

УДК 536.24

Исследование кипения диэлектрической жидкости FC-72 в щелевом микроканале*

Ф.В. Роньшин, Ю.А. Дементьев, Е.А. Чиннов

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

E-mail: f.ronshin@gmail.com

Микроканальные системы охлаждения получают широкое распространение благодаря своей эффективности. В работе проведено исследование кипения диэлектрической жидкости FC-72 в плоском микроканале высотой 66 мкм и шириной 10 мм. Нагрев осуществлялся тонкопленочным ИТО-нагревателем, находящимся в непосредственном контакте с рабочей жидкостью. Исследованы режимы течения при кипении в широком диапазоне расходов жидкости. Показано, что режимы кипения в плоском микроканале существенно отличаются от режимов течения в круглых и прямоугольных мини- и микроканалах. Построены зависимости теплового потока от температурного напора. Исследована зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока для различных режимов двухфазного потока.

Ключевые слова: кипение, щелевой микроканал, диэлектрическая жидкость.

Введение

Миниатюризация вычислительной электроники приводит к существенному увеличению тепловыделения с единицы площади поверхности. Эта проблема стоит более остро при проектировании трехмерных чипов, где тепло необходимо отводить непосредственно из области чипа. Внимание исследователей в последнее время направлено на изучение теплообмена и развития кризисных явлений в микроканальных системах, что связано с перспективой использования таких систем для охлаждения микроустройств с высокой энергонапряженностью [1]. Кипение в микроканалах — один из наиболее перспективных методов охлаждения в силу своей эффективности. Микроканальная система охлаждения способна отводить высокие тепловые потоки при небольшом перепаде температуры. В работе [2] показано, что микроканальные теплообменники имеют широкую область применения, начиная с систем охлаждения микроэлектроники до реакторов и ракетных двигателей. В работе [3] детально проанализированы основные механизмы, влияющие на эффективность теплообмена в микроканальных системах. Показано, что эффективность теплоотдачи существенно зависит от режима течения и конфигурации канала. В обзоре [4] рассмотрены основные параметры, влияющие

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>).

на переходы между режимами, и показано, что с уменьшением размеров каналов режимы двухфазных течений существенно изменяются. В работе [5] рассмотрены основные результаты экспериментальных и аналитических исследований кипения в микроканалах. Определены основные механизмы теплоотдачи при кипении, а также при испарении тонкой пленки жидкости. Показано, что с увеличением теплового потока вплоть до критического теплового потока возрастает коэффициент теплоотдачи. Исследование пузырькового кипения фреонов R134a и R245fa в микротрубах приведено в работе [6]. Проведен анализ скорости роста пузырьков, частоты их формирования и других характеристик при тепловом потоке до 226 кВт/м². Исследование основных физических процессов при кипении FC-72 в микроканале представлено в работе [7]. Был изучен вклад основных механизмов в интенсификацию теплообмена: испарение микрослоя; испарения в области контактных линий; теплопроводность и микроконвекция.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию кипения в микросистемах, до сих пор нет единой модели для описания тепло- и массообмена в таких системах. Это связано с узким диапазоном исследуемых параметров в экспериментах. Показано, что эффективность теплообмена в микроканальных системах увеличивается с уменьшением размеров плоских каналов за счет увеличения отношения площади канала к его объему. Однако количество экспериментальных работ в плоских микроканалах ограничено. Кроме того, авторы в основном исследуют интегральные параметры теплообмена, такие как коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток, не уделяя должного внимания режимам течения. Эта задача усложняется с уменьшением размеров каналов, когда капиллярные эффекты и смачиваемость начинают оказывать существенное влияние на формирование режимов двухфазных течений. Целью настоящей работы является исследование кипения диэлектрической жидкости FC-72 в щелевом микроканале с использованием скоростного шпирен-метода и метода инфракрасной (ИК) визуализации.

Экспериментальная установка и методика исследований

Рабочий участок представляет собой две пластины: боросиликатное стекло с вытравленным микроканалом (высота 66 мкм, ширина 10 мм) и сапфир с напыленным нагревателем из оксида индия-олова (indium tin oxide, ИТО), которые плотно прижаты к друг другу. Оптически прозрачный нагревательный элемент (тонкопленочный ИТО-нагреватель) размером 100 мм² напылен на сапфировую пластину, прозрачную в инфракрасном диапазоне (85 % при длине волны 3,7 мкм), для визуализации поля температур на нагревателе ИК-методом. Толщина ИТО-нагревателя составляет ~ 1 мкм, а шероховатость R_q ~ 10 нм. Тонкопленочные нагреватели хорошо зарекомендовали себя при исследовании кипения в большом объеме [8, 9] и при спрейном охлаждении [10]. ИТО-нагреватель является прозрачным в видимом диапазоне (380–750 нм) и непрозрачным в ИК-диапазоне для длин волн 3–5 мкм. Нагреватель расположен на внутренней поверхности стенки микроканала, а подводные площадки для подачи питания (серебро, обладающее пренебрежимо малым сопротивлением по сравнению с нагревателем) выведены на противоположную сторону. Непосредственный контакт жидкости с нагревателем позволяет существенно снизить тепловые растечки. После сборки высота микроканала измерена во всей рабочей области с помощью конфокального метода на установке confocalDT IFC2451 и составила 66 мкм. В качестве рабочей жидкости использована диэлектрическая жидкость FC-72 с температурой кипения 56 °С, что позволяет поддерживать

Таблица
 Параметры рабочей жидкости (FC-72)

Параметр	Значение
Температура кипения (1 атм)	56 °С
Плотность жидкости (25 °С)	1680 кг/м ³
Плотность пара (56 °С)	13,24 кг/м ³
Вязкость жидкости (25 °С)	6,4·10 ⁻⁴ Па·с
Поверхностное натяжение (25 °С)	1,05·10 ⁻² Н/м
Удельная теплоемкость (25 °С)	1,1·10 ³ Дж/(кг·К)
Удельная теплота парообразования (25 °С)	8,8·10 ⁴ Дж/кг
Контактный угол (25 °С, сапфир/стекло)	< 5°

оптимальную для вычислительных микропроцессоров температуру на нагревателе. Указанная жидкость обладает хорошей смачиваемостью, что обеспечивает устойчивость пленочных режимов течения. Параметры исследуемой жидкости представлены в таблице.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Рабочая жидкость циркулирует в замкнутом контуре. Циркуляцию обеспечивает высокоточный шестеренчатый насос Cole-Parmer 1, который подает жидкость в микроканал. Перед насосом установлен контур термостабилизации, который включает пластинчатый теплообменник 2 и термостат 3, задающий требуемую температуру жидкости. Жидкость подавалась в микроканал при температуре 27 °С. На входе и выходе из микроканала установлены термопары 4, измеряющие температуру жидкости. Давление измеряется датчиками VD Sensors 5 на входе в рабочий участок, на выходе, а также на участке непосредственно в области сапфировой пластины. В микроканале кипение происходит на ИТО-нагревателе 6, который напылен на сапфировую пластину. Микроканал вытравлен в пластине

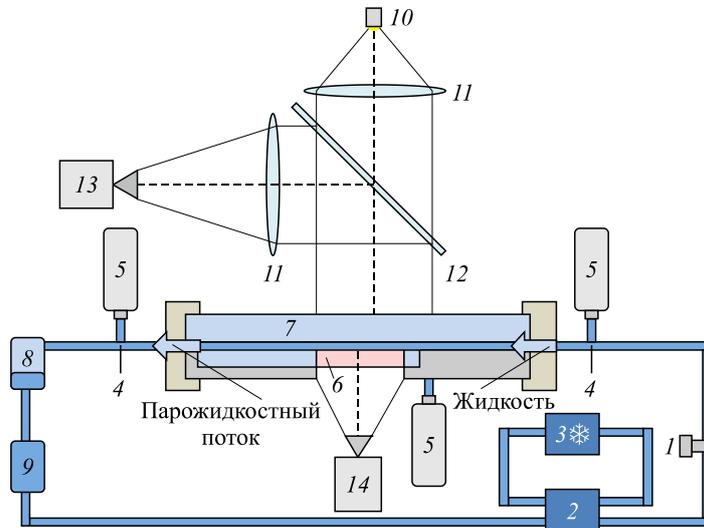


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

- 1 — шестеренчатый насос Cole-Parmer, 2 — пластинчатый теплообменник,
 3 — термостат Huber, 4 — термопары, 5 — датчики давления BD Sensors,
 6 — ИТО-нагреватель, напыленный на сапфировую пластину,
 7 — боросиликатное стекло с вытравленным микроканалом,
 8 — конденсатор, 9 — резервуар, 10 — точечный источник света,
 11 — линзы, 12 — полупрозрачное зеркало,
 13 — скоростная камера Phantom VEO 410,
 14 — ИК-камера Titanium HD 570M.

из боросиликатного стекла 7, которое сверху закрывает сапфир. После прохождения микроканала жидкость поступает в конденсатор 8, а затем в резервуар для хранения жидкости 9. Визуализация двухфазного течения проводилась при помощи шпирен-метода. Свет от источника 10 проникает в микроканал с газожидкостным потоком через линзу 11, полупрозрачное зеркало 12 и попадает в микроканал. Свет, отраженный от границы раздела пар–жидкость, передается через полупрозрачное зеркало и линзу. В результате камера 13 фиксирует изображение в оттенках серого, где каждому оттенку соответствует определенный угол наклона границы раздела жидкость–газ. Таким образом можно четко визуализировать области с наклоном межфазной границы (пузыри, волны на пленке жидкости, жидкостные мостики). Использование методики позволяет достаточно точно фиксировать структуру двухфазного потока в каналах и четко определять границы между режимами [11]. Для визуализации быстропротекающих процессов использована скоростная камера Phantom VEO 410. Для измерения поля температур на поверхности нагревателя экспериментальный стенд оснащен инфракрасной камерой Titanium HD 570M FLIR Systems ATS 14. Для контроля температуры жидкости на входе и выходе использованы термопары. Калибровка ИК-камеры проводилась при заданных значениях температуры нагревателя во всем исследуемом диапазоне температур с помощью предварительно установленной сапфировой пластины в том же положении, что и в эксперименте. Для калибровки шкалы ИК-камеры на сапфировой пластине был обеспечен тепловой контакт между ИТО-нагревателем и термопарой с помощью термопасты и УФ-клея. Для поддержания постоянной температуры на ИТО-нагреватель сверху устанавливался массивный медный брусок. Установка тщательно теплоизолировалась базальтовым волокном. Далее медный брусок разогревался до температуры ~ 14 °C и при медленном остывании фиксировались показания термопары и значения шкалы ИК-камеры. Такая процедура повторялась несколько раз. Результаты калибровок показали повторяемость в диапазоне температур от 20 до 110 °C с погрешностью менее 1 °C.

Результаты исследования

Изучено кипение в микроканале шириной 10 мкм и высотой 66 мкм. Исследованы режимы течения в широком диапазоне расходов жидкости (0,5–10 мл/мин) для тепловых потоков 0–40 Вт/см². При небольших величинах тепловых потоков наблюдался конвективный режим теплообмена. При увеличении теплового потока начинали формироваться пузыри в процессе кипения. На рис. 2 приведены характерные картины

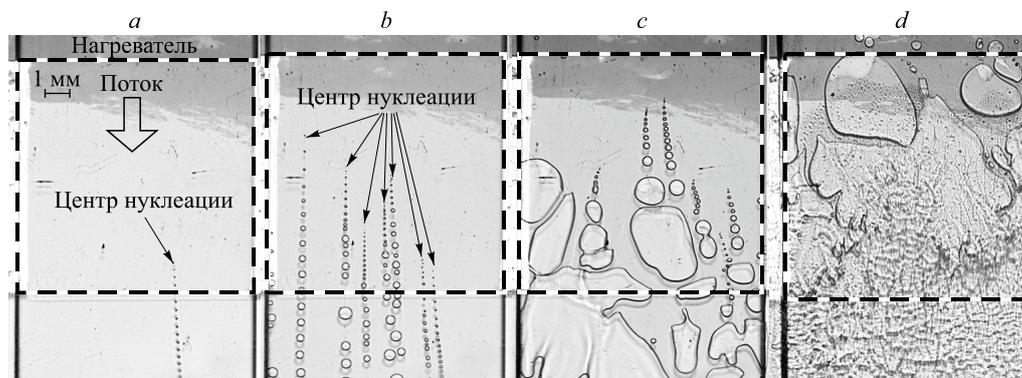


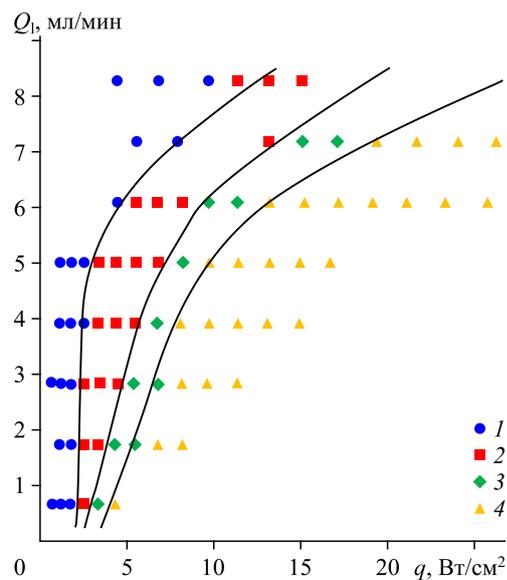
Рис. 2. Режимы течения: пузырьковый при $Q_1 = 8,3$ м/с, $q = 9$ (a) и $9,7$ (b) Вт/см²; вспененный при $Q_1 = 8,3$ м/с, $q = 12$ Вт/см² (c); кольцевой при $Q_1 = 7,2$ м/с, $q = 19$ Вт/см² (d).

кипения в зависимости от теплового потока и расхода жидкости. При небольших тепловых потоках наблюдался пузырьковый режим, центры нуклеации появлялись в случайном месте нагревателя ближе к его краю по направлению потока, где температура жидкости была выше (рис. 2*a*). В отличие от хорошо изученных круглых и прямоугольных мини- и микроканалов, в исследуемом щелевом микроканале практически сразу после нуклеации формируется зажатый паровой пузырь между верхней и нижней стенками канала. С увеличением теплового потока количество центров нуклеации возрастает (см. рис. 2*b*). Когда размер пузырей становится достаточно большим, происходит их коалесценция, наблюдается переход ко вспененному режиму (см. рис. 2*c*). При дальнейшем увеличении теплового потока паросодержание возрастает, происходит переход к кольцевому режиму. В кольцевом режиме течения нижняя и верхняя стенки микроканала смочены, по ним движутся пленки жидкости, между которыми движется паровой поток (см. рис. 2*d*). На пленках наблюдаются волны. Также при небольших расходах жидкости и небольших тепловых потоках в кольцевом режиме по пленкам жидкости движутся вертикальные жидкостные мостики, которые были зарегистрированы в условиях хорошего смачивания в работе [12]. При дальнейшем увеличении теплового потока наблюдается частичное осушение нагревателя, имеет место кризис теплоотдачи.

На рис. 3 представлена режимная карта, где в качестве координат использованы объемный расход жидкости и тепловой поток на нагревателе. С увеличением расхода жидкости границы переходов между режимами существенно сдвигаются в сторону более высоких тепловых потоков.

Зависимость теплового потока на нагревателе q от температурного напора $\Delta T = T_{\text{heat}} - T_{\text{sat}}(P)$ (где T_{heat} — температура нагревателя, $T_{\text{sat}}(P)$ — температура насыщения жидкости в зависимости от давления) при различных расходах жидкости представлена на рис. 4*a*. Область с небольшим наклоном при малых температурных напорах и небольших тепловых потоках соответствует конвективному режиму нагрева. С увеличением температурного напора и теплового потока начинается процесс кипения, интенсивность теплообмена возрастает, достигая максимума при кольцевом режиме течения. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки происходит частичное осушение нагревателя, наблюдается кризис теплоотдачи. Определены значения коэффициента теплоотдачи $h = q/\Delta T$. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока при различных значениях расхода жидкости показана на рис. 4*b*. Минимальный коэффициент теплоотдачи наблюдается при начале кипения. С увеличением количества центров нуклеации происходит интенсификация теплообмена, коэффициент теплоотдачи резко возрастает.

Рис. 3. Режимная карта: конвективный (1), пузырьковый (2), вспененный (3), кольцевой (4) режимы.



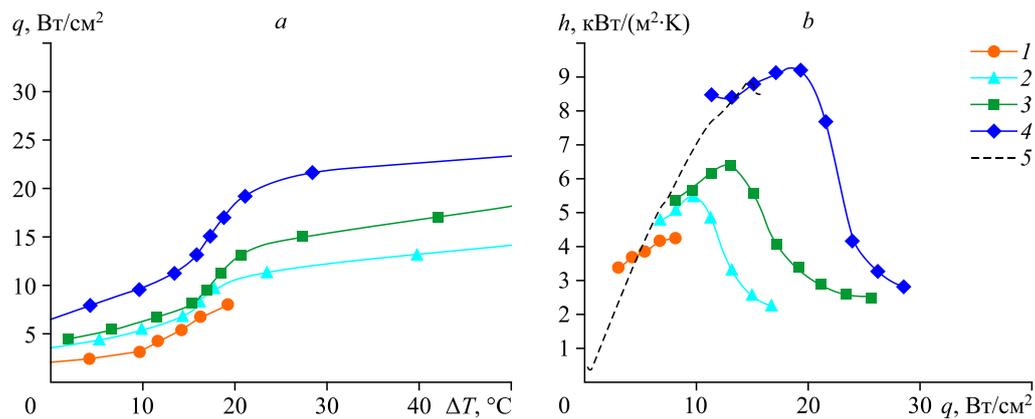


Рис. 4. Зависимости плотности теплового потока от температурного напора в зоне нагревателя (а) и коэффициента теплоотдачи от теплового потока (b) для различных расходов жидкости $Q_1 = 1,8$ (1), 5 (2), 6,1 (3), 7,2 (4) мл/мин; линия 5 — кипение в большом объеме [13].

При дальнейшем увеличении теплового потока коэффициент теплоотдачи растет за счет увеличения площади испарения. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи отмечено в кольцевом режиме течения, когда на нагревателе испаряется тонкая пленка жидкости, а по центру канала движется поток пара. При этом скорость потока пара существенно превышает скорость движения жидкости. При достижении критического теплового потока, когда нагреватель начинает осушаться, коэффициент теплоотдачи резко падает. С увеличением расхода жидкости возрастает как коэффициент теплоотдачи, так и критический тепловой поток. На рис. 4 также показано сравнение с данными по кипению жидкости FC-72 в большом объеме [13]. Видно, что при малых расходах жидкости коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток выше для кипения в большом объеме. Это связано с низкими скоростями потока (приведенная скорость жидкости, определяемая как объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения, $U_{SL} = 0,017 - 0,15$ м/с). При увеличении расхода до 7,2 мл/мин ($U_{SL} = 0,18$ м/с) коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток становятся выше для кипения в канале по сравнению с кипением в большом объеме.

Заключение

Проведено комплексное исследование кипения диэлектрической жидкости FC-72 в плоском микроканале высотой 66 мкм и шириной 10 мм. Микроканал создан в стеклянной пластине при помощи травления. Оптически прозрачный тонкопленочный ИТО-нагреватель напылен на сапфировую пластину и находится в непосредственном контакте с рабочей жидкостью. Конструкция установки позволила провести синхронное исследование кипения при помощи скоростного шпирен-метода и ИК-визуализации. Показано, что режимы кипения в плоском микроканале существенно отличаются от результатов, представленных в литературе. Изучены переходы от пузырькового кипения ко вспененному и кольцевому режимам в зависимости от теплового потока и расхода жидкости. Исследованы зависимости плотности теплового потока от температурного напора и коэффициента теплоотдачи от теплового потока. Показано, что интенсивность теплообмена возрастает с увеличением теплового потока, коэффициент теплоотдачи значительно увеличивается. Максимальный коэффициент теплоотдачи наблюдается в кольцевом

режиме течения, когда происходит испарение тонкой пленки жидкости. Коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток существенно возрастают с увеличением расхода жидкости. Проведено сравнение характерных величин коэффициента теплоотдачи с данными для кипения в большом объеме. Показано, что для скоростей потока менее 0,15 м/с коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток выше при кипении в большом объеме. При достижении скорости потока 0,18 м/с коэффициент теплоотдачи и критический тепловой поток в исследуемом канале превышают их значения для случая кипения в большом объеме.

Список литературы

1. **Jaeseon L., Mudawar I.** Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics // *Components Packag. Technol. IEEE Trans.* 2009. Vol. 32, No. 2. P. 453–465.
2. **Mudawar I.** Two-phase microchannel heat sinks: theory, applications, and limitations // *ASME J. Electron. Packag.* 2011. Vol. 133, No. 4. P. 041002-1–041002-31.
3. **Karayiannis T.G., Mahmoud M.M.** Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications // *Applied Thermal Engng.* 2017. Vol. 115. P. 1372–1397.
4. **Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.** Режимы двухфазного течения в микро- и миниканалах (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22, № 3. С. 275–297.
5. **Thome J.R.** Boiling in microchannels: a review of experiment and theory // *Intern. J. Heat and Fluid Flow.* 2004. Vol. 25, No. 2. P. 128–139.
6. **Tibirićá C.B., Ribatski G.** Flow patterns and bubble departure fundamental characteristics during flow boiling in microscale channels // *Experiment. Thermal and Fluid Sci.* 2014. Vol. 59. P. 152–165.
7. **Bigham S., Moghaddam S.** Microscale study of mechanisms of heat transfer during flow boiling in a microchannel // *Intern. J. Heat Mass and Transf.* 2015. Vol. 88. P. 111–121.
8. **Surtaev A., Serdyukov V., Zhou J., Pavlenko A., Tumanov V.** An experimental study of vapor bubbles dynamics at water and ethanol pool boiling at low and high heat fluxes // *Intern. J. Heat and Mass Transfer.* 2018. Vol. 126. P. 297–311.
9. **Суртаев А.С., Сердюков В.С., Малахов И.П., Тимошевский М.В., Сафаров А.С.** Вскипание недогретой воды на микронагревателе в условиях импульсного тепловыделения // *Теплофизика и аэромеханика.* 2020. Т. 27, № 5. С. 823–826.
10. **Serdyukov V., Miskiv N., Surtaev A.** The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during water spray cooling using a transparent heater // *Water.* 2021. Vol. 13, No. 2730. P. 1–16.
11. **Ronshin F., Chinnov E.** Experimental characterization of two-phase flow patterns in a slit microchannel // *Experiment. Thermal and Fluid Sci.* 2019. Vol. 103. P. 262–273.
12. **Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А., Дементьев Ю.А., Кабов О.А.** Мостиковый режим течения в микроканалах // *Докл. РАН. Физика, техн. науки.* 2021. Т. 499, № 1. С. 43–47.
13. **Jung J., Kim S.J., Kim J.** Observations of the critical heat flux process during pool boiling of FC-72 // *J. Heat Transfer.* 2014. Vol. 136, No. 4. P. 041501-1–041501-12.

*Статья поступила в редакцию 18 июля 2022 г.,
после переработки — 11 августа 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.*