

03

Экспериментальное исследование ручейкового течения легкокипящей жидкости в мини-канале под действием потока газа

© В.В. Чеведа^{1,2}, О.А. Кабов^{1,3}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: slava.cheverda@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 сентября 2016 г.

Экспериментально исследовались разновидности режимов течения и построена карта 11 разновидностей режимов при течении ручейка диэлектрической легкокипящей жидкости в мини-канале под действием потока газа. Экспериментально установлено, что прямолинейное течение ручейка жидкости наблюдается в ограниченном диапазоне расходов жидкости, газа.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44401.16472

Под течением пленки жидкости в мини-канале понимается режим раздельного течения двухфазного потока, при котором смачивается вся поверхность подложки. Течение пленки жидкости под действием потока газа в мини-канале является эффективным решением для охлаждения микроэлектроники в наземных условиях и при невесомости. Принцип работы одной из таких систем описан в [1]. Одной из проблем при использовании микросистем с протяженными плоскими микро- и мини-каналами является большой перепад давления. Для эффективного охлаждения электронного компонента необходимо прокачивать достаточное количество жидкости и пара или газа, т.е. возникают большие энергозатраты [2]. Необходимо обеспечить движение пара или газа, а также жидкости с большими скоростями для обеспечения требуемой интенсивности теплообмена. При ручейковом течении смачивается только часть подложки. Использование ручейкового течения в системах

охлаждения — многообещающее решение актуальной задачи интенсификации теплообмена благодаря наличию контактной линии смачивания с аномально высоким коэффициентом теплоотдачи по сравнению с пленочным течением [3]. При пленочном течении жидкость орошает всю подложку по ширине, в то время как при ручейковом течении жидкость орошает только часть подложки. При ручейковом течении в углах канала движется газ и тем самым обеспечивается снижение расхода жидкости, т. е. энергозатраты. Вязкость жидкости существенно больше вязкости газа, что обеспечивает уменьшение сопротивления при течении смеси и уменьшение перепада давления по каналу, а следовательно, уменьшение энергетических затрат на прокачку двухфазной смеси в микроканале.

По результатам экспериментов построены карты режимов ручейкового течения под действием силы тяжести жидкостей (триэтиленгликоля, а также водяных растворов спирта и глицерина) по наклонной пластине [4]. Карта разновидностей волнообразования при ручейковом течении водяных растворов глицерина и спирта построена в работе [5]. Математическая модель, описывающая течение ручейка легкокипящей жидкости (FC-72) под действием потока газа азота в мини- и микроканалах изложена в работе [6]. Эксперименты с ручейковым течением жидкости FC-72 под действием потока газа в условиях с изменяемым ускорением (параболические полеты) приведены в работе [7]. Исследовалось влияние параметров эксперимента на ширину ручейка. Эксперименты с ручейковым течением воды под действием потока газа в условиях с разным ускорением поставлены в работе [8]. При уменьшении значения ускорения ручеек воды становится менее устойчивым. В литературе отсутствует информация о карте режимов ручейкового течения жидкости FC-72 под действием потока газа или пара.

Цель работы состоит в построении карты режимов течения ручейка легкокипящей диэлектрической жидкости FC-72 в мини-канале под действием потока азота.

Рабочий участок состоит из текстолитовой пластины, на которую крепится пластина из нержавеющей стали — подложка. К текстолитовой пластине крепится рамка, которая сверху накрывается оптическим стеклом, образуя тем самым мини-канал. Газовый поток поступает в мини-канал на значительном расстоянии от входа жидкости. Ручейковое течение формируется частичным закрытием жидкостного сопла

высотой $150\ \mu\text{m}$. Начальная ширина ручейка после выхода из сопла составляет $10\ \text{mm}$. Ручеек течет по подложке из нержавеющей стали с зеркальным алюминиевым покрытием (шероховатость $R_z = 0.08\ \mu\text{m}$, плоскостность $1\ \mu\text{m}$ на $50\ \text{mm}$), после чего двухфазная смесь эвакуируется из участка. Температура подложки измеряется несколькими термисторами, впрессованными в нее, и регулируется путем прокачки воды с контролируемой температурой через водяной теплообменник, а также электрическим нагревателем, прикрепленным к подложке снизу. Высота канала составляет $1.5\ \text{mm}$ и регулируется металлическими вставками, установленными между оптическим стеклом и подложкой. Ширина прямоугольного миниканала составляет $40\ \text{mm}$, а длина $120\ \text{mm}$.

Наблюдения осуществляются с помощью высокоточной фазовой шпирен-системы [9]. Наблюдение деформаций и измерение ширины ручейка жидкости осуществляется на расстоянии $40\ \text{mm}$ от жидкостного сопла. На этом расстоянии, как правило, наблюдается установление режима течения. Радиус области видения выбран как максимально возможный для фазовой шпирен-системы — $22.5\ \text{mm}$. Экспериментальный стенд позволял поддерживать в ходе всего эксперимента одинаковую температуру подложки, газа и жидкости на входе в рабочий участок. Для анализа данных по структуре течения использовались числа Рейнольдса жидкости и газа ($Re_l = Q_l/(v_l a)$), $Re_g = Q_g/(v_g b)$, где $Q_{l,g}$ — объемный расход жидкости или газа (m^3/s), a — ширина мини-канала (m), b — ширина жидкостного сопла (m), $v_{l,g}$ — кинематическая вязкость жидкости или газа (m^2/s).

По результатам экспериментов построена карта 11 режимов ручейкового течения в зависимости от расходов жидкости и газа при температуре подложки 40°C . Наблюдались геометрические деформации (рис. 1) и деформации поверхности ручейка (рис. 2). Для удобства восприятия карты разновидностей ручейкового течения с геометрическими деформациями (рис. 3, *a*) и деформацией поверхности ручейка (рис. 3, *b*) построены на разных графиках. Геометрические деформации делятся на следующие: *a* — неустойчивое течение (при малом расходе жидкости ручеек начинает изгибаться, разделяется на два, распадается на капли); *b* — сужающееся течение (ручеек сужается в результате интенсивного испарения легкокипящей жидкости, т.е. расхода жидкости не хватает, чтобы скомпенсировать это испарение, в этом случае равновесная ширина ручейка меньше начальной ширины ручейка на входе в мини-канал, равной ширине жидкостного

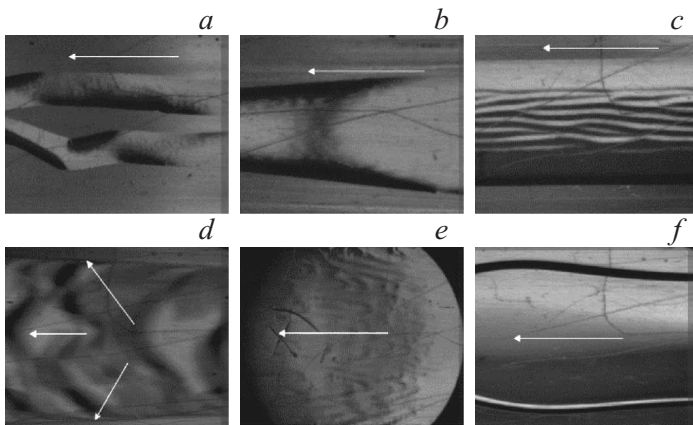


Рис. 1. Геометрические деформации ручейка легкокипящей жидкости (FC-72, фото), стрелками показаны направление течения и линия контакта ручейка и подложки мини-канала.

сопла); *c* — прямолинейное течение с увеличением расхода жидкости (ширина ручейка в области видения изменяется не более чем на 5%); *d* — расширяющееся течение с дальнейшим увеличением расхода жидкости (ширина ручейка увеличивается по ходу течения более чем на 10%); *e* — пленочное течение как частный случай расширяющегося течения, при котором ручеек касается стенок мини-канала; *f* — инвертированное течение, если при пленочном течении ручейка происходит полное или частичное затопление мини-канала жидкостью по ширине более чем на 10%. Данное течение обусловлено недостаточно высоким расходом газа, чтобы проталкивать необходимое количество жидкости в мини-канале, а также хорошим смачиванием жидкостью боковых стенок и поверхности оптического окна мини-канала.

Деформации поверхности жидкости изучались в режиме три (рис. 3, *a*), когда осуществлялось практически прямолинейное течение ручейка жидкости. Течения с деформациями поверхности ручейка делятся на несколько видов: хаотическая рябь (рис. 2, *a* и 3, *b-1*) — ширина образующихся структур незначительно отличается от их длины, характерный размер — несколько миллиметров; течение с вытянутыми

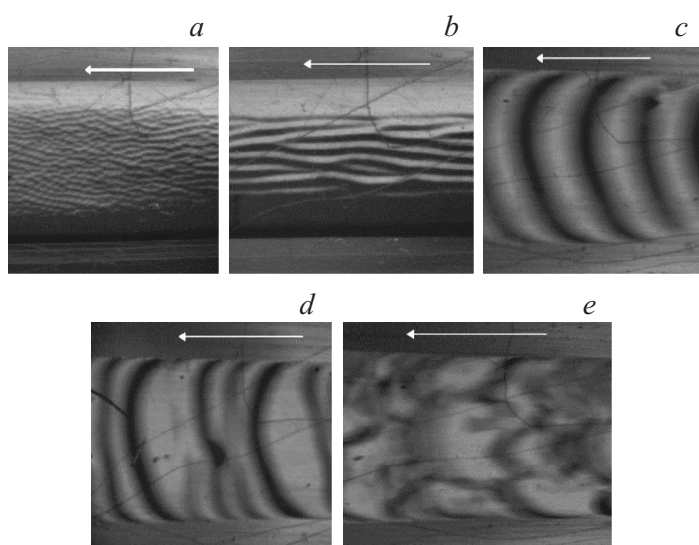


Рис. 2. Деформации поверхности ручейка легкокипящей жидкости (FC-72, фото).

по потоку деформациями в виде структур-жгутиков (рис. 2, *b* и 3, *b-2*), длина волны структур поперек потока составляет несколько миллиметров, длина по потоку — несколько сантиметров, возникновение ряби и структур объясняется термокапиллярной природой в связи с интенсивным испарением [10]; сложная деформация в виде серповидной 2D-волны поперек течения (рис. 2, *c* и 3, *b-3*), занимают всю ширину ручейка, волны наблюдаются совместно с деформацией в виде жгутиков; сложная деформация в виде солитообразных волн (рис. 2, *d* и 3, *b-4*), две большие и несколько малых волн между ними во всю ширину ручейка, наблюдается совместно с деформацией в виде жгутиков; сложная деформация в виде 3D-волн (рис. 2, *e* и 3, *b-5*), наблюдается при высоких расходах газа, особенность — наличие деформаций, перпендикулярных потоку, ширина которых в несколько раз меньше ширины самого ручейка, наблюдается совместно с деформацией в виде жгутиков.

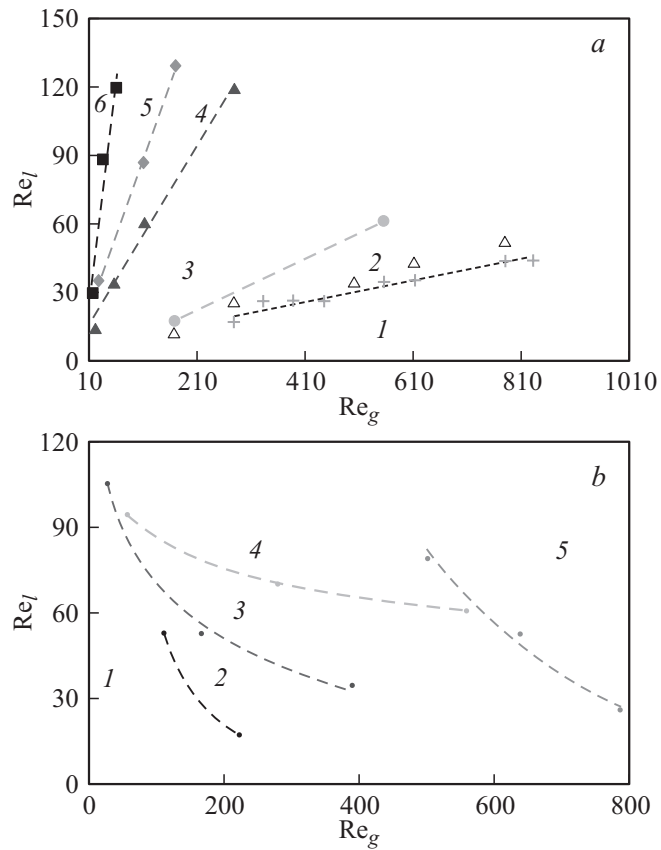


Рис. 3. Карта разновидностей деформаций ручейка легкокипящей жидкости (FC-72) при течении в мини-канале под действием потока газа азота для температуры подложки, газа и жидкости на входе в рабочий участок, равной 40°C . *a* — геометрические деформации: 1 — неустойчивое течение, 2 — сужающийся ручеек, 3 — прямолинейный ручеек, 4 — расширяющийся ручеек, 5 — пленочное течение, 6 — инвертированное течение. *b* — деформации поверхности жидкости: 1 — рябь, 2 — структуры (жгутики), 3 — 2D-волны, 4 — солитонобразные волны, 5 — 3D-волны.

Таким образом, эксперименты показали, что рабочие параметры (расходы жидкости и газа) существенно влияют на ручейковое течение: существует ограниченная область, в которой течение ручейка осуществляется с примерно постоянной шириной (область 3, рис. 3, а).

Именно эта область удобна для проведения исследований гидродинамики и волновой структуры ручейковых течений. Этот режим течения, также может быть использован для практических приложений, т.е. в теплообменных устройствах. Экспериментально показано, что поверхность жидкости наблюдается всегда с деформациями. Можно выделить два основных класса волн: 1) с волновым фронтом, ориентированным вдоль течения, вызваны термокапиллярной неустойчивостью и испарением (информация о природе данной неустойчивости на поверхности пленки приведена в [9]); 2) с волновым фронтом, ориентированным поперек течения, вызваны гидродинамической природой [5]. Установлено, что в широком диапазоне числа Рейнольдса жидкости и газа эти два класса волн сосуществуют. Установлен переход от ручейкового течения к пленочному без разрывов жидкости на достаточно коротком участке по длине, равном ширине канала. Таким образом, определены предельные режимы для течения ручейка в канале.

Исследования карты режимов течения выполнены за счет гранта РФФИ 14-19-01755. Настройка и адаптация фазовой шпирен-системы осуществлялась при поддержке проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ_мол_а 14-08-31515).

Список литературы

- [1] *Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A.* // *Microgravity Sci. Technol.* 2008. V. 20. Iss. 3–4. P. 187.
- [2] *Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A.* et al. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 68. P. 527.
- [3] *Stephan P., Brandt C.* // *Heat Transfer Eng.* 2004. V. 25(3). P. 78.
- [4] *Schmuki P., Laso M.* // *J. Fluid Mech.* 1990. V. 215. P. 125.
- [5] *Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Kharlamov S.M.* et al. // *Abstracts of papers of 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.* Lisbon. Portugal. 2008.
- [6] *Kabov O.A., Bartashevich M.V., Cheverda V.* // *Int. J. Emerg. Multidisciplin. Fluid Sci.* 2010. V. 2 (2–3). P. 161.

- [7] *Cheverda V., Glushchuk A., Queeckers P.* et al. // *Microgravity Sci. Technol.* 2013. V. 25 (1). P. 73.
- [8] *McAlister G., Ettema R., Marshall J.S.* // *J. Fluids Eng.* 2005. V. 127. P. 257.
- [9] *Joannes L., Dubois F., Legros J.C.* // *Appl. Opt.* 2003. V. 42 (25). P. 5046.
- [10] *Kabov O.A., Zaitsev D.V., Cheverda V.V.* et al. // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2011. V. 35 (5). P. 825.