

УДК 536.423

Влияние вязкости на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости*

Д.В. Зайцев¹, А.А. Семенов¹, О.А. Кабов^{1,2}

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

²Томский политехнический университет

E-mail: zaitsev@itp.nsc.ru

Исследуется термокапиллярный разрыв пленки жидкости, стекающей под действием гравитации по вертикальной пластине с нагревателем 150×150 мм, в широком диапазоне изменения свойств жидкости (в частности, динамическая вязкость при начальной температуре изменяется от $0,91 \cdot 10^{-3}$ до $16,9 \cdot 10^{-3}$ Па·с) и числа Рейнольдса пленки ($Re = 0,15-53,5$). Установлено, что вязкость жидкости оказывает существенное влияние на пороговый тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки. Для учета влияния свойств жидкости критерий разрыва, традиционно используемый в литературе, был модифицирован, что позволило удовлетворительно обобщить все полученные данные.

Ключевые слова: разрыв пленки, пороговый тепловой поток, термокапиллярность, вязкие жидкости.

Известно, что кризисные явления при нагреве пленок жидкости связаны с нарушением сплошности течения. Образование сухих пятен существенно снижает эффективность тепло- и массообмена и может вызвать нарушение технологического процесса либо вывести аппарат из строя. Для гравитационно стекающей пленки жидкости обычно различают четыре вида кризисных явлений: разрыв пленки в изотермических условиях, разрушение под действием эффекта Марангони (за счет действия термокапиллярных или концентрационно-капиллярных сил), утончение и разрыв испаряющейся пленки (высыхание), оттеснение жидкости от поверхности нагрева при наступлении кризиса кипения. В настоящей статье рассматривается случай, когда основной вклад в разрыв пленки вносят термокапиллярные силы.

Подавляющая часть экспериментальных исследований по разрыву недогретых пленок жидкости, стекающих по нагреваемой поверхности, выполнялась при течении по вертикальным трубам длиной 0,3–3,6 м в диапазоне чисел Рейнольдса пленки Re ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости, μ — динамическая вязкость жидкости) от 20 до 1000 [1]. В работах [2–5] область исследований была существенно расширена на малые размеры поверхностей нагрева (2–150 мм) и малые числа Рейнольдса (0,1–10). Во многих работах (в частности, [1–3]) полученные данные описываются эмпирическими зависимостями с использованием критерия разрыва $K_p = -q_{идр} (d\sigma/dT) / [\lambda \rho (g\nu)^{2/3}]$, где $q_{идр}$ — тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки ($Вт/см^2$), σ — коэффициент

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-19-01755).

поверхностного натяжения (Н/м), T — температура ($^{\circ}\text{C}$), λ — теплопроводность жидкости (Вт/(м·К)), ρ — плотность жидкости (кг/м^3), g — ускорение свободного падения (м/с^2), ν — кинематическая вязкость жидкости ($\text{м}^2/\text{с}$). Критерий K_p является аналогом числа Марангони и определяет отношение масштаба термокапиллярного касательного напряжения на поверхности пленки к масштабу касательного напряжения на стенке при чисто гравитационном течении пленки. Хотя в работах [1–3] данные были получены для различных жидкостей, исследованный диапазон изменения свойств жидкости оставался достаточно ограниченным (теплофизические характеристики жидкости при начальной температуре изменялись не более, чем в 3 раза).

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование разрыва недогретой до температуры насыщения пленки жидкости, стекающей под действием гравитации по вертикальной пластине с нагревателем среднего размера (150×150 мм), в широком диапазоне изменения свойств жидкости (в частности, динамическая вязкость при начальной температуре изменяется в 18,6 раз). Используемые рабочие жидкости и их основные теплофизические свойства при начальной температуре T_0 представлены в таблице. Стенд представляет собой замкнутый циркуляционный контур. Рабочая жидкость из термостата через систему ротаметров подается в пленкоформирователь, стекает по рабочему участку, установленному вертикально, и возвращается в термостат. Основной рабочей участком является пластина из текстолита длиной 650, шириной 340 и толщиной 60 мм. Ширина потока жидкости составляет 250 мм. Основой нагревателя служит плита из нержавеющей стали толщиной 6 мм и размером 150×150 мм, заделанная заподлицо в текстолитовую пластину. Тепловыделяющим элементом служит плоская электрическая спираль, прикрепленная к тыльной стороне плиты из нержавеющей стали. Средняя плотность теплового потока определяется по электрической мощности, выделяемой на спирали, и контролируется по перепаду температур по толщине плиты из нержавеющей стали, измеряемому при помощи термомпар. Рабочий участок открыт в атмосферу, температура окружающего воздуха составляет 24 ± 2 $^{\circ}\text{C}$. Более подробное описание экспериментального стенда приведено в работе [3].

В ходе эксперимента при заданном числе Рейнольдса пленки Re тепловой поток q увеличивается с шагом 5 % до порогового значения q_{idp} , при котором на нагревателе образуется первое устойчивое сухое пятно. Максимальная температура поверхности нагревателя во всех экспериментах была существенно ниже температуры насыщения рабочей жидкости. Для визуализации течения и регистрации разрыва пленки использовался цифровой фотоаппарат Nikon D200 с макрообъективом Nikon 105 mm $f/2.8G$ Micro-Nikkor (разрешение до 6 микрон/пиксель).

В процессе увеличения теплового потока под действием термокапиллярных сил, направленных поперек течения, возникали продольные деформации поверхности пленки, формировались регулярно стекающие струи (более детальную информацию по формированию струйного течения можно найти в работе [5]). Сухие пятна зарождались от нижней кромки нагревателя и распространялись между струями вверх по потоку. Картина образования сухих пятен для этиленгликоля при $Re = 0,41$ показана на рис. 1.

Таблица

Рабочие жидкости и их свойства при начальной температуре T_0

Рабочая жидкость	T_0 , $^{\circ}\text{C}$	ρ , кг/м^3	$\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^3$, $\text{Па}\cdot\text{с}$	c_p , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	$(d\sigma/dT) \cdot 10^3$, $\text{Н}/(\text{м}\cdot\text{K})$
Вода	24	997,2	0,912	0,909	4184	0,609	72,1	0,191
10-процентный раствор этилового спирта в воде	24	981,3	1,39	1,363	4266	0,556	47,4	0,133
50-процентный раствор глицерина в воде	25	1124	4,485	5,041	3302	0,424	68	0,15
60-процентный раствор глицерина в воде	25	1151	7,665	8,823	3126	0,390	67,8	0,131
Этиленгликоль	24	1112	15,17	16,87	2429	0,255	45,74	0,090

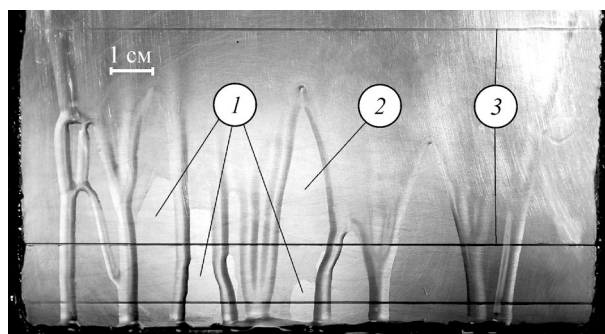


Рис. 1. Образование сухих пятен на нагревателе для этиленгликоля при $Re = 0,41$ и $q_{идр} = 1,1 \text{ Вт/см}^2$.

1 — сухие пятна, 2 — остаточная пленка, 3 — терморпары; на рисунке показана нижняя половина нагревателя.

В экспериментах на вязкой, слабо испаряющейся жидкости (этиленгликоль) было обнаружено, что в некоторых случаях разрыв пленки происходит в два этапа: первый этап — внезапное утончение пленки до очень тонкой остаточной пленки; второй — разрушение остаточной пленки (см. рис. 1). Аналогичный сценарий разрыва был зафиксирован ранее при разрыве нагреваемой пленки воды в работе [4]. Отличие состоит в том, что в [4] остаточная пленка существовала доли секунды, тогда как в экспериментах с этиленгликолем она существовала от нескольких секунд до нескольких минут, что, по-видимому, объясняется существенно различной скоростью испарения воды и этиленгликоля, а также существенно различной вязкостью.

На рис. 2 представлена зависимость порогового теплового потока, при котором происходит разрыв пленки, от числа Рейнольдса для различных рабочих жидкостей. Видно, что $q_{идр}$ возрастает по степенному закону с увеличением Re для каждой жидкости, при этом $q_{идр}$ существенно возрастает с увеличением вязкости: при одном и том же Re его величина на порядок и более для этиленгликоля выше, чем для воды.

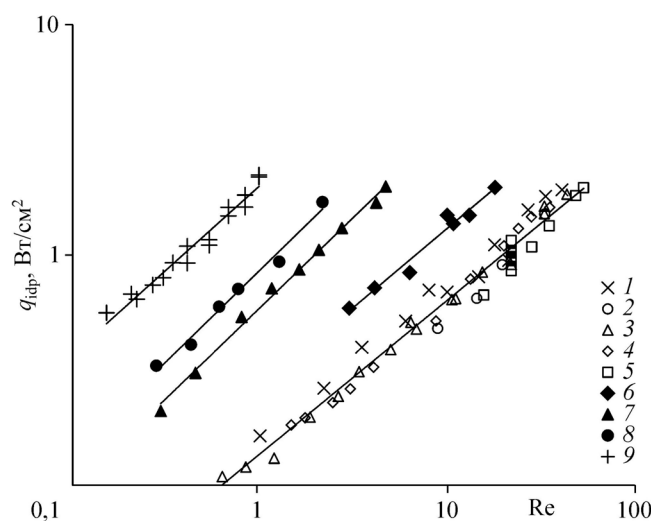


Рис. 2. Тепловой поток, при котором происходит разрыв пленки, в зависимости от числа Рейнольдса для различных рабочих жидкостей.

1–5 — вода (пять серий эксперимента), 6 — 10-процентный раствор этилового спирта в воде, 7 — 50-процентный раствор глицерина в воде, 8 — 60-процентный раствор глицерина в воде, 9 — этиленгликоль.

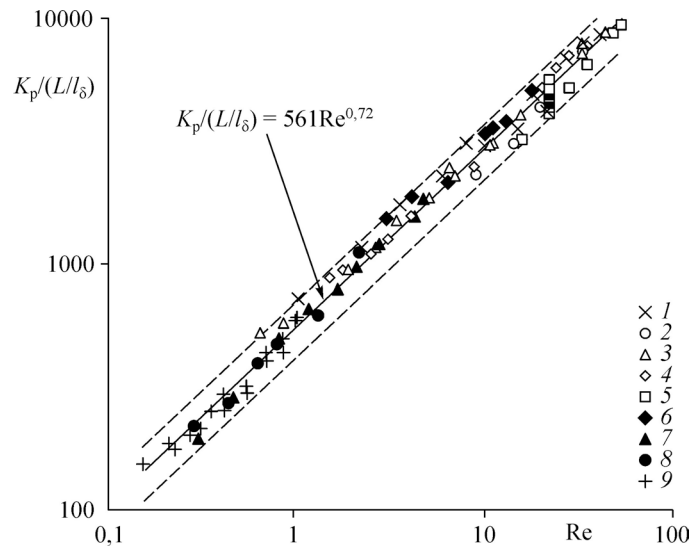


Рис. 3. Обобщение данных по разрыву пленки с использованием модифицированного критерия $K_p(L/l_\delta)$.

Обозначение см. на рис. 2; пунктирные линии показывают отклонение от обобщающей прямой ($\pm 25\%$).

При попытке обобщения полученных результатов с использованием традиционного критерия разрыва K_p данные для вязких жидкостей — растворов глицерина в воде и этиленгликоля — обобщить не удалось (отклонение от данных для воды составляет до 150%). Для адекватного учета влияния свойств жидкости традиционный критерий K_p был модифицирован путем домножения на отношение L/l_δ , где L — длина нагревателя, а $l_\delta = (\sigma\mu^2/(\rho^3g^2))^{1/5}$ — характерный масштаб критической толщины пленки в изотермических условиях, впервые полученный в модели разрыва пленки [6]. Физический смысл домножения K_p на L/l_δ состоит в том, что пороговый тепловой поток для разрыва пленки $q_{идр}$ должен быть прямо пропорционален критической толщине пленки в изотермических условиях и обратно пропорционален длине нагревателя, что было показано в работе [7] для вертикальных труб, и в работах [2, 3] — для локальных нагревателей. На рис. 3 представлено обобщение полученных данных с использованием модифицированного критерия $K_p(L/l_\delta)$. Видно, что все полученные данные в пределах $\pm 25\%$ обобщаются единой зависимостью — $K_p(L/l_\delta) = 561 \cdot Re^{0.72}$.

Список литературы

1. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокслас, 1988. 233 с.
2. Кабов О.А. Разрыв пленки жидкости, стекающей по поверхности с локальным источником тепла // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7, № 4. С. 537–545.
3. Chinnov E.A., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. Heat transfer and breakdown of subcooled falling water film on a vertical middle size heater // Int. J. of Heat and Technology. 2002. Vol. 20, No 1. P. 69–78.
4. Zaitsev D.V., Kabov O.A. An experimental modeling of gravity effect on rupture of a locally heated liquid film // Microgravity Sci. and Technology. 2007. Vol. XIX, No. 3/4. P. 174–177.
5. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 5. С. 128–137.
6. Hartley D.E., Murgatroyd W. Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 1964. Vol. 7. P. 1003–1015.
7. Гогонин И.И., Дорохов А.Р. К обобщению опытных данных по критическим тепловым потокам в стекающих пленках жидкости // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1980. Вып. 2, № 8. С. 100–102.

Статья поступила в редакцию 30 июня 2015 г.,
после доработки — 5 декабря 2015 г.