

03

Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости

© Д.В. Зайцев¹, Д.П. Кириченко^{1,2}, О.А. Кабов^{1,2,3}

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

² Новосибирский государственный университет

³ Томский политехнический университет

E-mail: zaitsev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 ноября 2014 г.

Экспериментально исследовано влияние равновесного краевого угла смачивания на динамику распространения сухого пятна и на критический тепловой поток при разрушении пленки воды, локально нагреваемой со стороны подложки. Применялась различная шлифовка рабочей поверхности, что позволило варьировать равновесный краевой угол смачивания от 27 ± 6 до $74 \pm 9^\circ$ без изменений теплофизических свойств системы. Исследования проводились для трех конфигураций течения: 1) пленка жидкости, свободно стекающая по подложке, наклоненной под углом 5° к горизонту; 2) пленка, движущаяся по горизонтальной подложке под действием гидростатического напора; 3) неподвижная пленка на горизонтальной подложке. Установлено, что во всех трех случаях смачиваемость подложки существенно влияет на скорость распространения сухого пятна, а также на его конечный размер, однако практически не влияет на пороговый тепловой поток, при котором происходит разрушение пленки.

Процессы в пленках жидкости широко используются в промышленности, поскольку обеспечивают высокую интенсивность тепло-массообмена. Снижение толщины пленки позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, однако тонкие пленки подвержены разрывам, что резко снижает эффективность аппаратов и может привести к выходу их из строя. С другой стороны, субмикронная пленка жидкости, образующаяся на границе смываемых сухих пятен, за счет интенсивного испарения может вносить существенный вклад в суммарный тепло-массообмен. Так, авторами в режимах пленочного течения с мелкомасштабными смываемыми сухими пятнами был получен тепловой поток,

на порядок превышающий тепловой поток, реализуемый при сплошном течении пленки для того же расхода жидкости [1].

Важным аспектом проблемы разрыва пленки жидкости является вопрос о влиянии смачиваемости подложки [2]. В большинстве теоретических моделей разрыва изотермической пленки жидкости равновесный краевой угол смачивания выступает как основной параметр, определяющий критическую толщину пленки [3]. Эксперименты по разрыву пленки жидкости при отсутствии нагрева качественно подтверждают зависимость критической толщины пленки от краевого угла [4]. Однако вопрос о влиянии краевого угла на разрыв нагреваемой пленки жидкости исследован недостаточно. Равновесный краевой угол смачивания используется по-прежнему как основной параметр во многих моделях разрыва нагреваемой пленки жидкости [5]. Однако это не согласуется с некоторыми экспериментальными работами, в которых данные по термокапиллярному разрыву для различных жидкостей и различных подложек обобщены без привлечения краевого угла смачивания [6,7]. Сложность экспериментального исследования влияния смачиваемости на термокапиллярный разрыв пленки вызвана тем, что при смене жидкости или материала подложки меняется не только краевой угол, но и теплофизические свойства системы, которые существенно влияют на разрыв пленки.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния равновесного краевого угла смачивания на динамику распространения сухого пятна и на критический тепловой поток при разрушении локально нагреваемой пленки воды.

В работе используется одна и та же подложка, но с различной механической обработкой (шлифовкой) поверхности, что позволяет варьировать равновесный краевой угол смачивания в достаточно широком диапазоне без изменения теплофизических свойств системы. Устройство рабочего участка представлено на рис. 1. Основой участка является пластина из нержавеющей стали размером 50×150 мм с впрессованным заподлицо медным сердечником размером 10×10 мм, который служит нагревательным элементом. При помощи термопар в нескольких точках определяется температура нагревателя, а также температура поверхности пластины из нержавеющей стали. Источником теплоты является нихромовая спираль, намотанная на свободную часть стержня (на рис. 1 не показана). Поверх спирали наложен слой теплоизоляционного материала (минеральная вата). Тепловой поток q

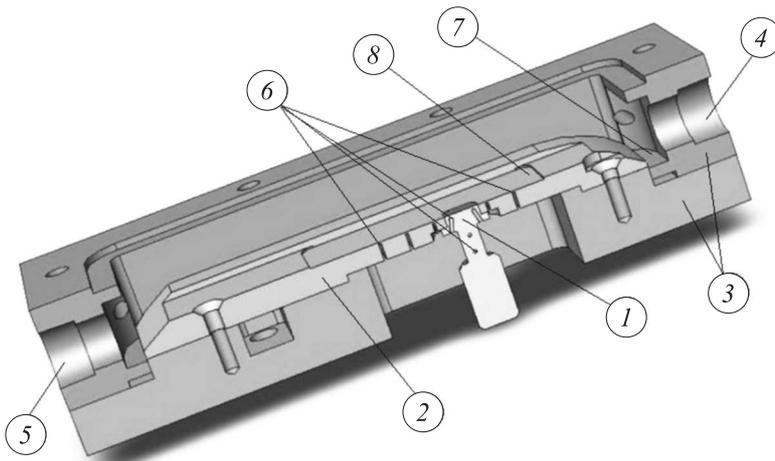


Рис. 1. Устройство рабочего участка: 1 — медный стержень с квадратной головкой 10×10 мм, 2 — пластина из нержавеющей стали, 3 — текстолит, 4 — вход жидкости, 5 — выход жидкости, 6 — термопары, 7 — приемник жидкости, 8 — рабочая поверхность.

определяется по электрической мощности, выделяемой на спирали, и контролируется по перепаду температур вдоль медного стержня. Конструкция нагревателя обеспечивает условие $T_w = \text{const}$, где T_w — температура поверхности нагревателя. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода с начальной температурой 25°C . Рабочий участок открыт в атмосферу, температура окружающего воздуха составляет $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Исследования проводились для трех различных конфигураций течения:

1. Пленка жидкости свободно стекает по рабочему участку, установленному под углом 5° к горизонту. Рабочая жидкость из термостата поступает в рабочий участок, движется под действием гравитации по рабочей поверхности, после чего возвращается в термостат. Число Рейнольдса пленки Re_1 ($Re_1 = \Gamma_l / \mu_l$, где Γ_l — удельный массовый расход жидкости, μ_l — динамическая вязкость жидкости) в эксперименте изменяется от 13.7 до 70.9.

2. Пленка жидкости движется по рабочему участку, установленному горизонтально. В этом случае жидкость из термостата поступает в рабочий участок, накапливается в приемнике, под действием гидростатического напора движется по рабочей поверхности, после чего возвращается в термостат. Число Рейнольдса пленки изменяется от 3.4 до 25.3.

3. Неподвижная пленка жидкости на горизонтальной подложке. В этом случае рабочий участок устанавливается горизонтально, на рабочую поверхность устанавливается медный охлаждающий контур в форме квадрата, так что нагреватель располагается по его центру. Внутренний размер контура 40×40 мм. Через контур прокачивается вода с температурой 25°C . Затем с помощью шприца на рабочую поверхность помещается заданный объем рабочей жидкости. Начальная толщина пленки (слоя) жидкости h_0 в эксперименте варьируется от 0.375 до 0.890 мм.

Равновесный краевой угол смачивания на рабочей поверхности в различных точках определялся методом сидячей капли при комнатной температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Для получения профиля свободной границы капли был использован теневой метод с коллимированным источником света и цифровой камерой Nikon D800, имеющей разрешение 7360×4912 пикс (оптическое разрешение $6 \mu\text{m}/\text{пикс}$). Полученные изображения обрабатывались при помощи программного обеспечения фирмы KRUSS с точностью измерения краевого угла 0.1° . Рабочая поверхность подвергалась специальной механической обработке (шлифовке) двумя различными способами, что позволило иметь существенно отличающиеся значения равновесного краевого угла смачивания: $\theta = 27 \pm 6$ и $\theta = 74 \pm 9^\circ$. Краевые углы на нагревателе и на окружающей его поверхности из нержавеющей стали в пределах статистической ошибки измерений не отличались.

В ходе эксперимента при заданном Re_l (или h_0) тепловой поток увеличивается с малым шагом до порогового значения q_{idp} , при котором на нагревателе образуется первое сухое пятно. Первое сухое пятно, как правило, распространяется по всему нагревателю, в результате чего температура нагревателя начинает резко возрастать (наступает кризис теплообмена). В эксперименте максимальный тепловой поток составлял $56.2 \text{ W}/\text{cm}^2$, а максимальная температура поверхности нагревателя перед разрушением пленки — 98.3°C .

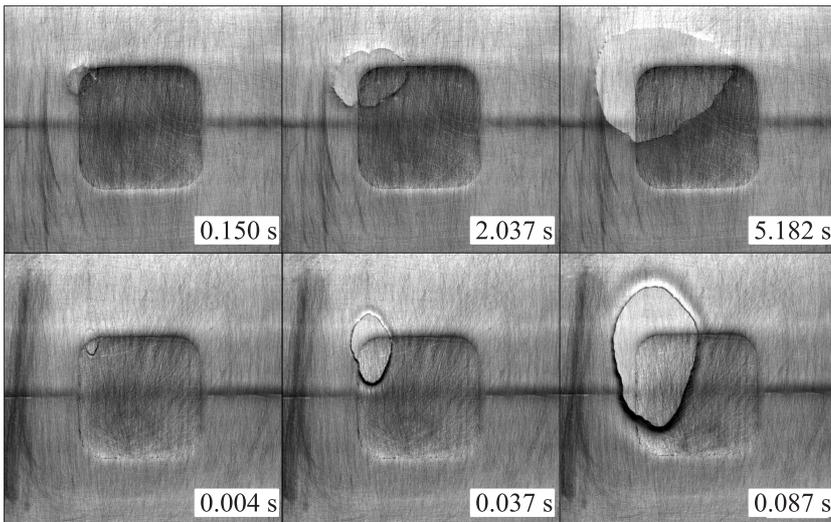


Рис. 2. Динамика распространения сухого пятна, конфигурация течения № 3, $h_0 = 0.40$ mm, $q = 27.0$ W/cm², $T_w = 85 \pm 3^\circ$ C. Верхний и нижний фоторяд — $\theta = 27 \pm 6$ и $\theta = 74 \pm 9^\circ$ соответственно. Указано время с начала разрыва пленки.

Для регистрации динамики разрыва пленки использовался Шлирен метод [8] со скоростной камерой FASTCAM SA1.1 (скорость 5400 fps при разрешении 1024×1024 px).

Динамика распространения сухого пятна при тепловом потоке, несколько большем q_{idp} , показана на рис. 2 (конфигурация течения № 3). Верхний ряд фотографий соответствует рабочей поверхности с $\theta = 27 \pm 6^\circ$, нижний — $\theta = 74 \pm 9^\circ$. Видно, что в обоих случаях сухое пятно зарождается в углу нагревателя, а затем распространяется как по медному нагревателю, так и по окружающей его поверхности из нержавеющей стали. Механизм разрыва пленки является термокапиллярным (см. результаты графического исследования [9]). Сухое пятно образуется при температуре подложки, существенно меньшей температуры насыщения ($T_w = 85^\circ$ C), в точке, где градиент температуры на поверхности пленки максимальный (в углу нагревателя). Как видно по

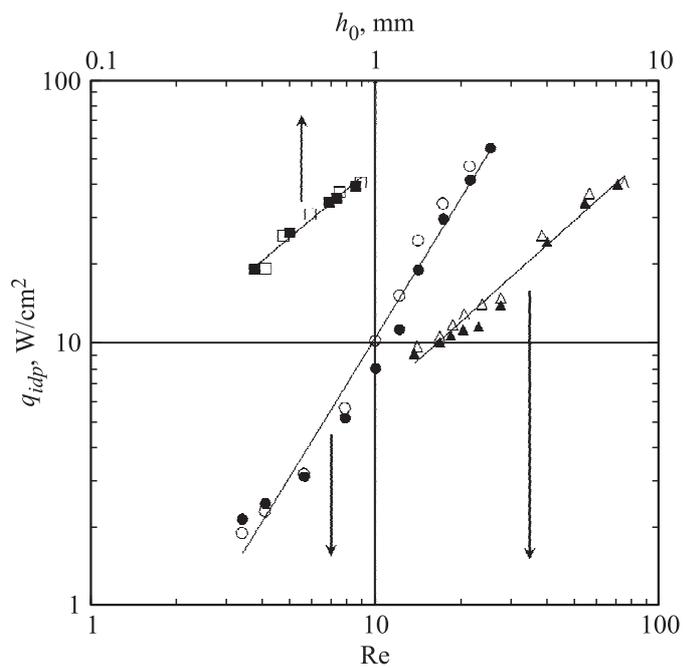


Рис. 3. Зависимость теплового потока q_{idp} , при котором происходит разрушение пленки, от числа Рейнольдса пленки Re (кружки и треугольники) или начальной толщины пленки h_0 (квадраты) для различных условий смачивания. Квадраты, кружки, треугольники — конфигурации течения № 1, 2, 3 соответственно. Пустые и заполненные значки — $\theta = 27 \pm 6$ и $\theta = 74 \pm 9^\circ$ соответственно.

временам, указанным на рис. 2, скорость распространения сухого пятна для различных условий смачиваемости существенно различается: для $\theta = 74 \pm 9^\circ$ скорость примерно в 50 раз больше, чем для $\theta = 27 \pm 6^\circ$. Конечный размер сухого пятна также существенно различается: для $\theta = 74 \pm 9^\circ$ площадь конечного сухого пятна обычно в несколько раз больше, чем для $\theta = 27 \pm 6^\circ$ (на рис. 2 конечные пятна не показаны). Для конфигураций течения № 1 и 2 смачиваемость подложки также оказывает существенное влияние как на скорость распространения сухого пятна, так и на его конечный размер.

На рис. 3 представлена зависимость теплового потока q_{idp} , при котором происходит разрыв пленки, от числа Рейнольдса пленки (начальной толщины горизонтального слоя) для различных конфигураций течения и различных условий смачивания. Видно, что q_{idp} возрастает по степенному закону с увеличением Re_l и h_0 , при этом q_{idp} для конфигурации № 2 в несколько раз выше, чем для конфигурации № 1, что качественно согласуется с данными, полученными авторами ранее на другом рабочем участке [10]. Из рис. 3 видно также, что для всех трех конфигураций течения смачиваемость подложки практически не влияет на пороговый тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки. Это согласуется с результатами [6,7], где авторам удалось обобщить данные по термокапиллярному разрыву пленки для различных жидкостей и различных подложек без привлечения равновесного краевого угла смачивания. Полученные данные показывают, что теоретические модели термокапиллярного разрыва пленки жидкости, в которых равновесный краевой угол смачивания используется в качестве параметра, определяющего критическую толщину пленки, требуют уточнения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01755).

Список литературы

- [1] Зайцев Д.В., Родионов Д.А., Кабов О.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 88–94.
- [2] Ajaev V. // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2013. V. 1. Iss. 1. P. 81–92.
- [3] El-Genk M.S., Saber H.H. // International J. Heat Mass Transfer. 2001. V. 44. P. 2809–2825.
- [4] Kadoura M., Chandra S. // Experiments in Fluids. 2013. V. 54. N 2. P. 1465.
- [5] El-Genk M.S., Saber H.H. // J. Heat Transfer. 2002. V. 124. P. 39–50.
- [6] Кабов О.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 4. С. 537–545.
- [7] Зайцев Д.В., Кабов О.А., Чеверда В.В., Бужетов Н.С. // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42. № 3. С. 449–455.
- [8] Kabov O.A., Bartashevich M.V., Cheverda V.V. // International J. Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences. 2010. V. 2. N 2–3. P. 161–182.
- [9] Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. // International J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103–112.
- [10] Zaitsev D.V., Kabov O.A. // Microgravity Science and Technology. 2007. V. XIX. Iss. 3/4. P. 174–177.