависят от условий ввода фаз в канал. В работе (Haverkamp, 2006) использовалось несколько начальных участков. Газ двигался вдоль микроканала, а жидкость подавалась с двух его сторон. Изменялся угол подвода жидкости. При различных условиях подачи жидкости границы режимов газо-жидкостного течения сдвигаются на режимной карте. Установлено, что хотя качественно характер режимной карты сохраняется, на положение границ режимов двухфазного течения существенное влияние оказывают особенности геометрии смесителя и входного участка.

1. Режимы течения

В табл. 1 представлены основные публикации по круглым и треугольным микроканалам, а в табл. 2 — по прямоугольным. В работах исследуются различные параметры, влияющие на структуру двухфазного потока в микроканалах. Например, в работе (Ребров, 2010) проанализировано влияние таких параметров течения, как входной участок, диаметр канала, геометрия сечения канала, гидрофильность поверхности стенки канала, поверхностное натяжение и вязкость жидкости. Подробнее параметры, влияющие на структуру двухфазного потока, рассмотрим далее.

Таблица 1

Экспериментальные данные по исследованию режимов течения двухфазного потока в круглых трубах диаметром менее 2 мм и треугольных каналах

Источник	Тип смеси	Канал	Режимы течений	Границы режимов	Ключевые моменты
1	2	3	4	5	6
Suo, Griffith (1964)	Вода-воздух, вода-азот	Г, круглый, $d = 1, 1,4$ мм	Снарядный (capillary slug), кольцевой (annular)	Граница между снарядным и кольцевым режимами исследовалась при постоянном расходе жидкости.	Описание снарядного режима и его границ с другими режимами.
Galbiati, Andreini (1994)	Вода-воздух	В (вниз), $d = 0,5, 1,1, 2$ мм	Снарядный (slug), кольцевой (annular)		Параметры входного участка оказывают существенное влияние на границы режимов течения.
Barajas, Panton (1993)	Вода-воздух	Г, $d = 1,5875$ мм, четыре материала с различными углами смачивания: $34^\circ, 61^\circ, 74^\circ, 106^\circ$; $U_{SG} = 0,1-100$ м/с; $U_{SL} = 0,003-2$ м/с; расстояние до зоны наблюдения — $160d$	Волновой (wavy), пробковый (plug), снарядный (slug), кольцевой (annular), пузырьковый (bubble), струйный (rivulet)	Изменение угла смачивания при $\theta < 90^\circ$ оказывало незначительное влияние на границы режимов течения, изменение угла смачивания при $\theta > 90^\circ$ оказывало значительное влияние на границы режимов течения.	Исследовано влияние угла смачивания и диаметра канала на режимы двухфазного течения.
Fukano, Kariyasaki (1993)	Вода-воздух	Г, В (вверх и вниз), круглый, Ругех* -стекло, $d = 1, 2,4, 4,9, 9, 26$ мм, $U_{SG} = 0,1-30$ м/с; $U_{SL} = 0,02-2$ м/с	Пузырьковый (bubble), прерывистый (intermittent), кольцевой (annular)	Границы режимов хорошо согласуются с данными работы (Barnea et al., 1983) только при небольших диаметрах канала (4 мм) и плохо согласуются с данными работы (Mandhane et al., 1974).	В каналах диаметром $d < 4,9$ мм ориентация канала несущественно влияет на режимы течений. Исследованы изменения во времени объемного газосодержания и давления. Проведено измерение скорости пузырьков и толщины пленки жидкости в каналах.

* — производитель боросиликатного стекла.

1	2	3	4	5	6
Mishima, Hibiki (1996)	Вода-воздух	В, Рухех-стекло и алюминий, круглый, $d = 1-4$ мм, $U_{SG} = 0,1-50$ м/с, $U_{SL} = 0,02-2$ м/с	Пузырьковый (bubbly), снарядный (slug), вспененный (churn), кольцевой (annular), раздельный (annular mist)	Границы режимов предсказаны моделью (Mishima, Ishii, 1984).	Проведены измерения объемного газосодержания, скорости пузырьков и падения давления.
Triplet et al. (1999)	Вода-воздух	Г, круглый, $d = 1,1; 1,45$ мм, Рухех, треугольный, $d_h = 1,09$ (акрил), $1,49$ мм (поликарбонат), $U_{SG} = 0,02-80$ м/с, $U_{SL} = 0,02-8$ м/с	Режимы течения одинаковые для всех каналов: пузырьковый (bubbly), вспененный (churn), снарядный (slug), снарядно-кольцевой (slug-annular), кольцевой (annular)	Проведено сравнение режимов течений с данными работы (Suo, Griffith, 1964), выявлены существенные расхождения.	Проведено исследование влияния ориентации и формы канала на режимы течений. Получены схожие результаты для круглого и треугольного сечений каналов. Хорошо согласуется с (Suo, Griffith, 1964), (Damianides, Westwater, 1988) и (Fukano, Kariyasaki, 1993).
Yang, Shieh (2001)	Вода-воздух, R-134a	Г, Рухех-стекло, круглый, d от 1 до 3 мм, $U_{SG} = 0,016-91,5$ м/с, $U_{SL} = 0,006-2,1$ м/с	Пузырьковый (bubbly), пробковый (plug), раздельный (wavy stratified), снарядный (slug), дисперсный (dispersed), кольцевой (annular)	Границы режимов течения плохо согласуются с данными работы (Taitel, Dukler, 1976).	Исследовано влияние диаметра канала и свойств жидкости. Границы режимов в канале с водой и воздухом четко не определены, особенно для перехода от пробкового режима к кольцевому. Определены границы режимов для R-134a.
Zhao, Bi (2001)	Вода-воздух	В (вверх), равно-сторонний треугольник, $d_h = 0,866; 1,443; 2,886$ мм, $U_{SG} = 0,1-100$ м/с, $U_{SL} = 0,08-10$ м/с	Пузырьковый (capillary bubble) для $d_h = 0,866$ мм, снарядный (slug), вспененный (churn), кольцевой (annular)	Границы режимов существенно расходятся с (Taitel et al., 1980) и (Mishima, Ishii, 1984).	Измерены скорости газа и жидкости, а также давление и перепад давления. Диаметр и форма канала имеют значительное влияние на режимы течения и их границы.
Chen et al. (2002)	Вода-азот	Г, В, стекло, круглый, $d = 1$ и $1,5$ мм, $U_{SG} = 0,502-11$ м/с, $U_{SL} = 0,399-3,53$ м/с	Пузырьковый (bubbly), снарядный (slug and bubble-train slug), вспененный (churn), кольцевой (annular)	–	Исследованы режимы течения, скорость пузырьков и объемное газосодержание.

1	2	3	4	5	6
Kawahara et al. (2002)	Вода-азот	Г, круглый, $d = 100$ мкм, $U_{SG} = 0,1-60$ м/с, $U_{SL} = 0,02-4$ м/с	Кольцевой	–	Исследованы усредненное по времени объемное газосодержание и падение давления.
Serizawa et al. (2002)	Вода-воздух	Г, круглый, $d = 20, 25, 100$ мкм для пара, $U_{SG} = 0,0022-295,3$ м/с, $U_{SL} = 0,0032-17,5$ м/с	Пузырьковый (bubbly), снарядный (slug, liquid lump), кольцевой (liquid ring, frothy annular), кольцевой (liquid droplet flow or annular-mist, rivulet)	Все режимы, кроме раздельного, хорошо согласуются с изученными в работе (Mandhane et al., 1974). Границы режимов плохо согласуются с данными, полученными в работе (Fukano, Kariyasaki, 1993).	Исследовано влияние поверхностного натяжения и смачиваемости на режимы течения. Определено объемное газосодержание. Обнаружено существование несмоченной зоны, на которую влияют размеры и смачиваемость поверхности.
Chung, Kawaji (2004)	Вода-пар, вода-азот	Г, круглый, $d = 530, 250, 100, 50$ мкм, $U_{SG} = 0,02-20$ м/с, $U_{SL} = 0,01-7$ м/с	Для 530 и 250 мкм: пузырьковый (bubbly), снарядный (slug), вспененный (churn), снарядно-кольцевой (slug-annular), кольцевой (annular)	–	Исследовано влияние диаметра канала на границы между режимами. Для каналов диаметром 530 и 250 мкм структура потока была такая же, как у каналов диаметром ~ 1 мм; в каналах диаметром 100 и 50 мкм структура течения существенно отличалась.
Hassan et al. (2005)	Вода-воздух	Г, круглый, $d = 800$ мкм, 1 и 3 мм, $U_{SG} = 10-100$ м/с, $U_{SL} = 0,02-3,82$ м/с	Преобладание силы поверхностного натяжения: пузырьковый (bubbly), прерывистый (intermittent); преобладание инерциальных сил: вспененный (churn) и кольцевой (annular)	–	Сделан обзор и проведено экспериментальное исследование двухфазного течения в микроканалах. Ориентация канала оказывала существенное влияние на границы между режимами.

1	2	3	4	5	6
Shao et al., (2008)	Вода-азот	Γ , $d = 500$ и 750 мкм, $U_{SG} = 0,1-17$ м/с, $U_{SL} = 0,07-4,2$ м/с	Пузырьковый (bubbly), снарядный (Taylor), снарядно-кольцевой (Taylor-annular), вспененный (churn), кольцевой (annular)	Пузырьковый режим наблюдался при высоких приведенных скоростях жидкости, когда использовались большие отверстия для ввода жидкости в канал. Размер отверстия для ввода жидкости не оказал существенного влияния на границу между снарядным, снарядно-кольцевым и вспененным режимами. При уменьшении размера канала границы между пузырьковым и снарядно-кольцевым режимами сдвигались в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости и газа.	Размер входного отверстия канала существенно влияет на границы между режимами.
Lee, Lee (2008)	Вода-воздух, метанол.	Γ , круглый, стекло: $d = 1,46$ и $1,8$ мм, $U_{SG} = 0,5-50$ м/с, $U_{SL} = 0,004-0,4$ м/с; тефлон: $d = 1,59$ мм, $U_{SG} = 0,4-47$ м/с, $U_{SL} = 0,02-0,8$ м/с; полиуретан: $d = 2$ мм, $U_{SG} = 0,3-53$ м/с, $U_{SL} = 0,007-0,4$ м/с	Пробковый (plug), снарядный (slug), кольцевой (annular for wet condition and rivulet for dry condition), волновой (wavy)	Граница между смоченным и несмоченными потоками определялась по нормированной поверхностной скорости $\overline{U}_{SL} = U_{SL}/(a + b\theta)$, где a и b определялись экспериментально.	$\overline{U}_{SL} = 1$ определяла нижнюю границу для смоченного потока, когда угол смачивания $\theta < 50^\circ$, переход от смоченного к несмоченному потоку был при угле смачивания $50^\circ < \theta < 90^\circ$. Эта граница зависит от угла смачивания так же, как от U_{SL} .

Таблица 2

Основные параметры экспериментов по исследованию течения двухфазного потока в прямоугольных каналах малого размера

Источник	Тип смеси	Канал	Режимы течений	Границы режимов	Ключевые моменты
1	2	3	4	5	6
Бейнусов и др. (1978)	Вода-воздух	В, прямоугольный, $0,2 \times 124$, $0,25 \times 124$, $0,5 \times 124$ мм	–	–	–
Lowry, Kawaji (1988)	Вода-воздух	В, прямоугольный, $80 \times 0,5$ мм	–	–	–

1	2	3	4	5	6
Bonjour, Lallemand (1998)	R-113	В, прямоугольный, 0,5×2 мм	–	–	Исследованы три режима кипения жидкости в микроканале. Количественно и качественно проанализированы характеристики течения.
Xu et al. (1999)	Вода-воздух	В, прямоугольный, 0,3×12 и 0,6×12 мм	Пузырьковый (bubbly), сарядный (slug), вспененный (slug-churn), churnturbulent), кольцевой (annular)	Все режимы течения, кроме вспененного, хорошо согласуются с рассмотренными в работе (Mishima et al., 1993).	Предложены новые критерии границ режимов.
Coleman, Garimella (1999)	Вода-воздух	Г, проточный, Рухт-стекло, круглый и прямоугольный, $d_h = 1,3, 1,75, 2,6$ и $5,5$ мм, $U_{SG} = 0,1 - 100$ м/с, $U_{SL} = 0,01 - 10$ м/с	Пузырьковый (bubbly), дисперсный (dispersed), сарядный (elongated bubble/plug flow and slug flow), сарядно-кольцевой (wavy-annular), волновой (wavy), кольцевой (annular)	Режимы течения хорошо согласуются с рассмотренными в работе (Damianides, Westwater, 1988), где показано увеличение зоны сарядного режима и уменьшение зоны раздельного режима.	Проведено исследование влияния диаметра и формы канала на границы между режимами.
Bi, Zhao (2001)	Вода-воздух	Г, прямоугольный, 0,75×1,5 мм	Пузырьковый (capillary bubble), сарядный (slug), вспененный (churn), кольцевой (annular)	–	Установлено, что скорость дрейфа не равна нулю. Проведено сравнение режимов течения с другими каналами некруглого сечения.
Hibiki, Mishima (2001)	Вода-воздух	В, прямоугольный, 0,3×17 мм	Пузырьковый (bubbly), сарядный (slug), вспененный (churn), кольцевой (annular)	–	Предложены новые критерии границ режимов двухфазного потока.
Kawaji, Chung (2003)	Вода-азот	Г, квадратный, 0,096×0,096 мм	–	–	–
Cubaud, Ho (2004)	Вода-воздух	Г, квадратный, стекло и кремний, $d_h = 200$ и 525 мкм, $U_{SG} = 0,003 - 20$ м/с, $U_{SL} = 0,001 - 0,2$ м/с	Пузырьковый (bubbly), пробковый (wedging), сарядный (slug), кольцевой (annular and dry)	Переход от пузырькового к пробковому режиму при $\alpha_L \approx 0,75$; переход от пробкового к сарядному режиму при $\alpha_L \approx 0,2$; переход от сарядного к кольцевому режиму при $\alpha_L \approx 0,04$.	Установлено, что режимная карта не зависит от размера канала (в отличие от больших каналов). Средняя скорость пузырьков примерно равна скорости жидкости. Определено, что смачиваемость оказывает важную роль в формировании режима.

1	2	3	4	5	6
Waelchli, von Rohr (2006)	Вода-азот, этанол, глицерин (10%) и глицерин (20%)	Г, прямоугольный, $d_h = 187,5$ – 218 мкм, $U_{SG} = 0,027$ – $8,9$ м/с, $U_{SL} = 0,014$ – $1,4$ м/с	Прерывистый (intermittent), кольцевой (annular), пузырьковый (bubbly)	В качестве координат режимной карты использовались $10^7 \cdot Re_{SL}^{0,2} \cdot We_{SL}^{0,4} \cdot (kS/d)^5$ и $Re_{SG}^{0,2} \cdot We_{SG}^{0,4}$, где kS/d — относительная шероховатость канала.	Определено, что режим течения в большей степени зависит от формы канала, чем от его размера
Cubaud et al. (2006)	Вода-воздух, вода с ПАВ	Г, квадратный, $d_h = 525$ мкм	Гидрофильная поверхность: пузырьковый (bubbly), пробковый (wedging), снарядный (slug), кольцевой (annular and dry); гидрофобная поверхность: изолированный ассиметричный пузырьковый (isolated asymmetric bubble flow), волновой пузырьковый (wavy bubble flow), капельный (scattered droplet flow)	—	Обозначена важность влияния поверхности микроканала на режимы двухфазного потока. Гидрофильная поверхность и микрошероховатости существенно влияют на структуру двухфазного потока.
Haverkamp et al. (2006)	Вода-воздух, изопропанол	Г, прямоугольный, нержавеющей сталь: $d_h = 150$ и $294,5$ мкм, $U_{SG} = 0,001$ – 22 м/с, $U_{SL} = 0,001$ – $0,074$ м/с, боросиликатное стекло: $d_h = 66,67$ мкм, $U_{SG} = 0,5$ – 190 м/с, $U_{SL} = 0,03$ – 2 м/с	Для каналов $d_h = 150$ и $294,5$ мкм: пузырьковый (bubbly), снарядный (slug), снарядно-кольцевой (slug-annular), кольцевой (annular); для канала $d_h = 66,67$ мкм: снарядный (Taylor), вспененный (churn), кольцевой (annular), снарядно-кольцевой (ring)	С уменьшением поверхностного натяжения, граница между снарядным и снарядно-кольцевым режимами сдвигалась в сторону более высоких U_{SG} ; при изменении варианта смесителя с Т на S граница между снарядным и вспененным режимами сдвигалась в сторону более высоких U_{SG} .	Была создана специальная конструкция смесителя для изменения размера пузырьков, распределения пузырьков и структуры потока в микроканале. Используя S-смеситель, удалось уменьшить размер пузырьков и увеличить их количество. В каналах размером $d_h = 66,67$ мкм снарядно-кольцевой режим заменял кольцевой режим при высоких U_{SG} , о чем ранее нигде не сообщалось.
Xiong, Chung (2007)	Вода-азот	Г, прямоугольный, $0,213 \times 0,206$, $0,419 \times 0,406$ и $0,630 \times 0,615$ мм, $U_{SG} = 0,06$ – $72,3$ м/с, $U_{SL} = 0,02$ – $7,13$ м/с	Пузырьковый (bubbly slug flow), снарядный (slug-ring flow), вспененный (dispersed-churn flow), кольцевой (annular flow)	При уменьшении гидравлического диаметра границы между режимами сдвигаются в сторону более высоких We_{SG} или приведенной скорости газа.	Измерено объемное газосодержание для всех каналов. Получена нелинейная зависимость газосодержания от гидравлического диаметра канала.
Yu et al. (2007)	Силиконовое масло-воздух	Г, квадратный и прямоугольный, $0,125 \times 0,125$ и $0,125 \times 0,25$ мм	Снарядный (slug), пузырьковый (bubble).	В качестве параметра использовалось число капиллярности (Ca).	Исследовано влияние параметров (геометрия смесителя и вязкость) на механизм формирования пузырьков.

1	2	3	4	5	6
Kabov et al. (2007a)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 1×40 мм	Пузырьковый (bubbles), снарядный (slug), прерывистый (intermittent jet), струйный (jet), раздельный (stratified) и кольцевой (annular, annular-droplet)	Кольцевой режим хорошо согласуется с данными работы (Kabov et al., 2007b) и (Wambuganss et al., 1991), раздельный режим хорошо согласуется с данными работы (Wambuganss et al., 1991).	Обозначено, что режим течения в микроканалах существенно отличается от режима течения в больших трубах. Выделен новый режим двухфазного течения в микроканалах — струйный.
Yue et al. (2008)	Вода – CO ₂	Г, прямоугольный, $d_h = 200, 400$ и 667 мкм, $U_{SG} = 0,04-70$ м/с, $U_{SL} = 0,02-2$ м/с	Пузырьковый (bubbly), снарядный (slug), снарядно-кольцевой (slug-annular), вспененный (churn), кольцевой (annular)	При уменьшении канала, граница между снарядным и снарядно-кольцевым режимами сдвигалась в сторону более высоких U_{SG} . Границы между снарядным и пузырьковым режимами, снарядно-кольцевым и кольцевым режимами практически не сдвигались при изменении размера каналов.	Использовалась модель раздельного течения, для учета U_{SL} множитель был модифицирован.
Pohorecki et al. (2008)	Вода-азот, этанол	Г, прямоугольный и квадратный, $d_h = 843$ мкм, $U_{SG} = 0,01-50$ м/с, $U_{SL} = 0,02-1,2$ м/с	Пузырьковый (bubble), снарядный (slug), снарядно-кольцевой (slug/annular), кольцевой (annular)	При увеличении поверхностного натяжения граница между снарядным и снарядно-кольцевым режимами сдвигалась в сторону более низких U_{SG} .	Предложен критерий эффективности площади поверхности для газожидкостных микрореакторов.
Чиннов, Кабов (2008)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 0,3×40 мм	Прерывистый, вспененный, струйный, капельно-кольцевой, снарядный, пузырьковый, струйно-пузырьковый, кольцевой	Хорошо согласуется с данными работы (Xu et al., 1999).	Определено, что в каналах большой ширины на нижней их стенке при небольших приведенных скоростях жидкости образуются капли.
Chinnov et al. (2009)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 0,44×30 мм	Кольцевой (annular), вспененный (churn), пузырьковый (bubbles), раздельный (stratified), струйный (jet), снарядный (slug)	–	Указано, что у боковых стенок канала возникают нестабильные всплески.

1	2	3	4	5	6
Santos, Kawaji (2010)	Вода-воздух	Г, квадратный, 0,118×0,119 мм, $U_{SG} = 0,018$ – $-0,791$ м/с, $U_{SL} = 0,042$ – $-0,757$ м/с	Раздельный (stratified) и снарядный (slug)	Методы вычислительной динамики (CFD) хорошо предсказывают формирование снарядного режима.	Вычислено объемное газосодержание, которое хорошо сошлось с данными работы (Арманд, 1946) и плохо — с (Kawahara et al., 2002) и (Xiong, Chung, 2007). Обозначено, что поверхностное натяжение имеет значительное влияние на форму и размер пузырьков.
Choi et al. (2011)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 0,5×0,47, 0,6×0,41, 0,5×0,24 мм	Пузырьковый (bubbly), снарядный (slug bubble), кольцевой (elongated bubble, multiple, liquid film)	При уменьшении относительной ширины канала (aspect ratio) расширяется область пузырькового режима.	В работе проанализировано влияние относительной ширины канала (aspect ratio) и гидравлического диаметра на характеристики двухфазного потока.
Козулин, Кузнецов (2011)	Вода-азот	В, прямоугольный, 0,67×2 мм, $U_{SG} = 0,04$ – -11 м/с, $U_{SL} = 0,07$ – $-0,41$ м/с	Пузырьковый (slug-bubble regime), снарядный (slug regime), переходной режим (transient regime), эмульсия (emulsion regime), кольцевой (annular regime)	–	Использование двухлучевого лазерного метода позволило зарегистрировать и количественно определить характеристики двухфазного течения.
Чиннов, Кабов (2011а)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 0,42×40, 0,44×30, 0,49×20 и 0,1×30 мм	Пузырьковый, струйный, вспененный, раздельный, кольцевой	–	В канале высотой 100 мкм обнаружен новый тип неустойчивости — фронтальная неустойчивость — при взаимодействии жидкости и газа при выходе жидкости из сопла. Показано, что два типа неустойчивости (боковая и фронтальная) оказывают определяющее влияние на формирование режимов двухфазного течения в плоских горизонтальных микроканалах и на переходы между ними.
Kuznetsov et al. (2012)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 0,217×0,37 мм	Периодический пузырьковый (flow with periodic elongated bubbles), непериодический пузырьковый (non-periodic elongated bubble flow, transition flow), и кольцевой (annular flow)	–	Кипение в каналах оказывает значительное влияние на капиллярные силы, изменяя структуру двухфазного потока. Выдвинута новая модель перехода к кольцевому режиму.

1	2	3	4	5	6
Kuznetsov et al. (2013)	Вода-азот	В, Г, прямоугольный, 0,72×1,5 мм	Пузырьковый (bubbly-slug), снарядный (slug), вспененный (churn), кольцевой (annular, and annular-mist)	Переход к кольцевому режиму хорошо согласуется с моделью (Mishima, Ishii, 1984).	Указано, что ориентация канала практически не влияет на структуру двухфазного потока. Приведен анализ влияния кипения на пузырьки и структуру потока
Houshmand et al. (2014)	Вода-азот	Г, прямоугольный, 1,5×0,225 мм	Режимы образования пузырьков: дискретные пузырьки (discrete bubbling), связанные пузырьки (attached ligament), смешанный режим (mixed bubbling-ligament)	–	Газ вводился в поток жидкости через щели, вырезанные на разных сторонах микростолбика. Использовались пять углов, под которыми вводился газ: 0°, 30°, 80°, 110° и 190°. Указано, что угол, под которым вводится газ в жидкость оказывает существенное влияние на структуру двухфазного потока
Kim et al. (2014)	Вода-аргон	Г, квадратный, 0,2×0,2 мм	Капельный (droplet), пробковый (plug) и переходной между капельным и пробковым (irregular segmented).	–	В работе использовались входные каналы с различным поперечным сечением (0,05×0,05, 0,05×0,2 и 0,1×0,2 мм). Указано, что начальные параметры впрыска оказывают существенное влияние на структуру двухфазного потока.
Patel, Garimella (2014)	Вода-воздух	Г, квадратный, 0,5×0,5 мм	Кольцевой (annular), снарядный (slug)	–	Предложена новая методика, позволяющая достичь лучшего качества изображения структур.
Holloway et al. (2014)	FC-72.	Г, прямоугольный, 0,184×20 мм	Пузырьковый (bubbly), раздельный (stratified), прерывистый (intermittent), кольцевой (annular)	Режимная карта Taitel & Dukler с модификацией перехода от прерывистого к кольцевому режиму Ullman-Brauner хорошо предсказала все границы режимов.	Проведено исследование двухфазного потока с FC-72 в микроканале. Установлено, что режимную карту можно предсказать при помощи моделей Taitel & Dukler и Ullman-Brauner.

Результаты выполненных исследований двухфазного потока в мини- и микроканалах не всегда имеют однозначный характер, содержат противоречия и разные трактовки. В большинстве работ выделены следующие режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой, которые присутствуют во всех каналах. При небольших приведенных скоростях жидкости и газа наблюдался снарядный режим, который характеризуется прохождением вдоль канала больших, пулеобразных пузырей. Поперечный размер пузырей почти совпадает с диаметром канала. При увеличении приведенной скорости жидкости происходит переход к пузырьковому режиму. В этом режиме по каналу движется жидкость, содержащая много небольших пузырьков газа. Размер и число пузырьков изменяются в зависимости от расходов жидкости и газа. При высоких приведенных скоростях жидкости и газа наблюдается кольцевой режим. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока. Из-за сложностей точной регистрации границ

между режимами используют термины, характеризующие переходные состояния: прерывистый, снарядно-кольцевой. При высоких приведенных скоростях газа наблюдается дисперсный режим, когда жидкость движется в виде капель. При больших приведенных скоростях жидкости наблюдается вспененный режим. Этот режим характерен для вертикальных каналов (Xu et al., 1999), где он обусловлен гравитацией, а также наблюдается в широких горизонтальных микроканалах высотой менее 1 мм (Kabov et al., 2007a). Для этого режима характерно существование разорванных перемычек. В работе (Barrajas, Panton, 1993) выделен ручейковый (rivulet) режим. Жидкость в таком режиме движется по поверхности канала, причем не прямо, а изгибается подобно реке. Указано, что ручейковый режим заменяет собой волновой режим при больших контактных углах смачивания. Волновой режим представлял из себя раздельный режим, в котором по поверхности пленки жидкости двигались волны, не касаясь верхней стенки канала. Пробковый (plug, wedging) режим представляет собой прерывистые пробки (удлиненные пузырьки, длиной больше диаметра канала) из газа, движущиеся по каналу с жидкостью. Этот режим является переходным между снарядным и пузырьковым. Поток состоит из одинаковых монодисперсных удлиненных пузырьков. Размер таких пузырьков превышает высоту канала (Cubaud, Ho, 2004). Поперечные размеры пробок увеличиваются с увеличением приведенной скорости газа. При малых приведенных скоростях жидкости в прямоугольных коротких микроканалах наблюдался струйный режим (jet), когда газ двигался в центральной части канала, а основная часть жидкости перемещалась по его периферии вдоль боковых стенок. При небольших приведенных скоростях жидкости и больших приведенных скоростях газа наблюдался раздельный режим. В этом режиме часть жидкости двигалась по нижней стенке канала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. Раздельный режим характерен только для прямоугольных микроканалов, так как в круглых каналах малого диаметра пленка замыкается, образуя кольцевой режим.

2. Влияние расходов газа и жидкости

Расходы газа и жидкости оказывают основное влияние не только на структуру двухфазного потока, задавая режим течения, но и на механизмы его формирования. При построении режимных карт в качестве координат традиционно использовались приведенные скорости газа U_{SG} и жидкости U_{SL} , которые определялись как объемный расход газа или жидкости, деленный на площадь поперечного сечения канала. Ввиду большого количества факторов, влияющих на границы режимов течения, не удалось построить универсальные безразмерные критерии для определяющих параметров диаграмм. Только для наиболее простых случаев, например, для круглых труб, когда влиянием гравитационных сил можно пренебречь ($D/l_\sigma < 0,5$), целесообразно использовать отношения инерционных и капиллярных сил в виде чисел Вебера, вычисленных по приведенным скоростям газа и жидкости (Akbar et al., 2003).

3. Влияние геометрии входного участка

Режимы течения значительно зависят от условий ввода фаз в канал. В работе (Haverkamp et al., 2006) имелось несколько начальных участков. Газ двигался вдоль микроканала, а жидкость подавалась с двух сторон микроканала. Использовались, как показано на рис. 2, два варианта смесителей: Плавный (Smooth) (угол подвода жидкости 10°) и Т-смеситель (угол подвода жидкости 90°). Также были проанализированы различные геометрии входного участка для Т-смесителя.

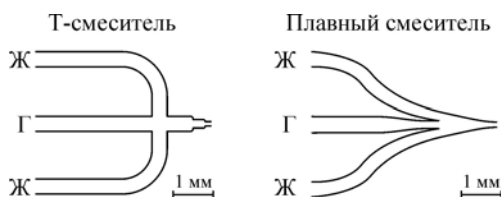


Рис. 2. Варианты смесителей (Haverkamp et al., 2006).

Обозначения: Г — газ; Ж — жидкость.

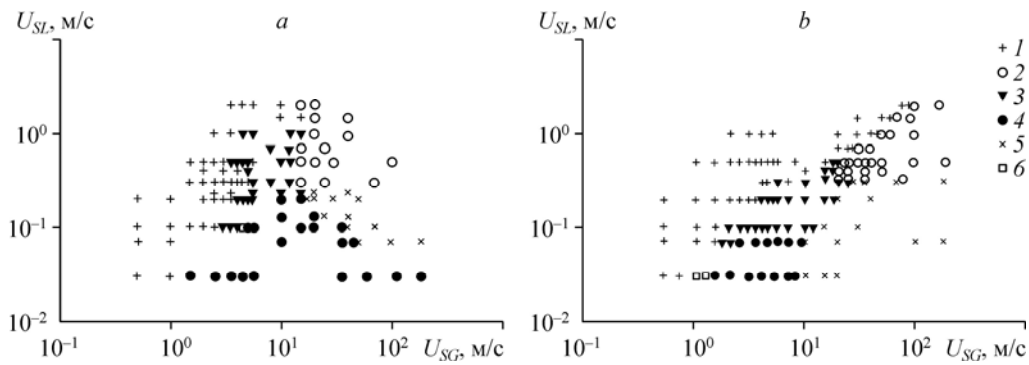


Рис. 3. Режимная карта с использованием Т-смесителя (а) и плавного смесителя (b) (Haverkamp et al., 2006).

Режимы течения: 1 — снарядный (Taylor), 2 — вспененный (churn), 3, 6 — струйно-снарядный (3 — Taylor/ring, 6 — Taylor/annular), 4 — кольцевой (annular), 5 — неоднородный кольцевой (ring).

В смесителе T_1 переход от сечения подводящего канала (400 мкм) к сечению микроканала (100 мкм) осуществлялся в две ступени (400–200 и 200–100 мкм), выполненных в виде внезапного сужения канала. В смесителе T_2 микроканал начинался сразу после места ввода газа. В смесителе типа “Плавный” переход осуществлялся постепенно.

В работе (Haverkamp et al., 2006) выделены следующие режимы течения: снарядный, вспененный и кольцевой. Также выделен неоднородный кольцевой режим, при котором толщина пленки изменялась на протяжении всего канала. Из рис. 3 видно, что при различных условиях подачи жидкости границы режимов сдвигаются на режимной карте. При переходе от Т-смесителя к Плавному граница снарядного режима практически не изменяется, область неоднородного кольцевого режима значительно уменьшается, сужаются области снарядно-кольцевого и вспененного режимов. Но в целом характер режимной карты сохраняется.

4. Влияние поперечных размеров канала

4.1. Круглые каналы

Размер канала является наиважнейшим критерием, отличающим макроканальные и микроканальные течения. Имеется огромное количество публикаций на эту тему. В работе (Coleman, Garimella, 1999) проведено исследование двухфазного потока в круглых каналах диаметром от 1,3 до 5,5 мм. Из рис. 4 видно, что основным отличием между

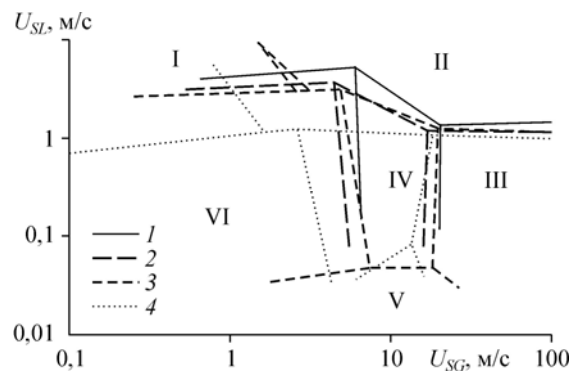


Рис. 4. Сравнительная режимная карты для круглых каналов различного диаметра (Coleman, Garimella, 1999).

Диаметры канала: 1,3 (1), 1,75 (2), 2,6 (3), 5,5 (4) мм; режимы течения: I — пузырьковый (bubble), II — дисперсный (dispersed), III — кольцевой (annular), IV — снарядно-кольцевой (wavy-annular), V — раздельный (stratified), VI — снарядный (slug).

небольшими (1,3, 10,75 и 2,6 мм) и большим (5,5 мм) каналами является преобладание раздельного и прерывистого режимов течения при более высоких приведенных скоростях жидкости и газа. Для небольших каналов уменьшение диаметра канала способствовало сдвигу границ между прерывистым и пузырьковым, снарядным и снарядно-кольцевым, снарядно-кольцевым и дисперсным режимами в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости и газа. Однако изменение размера канала практически не влияло на границу между снарядно-кольцевым и кольцевым, кольцевым и дисперсным режимами. Влияние размера канала на область прерывистого режима можно объяснить двумя явлениями: во-первых, в небольших каналах пузырьки диаметром порядка диаметра канала образуют прерывистый режим. В больших же каналах пузырьки такого диаметра образуют пузырьковый режим. Отсюда видно, что при уменьшении диаметра канала область прерывистого режима будет расширяться, а пузырькового наоборот, сужаться. Во-вторых, при уменьшении диаметра канала силы поверхностного натяжения начинают преобладать над инерциальными силами, из-за чего разрушение пузырей становится более сложным.

Из анализа литературы, приведенного в публикации (Ребров, 2010), следует, что при уменьшении диаметра микроканала область снарядного режима возрастает вдоль обеих координат (U_{SL} и U_{SG}). При уменьшении диаметра канала пузыри газа одинакового размера формируют снарядный режим при больших значениях U_{SG} . Границы струйно-снарядного режима сдвигаются в сторону более высоких U_{SL} и U_{SG} . Области пузырькового и вспененного режимов уменьшаются за счет расширения области снарядного режима. Границы струйного режима практически не меняются.

4.2. Треугольные каналы

В работе (Zhao, Bi, 2001) исследовано двухфазное течение в треугольных микроканалах различного гидравлического диаметра ($d_h = 2,886, 1,443$ и $0,886$ мм). Из рис. 5 видно, что пузырьковый режим сжимался с уменьшением диаметра канала с 2,886 до 1,443 мм и заменялся в канале 0,886 мм на капиллярный пузырьковый режим, который занимал гораздо большую площадь. С уменьшением диаметра канала снарядный режим расширялся в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости и газа, а вспененный режим сжимался из-за сдвига границы снарядного. Область кольцевого режима практически не изменялась.

4.3. Прямоугольные каналы

Высота канала

В работе (Чиннов и др., 2014) проведено исследование влияния высоты канала на структуру двухфазного потока. Показано сравнение данных для прямоугольного канала с зазором 0,2 мм с данными для горизонтальных каналов с большей высотой (0,42 и 1 мм). Из рис. 6 видно, что граница пузырькового и снарядного течений не претерпела существенных изменений при уменьшении

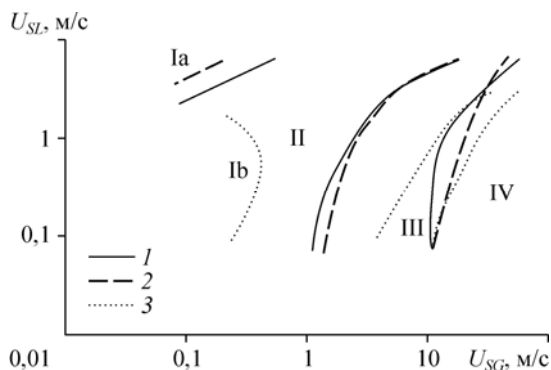


Рис. 5. Сравнительная режимная карта для треугольных каналов с различным гидравлическим диаметром (Zhao, Bi, 2001).

Режимы течения: $d_h = 2,886$ (1), $1,443$ (2) мм: Ia — пузырьковый (dispersed bubbly), II — снарядный (slug), III — вспененный (churn), IV — кольцевой (annular); $d_h = 0,886$ (3) мм: Ib — пузырьковый (capillary bubbly), II — снарядный (slug), III — вспененный (churn), IV — кольцевой (annular).

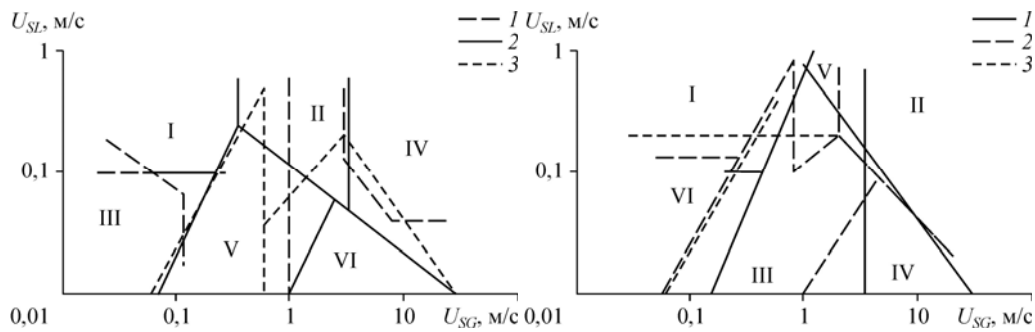


Рис. 6. Сравнение режимных карт для каналов с различным сечением (Чиннов и др., 2014). Сечения каналов: 0,2×34 (1), 0,42×40 (2), 1×40 (3) мм; режимы течения: I — пузырьковый, II — вспененный, III — снарядный, IV — кольцевой, V — струйный, VI — раздельный.

Рис. 7. Влияние ширины канала на границы режимов для каналов с разным сечением. Сечения каналов: 0,42×9 (1), 0,49×20 (2), 0,44×30 (3) мм (Чиннов, Кабов, 2012); режимы течения для каналов 0,49×20 и 0,44×30 мм: I — пузырьковый, II — кольцевой, III — струйный, IV — раздельный, V — вспененный.

высоты канала от 0,42 до 0,2 мм. С увеличением высоты канала уменьшилась область струйного режима (граница между струйным и раздельным режимами сдвинулась в сторону более низких приведенных скоростей газа), за счет чего существенно увеличилась область раздельного течения. Область кольцевого режима уменьшается с увеличением высоты канала (граница между кольцевым и раздельным режимами сдвигается в область более высоких приведенных скоростей жидкости). С уменьшением высоты горизонтальных каналов область вспененного режима возрастает, достигая максимальной величины для канала с зазором 0,2 мм. При этом граница между вспененным и кольцевым режимами 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.

Ширина канала

В работе (Чиннов, Кабов, 2012) проведено сравнение режимных карт в каналах сечением 0,42×9, 0,44×30 и 0,49×20 мм. На рис. 7 представлена сравнительная карта режимов течений в этих каналах. Видно, что в исследуемых микроканалах существует область устойчивого раздельного течения с тонкой пленкой жидкости. Установлено, что граница между раздельным и кольцевым режимами течения практически не подвержена влиянию изменения ширины канала. Граница между пузырьково-снарядным и струйным режимами изменяется слабо, как и граница между вспененным и кольцевым режимами двухфазного течения. Наибольшие изменения границ наблюдаются между струйным, вспененным и раздельным режимами течения. Увеличение ширины канала приводит к расширению областей раздельного и вспененного течений и сужению области струйного течения. Для канала сечением 0,42×9 мм область вспененного режима уменьшалась.

5. Влияние геометрии сечения канала

В работе (Triplett, 1999) приведено сравнение каналов треугольного и круглого сечений (для круглого $d = 1,097$ мм, для треугольного $d_n = 1,09$ мм). Сравнительная режимная карта для круглых и треугольных каналов приведена на рис. 8. Показано, что геометрия сечения слабо влияет на границы снарядного режима. В треугольном канале незначительно расширяется область вспененного режима, также немного расширяется струйный режим, сдвигая струйно-снарядный. В каналах некруглого сечения наблюдалась тенденция скапливания жидкости по углам канала. Это приводило к увеличению

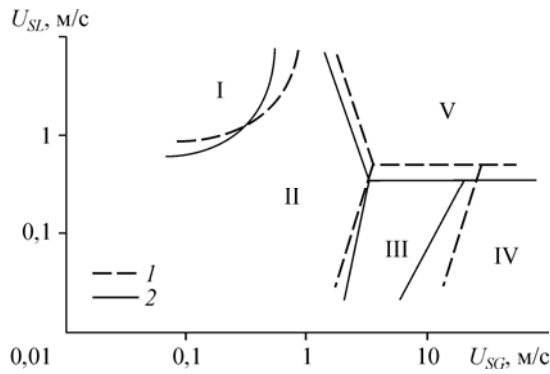


Рис. 8. Сравнительная режимная карта для круглых ($d = 1,097$ мм) (1) и треугольных ($d_h = 1,09$ мм) (2) каналов (Triplett et al., 1999).

Режимы течения: I — пузырьковый (bubbly), II — снарядный (Taylor), III — снарядно-кольцевой (Taylor-annular), IV — кольцевой (annular), V — вспененный (churn).

площади, занимаемой жидкостью по краям канала, и уменьшению площади ядра газового потока, из-за чего переход к кольцевому режиму происходил раньше. Подобная тенденция была обнаружена в работе (Coleman, Garimella, 1999) при сравнении достаточно больших круглых и прямоугольных каналов (aspect ratio = 0,725) с гидравлическим диаметром 5,5 мм. В работе (Ребров, 2010) сделан вывод, что геометрия сечения канала незначительно влияет на положение границ режимов, однако двухфазные течения в плоских прямоугольных каналах существенно отличаются от других (Чиннов, Кабов, 2006).

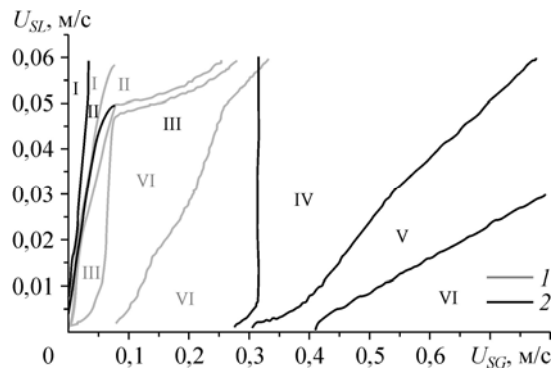
6. Влияние длины канала

В работе (Zeguai et al., 2013) исследуется влияние длины канала на режимы двухфазного течения. Здесь использовался канал диаметром 3 мм, а измерения проводились на расстоянии $L/D = 10$ и 420 при различных скоростях жидкости и газа. Из рис. 9 видно, что при уменьшении приведенной скорости жидкости до $U_{SL} = 0,78 \times 10^{-3}$ м/с различий практически не заметно. Для $L/D = 420$ на режимной карте практически всю область занимал снарядный режим, только для больших приведенных скоростей газа 297×10^{-3} м/с был зафиксирован кольцевой режим. Для $L/D = 10$ границы всех режимов были сдвинуты в сторону более низких приведенных скоростей газа. Особенно это заметно для кольцевого и снарядного режимов. Область пузырькового режима практически не изменяется. Следовательно, можно обобщить, что для микрочаналов диаметром $d \sim 1$ мм длина канала существенно влияет на границы режимов.

7. Влияние вязкости жидкости

В работе (Waelchli, von Rohr, 2006) проанализировано влияние вязкости жидкости в каналах различного диаметра. В работе использовались два канала, диаметром 187,5 мкм и 218 мкм, применялись жидкости различной вязкости (вода, этанол, глицерин) с азотом. В результате с увеличением вязкости жидкости

Рис. 9. Сравнительная режимная карта для $L/D = 10$ и 420 (Zeguai et al., 2013). Каналы: $L/D = 10$ (1), 2420 (2); режимы течения: I — пузырьковый (bubbly), II — снарядно-пузырьковый (bubbly/slug), III — снарядный (slug), IV — снарядно-кольцевой (slug-annular), V — кольцевой (annular), VI — нестабильный кольцевой (unstable annular).



границы снарядного режима сдвигались в область более высоких U_{SL} и U_{SG} . Подобные эффекты были обнаружены в работе (Furukawa, Fukano, 2001) в круглом канале диаметром $d = 19,2$ мм.

8. Влияние поверхностного натяжения

В работе (Ребров, 2010) исследовано влияние поверхностного натяжения на режимы двухфазного течения на примере смеси вода-азот и изопропанол-азот в каналах прямоугольного сечения (100×50 мкм). При переходе от первой смеси ко второй граница пузырькового режима сдвигалась в область более низких значений U_{SG} . Область струйно-снарядного режима существенно уменьшалась при увеличении поверхностного натяжения. При переходе от изопропанола к воде область вспененного режима сдвигалась в сторону более высоких значений U_{SG} .

В работе (Pohorecki et al., 2008) исследуется влияние поверхностного натяжения в прямоугольном микроканале ($0,2 \times 0,55$ мм) на структуру двухфазного потока с использованием воды ($\sigma = 0,073$ Н/м) и этанола ($\sigma = 0,024$ Н/м). С увеличением поверхностного натяжения граница между снарядно-кольцевым и кольцевым режимами сдвигалась в сторону более низких приведенных скоростей газа. Для определения границы между снарядным и снарядно-кольцевым режимами было недостаточно данных.

Противоположная тенденция движения границы между снарядно-кольцевым и кольцевым режимами (рис. 10) была обнаружена в эксперименте (Waelchli S, von Rohr, 2006) с использованием кремнивых прямоугольных микроканалов ($d_h = 187,5$ и 218 мкм). Как можно видеть из рис. 10, в двухфазной смеси вода-азот ($\sigma = 0,073$ Н/м, $\mu = 0,001$ Па·с) граница между снарядным и снарядно-кольцевым режимами пролегает выше, чем в двухфазной смеси этанол-азот ($\sigma = 0,022$ Н/м, $\mu = 0,0011$ Па·с). Также при использовании жидкости с большим поверхностным натяжением пузырьковый режим смещался в сторону более низких приведенных скоростей жидкости. Подобные результаты были получены в работе (Yang, Shieh, 2001) в каналах диаметром $d = 1-3$ мм с использованием двухфазной смеси вода-воздух ($\sigma = 0,0721$ Н/м) и двухфазной смеси R-134a и пара ($\sigma = 0,0075$ Н/м). Расхождения результатов могут объясняться использованием различных смесителей.

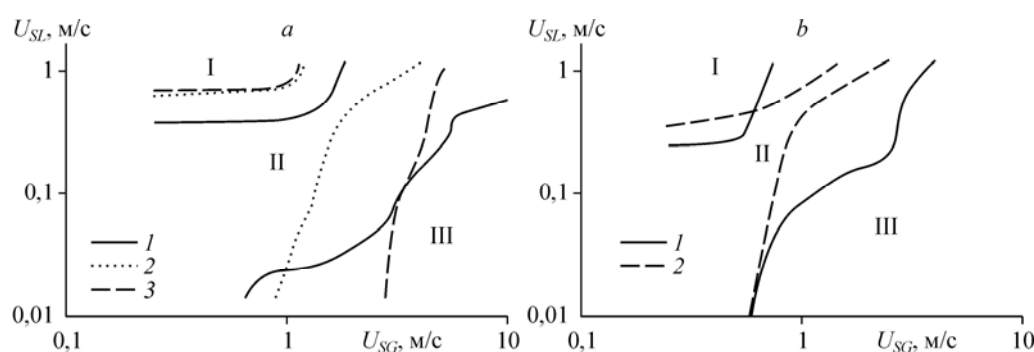


Рис. 10. Исследование влияния сил поверхностного натяжения и вязкости на режимную карту в канале прямоугольного сечения с гидравлическим диаметром $187,5$ мкм (а) для двухфазных смесей вода-азот (1), этанол-азот (2), глицерин-азот (3) и с гидравлическим диаметром 218 мкм (б) для двухфазных смесей вода-азот (1), этанол-азот (2) (Waelchli, von Rohr, 2006).

Режимы течения: I — пузырьковый (bubbly), II — снарядный (intermittent), III — кольцевой (annular).

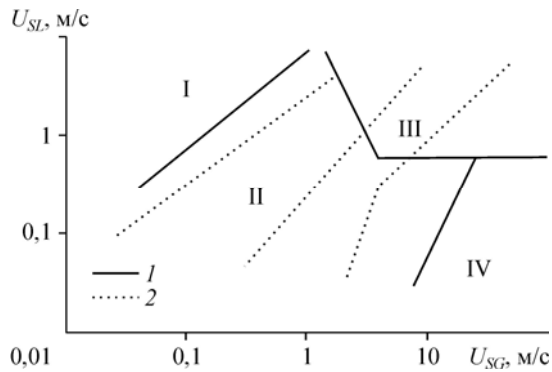


Рис. 11. Сравнение режимных карт для каналов горизонтальной (1) и (2) вертикальной ориентации (Hassan et al., 2005). Режимы течения: I — пузырьковый (bubbly), II — снарядный (Taylor), III — вспененный (churn), IV — кольцевой (annular).

9. Влияние гравитации

В работе (Hassan et al., 2005) проведено сравнение горизонтальных и вертикальных каналов диаметром 0,1 и 1 мм. Как видно из рис. 11, пузырьковый режим в вертикальном канале сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей жидкости. Возможно, это происходило из-за того, что плавучесть в вертикальных каналах способствовала образованию мелких пузырьков на входе в канал. Кольцевой режим в вертикальных каналах сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей газа, что указывает на преобладание инерциальных сил над силами поверхностного натяжения. Тем не менее, из-за недостатка исследований влияние силы тяжести на структуру двухфазного потока до сих пор до конца не изучено.

В работе (Ребров, 2010) указано, что в каналах диаметром менее 300 мкм влиянием гравитации можно пренебречь. Это позволяет использовать систему из микроканалов в любом положении и в условиях слабой гравитации, что не будет влиять на структуру двухфазного потока.

10. Влияние гидрофобности поверхности канала

В работе (Barajas, Panton, 1993) исследовано влияние контактного угла смачивания θ на структуру двухфазного потока в круглом канале диаметром 1,6 мм. Как видно из рис. 12, раздельный режим (wavy) в канале с $\theta = 34^\circ$ заменялся на ручейковый режим при $\theta \geq 61^\circ$, который распадался на несколько ручейков при больших контактных углах смачивания

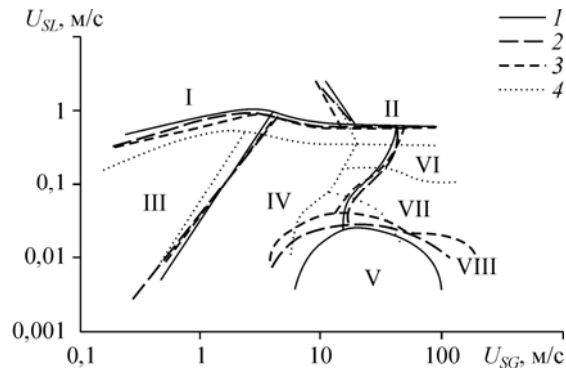


Рис. 12. Влияние контактного угла смачивания на режимную карту в круглом канале диаметром 1,6 мм (Barajas, Panton, 1993).

Режимы течения: 1 — $\theta = 34^\circ$, I — пузырьковый (bubble), II — дисперсный (dispersed), III — пробковый (plug), IV — снарядный (slug), V — раздельный (wavy), VI–VIII — кольцевой (annular); 2 — $\theta = 61^\circ$, I — пузырьковый (bubble), II — дисперсный (dispersed), III — пробковый (plug), IV — снарядный (slug), V — ручейковый (rivulet), VI, VIII — кольцевой (annular); 3 — $\theta = 74^\circ$, I — пузырьковый (bubble), II — дисперсный (dispersed), III — пробковый (plug), IV — снарядный (slug), V — ручейковый (rivulet), VI–VII — кольцевой (annular), VIII — мультиручейковый (multiple rivulet); 4 — $\theta = 106^\circ$, I — пузырьковый (bubble), II — дисперсный (dispersed), III — пробковый (plug), IV — снарядный (slug), V — ручейковый (rivulet), VI — кольцевой (annular), VII, VIII — мультиручейковый (multiple rivulet).

(менее гидрофильная поверхность). С увеличением контактного угла смачивания граница между ручейковым и кольцевым режимами течения сдвигалась в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости. Это происходит из-за того, что увеличение контактного угла смачивания мешает образованию пленки на стенках канала. В несмачиваемых каналах с контактным углом смачивания $\theta \geq 90^\circ$ более половины кольцевого режима заменялось ручейковым. Также при таких углах смачивания переход к пузырьковому и дисперсному режиму происходит при более низких U_{SL} , в то время как при небольших контактных углах смачивания существенных отличий не наблюдается.

В работе (Lee, Lee, 2008) было выделено два вида потоков: смоченный и осушенный, определяемые существованием замкнутой пленки. Например, ручейковый режим в работе (Bajaj, Panton, 1993) считался осушенным, так как в нем не было зарегистрировано замкнутой пленки жидкости. Авторы (Lee, Lee, 2008) также определили, что на переход между смоченным и осушенным режимами влияет приведенная скорость жидкости и контактный угол смачивания. Они определили нормированную приведенную скорость жидкости:

$$\overline{U}_{SL} = U_{SL} / (a + b\theta) = 1, \quad (2)$$

где a и b — константы, зависящие от условия смачивания. Осушенный поток может появляться даже в хорошо смачиваемых каналах в зависимости от U_{SL} , например, при $U_{SL} < 0,018$ м/с — в стеклянном канале ($\theta = 30^\circ$ для воды) и при $U_{SL} < 0,025$ м/с — в канале из тефлона ($\theta = 43^\circ$ для метанола). В каналах с меньшим углом смачивания ($50^\circ < \theta < 90^\circ$) переход от смоченного к осушенному режиму происходил при стандартных приведенных скоростях жидкости для двухфазного потока, например, этот процесс наблюдался при $U_{SL} \approx 0,17$ м/с для двухфазного потока вода-воздух в трубе из полиуретана диаметром 2 мм.

В работе (Serizawa et al., 2002) проведено исследование влияния обработки поверхности на структуру двухфазного потока. Более регулярные структуры появлялись в более гладком канале, обработанном комбинацией механической очистки с помощью мягкой щетки и ультразвуковой вибрации в дистиллированной воде этанолом и разбавленной соляной кислотой. В снаряжном режиме в канале с лучше обработанной поверхностью вместо капель наблюдалась пленка жидкости. Из этого следует вывод, что мелкие дефекты канала изменяют смачиваемость, препятствуя распространению и стабилизации пленки жидкости. В работе (Lee, Lee, 2008) сообщается, что мелкие дефекты поверхности увеличили ее гидрофильность для двухфазного потока вода-воздух в полиуретановых каналах ($d = 2$ мм, $\theta = 75^\circ$) и сместили границу между смоченным и осушенным режимами с $U_{SL} = 0,017$ м/с до $U_{SL} = 0,05$ м/с.

В работе (Cubaud, No, 2004) исследуется влияние смачиваемости на структуру двухфазного потока в раздельном режиме для гидрофильных и гидрофобных поверхностей. В этом случае поток по гидрофобному каналу течет ассиметрично, т.к. стенки канала не смочены жидкостью.

11. Неустойчивости двухфазного течения

В работе (Чиннов, Кабов, 2011а) проведен анализ неустойчивостей течения двухфазного потока при формировании режимов в плоских горизонтальных каналах высотой от 100 до 500 мкм. Показано, что существенное влияние на переход между различными режимами двухфазного течения в коротких прямоугольных каналах оказывает неустойчивость течения жидкости в окрестности их боковых стенок. Неустойчивость течения жидкости возникала при увеличении ее приведенной скорости, но в зависимости от величины приведенной скорости газа ее характеристики существенно отличались. В канале высотой 100 мкм обнаружен новый тип неустойчивости — фронтальная неустойчивость,

возникающая при взаимодействии жидкости и газа при выходе жидкости из сопла. Показано, что два типа неустойчивости (боковая и фронтальная) оказывают определяющее влияние на формирование режимов двухфазного течения в плоских горизонтальных микроканалах и переходы между ними. В частности, определено, что характерной особенностью газожидкостного течения в каналах высотой менее 500 мкм является образование капель жидкости (Чиннов, Кабов, 2011b). Выделено два режима: образование фиксированных капель на стенке канала в результате разрыва пленки или перемычек жидкости и возникновение подвижных капель в результате неустойчивости двухфазного течения. Определено, что интенсивность образования капель увеличивается с уменьшением высоты канала.

Выводы

Анализ экспериментальных данных по исследованию течения двухфазного потока в круглых трубах, треугольных и прямоугольных каналах с малым поперечным размером, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы.

Результаты выполненных исследований двухфазного потока в мини- и микроканалах не всегда имеют однозначный характер, содержат противоречия и имеют разные трактовки. В большинстве работ выделены следующие режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой, которые присутствуют во всех каналах. Обнаружены также новые режимы течений или разновидности уже известных режимов течения: вспененный, струйный, раздельный, волновой, капельный и др. Однако границы между режимами существенно отличаются в зависимости от условий эксперимента. Существенно влияют на этот процесс условия ввода газа и жидкости в каналы, а также параметры канала, такие как размер и форма.

При изменении размеров канала меняется и влияние сил на двухфазный поток. В небольших каналах уменьшение диаметра канала способствовало сдвигу границ между прерывистым и пузырьковым, снарядным и снарядно-кольцевым, снарядно-кольцевым и дисперсным режимами в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости и газа. Однако изменение размера канала практически не влияло на границу между снарядно-кольцевым и кольцевым, кольцевым и дисперсным режимами.

В каналах некруглого сечения наблюдалась тенденция, когда жидкость собиралась по углам канала. Это приводило к увеличению площади, занимаемой жидкостью по краям канала, и уменьшению площади ядра газового потока, из-за чего переход к кольцевому режиму происходил раньше.

Показано, что для больших каналов (> 1 мм) существенное влияние на границы режимов оказывает длина канала. С ее увеличением граница между пузырьковым и снарядным режимами сдвигаются в сторону более низких приведенных скоростей газа, в то время как граница между снарядным и кольцевым режимами сдвигается в противоположную сторону.

Существенным оказывается и влияние параметров жидкости. С увеличением вязкости жидкости границы снарядного режима сдвигались в область более высоких приведенных скоростей газа и жидкости. При увеличении поверхностного натяжения границы пузырькового режима сдвигались в область более низких значений U_{SG} . Область струйно-снарядного режима существенно уменьшалась при увеличении поверхностного натяжения. Границы области вспененного режима сдвигались в сторону более высоких значений U_{SG} при уменьшении поверхностного натяжения.

Во многих работах используются круглые каналы, хотя прямоугольные каналы имеют большую перспективу для использования в системах термостабилизации. В прямоугольных каналах картина течения качественно соответствует режимам в трубах, хотя границы между режимами существенно отличаются. Появляются два линейных размера, и в зависимости от их отношения существенно меняется картина процесса. Из табл. 2

следует, что основные исследования двухфазных течений проводились в каналах с отношением сторон менее 5. В работах (Бейнусов и др., 1978), (Lowry, Kawaji, 1988), (Xu et al., 1999), (Hibiki, Mishima, 2003) были выполнены исследования в вертикальных плоских каналах, а режимы газо-жидкостных течений в горизонтальных каналах с отношением сторон более 10 рассмотрены только в публикациях (Chinnov et al., 2009), (Чиннов, Кабов, 2011а), (Чиннов, Кабов, 2008).

Структура двухфазного течения в микроканалах до конца не изучена. Существует огромное количество параметров, влияющих на структуру двухфазного потока. До сих пор не существует модели, которая достаточно точно предсказывала бы режимную карту для большинства рассмотренных каналов. Анализ исследований показывает, что на структуру двухфазного потока в основном влияют следующие параметры: геометрия и размеры канала, параметры входного участка и свойства жидкости, такие как вязкость и поверхностное натяжение. Изменяя эти параметры, можно менять границы между режимами и получать различные подрежимы. Объяснить это можно тем, что на формирование различных режимов оказывают влияние разные силы. За пузырьковый и снарядный режимы в основном отвечают капиллярные силы, а за кольцевой и дисперсный — инерциальные силы. Именно этим влиянием объясняются различия режимных карт, построенных при различных условиях.

Список литературы

- Арманд А.А. 1946. Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубам // Известия ВТИ. Т. 1 С. 16–23.
- Бейнусов А.Г., Хозе А.Н., Челкас А.Я. 1978. К вопросу об изучении гидродинамики двухфазного течения в узком канале // Изв. АН СССР. МЖГ. № 2. С. 170–174.
- Козулин И.А., Кузнецов В. В. 2011. Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // Прикладная механика и техническая физика. Т. 52, № 6. С. 129–139.
- Ребров Е.В. 2010. Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теорет. основы хим. технологии. Т. 44, № 4. 371 с.
- Чиннов Е.А., Кабов О.А. 2006. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур. Т. 44, № 5. С. 777–795.
- Чиннов Е.А., Кабов О.А. 2008. Режимы двухфазного течения в плоском коротком микроканале // Письма в ЖТФ. Т. 34, № 16. С. 41–47.
- Чиннов Е.А., Кабов О.А. 2011а. Неустойчивости течения двухфазного потока в коротких плоских микроканалах // Письма в ЖТФ. Т. 37, № 19. С. 65–71.
- Чиннов Е.А., Кабов О.А. 2011б. Образование капель в микроканалах // Письма в ЖТФ. Т. 37, № 14. Р. 47–53.
- Чиннов Е.А., Кабов О.А. 2012. Двухфазные течения в горизонтальных плоских микроканалах // ДАН. Т. 442, № 2. С. 1–5.
- Чиннов Е.А., Роньшин Ф. В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Кабов О.А. 2014. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале // Теплофизика высоких температур. Т. 52, № 4. С. 710–717.
- Akbar M.K., Plummer D.A., Ghiaasiaan S.M. 2003. Gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 29, No. 5. P. 855–865.
- Varajas A.M., Panton R.L. 1993. The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 19, No. 2. P. 337–346.
- Barnea D., Luninski Y., Taitel Y. 1983. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes // The Can. J. Chem. Eng. Vol. 61, No. 5. P. 617–620.
- Bi Q.C., Zhao T.S. 2001. Taylor Bubbles in Miniaturized Circular and Noncircular Channels // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 27, № 3. P. 561–570.
- Bonjour J., Lallemand M. 1998. Flow Patterns during Boiling in a Narrow Space between Two Vertical Surfaces // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 24, № 6. P. 947–960.
- Bretherton F.P. 1961. The motion of long bubbles in tubes // J. Fluid Mech. Vol. 10. P. 166–168.
- Chen W.L., Twu V.C., Pan C. 2002. Gas-liquid two-phase flow in micro-channels // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 28, No. 7. P. 1235–1247.
- Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V. 2009. Regimes of two-phase flow in short rectangular channel // Microgravity Sci. Technol. Vol. 21, No. 1. P. 199–205.
- Choi C.W., Yu D.L., Kim M.H. 2011. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios. Part I. Flow pattern, pressure drop and void fraction // Int. J. Heat Mass Trans. Vol. 54. P. 616–624.
- Chung P.M.-Y., Kawaji M. 2004. The effect of channel diameter on adiabatic twophase flow characteristics in microchannels // Int. J. Multiphase Flow. Vol. 30, No. 7. P. 735–761.

- Coleman J.W., Garimella S.** 1999. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 42, No. 15. P. 2869–2881.
- Cubaud T., Ho C.M.** 2004. Transport of bubbles in square microchannels // *Phys. Fluids*. Vol. 16, No. 12. P. 4575–4585.
- Cubaud T., Umanella U., Ho C.M.** 2006. Two-phase flow in microchannels with surface modifications // *Fluid Dyn. Res.* Vol. 38, No. 11. P. 772–786.
- Damianides C.A., Westwater J.W.** 1988. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes // In: *Proc. of the Second UK National Conf. on Heat Transfer*. P. 1257–1268.
- Fukano T., Kariyasaki A.** 1993. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary // *Nucl. Eng. Des.* Vol. 141. P. 59–68.
- Furukawa T., Fukano T.** 2001. Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 27, No. 6. P. 1109–1126.
- Galbiati L., Andreini P.** 1994. Flow pattern transition for horizontal air-water flow in capillary tubes. A microgravity equivalent system simulation // *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. Vol. 21, No. 4. P. 461–468.
- Hassan I., Vaillancourt M., Pehlivan K.** 2005. Two-phase flow regime transitions in microchannels: a comparative experimental study // *Microscale Thermophys. Eng.* Vol. 9, No. 2. P. 165–182.
- Haverkamp V., Hessel V., Löwe H.** 2006. Hydrodynamics and mixer-induced bubble formation in microbubble columns with single and multiple channels // *Chem. Eng. Technol.* Vol. 29, № 9. P. 1015–1026.
- Hibiki T., Mishima K.** 2001. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels // *Nucl. Eng. Des.* Vol. 203, № 2, 3. P. 117–131.
- Holloway C.A., Bar-Cohen A., Sharar D.** 2014. Liquid film wave patterns and dry out in microgap channel annular flow // *IHTC-15, Kyoto, August 10–15*.
- Houshmand F., Elcock D., Amitay M., Peles Y.** 2014. Bubble formation from a micro-pillar in a microchannel // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 59. P. 44–53.
- Kabov O.A., Chinnov E.A., Cheverda V.** 2007a. Two-phase flow in short rectangular mini-channel // *Microgravity Sci. Technol.* Vol. 19, No. 3, 4, P. 44–47.
- Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V.** 2007b. Locally heated annular liquid films in microchannels and minichannels // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. Vol. 28, No. 1. P. 103–112.
- Kandikar S.G.** 2003. Microchannels and minichannels — history, terminology, classification and current research needs // *Proc. First Intern. Conf. on Microchannels and Minichannels*. USA, Rochester: ASME. P. 1–6.
- Kawahara A., Chung P.M.-Y., Kawaji M.** 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 28. P. 1411–1435.
- Kawaji M., Chung P.M.-Y.** 2003. Unique characteristics adiabatic gas-liquid flow in microchannels: diameter and shape effects on flow pattern, void fraction and pressure drop // *Proc. First Intern. Conf. on Microchannels and Minichannels*. P. 115–127.
- Kim N., Murphy M.C., Soper S.A., Nikitopoulos D.E.** 2014. Liquid-liquid segmented flows in polycarbonate microchannels with cross-sectional expansions // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 58. P. 83–96.
- Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S., Kozulin I.A.** 2012. Correlation of the flow pattern and refrigerant flow boiling heat transfer in microchannel heat sink // *J. Physics: Conf. Ser.* Vol. 395, № 1. P. 012093.
- Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S., Kozulin I.A., Kozlov S.P.** 2013. Correlation of the flow pattern and flow boiling heat transfer in microchannels // *Heat Transfer Engineering*. Vol. 34, № 2, 3. P. 235–245.
- Lee C.Y., Lee S.Y.** 2008. Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 34. P. 706–711.
- Lowry B., Kawaji M.** 1988. Adiabatic vertical two-phase flow in narrow flow channels // *AIChE Symp.* P. 133–139.
- Mandhane J.M., Gregory G.A., Aziz K.** 1974. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 1. P. 537–553.
- Mishima K., Hibiki T.** 1996. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 22. P. 703–712.
- Mishima K., Hibiki T., Nishihara H.** 1993. Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 19. P. 115–124.
- Mishima K., Ishii M.** 1984. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 27, No. 5. P. 723–737.
- Patel R.S., Garimella S.V.** 2014. Technique for quantitative mapping of three-dimensional liquid-gas phase boundaries in microchannel flows // *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 62. P. 45–51.
- Pohorecki R., Sobieszuk P., Kula K., Moniuk W., Zielinski M., Cyganski P., Gawinski P.** 2008. Hydrodynamic regimes of gas-liquid flow in a microreactor channel // *Chem. Eng. J.* Vol. 135, Sup. 1. P. S185–S190.
- Santos R. M., Kawaji M.** 2010. Numerical modeling and experimental investigation of gas-liquid slug formation in a microchannel T-junction // *Intern. J. of Multiphase Flow*. Vol. 36, № 4. P. 314–323.
- Serizawa A., Feng Z., Kawara Z.** 2002. Two-phase flow in microchannels // *Exp. Thermal Fluid Sci.* Vol. 26. P. 703–714.
- Shao N., Gavriilidis A., Angeli P.** 2008. Effect of inlet conditions on gas-liquid flow regimes in microchannels // In: *First Intern. Conf. on Microfluidics, Bologna, Italy, 10–12 December*.
- Shao N., Gavriilidis A., Angeli P.** 2009. Flow regimes for adiabatic gas-liquid flow in microchannels // *Chem. Engng Sci.* Vol. 64, No. 11. P. 2749–2761.

- Suo M., Griffith P.** 1964. Two-phase flow in capillary tubes // *J. Basic Eng.* Vol. 86. P. 576–582.
- Taitel Y., Barnea D., Dukler A.E.** 1980. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes // *AIChE. J.* Vol. 26, No. 3. P. 345–354.
- Taitel Y., Dukler A.E.** 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow // *AIChE. J.* Vol. 22, No. 1. P. 47–55.
- Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L.** 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I. Two-phase flow patterns // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 25, № 3. P. 377–394.
- Waelchli S., von Rohr P.R.** 2006. Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 32. P. 791–806.
- Wambugans M.W., Jendrzeczyk J.A., France D.M.** 1991. Two-phase flow patterns and transition in a small, horizontal, rectangular channel // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 17, No. 3. P. 327–342.
- Xiong R., Chung J. N.** 2007. An experimental study of the size effect on adiabatic gas-liquid two-phase flow patterns and void fraction in microchannels // *Physics of Fluids.* Vol. 19, № 3. P. 033301–033308.
- Xu J.L., Cheng P., Zhao T.S.** 1999. Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 25, № 3. P. 411–432.
- Yang C.-Y., Shieh C.-C.** 2001. Flow pattern of air-water and two-phase R-134a in small circular tubes // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 27. P. 1163–1177.
- Yu Z., Hemminger O., Fan L.-S.** 2007. Experiment and lattice Boltzmann simulation of two-phase gas-liquid flows in microchannels // *Chem. Engng. Sci.* Vol. 62, No. 24. P. 7172–7183.
- Yue J., Luo L., Gonthier Y., Chen G., Yuan Q.** 2008. An experimental investigation of gas-liquid two-phase flow in single microchannel contactors // *Chem. Engng. Sci.* Vol. 63. P. 4189–4202.
- Zeguai S., Chikh S., Tadrist L.** 2013. Experimental study of two-phase flow pattern evolution in a horizontal circular tube of small diameter in laminar flow conditions // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 55. P. 99–110.
- Zhao T.S., Bi Q.C.** 2001. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels // *Int. J. Multiphase Flow.* Vol. 27. P. 765–782.

*Статья поступила в редакцию 4 сентября 2014 г.,
после доработки — 10 ноября 2014 г.*