

УДК 532.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2023 П. М. Сомванши^{1а}, В. В. Чеверда^{1,2б}, О. А. Кабов^{1,3}

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия,

²Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск 630090, Россия,

³Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, 20, г. Новосибирск 630073, Россия

E-mails: ^apraveen.somwanshi@gmail.com, ^bslava.cheverda@gmail.com

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.; после доработки 05.12.2022 г.;
принята к публикации 12.01.2023 г.

Исследовано взаимодействие капли жидкости с медной поверхностью. Подложка принимается супергидрофобной с краевым углом смачивания 150° . Исходя из объёма капли числа Бонда и Вебера составляют приблизительно 0,23 и 1,6 соответственно. Температура поверхности и окружающего воздуха составляет 298 К, а температура капли жидкости на 5 К ниже. Моделирование сопряжённого теплообмена выполняется с использованием осесимметричной системы координат. Модель контактной линии Кистлера используется для определения динамического угла контакта капли при растекании. Исследуется изменение напряжения сдвига на подложке и теплового потока, индуцированного во время распространения капли в зависимости от времени.

Ключевые слова: удар капли, супергидрофобная поверхность, температура поверхности.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.212

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие капли с твёрдой поверхностью широко изучается экспериментально, численно и теоретически из-за важности данных процессов в природе и технике [1–3]. Гидродинамика взаимодействия изотермической капли при падении на твёрдую поверхность в настоящее время хорошо изучена, но теплообмен при падении капли должен быть изучен более тщательно для лучшего понимания происходящих процессов. Теплообмен между каплями жидкости и твёрдой поверхностью является одним из важных параметров в спрейном охлаждении. Впоследствии детальное понимание поможет в разработке наиболее эффективной системы охлаждения [4]. В серии работ [5–7] разработан алгоритм обработки инфракрасных изображений для получения информации о тепловом потоке в области капли и контактной линии. Для этого используется алгоритм решения обратной задачи Коши для уравнения теплопроводности. Показано наличие максимума теплового потока в области контактной линии. В работе [8] показано, что поток пара с жидкого мостика меньше на гидрофильной поверхности по сравнению с гидрофобной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-79-10373; <https://www.rscf.ru/project/21-79-10373/>). Измерение краевого угла смачивания выполнено в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН.

Недостаточно эффективное охлаждение электроники является одной из причин, вызывающих сбой различных устройств. Таким образом, охлаждение микроэлектроники становится центральным при проектировании электронных устройств. Охлаждение может быть достигнуто с помощью нескольких методов. Двухфазный поток является одним из эффективных методов, используемых для охлаждения электронных устройств. Трёхфазная контактная линия демонстрирует значительную величину теплового потока [9, 10]. Плотность теплового потока вблизи трёхфазной контактной линии может достигать более 1 кВт/см^2 [11]. Трёхфазная контактная линия играет важную роль в спрейной системе [12]. Несколько режимов наблюдаются во время формирования распыления [13]. Баланс множественных сил, обусловленных гравитацией, вязкостью и поверхностным натяжением, определяет форму и размер распыления. Капли могут образовываться при небольшом расходе жидкости. Доминирование силы инерции заставляет капли двигаться непрерывно, сливаться и тем самым образуется обычная струя жидкости. При взаимодействии капли с твёрдой поверхностью форма капли искажается до тюльпановидной формы с последующим увеличением расхода. В результате образуется тонкая плёнка жидкости. Впоследствии поверхностное натяжение приводит к тому, что при разрыве плёнки образуются небольшие капли. Характеристики распыления [14, 15] влияют на охлаждение. Критический тепловой поток увеличивается с увеличением расхода [16]. Создание микроструктур на поверхностях повышает характеристики теплопередачи [17]. В спрейной системе охлаждения преобладает поверхностное натяжение и, следовательно, данная система может использоваться в условиях невесомости. Толщина тонкой плёнки на подложке больше при отсутствии силы тяжести.

Столкновение капли с твёрдой поверхностью подразделяется на три последующие фазы, а именно: распространение капли, отступление линии контакта и испарение сидячей капли [18–21]. Изменение радиуса смоченной каплей поверхности не зависит от её температуры [18]. Теплообмен и гидродинамика капли жидкости уникальны для выбранных жидкости и поверхности. Результаты одной конфигурации не могут быть сопоставлены с другой, что делает необходимым выполнение дальнейших исследований. Настоящее исследование направлено на создание двухфазной системы охлаждения. В данной работе спрогнозирован порядок величины напряжения сдвига и теплового потока, возникающих при взаимодействии холодной капли с гидрофобной поверхностью.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНФИГУРАЦИЯ ПОТОКА

Капля холодной жидкости (вода, глицерин) взаимодействует с медной поверхностью (плотность $\rho = 8460 \text{ кг/м}^3$, теплоёмкость $C_p = 385 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, коэффициент теплопроводности $k = 400 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, окружённой атмосферным воздухом $\rho = 1.395 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 0.286 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $k = 0.026 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$).

Геометрия условий падения и граничные условия показаны на рис. 1. Толщина медной подложки составляет 2,5 мм. Во время растекания жидкой капли рассчитывается процесс теплообмена с подложкой. При этом численное моделирование проводится с использованием сопряжённого механизма теплопередачи. Движение трёхфазной контактной линии допускается при отсутствии скольжения на твёрдой поверхности. Измерение краевого угла смачивания проводится благодаря обработке изображений [22]. В нашем случае измерения осуществлялись с помощью коммерческого прибора Kruss DSA-100. Измерения проводились в 8–10 местах на гидрофобной поверхности. Среднее между значениями натекающего и оттекающего краевых углов смачивания принималось за равновесный краевой угол смачивания.

Энергия поверхности прописывается с использованием равновесного контактного угла θ_e и динамического угла контакта θ_d . Верхняя и боковые границы открыты в атмосферу. Тепловой поток и температура непрерывны на границе раздела твёрдое тело-жидкость. Подложка и окружающий воздух находятся при температуре 298 К, а температура капли — на 5 К ниже (293 К). Теплофизические свойства считаются постоянными и принимаются при эталонной

температуре. Радиус посадочного места капли $R = r \sin(\theta_e)$ принимается в качестве характеристической длины, и выбираем скорость для получения безразмерных величин $U = (\sigma\rho/R)^{1/2}$, где σ (Н/м²) — поверхностное натяжение.

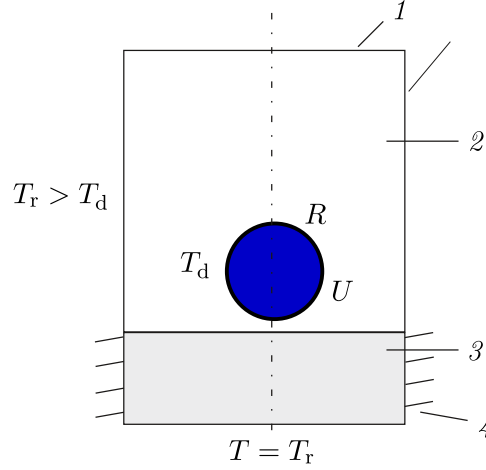


Рис. 1. Вычислительная область с начальными и граничными условиями: окружающий воздух, а также подложка изначально находятся при температуре $T_r = 298$ К; температура падающей капли $T_d = 293$ К ниже температуры подложки T_r ; 1 — открытые границы, 2 — воздух, 3 — подложка с краевым углом смачивания 150° , 4 — термоизоляция

COMSOL© (коммерческий решатель с помощью метода конечных элементов) используется для дискретизации несжимаемой формы уравнений Навье — Стокса в системе координат $r-z$. Интерфейс отслеживается методом фазового поля [23]. Уравнения массы, импульса и энергии решаются, чтобы найти распределение температуры внутри жидкости. Уравнения Навье — Стокса (1), (2) решаются совместно с моделью Кана — Хиллиарда (уравнения (4), (5) для прогнозирования формы поверхности капли) [23–25]. Свойства смеси определяются в уравнениях (6)–(9). Отношение сил гравитации к поверхностному натяжению задаётся числом Бонда $Bo = \rho g R^2 / \sigma$ и принимается условие $Bo < 1$, так как в данной работе рассматриваются маленькие капли, для которых поверхностное натяжение превышает силу гравитации. Отношение силы инерции к поверхностному натяжению задаётся числом Вебера $We = \rho U^2 R / \sigma$. Ожидается, что сила поверхностного натяжения будет значительной по отношению к гравитации. Поскольку медь обладает большой теплопроводностью по сравнению с водой, ожидается, что температурные переходные процессы будут контролироваться конвекцией жидкости [25]. Уравнения сохранения массы, импульса, энергии, модель Кана — Хиллиарда и свойства смеси приводятся ниже (уравнения (1)–(11)):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F}_{st} + \mathbf{F}_g, \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p(\mathbf{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \gamma \nabla \psi, \quad (4)$$

$$\psi = \lambda \left[-\nabla^2 \phi + \frac{\phi(\phi^2 - 1)}{\epsilon^2} \right], \quad (5)$$

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{\text{fluid } 2} - \rho_{\text{fluid } 1})(1 + \phi) + \rho_{\text{fluid } 1}, \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{2}(\mu_{\text{fluid 2}} - \mu_{\text{fluid 1}})(1 + \phi) + \mu_{\text{fluid 1}}, \quad (7)$$

$$C_p = \frac{1}{2}(C_{p,\text{fluid 2}} - C_{p,\text{fluid 1}})(1 + \phi) + C_{p,\text{fluid 1}}, \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{2}(k_{\text{fluid 2}} - k_{\text{fluid 1}})(1 + \phi) + k_{\text{fluid 1}}, \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_g = \rho \mathbf{g}, \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{\text{st}} = \nabla \cdot \{\sigma [I - (\mathbf{nn}^T)] \delta\}; \quad \delta = 6|\nabla \phi| |\phi(1 - \phi)|. \quad (11)$$

Здесь u — вектор скорости (м/с); p — давление (Н/м²); I — единичная матрица; \mathbf{F}_{st} — сила поверхностного натяжения (Н); \mathbf{F}_g — сила гравитации (Н); T — температура (К); ϕ — фаза (жидкость или газ); γ — мобильность фазы (м³с/кг); γ — мобильность фазы (м³с/кг); ψ — химический потенциал (Па); ε — толщина межфазовой границы (м); μ — динамическая вязкость (Нс/м²); fluid 1 — газ; fluid 2 — жидкость; \mathbf{g} — ускорение свободного падения (м²/с); \mathbf{n} — единичный вектор; δ — дельта-функция Дирака.

Модель контактной линии Кистлера [26] используется в настоящем исследовании и рассматривается в терминах капиллярного числа Ca в виде

$$\theta_d = f_N [Ca + f_{\text{HI}}(\theta_e)], \quad Ca = \mu U_{\text{cl}} / \sigma. \quad (12)$$

Здесь f_N определяется как

$$f_{N(x)} = \arccos \left\{ 1 - 2 \tanh \left[5.16 \left(\frac{x}{1 + 1.31x^{0.99}} \right)^{0.706} \right] \right\} \quad (13)$$

и f_{HI} определяется как

$$f_{\text{HI}}^{0.706} = \frac{1}{5.16} [1 + 1.31(f_{\text{HI}})^{0.99}]^{0.706} \operatorname{artanh} \left(\frac{1 - \cos \theta_e}{2} \right); \quad (14)$$

f_N и f_{HI} — функции Хоффмана; U_{cl} — скорость контактной линии, θ_e — равновесный контактный угол.

1.1. Независимость от размера расчётной сетки

Проверка и независимость результатов расчёта от размера расчётной ячейки выполняются аналогично тому, как показано в [25]. Численное моделирование может быть подвержено ошибкам из-за выбора размера сетки. Допустимая ошибка и требуемое вычислительное время являются решающими для размера сетки. Сетка неструктурированная, содержит треугольные ячейки. Независимость результатов от размера сетки исследуется с использованием малых, средних и больших ячеек и показана на рис. 2. График показывает ошибки для расчётов с разной сеткой объёма капли (V), содержащей большое и среднее количество ячеек. Ошибка в этом случае меньше 0,3%, в то время как при небольшом количестве ячеек ошибка превышает 0,5%. Сетка со средним количеством ячеек используется в настоящей работе. Потеря массы контролируется до тех пор, пока капля жидкости не откатится и полностью не сохранится в вычислительной области. Потеря массы как для воды, так и для глицерина (рис. 2) составляет менее 0,5%.

1.2. Сравнение с экспериментом для падающей капли

Проведено сравнение с численной работой [27]. В этой работе численно изучили воздействие капли жидкости на более холодную подложку из кремния при замерзании. На рис. 3 показано, что прогноз по коэффициенту теплопередачи (h) в настоящей работе является достаточно хорошим и согласуется с работой [27].

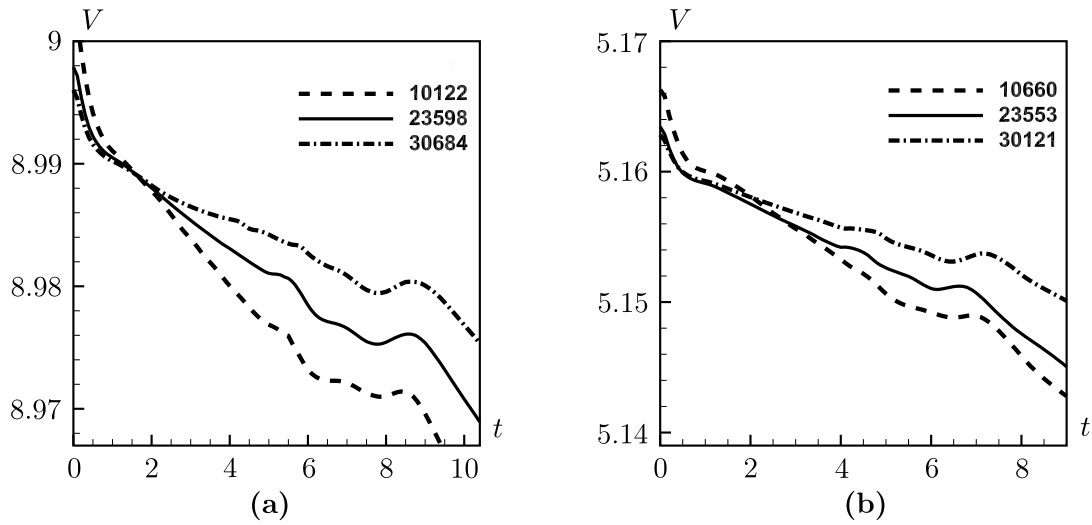


Рис. 2. Исследование независимости результатов расчётов от размера сетки при взаимодействии капли воды (а) и глицерина (б) с числами Бонда ($\sim 0,23$) и Вебера ($\sim 1,6$) с супергидрофобной медной поверхностью, имеющей краевой угол смачивания 150°

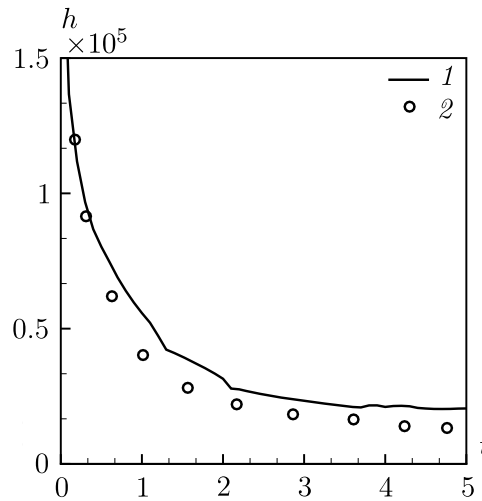


Рис. 3. Воздействие капли воды (0°C) на холодную подложку из кремния -20°C ; $\rho = 2330 \text{ кг/м}^3$, $k = 148 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $C_p = 712 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ со скоростью удара 1 м/с и диаметром 2 мм ; сравнивается коэффициент теплопередачи 1 , определяемый как отношение поверхностного усреднённого теплового потока и разницы температур между изначальным перепадом нагрева и теоретически предполагаемой температурой контакта, с коэффициентом теплопередачи 2 в работе [27]; показано удовлетворительное совпадение

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовано падение капли жидкости на супергидрофобную поверхность. Динамика радиуса пятна контакта капли на твёрдой поверхности обсуждается в разд. 2.1. Средняя температура жидкости вблизи подложки обсуждается в разд. 2.2. Напряжение сдвига и тепловой поток на подложке обсуждаются в разд. 2.3.

В качестве жидкости рассматривается вода применительно к решению проблемы антиобледенения крыльев самолётов, также результаты данного исследования можно применить в создании системы охлаждения на основе спреев. В данной системе важно понимать взаимодействие и теплообмен капли с твёрдой поверхностью. Глицерин рассматривается в качестве

рабочей жидкости для понимания эффекта вязкости в данных процессах.

2.1. Радиус площади, занимаемой каплей

Изменение радиуса (R_b) следа от времени, возникающего при воздействии капли воды или глицерина с супергидрофобной поверхностью, показано на рис. 4. Скорость распространения фронта жидкости определяется скоростью удара и физическими свойствами жидкостей. Впоследствии скорость распространения определяет порядок величины радиуса занимаемой площади. Радиус занимаемой площади становится нулевым в момент отскока. Отскок наблюдается как для воды, так и для глицерина, который похож на тот, который обнаружен в [25, 28]. Максимальная величина радиуса следа для воды на 25.9% больше, чем у глицерина. Отскок капли происходит из-за приобретения относительно большой поверхностной энергии капли, которой достаточно для её отрыва от подложки.

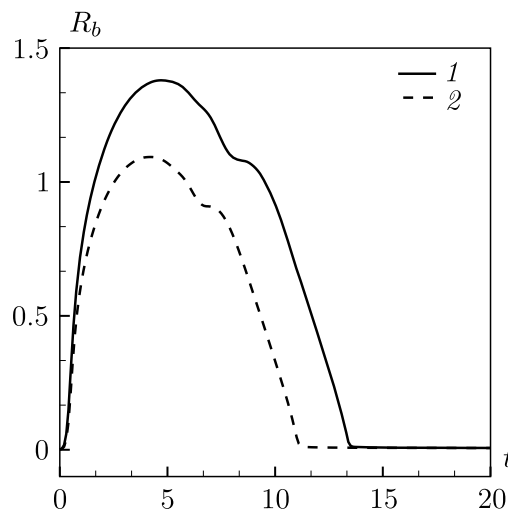


Рис. 4. Изменение радиуса занимаемой площади, наблюдаемое при падении капли холодной жидкости с числами Бонда ($\sim 0,23$) и Вебера ($\sim 1,6$) на супергидрофобную медную поверхность, имеющую краевой угол смачивания 150° ; 1 — вода, 2 — глицерин

2.2. Температура на поверхности подложки

Изменение средней температуры (T) жидкости вблизи подложки показано на рис. 5. Видно, что в течение первых 8 мс температура стенки уменьшается. Для воды температура подложки снижается на 0,81 К, а для глицерина на 0,79 К. Нужно отметить, что максимального радиуса капля достигает за время 5 мс. На последующих этапах температура стенки начинает возрастать. Через 25 мс температура стенки начинает превышать начальную температуру стенки 298 К. В этот период времени капля находится во взвешенном состоянии. Температура стенки превышает начальную температуру на 0,1 К, что может объясняться переходом кинетической энергии капли в тепловую. Скорость распространения и, следовательно, конвекция в воде больше, чем у глицерина. Также результирующая теплоотдача в воде больше, чем у глицерина. Нужно отметить, что температура подложки в случае падения глицерина всего на 0,04 К больше, т. е. изменяется на маленькую величину за 20 мс.

2.3. Напряжение сдвига и тепловой поток на стенке

Изменение напряжения сдвига на стенке (τ) в зависимости от времени показано на рис. 6(а). Напряжение сдвига на стенке быстро увеличивается и достигает максимума за время 0,5 мс. Далее напряжение сдвига снижается до нуля в момент, когда капля достигает максимального радиуса, и меняет знак. Напряжение сдвига на стенке прямо пропорционально динамической вязкости, скорости распространения и обратно пропорционально смещению объёма

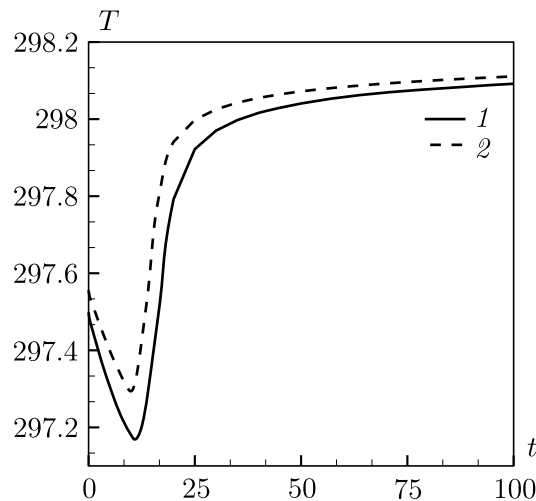


Рис. 5. Изменение средней температуры подложки, наблюдаемое при падении капли холодной жидкости с числами Бонда ($\sim 0,23$) и Вебера ($\sim 1,6$) на супергидрофобную медную поверхность, имеющую контактный угол смачивания 150° ; 1 — вода, 2 — глицерин

жидкости в направлении, нормальном к скорости распространения. Динамическая вязкость воды существенно меньше, чем у глицерина (см. таблицу), следовательно, результирующая скорость в воде больше, чем у глицерина. Пиковая величина напряжения сдвига на стенке в воде приблизительно на 8,5% больше, чем у глицерина.

Свойства жидкой среды при 25°C для воды и глицерина

Материалы/Свойства	Вода	Глицерин
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	998	1261
Динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$	8.9×10^{-4}	0.8395
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{моль}\cdot\text{К})$	0.56	0.286
Коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$	13.4×10^{-8}	9.3×10^{-8}
Поверхностное напряжение, $\text{Н}/\text{м}$	0,072	0,0629
Удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	4179	2449
Число Прандтля	6,64	7188.58
Скорость удара, $\text{м}/\text{с}$	0.299	0.273
Число Бонда	0.23	0.23
Число Вебера	1.6	1,6
Объём капли, микролитр	9.0	5.16
Радиус падения, мм	1.29	1.072

Изменение среднего теплового потока на стенке (q) в зависимости от времени показано на рис. 6(b). Осреднение теплового потока осуществляется по всему пятну контакта капли. Результирующая скорость распространения в воде больше, чем у глицерина. Колебания и конвекция являются доминирующими механизмами теплообмена. Анализируя число Прандтля для глицерина, можно обнаружить, что перемещение жидкости за счёт движения больше, чем за счёт диффузии. Максимальный тепловой поток на стене для воды приблизительно на 91,2% больше, чем у глицерина. С течением времени тепловой поток быстро вырастает и достигает максимуму при 2.8 мс для глицерина и 3 мс для воды. Таким образом, рост средней плотно-

сти теплового потока прекращается примерно в тот момент, когда капля имеет максимальный размер.

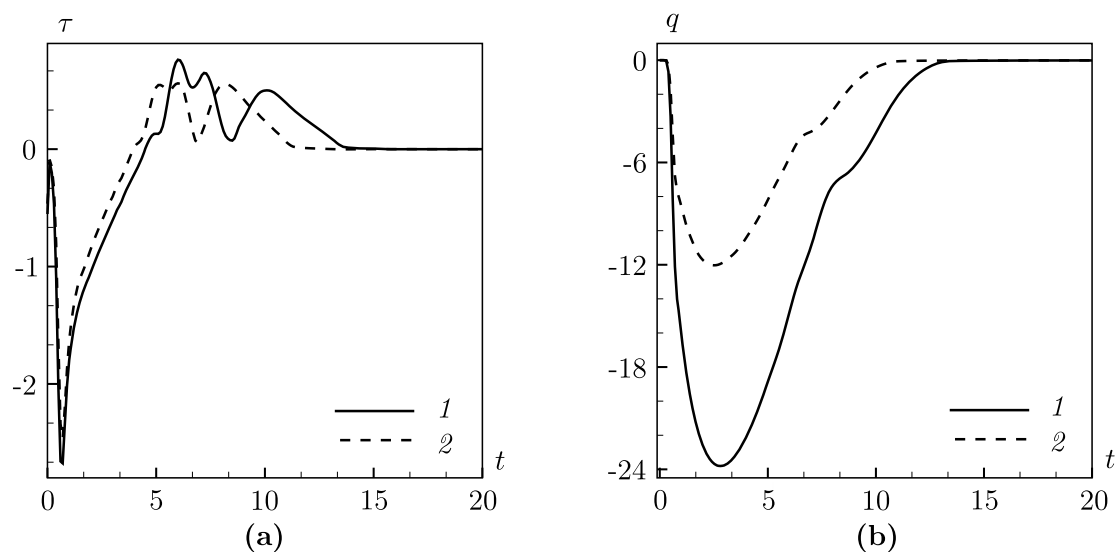


Рис. 6. Напряжение сдвига на стенке (а) и средний тепловой поток (б) на стенке в зависимости от времени, наблюдаемого при падении капли холодной жидкости с числами Бонда ($\sim 0,23$) и Вебера ($\sim 1,6$) на супергидрофобную поверхность с краевым углом смачивания 150° ; 1 — вода, 2 — глицерин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование выполнено для прогнозирования параметров распространения неизотермической капли жидкости с числами Бонда и Вебера приблизительно 0,23 и 1,6 соответственно на супергидрофобной медной поверхности, имеющей средний краевой угол смачивания 150° (взято из эксперимента).

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при моделировании процессов охлаждения нагреваемой поверхности с помощью спрейной системы, исследовании процессов образования наледи на поверхностях летательных аппаратов, оптимизации процессов нанесения краски.

Результаты исследования:

- отскок капли наблюдается как для воды, так и для глицерина приблизительно при 13,4 мс и 11,1 мс соответственно;
- максимальная величина напряжения сдвига на стенке для воды приблизительно на 8,5% больше, чем у глицерина;
- максимальный тепловой поток на стене для воды приблизительно на 91,2% больше, чем у глицерина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Worthington A. M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate // Proc. Royal Soc. 1876. V. 25. P. 261–272.
2. Yarin A. L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing // Ann. Rev. Fluid Mech. 2006. V. 38. P. 159–192.
3. Josserand C., Thoroddsen S.T. Drop impact on a solid surface // Ann. Rev. Fluid Mech. 2016. V. 48. P. 365–391.

4. *Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E. Y., Kabov O. A., Hu R., Luo X., Zhao L.* Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects // *Appl. Thermal Engrg.* 2021. V. 184. Article 115640.
5. *Karchevsky A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A.* Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // *Appl. Math. Model.* 2016. V. 40, N 2. P. 1029–1037.
6. *Чеверда В.В., Марчук И.В., Карчевский А.Л., Орлик Е.В., Кабов О.А.* Экспериментальное исследование теплообмена в стекающем по наклонной фольге ручейке // *Теплофизика и аэромеханика.* 2016. Т. 23, № 3. С. 431–436.
7. *Karchevsky A.L.* Development of the heated thin foil technique for investigating nonstationary transfer processes // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* 2018. V. 6, N 3. P. 179–185.
8. *Jaiswal A.K., Benard B., Garg V., Khandekar S.* Evaporation dynamics of liquid bridge formed between two heated hydrophilic and hydrophobic flat surfaces // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* 2022. V. 10, N 1. P. 1–14.
9. *Karchevsky A.L., Cheverda V.V., Marchuk I.V., Kabov O.A., Ponomarenko T.G., Sulyaeva V. S.* Heat flux density evaluation in the region of contact line of drop on a sapphire surface using infrared thermography measurements // *Microgravity Sci. Technology.* 2021. V. 33. N 53; <https://doi.org/10.1007/s12217-021-09892-6>
10. *Чеверда В.В., Карчевский А.Л., Марчук И.В., Кабов О.А.* Плотность теплового потока в области контактной линии капли, лежащей на горизонтальной поверхности тонкой нагреваемой фольги // *Теплофизика и аэромеханика.* 2017. Т. 24, № 5(107). С. 825–828.
11. *Stephan P.C., Busse C. A.* Analysis of the heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 1992. V. 35. P. 383–391.
12. *Wang J-X., Guo W., Xiong K., Wang S-N.* Review of aerospace-oriented spray cooling technology // *Progress in Aerospace Sci.* 2020. V. 116. Article 100635.
13. *Chen C., Tang Z.* Investigation of the spray formation and breakup process in an open-end swirl injector // *Sci. Progress.* 2020. V. 103. P. 1–19.
14. *Mudawar I., Estes K.* Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface // *ASME J. Heat Transfer.* 1996. V. 118. P. 672–679.
15. *Wang Y.Q., Liu M.H., Liu D., Xu K., Chen Y.L.* Experimental study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2010. V. 34. P. 933–942.
16. *Visaria M., Mudawar I.* Theoretical and experimental study of the effects of spray inclination on two-phase spray cooling and critical heat flux // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 2008. V. 51. P. 2398–2410.
17. *Zhang Z., Jiang P.X., Ouyang X.L., Chen J.N., Christopher D.M.* Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 2014. V. 76. P. 366–375.
18. *Liang G., Mudawar I.* Review of drop impact on heated walls // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 2017. V. 106. P. 103–126.
19. *Gholijani A., Schlawitschek C., Gambaryan-Roisman T., Stephan P.* Heat transfer during drop impingement onto a hot wall: The influence of wall superheat, impact velocity, and drop diameter // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 2020. V. 153. Article 119661.
20. *Liu L., Zhang Y., Cai G., Tsai P. A.* High-speed dynamics and temperature variation during drop impact on a heated surface // *Internat. J. Heat and Mass Transfer.* 2022. V. 189. Article. 122710.
21. *Gatapova E.Y., Kirichenko E.O., Bai B., Kabov O.A.* Interaction of impacting water drop with a heated surface and breakup into microdrops // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* 2018. V. 6, N 1. P. 75–88.
22. *Biolè D., Bertola V.* Measuring fluid interfaces, corners, and angles from high-speed digital images of impacting drops // *J. Flow Visualization and Image Processing.* 2021. V. 28, N 1. P. 1–19.
23. *Yue P., Zhou C., Feng J.J.* Sharp-interface limit of the Cahn–Hilliard model for moving contact lines // *J. Fluid Mech.* 2010. V. 645. P. 279–294.

24. Yue P., Zhou C., Feng J.J. Spontaneous shrinkage of drops and mass conservation in phase-field simulations // *J. Comput. Phys.* 2007. V. 223. P. 1–9.
25. Somwanshi P.M., Muralidhar K., Khandekar S., Vyacheslav C. Mixing and wall heat transfer during vertical coalescence of drops placed over a superhydrophobic surface // *Interfacial Phenomenon and Heat Transfer*. 2020. V. 8, N 3. P. 207–224.
26. Kistler S.F. *Hydrodynamics of Wetting in Wettability*. N. Y.: Marcel Dekker, 1993.
27. Schreimb M., Borchert S., Berberovic E., Jakirlic S., Roisman I. V., Tropea C. Computational modelling of flow and conjugate heat transfer of a drop impacting onto a cold wall // *Internat. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 109. P. 971–980.
28. Jaiswal A.K., Khandekar S. Dynamics of a droplet impacting a sessile droplet on a superhydrophobic surface: role of boundary conditions during droplet placement // *J. Flow Visualization and Image Processing*. 2021. V. 28, N 4. P. 69–89.

UDC 532.5

IMPACT OF LIQUID DROP OVER A SUPERHYDROPHOBIC SURFACE

© 2023 P. M. Somwanshi^{1a}, V. V. Cheverda^{1,2b}, O. A. Kabov^{1,3}¹*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
pr. Akad. Lavrentyeva 1, Novosibirsk 630090, Russia,*²*Novosibirsk State University,**ul. Pirogova 1, Novosibirsk 630090, Russia,*³*Novosibirsk State Technical University,
pr. K. Marksa 20, Novosibirsk 630073, Russia*E-mails: ^apraveen.somwanshi@gmail.com, ^bslava.cheverda@gmail.com

Received 22.11.2022, revised 05.12.2022, accepted 12.01.2023

Abstract. The impact of a liquid drop over a copper surface is investigated. The substrate is assumed to be superhydrophobic with a equilibrium contact angle of 150° . Based on the volume of the drop, the Bond and Weber numbers are 0.23 and 1.6, respectively. Surface temperature and ambient air is at 298 K, and the temperature of the liquid drop is 5 K lower than the ambient. Simulation of conjugate heat transfer is performed using the axi-symmetric coordinate system. The Kistler contact line model is used to predict the dynamic contact angle of the drop during spreading. In the present work, we investigate the temporal variation of the shear stress and the wall heat flux induced over a substrate during the drop spreading.

Keywords: drop impact, superhydrophobic surface, surface temperature.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.212

REFERENCES

1. Worthington A. M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate. *Proc. Royal Soc.*, 1876, Vol. 25, pp. 261–272.
2. Yarin A. L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2006, Vol. 38, pp. 159–192.
3. Josserand C., Thoroddsen S.T. Drop impact on a solid surface. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2016, Vol. 48, pp. 365–391.
4. Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E. Y., Kabov O. A., Hu R., Luo X., Zhao L. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects. *Appl. Thermal Engrg.*, 2021, Vol. 184, article 115640.
5. Karchevsky A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A. Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line. *Appl. Math. Model.*, 2016, Vol. 40, No. 2, pp. 1029–1037.
6. Cheverda V.V., Marchuk I.V., Karchevskii A.L., Orlik E.V., Kabov O.A. Eksperimental'noe issledovanie teploobmena v stekayushchem po naklonnoi fol'ge rucheike [Experimental study of heat transfer in a stream flowing down an inclined foil]. *Teplofiz. Aeromekhanika*, 2016, Vol. 23, No. 3, pp. 431–436 (in Russian).
7. Karchevsky A.L. Development of the heated thin foil technique for investigating nonstationary transfer processes. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2018, Vol. 6, No. 3, pp. 179–185.

8. Jaiswal A.K., Benard B., Garg V., Khandekar S. Evaporation dynamics of liquid bridge formed between two heated hydrophilic and hydrophobic flat surfaces. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2022, Vol. 10, No. 1, pp. 1–14.
9. Karchevsky A.L., Cheverda V.V., Marchuk I.V., Kabov O.A., Ponomarenko T.G., Sulyaeva V. S. Heat flux density evaluation in the region of contact line of drop on a sapphire surface using infrared thermography measurements. *Microgravity Sci. Technology*, 2021, Vol. 33, No. 53; <https://doi.org/10.1007/s12217-021-09892-6>
10. Cheverda V.V., Karchevskii A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A. Plotnost' teplovogo potoka v oblasti kontaktnoi linii kapli, lezhashchei na gorizontnoi poverkhnosti tonkoi nagrevaemoi fol'gi [The heat flux density in the area of the contact line of a drop lying on the horizontal surface of a thin heated foil]. *Teplofiz. Aeromekhanika*, 2017, Vol. 24, No. 5(107), pp. 825–828 (in Russian).
11. Stephan P.C., Busse C. A. Analysis of the heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 1992, Vol. 35, pp. 383–391.
12. Wang J-X., Guo W., Xiong K., Wang S-N. Review of aerospace-oriented spray cooling technology. *Progress in Aerospace Sci.*, 2020, Vol. 116, article 100635.
13. Chen C., Tang Z. Investigation of the spray formation and breakup process in an open-end swirl injector. *Sci. Progress*, 2020, Vol. 103, pp. 1–19.
14. Mudawar I., Estes K. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface. *ASME J. Heat Transfer*, 1996, Vol. 118, pp. 672–679.
15. Wang Y.Q., Liu M.H., Liu D., Xu K., Chen Y.L. Experimental study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime. *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 2010, Vol. 34, pp. 933–942.
16. Visaria M., Mudawar I. Theoretical and experimental study of the effects of spray inclination on two-phase spray cooling and critical heat flux. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2008, Vol. 51, pp. 2398–2410.
17. Zhang Z., Jiang P.X., Ouyang X.L., Chen J.N., Christopher D.M. Experimental investigation of spray cooling on smooth and micro-structured surfaces. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2014, Vol. 76, pp. 366–375.
18. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 106, pp. 103–126.
19. Gholijani A., Schlawitschek C., Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Heat transfer during drop impingement onto a hot wall: The influence of wall superheat, impact velocity, and drop diameter. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2020, Vol. 153, article 119661.
20. Liu L., Zhang Y., Cai G., Tsai P. A. High-speed dynamics and temperature variation during drop impact on a heated surface. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2022, Vol. 189, article. 122710.
21. Gatapova E.Y., Kirichenko E.O., Bai B., Kabov O.A. Interaction of impacting water drop with a heated surface and breakup into microdrops. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2018, Vol. 6, No. 1, pp. 75–88.
22. Biolè D., Bertola V. Measuring fluid interfaces, corners, and angles from high-speed digital images of impacting drops. *J. Flow Visualization and Image Processing*, 2021, Vol. 28, No. 1, pp. 1–19.
23. Yue P., Zhou C., Feng J.J. Sharp-interface limit of the Cahn–Hilliard model for moving contact lines. *J. Fluid Mech.*, 2010, Vol. 645, pp. 279–294.
24. Yue P., Zhou C., Feng J.J. Spontaneous shrinkage of drops and mass conservation in phase-field simulations. *J. Comput. Phys.*, 2007, Vol. 223, pp. 1–9.
25. Somwanshi P.M., Muralidhar K., Khandekar S., Vyacheslav C. Mixing and wall heat transfer during vertical coalescence of drops placed over a superhydrophobic surface. *Interfacial Phenomenon and Heat Transfer*, 2020, Vol. 8, No. 3, pp. 207–224.
26. Kistler S.F. *Hydrodynamics of Wetting in Wettability*. N. Y.: Marcel Dekker, 1993.
27. Schremb M., Borchert S., Berberovic E., Jakirlic S., Roisman I. V., Tropea C. Computational modelling of flow and conjugate heat transfer of a drop impacting onto a cold wall. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 109, pp. 971–980.

28. Jaiswal A.K., Khandekar S. Dynamics of a droplet impacting a sessile droplet on a superhydrophobic surface: role of boundary conditions during droplet placement. *J. Flow Visualization and Image Processing*, 2021, Vol. 28, No. 4, pp. 69–89.