

УДК 536.24

Рост пузыря в капле летучей жидкости: динамика межфазной границы*

Ю.А. Пещенюк^{1,2}, А.А. Семенов^{1,2}, Г.Е. Айвазян³, М.С. Лебедев⁴,
Е.Я. Гатапова^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

³Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

⁴Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
Новосибирск

E-mail: gatapova@itp.nsc.ru

Исследован процесс роста пузыря внутри интенсивно испаряющейся капли жидкости на нагреваемой структурированной поверхности из черного кремния. В экспериментах использовались летучие жидкости FC-72, HFE 7100, этанол и вода. Отработана методика исследования растущего пузыря внутри капли с помощью шпирен-системы. Измерены скорости контактной линии при испарении микрокапель, в том числе для капель с растущим внутри пузырем. Представлено сравнение скорости контактной линии для испаряющейся капли с пузырем и без него. Обнаружена неустойчивость контактной линии, образованная в том числе развитой структурой подложки, которая способна приводить к увеличению локальных течений в области микрорегиона, что может существенно интенсифицировать теплообмен.

Ключевые слова: микрокапля, испарение, скорость контактной линии, рост пузыря.

Испаряющиеся капли жидкости наблюдаются во многих промышленных процессах, таких как аэрозольное распыление [1], струйная печать [2], спрейное охлаждение [3–5] и др. Когда одиночная капля микролитрового объема садится на нагретую поверхность, т. е. капля контактирует с нагретой поверхностью с очень малым числом Вебера, ее контур напоминает сечение сферы: точная форма может варьироваться от части сферы до очень тонкого слоя в зависимости от свойств смачиваемости поверхности [6, 7]. Если температура поверхности выше точки кипения жидкости, начинается пузырьковое кипение с образованием пузырьков пара в поверхностных щелях с последующим отрывом и подъемом. Как только температура поверхности поднимается выше точки Лейденфроста, капли переходят в состояние пленочного кипения и парят над твердой поверхностью,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00722).

опираясь на пленку собственного пара [8–10]. Таким образом, основные режимы теплообмена при увеличении температуры поверхности такие же, что и для слоев жидкости.

Исследования процесса кипения в каплях жидкости в основном проводились для случая, когда капля падает с определенной высоты с определенной скоростью на горячую поверхность [8–13]. За последние 10 лет появилось также очень много работ, посвященных исследованию испарения капель на различных поверхностях [6, 14, 15], когда капля садится на нагретую поверхность. В качестве основных методов для изучения процесса испарения используются обычная визуализация и теневой метод, которые позволяют запечатлеть изображения сбоку [6]. Для получения количественной информации сверху или снизу обычно применяются методы эллипсометрии [16], интерферометрии [17] и другие. Однако работ, посвященных переходному режиму от чистого испарения к кипению сидящей на подложке капли жидкости, известно не так много. Этот температурный режим может быть наиболее интересен с точки зрения применения в системах охлаждения микроэлектронного оборудования, где максимальный предел температуры р-п перехода составляет $\sim 120^\circ\text{C}$ или ниже.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования динамики капли жидкости и образующегося внутри пузыря, когда начальная температура микроструктурированной подложки ниже или равна температуре кипения жидкости.

Экспериментальная установка представляет собой бокс, в котором размещаются рабочий участок и адаптированная шпирен-система. Рабочий участок состоит из алюминиевой пластины размером $50 \times 70 \times 15$ мм, на нижней стороне которой расположен элемент Пельтье размером 40×40 мм, подключенный к источнику питания GW GPR-3060D. На верхней стороне алюминиевой пластины закреплялась исследуемая подложка. Температура под подложкой измерялась шестью радиально вмонтированными в пластину термопарами К-типа с помощью измерительной системы National Instruments NI TB-9214 и программного обеспечения LabView SignalExpress. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

В качестве подложки использовалась пластина из чёрного кремния (b-Si) толщиной 150 мкм, которая закреплялась с помощью термопасты на алюминиевой пластине. Чёрный кремний, или «кремниевая трава», имеет игольчатую микротекстуру (см. изображение сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) на рис. 2). Этот тип пористого кремния обеспечивает низкий коэффициент отражения и высокое поглощение видимого света и инфракрасного излучения. Данная характеристика крайне важна для получения количественных данных с помощью оптических методик, основанных на отражении света. Подробная информация о параметрах для изготовления конкретно взятого b-Si и описание оборудования приводились в работах [18, 19]. Измеренные значения среднеквадратичной амплитуды (RMS) составляют 0,2 мкм [19].

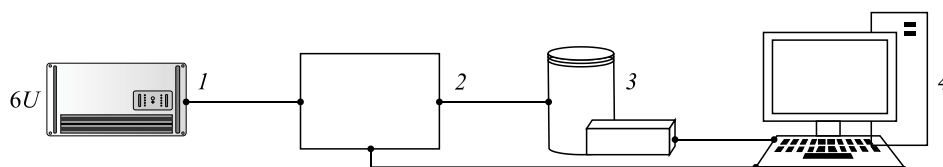


Рис. 1. Схема установки.

1 — источник питания, 2 — рабочий участок,
3 — система из термопар и считывающего устройства, 4 — компьютер.

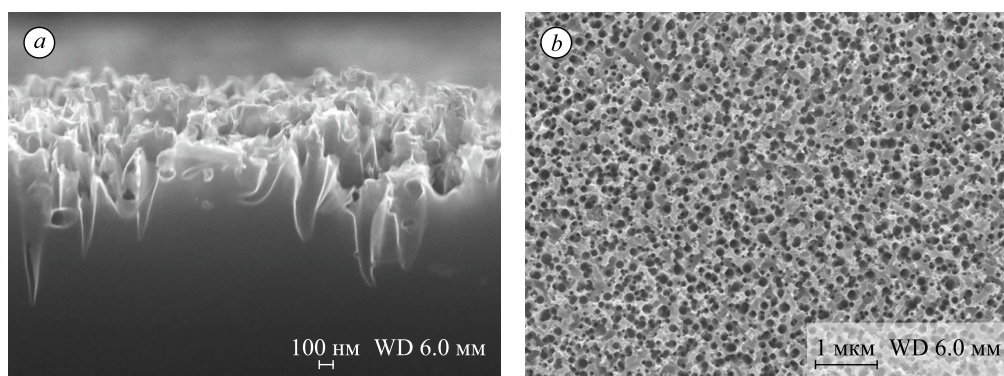


Рис. 2. СЭМ-изображения слоя b-Si.

a — поперечное сечение, b — вид сверху.

Оптическая схема шлирен-системы представлена на рис. 3. Сферически распространяемый поток света от источника Olympus KL 300 LED (1), проходя прямоугольный ступенчатый фильтр с семью градациями пропускания света (2), попадает на коллимирующую линзу (3). После этого плоскопараллельный поток света попадает на делитель потока света (4), установленный под углом 45° к световой оси. Часть света проходит делитель и достигает поверхности исследуемой подложки (5), на которой располагается капля жидкости. Другая часть отклоняется на 90° и попадает на светопоглощающий материал на стенках бокса. Отраженный от исследуемой поверхности поток света возвращается обратно на делитель (4), где часть потока отклоняется на 90° и затем проходит через шлирен-линзу (6). Линза фокусирует свет на щелевой шлирен-фильтре (7) — плоскую пластину со щелью заданного размера — в соответствии с размером одной полосы пропускания света на ступенчатом фильтре. Прошедший через фильтр свет благодаря оптическому объективу фокусируется на сенсор матрицы в камере (8).

Капля жидкости помещалась на подложку из черного кремния с помощью механического шприца с калибруемым объемом. Начальный объем капель составлял 2–4 мкл. Видеосъемка процесса испарения капли с подложки выполнялась с частотой 50 кадров в секунду. Влажность воздуха в помещении составляла 25–30 %, температура — 20–22 °C. Исследования велись с использованием четырех рабочих жидкостей: FC-72, HFE 7100, этилового спирта 95 % и чистой дистиллированной деионизированной микрофильтрованной воды Milli-Q. Выбор жидкостей обуславливался их различными теплофизическими свойствами, представленными в таблице.

FC-72 и HFE 7100 являются летучими жидкостями с низкой теплотой фазового перехода (r) и температурой кипения ($T_{\text{кип}}$). Для них характерно

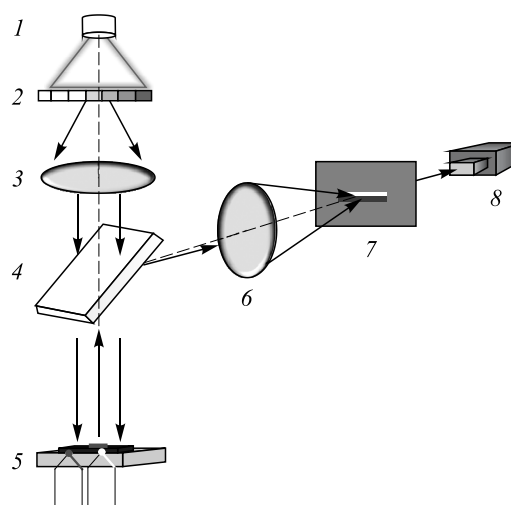


Рис. 3. Схема шлирен-системы для визуализации.

1 — источник света, 2 — ступенчатый фильтр и матовая пластинка, 3 — коллимирующая линза, 4 — лучевой делитель, 5 — рабочий участок, состоящий из подложки и нагревателя, 6 — шлирен-линза, 7 — шлирен-фильтр, 8 — камера с объективом.

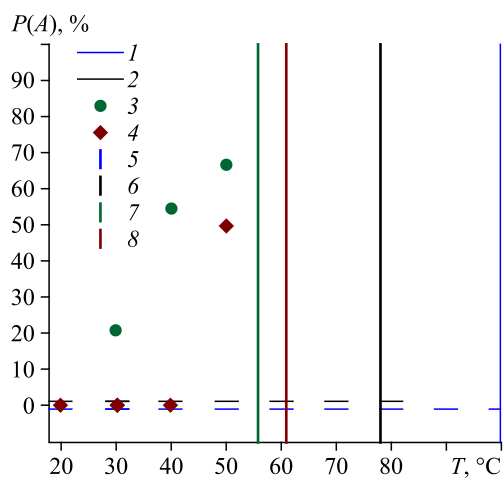
Таблица

Физические свойства исследуемых жидкостей

Рабочая жидкость \ Параметр	$\rho(20\text{ }^{\circ}\text{C})$, кг/м ³	$\sigma(20\text{ }^{\circ}\text{C})$, мН/м	$\sigma(30\text{ }^{\circ}\text{C})$, мН/м	$\sigma(40\text{ }^{\circ}\text{C})$, мН/м	σ (50 °C), мН/м	$T_{\text{кип}}$, °C	$r(20\text{ }^{\circ}\text{C})$, кДж/кг
FC-72	1680	10,25	9,74	9,23	8,71	56	87
HFE 7100	1510	13,6	12,76	11,92	11,08	61	112
Этанол	789	22,78	21,9	21	20,1	78,37	935
Вода	997	72,88	71,20	69,48	67,77	100	2250

возникновение крупных пузырей в капле жидкости при температуре подложки, близкой к температуре кипения. Вероятность появления пузыря рассчитывалась из экспериментальной статистики как $P(A) = (m/n) \cdot 100\%$, где m — количество серий с возникновением пузыря, n — количество всех серий. В воде и этиловом спирте большие пузыри не регистрировались вплоть до достижения температуры кипения на подложке. Для жидкостей HFE 7100 и FC-72 при приближении температуры подложки к температуре кипения жидкости одиночные пузыри возникали с 50–70 %-ой вероятностью (см. рис. 4). Для FC-72 оказалось характерным возникновение пузырей для температур гораздо меньших, чем температура кипения.

Рост во времени отдельного пузыря завершался по двум сценариям: пузырь либо лопался в какой-то момент времени, либо сначала вытеснял всю жидкость, а затем лопался. На рис. 5 показаны кадры эволюции роста (рис. 5a) и разрыва (рис. 5b) пузыря. На рис. 6 представлены графики изменения диаметра пузыря $d_{\text{пуз}}$ (светлые символы) и диаметра капли $d_{\text{жид}}$ (темные символы) для FC-72 при различных температурах подложки (рис. 6a) и для HFE 7100 при $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для трех различных серий экспериментов (рис. 6b). Видно, что со временем площадь основания пузырька увеличивается. Причем в конце процесса она растет быстрее и в случаях, когда происходит вытеснение жидкости, занимает перед разрывом всю площадь основания капли. При разрыве пузыря график уменьшения диаметра капли для случая неполного вытеснения жидкости претерпевает характерный скачок. После разрыва пузыря оставшийся слой жидкости испаряется по двум возможным сценариям: происходит его распад на фрагментированные части с последующим испарением каждой сепарированной части или имеет место разрыв с появлением коронообразного всплеска и с дальнейшим заполнением жидкостью образовавшегося пространства (см. рис. 5b). На первом кадре рис. 5b стрелка показывает характерный размер ширины жидкого слоя вокруг пузыря. Далее видна область всплеска и образованного кольцеобразного вала жидкости, который в дальнейшем заполняет область пузыря. В рассматриваемом случае после разрыва пузыря дальнейшее испарение оставшейся капли жидкости происходит так же, как и для капель без пузыря.



терный размер ширины жидкого слоя вокруг пузыря. Далее видна область всплеска и образованного кольцеобразного вала жидкости, который в дальнейшем заполняет область пузыря. В рассматриваемом случае после разрыва пузыря дальнейшее испарение оставшейся капли жидкости происходит так же, как и для капель без пузыря.

Рис. 4. Вероятность возникновения пузыря для воды, этанола, FC-72 и HFE 7100.

Вещество: вода (1), этанол (2), FC-72 (3), HFE 7100 (4);
 $T_{\text{кип}}$ для воды (5), этанола (6), FC-72 (7), HFE 7100 (8).

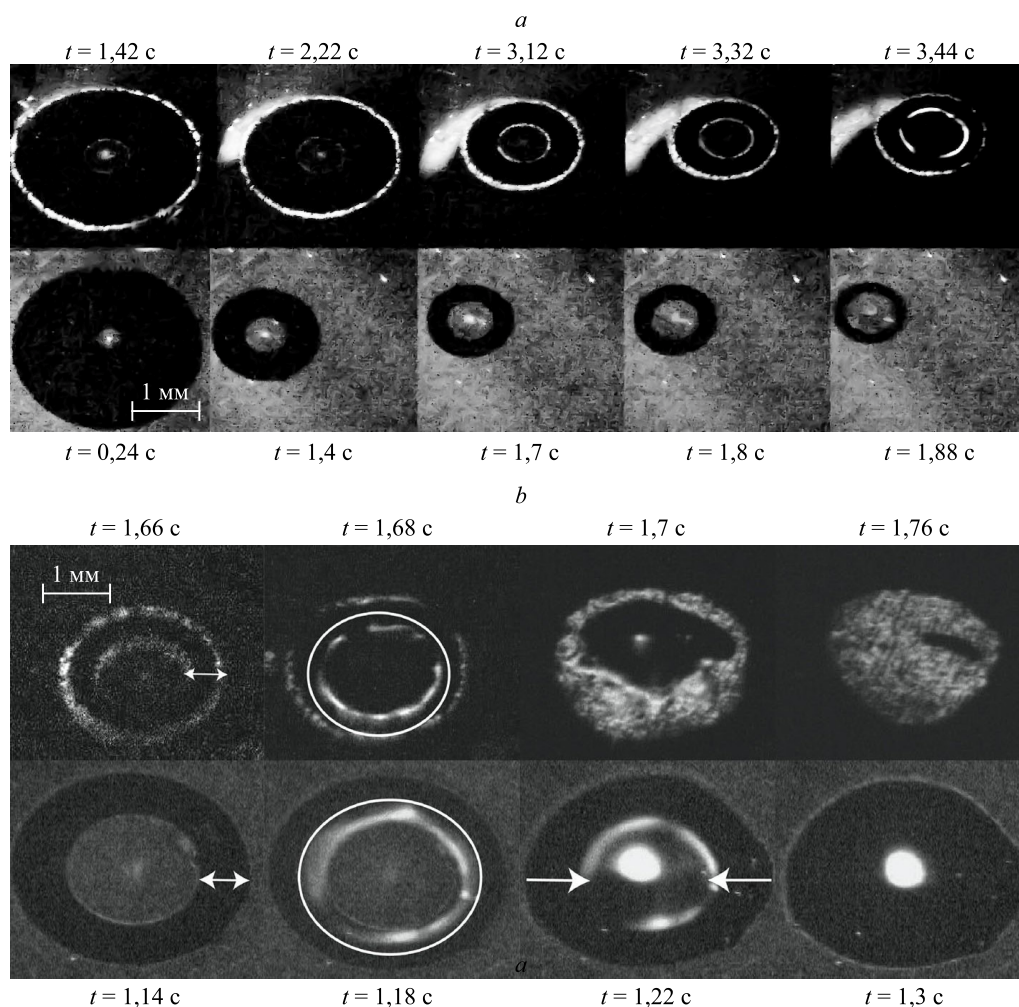


Рис. 5. Этапы роста (а) и разрыва (б) пузыря с коронообразным всплеском для FC-72 (верхний ряд) и HFE 7100 (нижний ряд) при $T = 50$ °C.

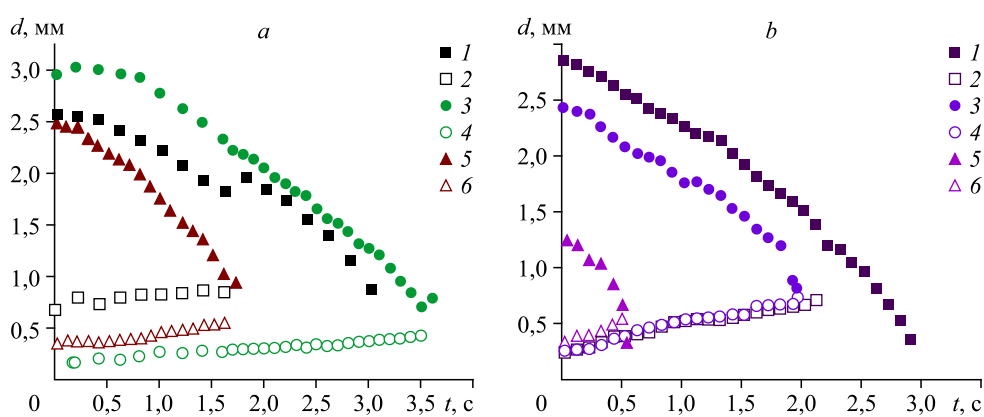


Рис. 6. Рост пузыря (светлые символы) и уменьшение диаметра капли (темные символы) для FC-72 при различных температурах подложки (а) и для HFE 7100 при $T = 50$ °C для трех серий экспериментов (б).

а: изменения $d_{\text{жид}}$ (мм) при $T = 30$ (1), 40 (3) и 50 (5) °C, $d_{\text{пуз}}$ (мм) при $T = 30$ (2), 40 (4) и 50 (6) °C, б: изменения $d_{\text{жид}}$ (мм) в экспериментах 1 (1), 2 (3) и 3 (5) и $d_{\text{пуз}}$ (мм) в экспериментах 1 (2), 2 (4), 3 (6).

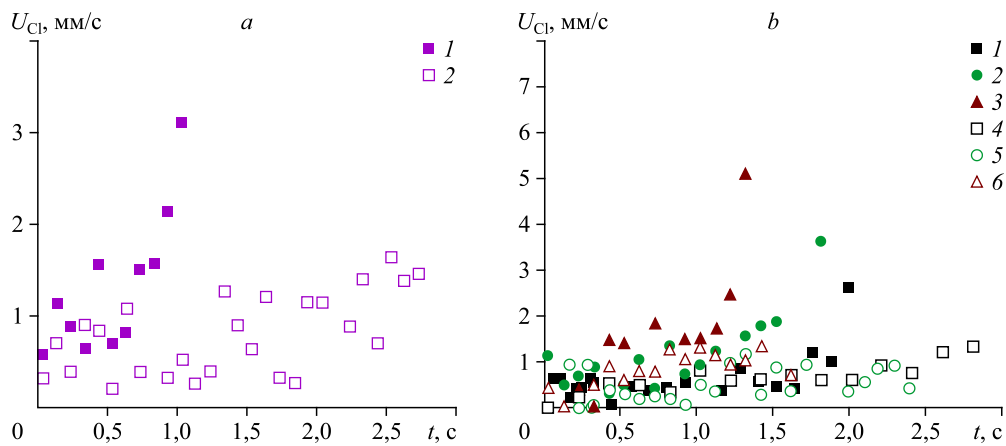


Рис. 7. Сравнение скорости движения контактной линии испаряющейся капли жидкости HFE 7100 с пузырьком (светлые символы) и без пузыря (темные символы) (а) и сравнение скорости движения контактной линии испаряющейся капли жидкости FC-72 с пузырьком (светлые символы) и без пузыря (темные символы) (b).

а: $T_{liq} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1), $T_{liq+bub} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2);
 б: $T_{liq} = 30$ (1), 40 (2), 50 (3) $^{\circ}\text{C}$, $T_{liq+bub} = 30$ (4), 40 (5), 50 (6) $^{\circ}\text{C}$.

В работе также проводилось сравнение скорости движения контактной линии капли жидкости для случаев, когда образуется пузырь внутри капли и когда пузырь отсутствует (рис. 7). Скорость движения контактной линии рассчитывалась по формуле

$$U_{CL} = \Delta d / \Delta t,$$

где Δd — изменение диаметра капли (диаметр рассчитывался как осредненный по всему периметру капли), Δt — изменение времени, соответствующего изменению диаметра. Погрешность определения скорости контактной линии составляет 5–7 % и зависит от разрешающей способности оптической системы. Расчетная погрешность составляет не более 3 %. Следует отметить значительное отличие скоростей для одинаковых температур подложки. На рис. 7 видно, что для капель без пузыря скорость контактной линии может быть в два раза выше, чем для капли с растущим внутри пузырьком. Поэтому можно сделать вывод о том, что большая часть тепловой энергии расходуется на рост и разрыв пузыря. Подобное поведение характерно для двух рассмотренных в экспериментах легкокипящих жидкостей: HFE 7100 и FC-72. В случае FC-72 результат характерен для всех температур, при которых возникал пузырь. На рис. 8 приведены графики скорости

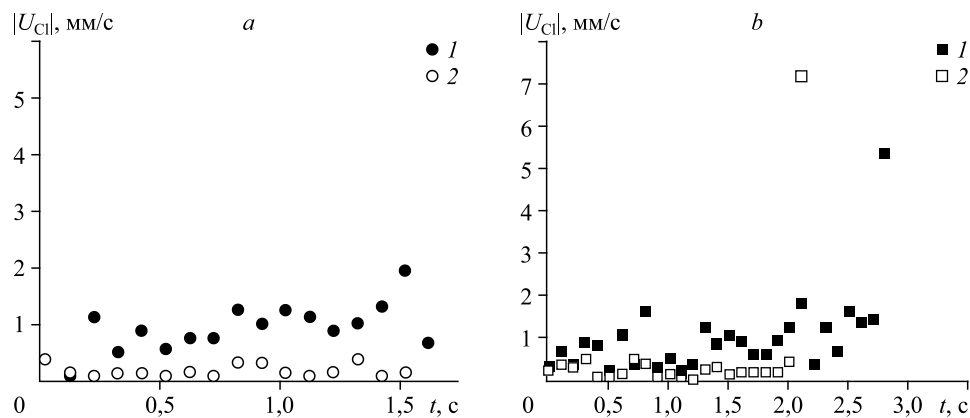


Рис. 8. Скорость движения контактной линии капли и пузыря внутри нее для FC-72, $T_w = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и для HFE 7100, $T_w = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b).

1 — $|U_{liq}|$, 2 — $|U_{bub}|$.

движения контактной линии капли и пузыря внутри этой капли. Видно, что скорость движения контактной линии капли жидкости практически в два раза выше, чем скорость роста пузыря внутри этой капли, несмотря на то, что они имеют одинаковый порядок величин.

Кроме описанного выше, в работе было выполнено сравнение скоростей движения контактных линий для каждой из исследуемых жидкостей при различных температурах подложки. Для корректного сравнения на графиках представлены данные только для капель без визуализируемых пузырей (рис. 9). С увеличением температуры нагреваемой подложки скорость движения контактной линии увеличивалась. Для сравнения были выбраны капли жидкости с начальными диаметрами, лежащими в диапазоне 1,5–1,8 мм.

При использовании шлирен-визуализации для измерения скорости движения контактной линии при малых углах было замечено четкое отображение разрывов и движения периферии капли и так называемых «пальцеобразных структур» (fingering pattern) (см. рис. 10). На рис. 10а явно выражены вышеперечисленные эффекты, они выделены белыми овалами. На этом же рисунке представлены увеличенные изображения пальцеобразных структур выделенных областей. Данная неустойчивость может быть обусловлена несколькими причинами, в том числе развитой микроструктурой черного кремния (рис. 2). Кадры на рисунке получены при экспозиции камеры 190. На рис. 10b относительно хорошо визуализируются структуры и процессы, происходящие внутри капли.

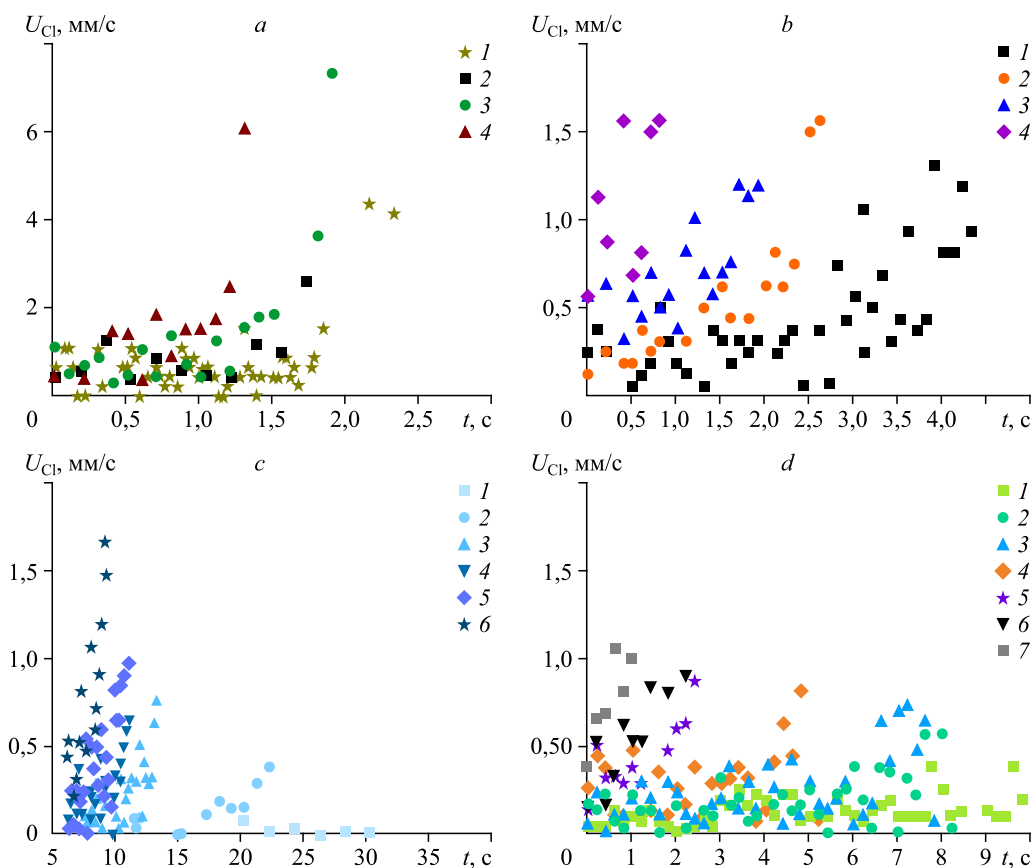


Рис. 9. Скорость движения контактной линии для FC-72 (a), HFE 7100 (b), воды (c) и этанола (d).

a, b: $T = 20$ (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) °C; c: $T = 20$ (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4), 60 (5), 70 (6) °C; d: 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4), 60 (5), 70 (6), 80 (7) °C.

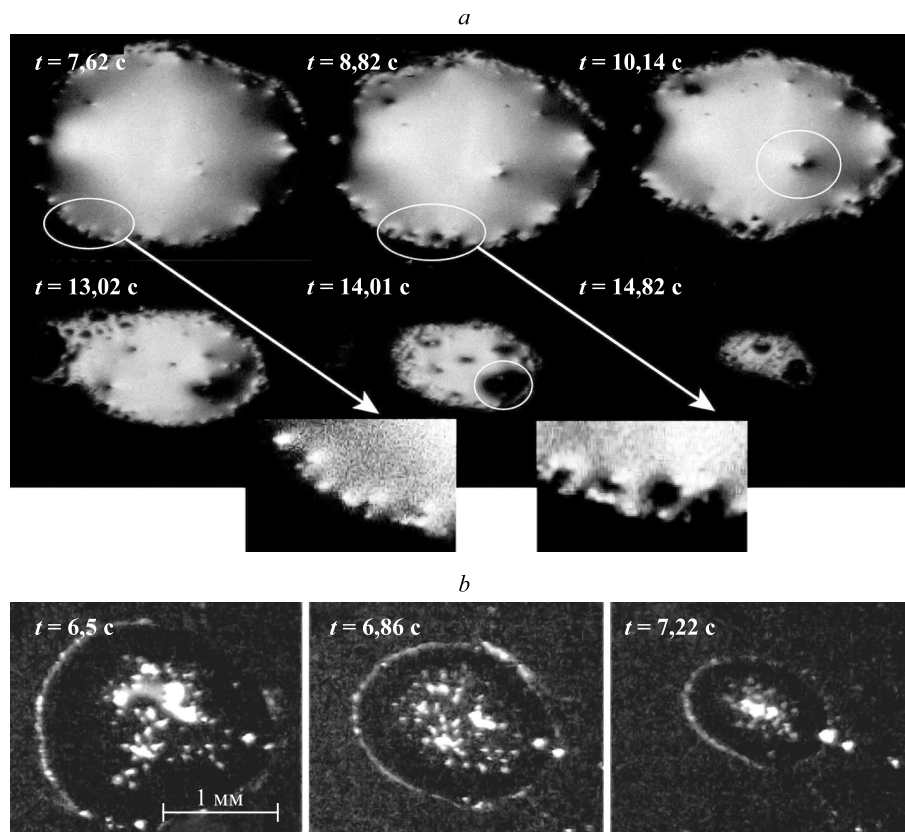


Рис. 10. Поэтапный процесс испарения капли воды для температур подложки $T = 20$ (a) и 100 (b) °C.

Кадры получены при экспозиции камеры 75. Для более детального изучения эволюции образующихся структур в быстроиспаряющихся каплях жидкости (для капель воды при температуре подложки выше 70 °C) необходимо в дальнейшем использовать высокоскоростную съемку с частотой более 500 кадров в секунду. Возникновение пальцеобразной структуры вблизи линии контакта может вызывать увеличение локальных течений в области микрорегиона и приводить к интенсификации теплообмена из-за увеличения протяженности линии контакта трех фаз. Следует указать, что шлирен-метод позволяет получать количественные характеристики данных структур, что важно для изучения взаимодействия жидкости с микроструктурированной твердой поверхностью.

Отметим, что одна из главных целей представленной работы заключалась в изучении роста пузыря в капле жидкости для температур подложки, близких к температуре кипения жидкости. Авторами показано, что скорость движения контактной линии капли без пузыря выше, чем капли с пузырем при одной и той же температуре подложки. Это объясняется тем, что происходит также испарение в пузырь, приводящее к росту и последующему разрыву пузыря. Визуализация с помощью шлирен-метода детально показывает наличие пальцеобразной структуры вблизи линии контакта трех фаз. Возникновение такой неустойчивости линии контакта, образованной в том числе развитой микроструктурой подложки из черного кремния, может приводить к увеличению локальных течений в области микрорегиона, а также к существенной интенсификации теплообмена.

Список литературы

1. Perednis D., Gauckler L.J. Thin film deposition using spray pyrolysis // J. Electroceramics. 2005. Vol. 14, No. 2. P. 103–111.
2. Le H.P. Progress and trends in ink-jet printing technology // J. Imaging Sci. and Technology. 1998. Vol. 42, No. 1. P. 49–62.
3. Mudawar I., Estes K.A. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface // J. of Heat Transfer. 1996. Vol. 118, No. 3. P. 672–679.
4. Khandekar S., Muralidhar K., Sahu G., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: challenges and prospects // Applied Thermal Engng. 2021. Vol. 184. P. 115640–115640-22.
5. Серов А.Ф., Назаров А.Д., Мамонов Н.Б., Миськив Н.Б., Карпов П.Н. Импактная система охлаждения большой поверхности многоструйным импульсным воздушно-капельным потоком // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 5. С. 731–738.
6. Gatapova E.Y., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engng Aspects. 2014. Vol. 441. P. 776–785.
7. Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В., Лавриков А.В. Исследование смачивания поверхности с комбинированной структурой // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 6. С. 893–899.
8. Chandra S., Avedisian C.T. On the collision of a droplet with a solid surface // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sci. 1991. Vol. 432, No. 1884. P. 13–41.
9. Visser C.W., Frommhold P., Wildeman S., Mettin R., Lohse D., Sun C. Dynamics of high-speed micro-drop impact: numerical simulations and experiments at frame-to-frame times below 100 ns // Soft Matter. 2015. Vol. 11, No. 9. P. 1708–1722.
10. Breitenbach J., Roisman I.V., Tropea C. From drop impact physics to spray cooling models: a critical review // Experiments in Fluids. 2018. Vol. 59, No. 3. P. 1–21.
11. Bernardin J.D., Stebbins C.J., Mudawar I. Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40, No. 2. P. 247–267.
12. Mehdizadeh N.Z., Chandra S. Boiling during high-velocity impact of water droplets on a hot stainless steel surface // Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engng Sci. 2006. Vol. 462, No. 2074. P. 3115–3131.
13. Gatapova E.Y., Gatapova K.B. Bubble dynamics in thin liquid films and breakup at drop impact // Soft Matter. 2020. Vol. 16, No. 46, P. 10397–10404.
14. Kelly-Zion P.L., Batra J., Pursell C.J. Correlation for the convective and diffusive evaporation of a sessile drop // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 278–285.
15. Brutin D., Starov V. Recent advances in droplet wetting and evaporation // Chemical Society Reviews. 2018. Vol. 47, No. 2. P. 558–585.
16. Cazabat A.M., Guena G. Evaporation of macroscopic sessile droplets // Soft Matter. 2010. Vol. 6, No. 12. P. 2591–2612.
17. Gatapova E.Y., Shonina A.M., Safonov A.I., Kabov O.A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation // Soft Matter. 2018. Vol. 14, No. 10. P. 1811–1821.
18. Ayvazyan G.Y., Katkov M.V., Lebedev M.S., Shayapov V.R., Afonin M.Yu., Petukhova D.E., Yushina I.V., Maksimovskii E.A., Aghabekyan A.V. Anti-reflection properties of black silicon coated with thin films of metal oxides by atomic layer deposition // J. of Contemporary Physics. Armenian Academy of Sci. 2021. Vol. 56, No. 3. P. 240–246.
19. Katkov M.V., Ayvazyan G.Y., Shayapov V.R., Lebedev M.S. Modeling of the optical properties of black silicon passivated by thin films of metal oxides // J. of Contemporary Physics. Armenian Academy of Sci. 2020. Vol. 55, No. 1. P. 16–22.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2021 г.,
после доработки — 19 октября 2021 г.,
принята к публикации 14 декабря 2021 г.,
после дополнительной доработки — 22 августа 2022 г.*