Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 1, с. 23 – 29 © 2026 г. 10 января

Корреляционная зависимость термокапиллярного разрыва горизонтальных пленок жидкости

Д. Ю. Кочкин[1)], *О. А. Кабов*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 4 октября 2025 г.
После переработки 7 ноября 2025 г.
Принята к публикации 12 ноября 2025 г.

В работе исследуется термокапиллярный разрыв жидких пленок, вызванный конвекцией Марангони, возникающей из-за термически индуцированных градиентов поверхностного натяжения вдоль границы раздела жидкость-газ. Показано, что из-за конкуренции термокапиллярных сил и гравитации с увеличением толщины пленки возрастает критическая разность температур на свободной границе, необходимая для ее разрыва. При анализе учтены также эффекты испарения и перераспределения жидкости в процессе нагрева. На основе собственных и литературных данных впервые получена корреляция, описывающая порог разрыва в координатах критического числа Марангони и безразмерной толщины пленки. Предложенная корреляция позволяет прогнозировать условия разрыва пленки в широком диапазоне физических параметров, что важно для предотвращения кризисных явлений в технологиях пленочного охлаждения.

DOI: 10.7868/S3034576626010038

Введение. Проблема отвода высоких тепловых потоков ограничивает развитие целого ряда технических решений в энергетике, транспорте, микроэлектронике и т.д. Одним из перспективных методов охлаждения являются технологии, использующие процессы с фазовым превращением, например, испарение тонкого слоя, приводимого в движение потоком газа [1]. В таких системах теплоотвод от источника тепловыделения существенным образом зависит от условий в тонком слое жидкости, где могут возникать кризисные явления, связанные с разрывами пленки, которые вызваны термокапиллярным эффектом (конвекция Марангони), возникающим из-за термически индуцированных градиентов поверхностного натяжения вдоль границы раздела жидкость-газ. Роль термокапиллярного эффекта многократно возрастает при локальном нагреве пленок жидкости. В свою очередь, теплоотвод именно от локального источника тепла становится в настоящее время одной из наиболее востребованных и сложнейших задач в теплофизике, поскольку прямым образом связан с проблемой охлаждения микроэлектронного оборудования. Помимо задач теплового менеджмента, исследование термокапиллярного разрыва жидких пленок актуально для разработки различных приложений микрофлюидики [2], таких как оптофлюидные диафрагмы [3], варифокальные жидкостные линзы [4], системы транспортировки и сборки микрочастиц [5]. Кроме того, термокапиллярный эффект может проявляться и в расплавах, образующихся при взаимодействии лазерного излучения с веществом [6–8].

Начало систематическому изучению конвективной неустойчивости положили эксперименты Бенара [9], наблюдавшего регулярную пространственно-периодическую конвекцию (ячейки Бенара) в подогреваемом снизу слое жидкости со свободной поверхностью. Позже Рэлей [10] теоретически исследовал устойчивость слоя с двумя свободными границами и объяснил возникновение конвективного движения влиянием архимедовых подъемных сил. Однако затем в работах [11, 12] было показано, что в тонких слоях важную роль играет термокапиллярный механизм, обусловленный зависимостью поверхностного натяжения от температуры. Нилд [13] проанализировал устойчивость с учетом обоих механизмов. Гершуни и Жуховицкий [14] заключили, что в тонких слоях ($h \ll h_{\text{cr}}$) неустойчивость определяется термокапиллярным механизмом, в толстых ($h \gg h_{\text{cr}}$) – архимедовыми силами, в промежуточной области – оба механизма конкурируют. Для многих жидкостей критическая толщина h_{cr} составляет несколько миллиметров. Тем не менее, даже в толстых слоях со свободной поверхностью термокапиллярный механизм оказывает существенное влияние на движение жидкости [15]. В работе [16] было впервые показано,

[1)]e-mail: kochkin1995@mail.ru

что свободная поверхность может деформироваться под действием термокапиллярного эффекта, вызванного локальным охлаждением слоя жидкости. В результате формируется жидкий холмик, для которого было получено приближенное решение уравнения, описывающего стационарный профиль термокапиллярной деформации. В [17] экспериментально исследованы термокапиллярные деформации в локально нагреваемых слоях этилового спирта толщиной 0.1–1.5 мм, а также разработана теоретическая модель в рамках теории пограничного слоя, хорошо согласующаяся с экспериментом в некотором диапазоне параметров. В работе [18] развита теория стационарных термокапиллярных деформаций тонких слоев жидкости, неравномерно нагреваемых со стороны подложки. Форма свободной поверхности описывается уравнением, учитывающим баланс термокапиллярных сил, силы тяжести и капиллярных сил при заданном распределении температуры вдоль подложки. Эксперименты [19] со слоями силиконовых масел показали, что термокапиллярная деформация хорошо предсказывается моделью [18] без учета капиллярного давления, которое тем не менее может оказывать сглаживающий эффект, когда кривизна поверхности становится достаточно большой. В работе [20] рассмотрено осесимметричное стационарное термокапиллярное течение в тонком локально нагреваемом горизонтальном слое с учетом конвективного переноса тепла в жидкости. Расчеты [20] показали, что учет конвективного переноса тепла в жидкости слабо влияет на термокапиллярные деформации поверхности жидкости, а распределение температуры во всей жидкости можно считать таким же, как и на подложке. При импульсном локальном нагреве термокапиллярные деформации сопровождаются жидкими валами на границе термокапиллярного углубления, которые объясняются вытеснением жидкости из области нагрева и исчезают в стационарных условиях [21].

Температурные градиенты могут приводить не только к деформациям пленки, но и к ее разрыву, что демонстрируется появлением сухих пятен в экспериментах или вычислением отрицательных значений толщины пленки в теоретических расчетах. Важным аспектом термокапиллярного разрыва является то, что непосредственно перед разрывом из-за вязкого трения на поверхности нагревателя формируется тонкая остаточная пленка [22–24] (для воды толщиной порядка 10 мкм [24]). Стоит отметить, что при достижении пленкой во время разрыва толщины менее 1 мкм необходимо учитывать силы Лондона–Ван-дер-Ваальса, которые могут влиять на стабильность слоя, способствуя или препятствуя образованию сухих пятен на микроскопическом уровне.

Стоит отметить, что деформации свободной поверхности жидкости, вызванные термокапиллярным эффектом, могут встречаться не только в горизонтальных неподвижных пленках жидкости, но и в толстых слоях жидкости с погруженным источником тепла [25], а также в движущихся пленках. К примеру, под действием термокапиллярного эффекта в тонкой движущейся под действием гравитации пленке жидкости при ее локальном нагреве со стороны подложки формируются пространственные самоорганизующиеся подковообразные регулярные структуры [26], эволюция которых под действием нагрева приводит к разрыву пленки и появлению сухих пятен. В [27] данные по разрыву пленки для различных рабочих жидкостей и углов наклона подложки к горизонту были обобщены корреляционной зависимостью. Несмотря на то, что неподвижный слой жидкости является более простой конфигурацией по сравнению со стекающей пленкой, для него до сих пор нет корреляций, предсказывающих термокапиллярный разрыв, что отчасти связано с большим количеством параметров системы жидкая пленка–подложка. Целью данной работы является получение такой корреляции.

Методы исследования. Эксперименты проводились с открытым в атмосферу горизонтальным слоем жидкости на локально нагреваемой подложке. В качестве рабочей жидкости использовалась сверхчистая вода Milli-Q. Исследование проводилось на двух взаимодополняющих экспериментальных стендах, основное отличие которых заключалось в различном подводе тепла к подложке, на которой находился горизонтальный слой рабочей жидкости, а также в размере области нагрева. Общая концепция экспериментальных стендов без уточнения способа нагрева представлена на рис. 1a. Центральным элементом каждого стенда является рабочий участок, на подложке которого формируется горизонтальная пленка жидкости, которая нагревается в центре и охлаждается по периферии. На одном из стендов реализован кондуктивный подвод тепла к подложке, в то время как на другом – подвод тепла к нижней стороне подложки осуществляется при помощи лазера.

Рабочий участок первого стенда (рис. 1b) состоит из текстолитового основания, в центр которого впрессован медный цилиндрический стержень диаметром 12 мм, к которому снизу прикреплен электронагреватель. По периметру основания расположен медный охлаждающий контур, соединенный с термостатом, по которому циркулирует вода заданной

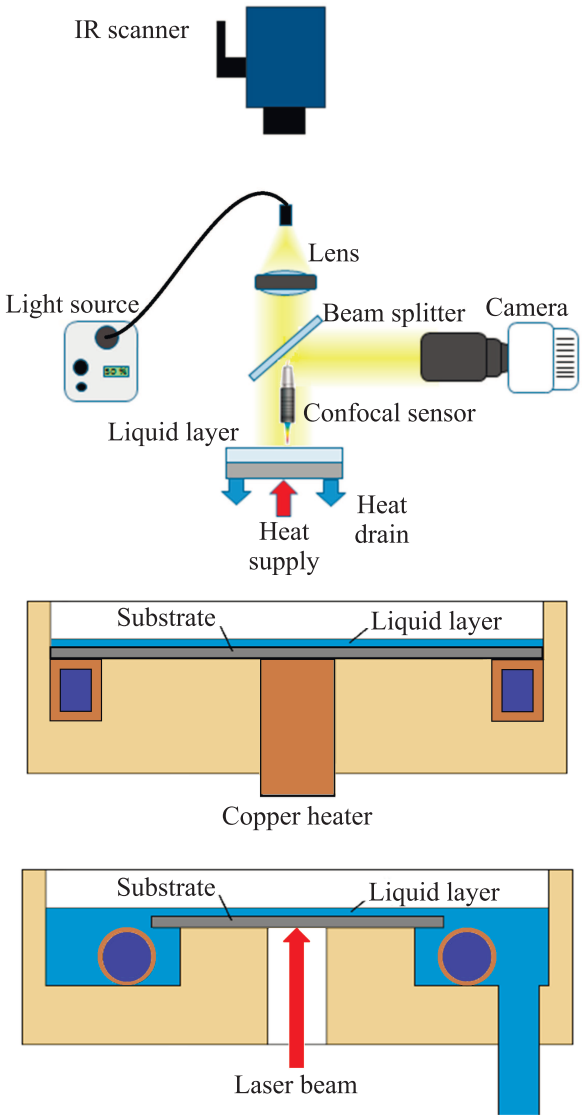

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Общая схема эксперимента; (b) – рабочий участок с кондуктивным подводом тепла; (c) – рабочий участок с лазерным нагревом

температуры (23 °C). На рабочий участок устанавливалась подложка – полированный диск из нержавеющей стали диаметром 51 мм и толщиной 1 мм. Подробное описание экспериментального стенда представлено в [28].

Температура поверхности медного стержня автоматически повышалась примерно на 0.025 °C каждую секунду и измерялась с помощью термопары с точностью 0.1 °C. Температура воды в охлаждающем контуре, поддерживающем постоянную температуру по периметру подложки, составляла 23 °C. Поскольку в экспериментах использовались очень тонкие пленки, распределение температур на свободной поверхности слоя жидкости принималось таким же, как и на поверхности подложки [20]. В свою очередь, температура поверхности в центре подложки оценивалась не более, чем на 0.3 °C ниже температуры поверхности медного нагревателя, что позволяло пренебрегать изменением температуры и по толщине подложки [28]. Начальная средняя толщина пленки задавалась объемом рабочей жидкости в кювете и варьировалась от 300 до 1100 мкм. В зависимости от положения свободной поверхности жидкости относительно кольцевой канавки, находящейся на боковой стенке кюветы и служащей для закрепления (пиннинга) контактной линии, профиль пленки мог быть выпуклым или вогнутым. В диапазоне исследуемых толщин слоя жидкости средняя толщина пленки в кювете отличалась не более, чем на 7 % от толщины пленки в центре кюветы [28], что свидетельствует о достаточной однородности распределения жидкости в кювете перед экспериментом. Диаметр области подложки, смоченной жидкой пленкой, составлял 46 мм.

Во втором стенде рабочий участок представляет собой цилиндрическую кювету с кремниевой подложкой толщиной 0.5 мм и диаметром 25 мм (рис. 1c). Для поддержания постоянной температуры жидкости вокруг подложки в кювету погружается медная трубка, через которую прокачивается вода заданной температуры (24 °C). Нагрев нижней стороны подложки осуществляется с малым шагом по мощности через отверстие в кювете непрерывным лазером с диаметром луча около 3.5 мм. Температура поверхности жидкости измерялась ИК-сканером. Для компенсации испарения жидкости кювета соединена с резервуаром по принципу сообщающихся сосудов. Вертикальное перемещение резервуара позволяло регулировать толщину пленки с шагом 1 мкм. Начальная толщина пленки жидкости h_0 варьировалась от 200 до 600 мкм.

Различные условия теплового воздействия на двух стендах вызывают разное распределение температуры на свободной поверхности жидкой пленки (рис. 2b, 3). Для регистрации разрыва пленки использовалась высокоскоростная камера Photron Fastcam с оптическим шлирен-методом, который позволяет визуализировать кривизну свободной поверхности на изображении в оттенках серого. Для измерения толщины слоя жидкости использовалась бесконтактная конфокальная оптическая система Micro-Epsilon® с контроллером IFC2451 и конфокальным хроматическим датчиком IFS2405-3, установленном на системе позиционирования. Измерения проводились с точностью около 1.5 мкм и частотой 0.3 кГц как в фиксированной точке, так и вдоль под-

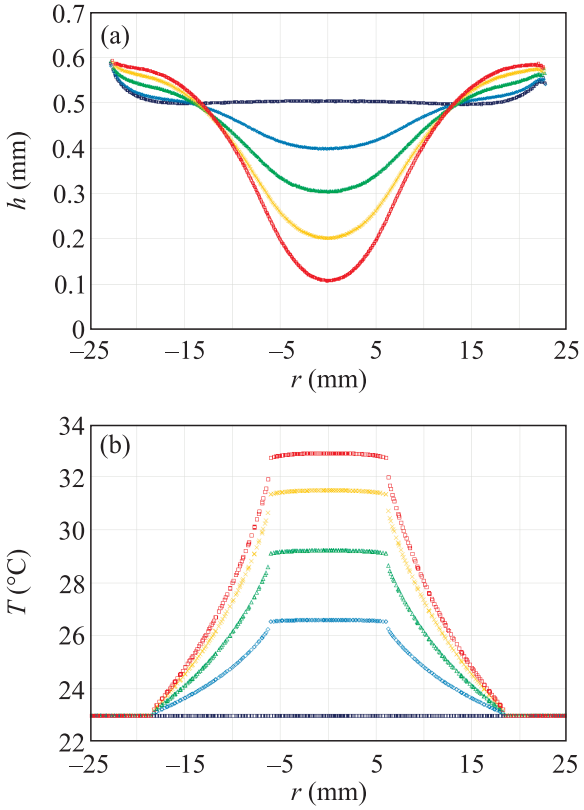

Рис. 2. (Цветной онлайн) Эволюция профиля свободной поверхности пленки воды (a) и соответствующего температурного профиля (b) на подложке с кондуктивным подводом тепла

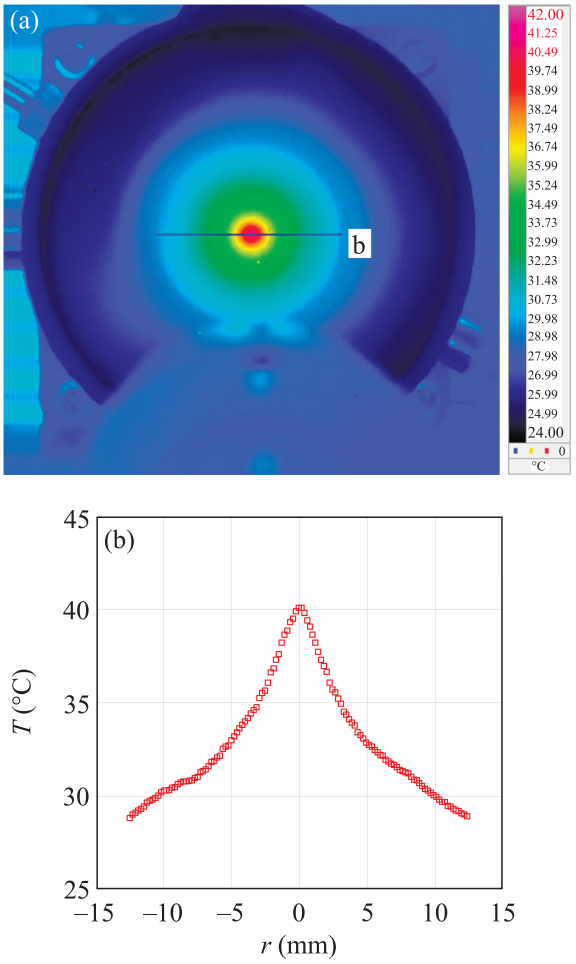

Рис. 3. (Цветной онлайн) Температурное поле (a) и радиальный профиль температуры (b) на свободной поверхности пленки воды (h_0 = 600 мкм) на подложке с лазерным нагревом, измеренные непосредственно перед разрывом

ложки путем линейного перемещения датчика. Температура и относительная влажность атмосферного воздуха в помещении в период проведения экспериментов составляли 22–26 °C, 15–40 % соответственно.

Результаты и обсуждение. Термокапиллярный разрыв горизонтальной пленки жидкости на обоих экспериментальных стендах происходит по похожему сценарию. При локальном нагреве слоя жидкости свободная поверхность деформируется под действием эффекта Марангони, принимая минимальное значение толщины слоя жидкости в центре кюветы. При достижении критической деформации образуется тонкая остаточная пленка, в которой зарождается сухое пятно (рис. 4).

С увеличением начальной толщины горизонтального слоя жидкости возрастает разница температур между нагревателем и холодильником, необходимая для разрыва слоя. Полученный результат согласуется с теоретическими работами [18, 20]. Данный эффект объясняется тем, что основными конкурирующими силами в данной задаче являются сила Марангони (термокапиллярный эффект), стремящаяся утончить слой в более горячей области, а также гравитация, препятствующая возникновению перепада высот в слое жидкости. При этом сила Марангони характеризуется градиентом температуры на свободной поверхности пленки (максимальной разницей температур вдоль подложки между точками, расположенными в центре подложки и на ее периферии), а гидростатическое давление – толщиной слоя жидкости. Таким образом, с увеличением толщины слоя жидкости, увеличивается и гидростатическое давление, препятствующее возникновению в пленке перепада толщин, следовательно, для разрыва слоя необходим больший градиент температуры.

Следует отметить, что на экспериментальном стенде с кондуктивным подводом тепла при различной влажности атмосферного воздуха в помещении в разные дни экспериментов (15–40 %), доля испарив-

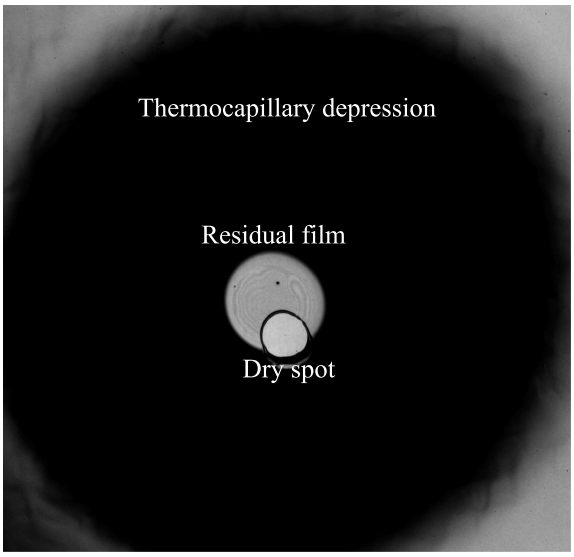

Рис. 4. Шлирен-изображение термокапиллярного разрыва пленки воды ($h_0 = 850$ мкм) на стенде с кондуктивным подводом тепла. Поле зрения 23×23 мм^2

шейся жидкости при одинаковой процедуре повторения эксперимента меняется, вследствие чего наблюдается некоторый разброс температур нагревателя (1–2 °C), при которых происходит разрыв слоя жидкости. К примеру, при относительной влажности атмосферного воздуха 21 и 37 % разрыв слоя воды начальной толщиной $h_0 = 900 \pm 5$ мкм происходит при температуре нагревателя 57.3 и 58.9 °C, соответственно. Также стоит отметить и тот факт, что в процессе развития термокапиллярных деформаций жидкость вытесняется из более теплой области над нагревателем в менее теплую, тем самым толщина слоя на периферии, а значит, и гидростатическое давление, препятствующее разрыву, увеличивается.

Для учета эффекта испарения, а также эффекта вытеснения жидкости термокапиллярными силами из центра кюветы к ее периферии, зависимость пороговой максимальной разности температур вдоль кюветы, при которой происходит разрыв пленки, строится как функция толщины слоя на периферии подложки непосредственно перед разрывом (рис. 5a). В первом стенде толщина пленки на периферии перед разрывом определяется, используя измеренный конфокальным датчиком профиль свободной поверхности (рис. 2a), в точке на расстоянии 3–5 мм от края кюветы, для игнорирования образованного на стенке мениска. Во втором стенде из-за того, что кювета соединена по принципу сообщающихся сосудов с резервуаром рабочей жидкости, а нагрев слоя осуществляется достаточно медленно, толщина пленки на периферии подложки (где практически отсутствуют термокапиллярные деформации) близка к начальной толщине пленки. Помимо собственных данных, на рис. 5a представлены литературные данные [17, 19, 24], при этом данные для различных рабочих жидкостей не согласуются друг с другом.

Для получения единой корреляционной зависимости, учитывающей свойства рабочих жидкостей, а также условия нагрева, данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости представлены на рис. 5b в координатах ($\mathrm{Ma}_{\mathrm{cr}}$; $h_{\mathrm{per}}/l_\delta$), где $\mathrm{Ma}_{\mathrm{cr}}$ – критическое число Марангони, h_{per} – толщина пленки на периферии кюветы, l_δ – масштаб устойчивости пленки (м), впервые предложенный Хартли и Мергатройдом [29] для стекающих пленок жидкости. Критическое число Марангони определяется как $\mathrm{Ma}_{\mathrm{cr}} = -(\partial\sigma/\partial T)\cdot(1/\mu\alpha)\cdot L\cdot\Delta T$, где $\partial\sigma/\partial T$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения; μ – динамическая вязкость жидкости; α – температуропроводность; L – характерная длина, равная радиусу/полуширине кюветы; ΔT – пороговый перепад температуры вдоль кюветы, который определяется непосредственно перед моментом разрыва, в условиях стационарного и устойчивого течения, когда пленка еще сохраняет сплошность. В свою очередь, масштаб устойчивости пленки определяется как $l_\sigma = (\sigma\mu^2/\rho^3 g^2)^{1/5}$, где σ – поверхностное натяжение, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости. Свойства жидкости брались при температуре 25 °C. Толщина пленки на периферии кюветы h_{per} для данных из [17, 24] определялась исходя из предположения о линейном увеличении толщины пленки от центра к краю кюветы при постоянном объеме жидкости в кювете.

Исходя из вышесказанного, все данные, представленные на рис. 5a, можно обобщить единой зависимостью

$$\mathrm{Ma}_{\mathrm{cr}} = 7400(h_{\mathrm{per}}/l_\delta)^{2.18}.$$

Полученная корреляционная зависимость удовлетворительно обобщает данные для разных условий теплового воздействия, а также рабочих жидкостей, свойства которых изменяются в широком диапазоне.

Таким образом, в представленной работе показано, что из-за конкуренции термокапиллярных сил и гидростатического давления с увеличением толщины слоя жидкости возрастает пороговая разница температур вдоль кюветы, необходимая для его разрыва. Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости для шести рабочих жидкостей и различных условий эксперимента впер-

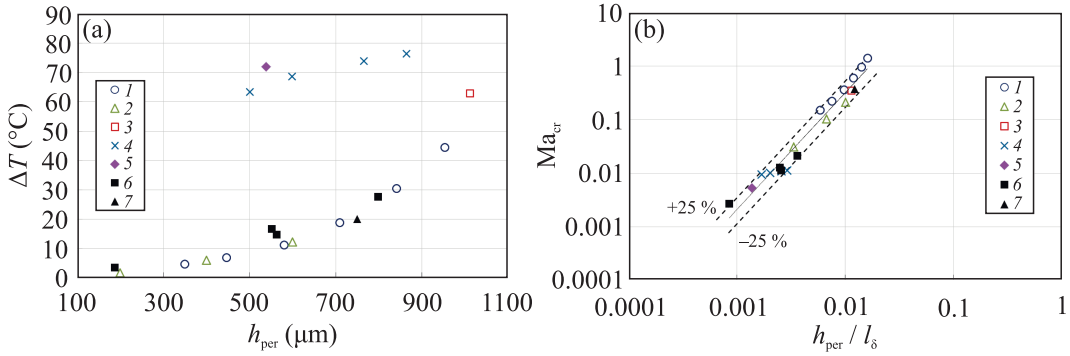

Рис. 5. (Цветной онлайн) Данные по термокапиллярному разрыву горизонтального слоя жидкости в различных условиях, построенные в координатах $(\Delta T; h_{per})$ (a) и $(Ma_{cr}; h_{per}/l_\delta)$ (b); *1* – рабочий участок с кондуктивным подводом тепла, вода; *2* – рабочий участок с лазерным нагревом, вода; *3* – [24], силиконовое масло ПМС-5; *4* – [24], силиконовое масло ПМС-100; *5* – [24], силиконовое масло ПМС-200; *6* – [19], силиконовое масло; *7* – [17], этанол

вые обобщены единой корреляционной зависимостью $Ma_{cr} = 7400(h_{per}/l_\delta)^{2.18}$.

Финансирование работы. Исследования выполнены в рамках государственного задания Института теплофизики имени С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук # 121031800213-0.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. O. A. Kabov, D. V. Zaitsev, V. V. Cheverda, and A. Bar-Cohen, "Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels", Exp. Therm. Fluid Sci. **35**(5), 825 (2011).
2. N. Ivanova, "Interfacial flows and interfacial shape modulation controlled by the thermal action of light energy", Colloids Interfaces **6**(2), 31 (2022).
3. D. S. Klyuev, V. M. Fliagin, M. Al-Muzaiqer, and N. A. Ivanova, "Laser-actuated optofluidic diaphragm capable of optical signal tracking", Appl. Phys. Lett. **114**(1), 011602 (2019).
4. A. Y. Malyuk and N. A. Ivanova, "Varifocal liquid lens actuated by laser-induced thermal Marangoni forces", Appl. Phys. Lett. **112**(10), 103701 (2018).
5. M. A. Al-Muzaiqer, N. A. Ivanova, V. M. Fliagin, and P. V. Lebedev-Stepanov, "Transport and assembling microparticles via Marangoni flows in heating and cooling modes", Colloids Surf. A **621**, 126550 (2021).
6. J. Bonse and S. Graf, "Maxwell Meets Marangoni – A Review of Theories on Laser-Induced Periodic Surface Structures", Laser Photonics Rev. **14**, 2000215 (2020).
7. А. С. Щекин, В. Н. Петровский, А. А. Гавриков, Д. В. Марин, А. А. Иванов, "Определение диаметра и глубины кратеров абляции вещества при наносекундных лазерных импульсах с использованием компьютерного моделирования", Ядерная физика и инжиниринг **14**(3), 303 (2023) [A. S. Shchekin, V. N. Petrovskiy, A. A. Gavrikov, D. V. Marin, and A. A. Ivanov, "Opredelenie diametra i glubiny kraterov ablyatsii veshchestva pri nanosekundnykh lazernykh impul'sakh s ispol'zovaniem komp'yuternogo modelirovaniya", Yadernaya Fizika i Inzhiniring **14**(3), 303 (2023)].
8. F. Korte, J. Koch, and B. N. Chichkov, "Formation of microbumps and nanojets on gold targets by femtosecond laser pulses", Appl. Phys. A **79**, 879 (2004).
9. H. Benard, "Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquid", Rev. Gen. Sci. Pures Appl. **12**(23), 1261 (1900).
10. Lord Rayleigh, "On the convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side", Philos. Mag. **32**, 529 (1916).
11. M. J. Block, "Surface tension as the cause of Bénard cells and surface deformation in a liquid film", Nature **178**, 650 (1956).
12. J. R. A. Pearson, "On convection cells induced by surface tension", J. Fluid Mech. **4**, 489 (1958).
13. D. A. Nield, "Surface tension and buoyancy effects in cellular convection", J. Fluid Mech. **19**, 341 (1964).
14. Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий, *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости* (Наука, М., 1972) [G. Z. Gershuni and E. M. Zhukhovitskii, Konvektivnaya ustoychivost' neszhimaemoy zhidkosti (Nauka, Moscow, 1972)] [in Russian].
15. С. С. Кутателадзе, А. Г. Кирдяшкин, В. С. Бердников, "Влияние термокапиллярных сил на процессы переноса у свободной поверхности жидкости в горизонтальном слое при турбулентной тепловой гравитационной конвекции", Докл. Акад. наук СССР **231**(2), 309 (1976) [S. S. Kutateladze, A. G. Kirdyashkin, and V. S. Berdnikov, "The influence of thermocapillary forces upon the transfer processes at liquid free surface in a horizontal layer under conditions of turbulent thermal gravitational convection", Dokl. Akad. Nauk SSSR **231**(2), 309 (1976)].

16. A. V. Hershey, "Ridges in a liquid surface due to the temperature dependence of surface tension", Phys. Rev. **56**, 204 (1939).
17. А. Ф. Пшеничников, Г. Л. Токменина, "Деформация свободной поверхности жидкости термокапиллярным движением", Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа **1983**(3), 150 (1983) [A. F. Pshenichnikov, and G. A. Tokmenina, "Deformation of the free surface of a liquid by thermocapillary motion", Fluid Dyn. **18**(0015), 463 (1983)].
18. M. J. Tan, S. G. Bankoff, and S. H. Davis, "Steady thermocapillary flows of thin liquid layers. I. Theory", Phys. Fluids A **2**(3), 313 (1990).
19. J. P. Burelbach, S. G. Bankoff, and S. H. Davis, "Steady thermocapillary flows of thin liquid layers. II. Experiment", Phys. Fluids A **2**(3), 322 (1990).
20. I. V. Marchuk, "Thermocapillary deformation of a thin locally heated horizontal liquid layer", J. Eng. Thermophys. **18**(3), 227 (2009).
21. I. V. Marchuk, "Thermocapillary deformation of a horizontal liquid layer under flash local surface heating", J. Eng. Thermophys. **24**(4), 381 (2015).
22. D. V. Zaitsev and O. A. Kabov, "An Experimental Modeling of Gravity Effect on Rupture of a Locally Heated Liquid Film", Microgravity Sci. Technol. **19**(3–4), 174 (2007).
23. Ю. В. Люлин, С. Е. Спесивцев, И. В. Марчук, О. А. Кабов, "Исследование динамики разрыва горизонтального слоя жидкости с точечным нагревом со стороны подложки", Письма в ЖТФ **41**(21), 22 (2015) [Y. V. Lyulin, S. E. Spesivtsev, I. V. Marchuk, and O. A. Kabov, "'Investigation of Disruption Dynamics of the Horizontal Liquid Layer with Spot Heating from the Substrate Side", Tech. Phys. Lett. **41**(11), 1034 (2015)].
24. D. Zaitsev, D. Kochkin, and O. Kabov, "Dynamics of liquid film rupture under local heating", Int. J. Heat Mass Transf. **184**, 122376 (2022).
25. A. I. Mizev, "Experimental investigation of thermocapillary convection induced by a local temperature inhomogeneity near the liquid surface. 1. Solid Source of Heat", J. Appl. Mech. Tech. Phys. **45**(4), 486 (2004).
26. A. M. Frank and O. A. Kabov, "Thermocapillary structure formation in a falling film: Experiment and calculations", Phys. Fluids **18**(3), 032107 (2006).
27. О. А. Кабов, "Разрыв пленки жидкости, стекающей по поверхности с локальным источником тепла", Теплофизика и аэромеханика **7**(4), 537 (2000) [O. A. Kabov, "Breakdown of a liquid film flowing over the surface with a local heat source", Thermophys. Aeromechanics. **7**(4), 513 (2000)].
28. D. Y. Kochkin, D. V. Zaitsev, and O. A. Kabov, "Thermocapillary rupture and contact line dynamics in the heated liquid layers", Interfacial Phenom. Heat Transf. **8**(1), 1 (2020).
29. D. E. Hartley and W. Murgatroyd, "Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces", Int. J. Heat Mass Transf. **7**, 1003 (1964).