

УДК 532.6

## СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАПЛИ И СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИНАМИКУ СТОЛКНОВЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ КАПЛИ

© 2020 г. П. Т. Навееен<sup>а,\*</sup>, Р. Р. Симхадри<sup>а,\*\*</sup>, С. К. Ранджит<sup>а,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup> Тривандрамский инженерный колледж, Факультет машиностроения, Исследовательская лаборатория микро/нанотехнологий, Тривандрам, шт. Керала, Индия

\*E-mail: naveenpt.nitc@gmail.com

\*\*E-mail: rajeshsimhadri78@gmail.com

\*\*\*E-mail: ranjith@cet.ac.in

Поступила в редакцию 09.01.2019 г.

После доработки 16.09.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Экспериментально исследовано влияние температуры жидкой капли на термо- и гидродинамику отдельной капли, падающей на поверхность, имеющую различную гидрофобность. Как правило, варьирование температуры жидкости приводит к изменению таких ее свойств, как плотность, вязкость, поверхностное натяжение и энтальпия, и в результате динамика капли испытывает видоизменения. Используя высокоскоростные средства воспроизведения изображений, картины морфологии и расширения капли исследуются в случае столкновения капли воды с гидрофильной, гидрофобной и супергидрофобной поверхностями. Деформация капли отслеживалась качественно и количественно для капель, температура которых находилась в диапазоне от 5 до 85°C, а число Вебера было между 14.5 и 160. В результате наблюдений найдено, что с ростом температуры жидкости коэффициент удлинения возрастает из-за совместного эффекта уменьшения плотности, поверхностного натяжения, вязкости и краевого угла смачивания твердой поверхности. Отмечено, что разница в удлинении капель при крайних значениях температуры в исследованном диапазоне температур для гидрофильной, гидрофобной и супергидрофобной поверхностей составляла 62.7, 27.76 и 20.52%, соответственно. При низкой температуре сила поверхностного натяжения преобладает, состояние Касси–Бакстера доминирует на текстурированной супергидрофобной поверхности, и капли отскакивают. Напротив, при повышенных температурах граница раздела между жидкостью и твердой средой разрывается, и жидкость проникает в каверны на поверхности, что имеет следствием состояние Венцеля. Более того, найдено, что та капля, которая испытывает многочисленные отскоки в низкотемпературном режиме, налипает на супергидрофобную подложку при высокой температуре капли независимо от числа Вебера.

**Ключевые слова:** температура капли, гидрофобные поверхности, удлинение капли, отскакивание капли, число Вебера

**DOI:** 10.31857/S0568528120040088

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Число Вебера	–We
Начальный диаметр капли	– $D_0$
Максимальный диаметр капли	– $D_{\max}$
Скорость столкновения капли	– $V_0$
Поверхностное натяжение	– $\sigma$
Краевой угол смачивания поверхности	– $\theta_c$
Коэффициент максимального удлинения	– $\beta_{\max}$

Динамика отдельных капель, соударяющихся с твердыми поверхностями, представляет собой чрезвычайно интересное и важное для практики гидродинамическое явление [1–8]. Столкновение отдельной капли с твердой подложкой является распространенным событием во многих технологических процессах, таких как струйная печать, быстрое охлаждение распылением, покрытие плазменным напылением, впрыск топлива, каталитическое смачивание и т.д. [9–13]. Начиная с основополагающей работы Вортингтона по соударению капли с твердой поверхностью, были выполнены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования для прояснения физической основы динамики столкновения жидкой капли [10, 14, 15]. Критическими параметрами, которые определяют результаты столкновения капли, являются направление столкновения, скорость соударения, свойства капли (размер, плотность, вязкость и поверхностное натяжение) и поверхности (кривизна, температура и смачиваемость) [10, 14, 16–27]. Важнейшим безразмерным фактором, характеризующим динамику соударения, является число Вебера ( $We = \rho D_0 V_0^2 / \sigma$ ), которое определяет относительное влияние на рассматриваемый процесс инерциальных сил и сил поверхностного натяжения. Здесь  $\rho$ ,  $D_0$ ,  $V_0$  и  $\sigma$  – плотность, начальный диаметр, скорость соударения и поверхностное натяжение падающей капли соответственно.

В последнее время особое внимание было уделено изучению падения капель на супергидрофобные поверхности в связи с характеристиками их самоочистки и уменьшения сопротивления и потенциальными приложениям к различным областям инженерных разработок [10, 11, 28, 29]. Необработанные поверхности, покрытые гидрофобными веществами, захватывают воздух в свои микро/нано-каверны и при контакте отталкивают воду [17, 19, 30–34]. В зависимости от числа Вебера  $We$  и смачиваемости поверхности, падающие капли осаждаются, отскакивают или разбрызгиваются [9, 10]. Кроме того, во время столкновения морфология капель полностью различна для подложек с разными краевыми углами смачивания поверхности. Например, на гидрофильной поверхности капля растекается по поверхности, и мгновенный диаметр капли  $D(t)$  возрастает от  $D_0$  до максимального диаметра  $D_{\max}$  [35] в зависимости от числа Вебера  $We$  [5, 36, 37]. Напротив, когда капля ударяется о гидрофобную поверхность, она расширяется до максимального диаметра и отскакивает, одновременно радиальное количество движения меняет свое направление на противоположное, становится направленным вверх и капля отлетает от поверхности [33, 38]. Наряду с гидрофобностью, возрастает эффект воздушной подушки поверхности. Впоследствии межфазные силы становятся доминирующими над инерционными силами и капля остается как единое целое во время рикошетирования.

Несмотря на то что многочисленные исследования были выполнены, чтобы расшифровать как роль капли, так и свойства поверхности, в динамике соударения капли, информация о совместном влиянии температуры капли и смачиваемости поверхности весьма скудная. Температура капли изменяется коренным образом в некоторых практических ситуациях, например, таких, как столкновение холодной капли воды с крылом самолета, для горячих капель чернил из сопла струйного принтера при их падении на поверхность бумаги, для расплавленных капель металла, падающих на холодную подложку, для горячих капель дождя, падающих на землю, воду, животных, птиц и т.д. [9–11, 39, 40]. Более того, когда жидкая капля сближается с раскаленной поверхностью в процессе пожаротушения, тепловое излучение изменяет температуру капель. Во всех этих практических процессах, как ожидается, температура играет жизненно важную роль в динамике капли. Влияние температуры на деформацию капли представляется сложным явлением, чтобы его можно было просто описать, поскольку температура видоизменяет некоторые важные свойства жидкости такие, как плотность, вязкость и поверхностное натяжение. Отметим, что все эти параметры имеют обратную зависимость от температуры [39, 41], например, свойства воды изменяются в зависимости от температуры так, что поверхностное натяжение  $\sigma \sim (-T)$  и вязкость  $\mu \sim \exp(1/T)$ , следовательно, как поверхностное натяжение, так и вязкость уменьшаются, когда температура растет [42]. Кроме того, температура капли оказывает существенное влияние на смачиваемость поверхности, так что при сдвиге температуры из холодной в горячую область, например, для капель, неподвижно находящихся на поверхности (сидячих капель), может происходить переход из состояния Касси–Бакстера в состояние Венцеля [41]. Эти наблюдения подтверждают тот факт, что требуется гораздо больше исследований для прояснения термодинамики соударения отдельной капли с твердой поверхностью [39]. В настоящем исследовании влияние температуры на удлинение и отскакивание капли изучается экспериментально для падающих капель. Структура статьи следующая. Методика экспериментов излагается в разд. 1. Детали влияния температуры на различные параметры динамики соударения обсуждаются в разд. 2 и 3, после чего подводятся итоги исследования.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

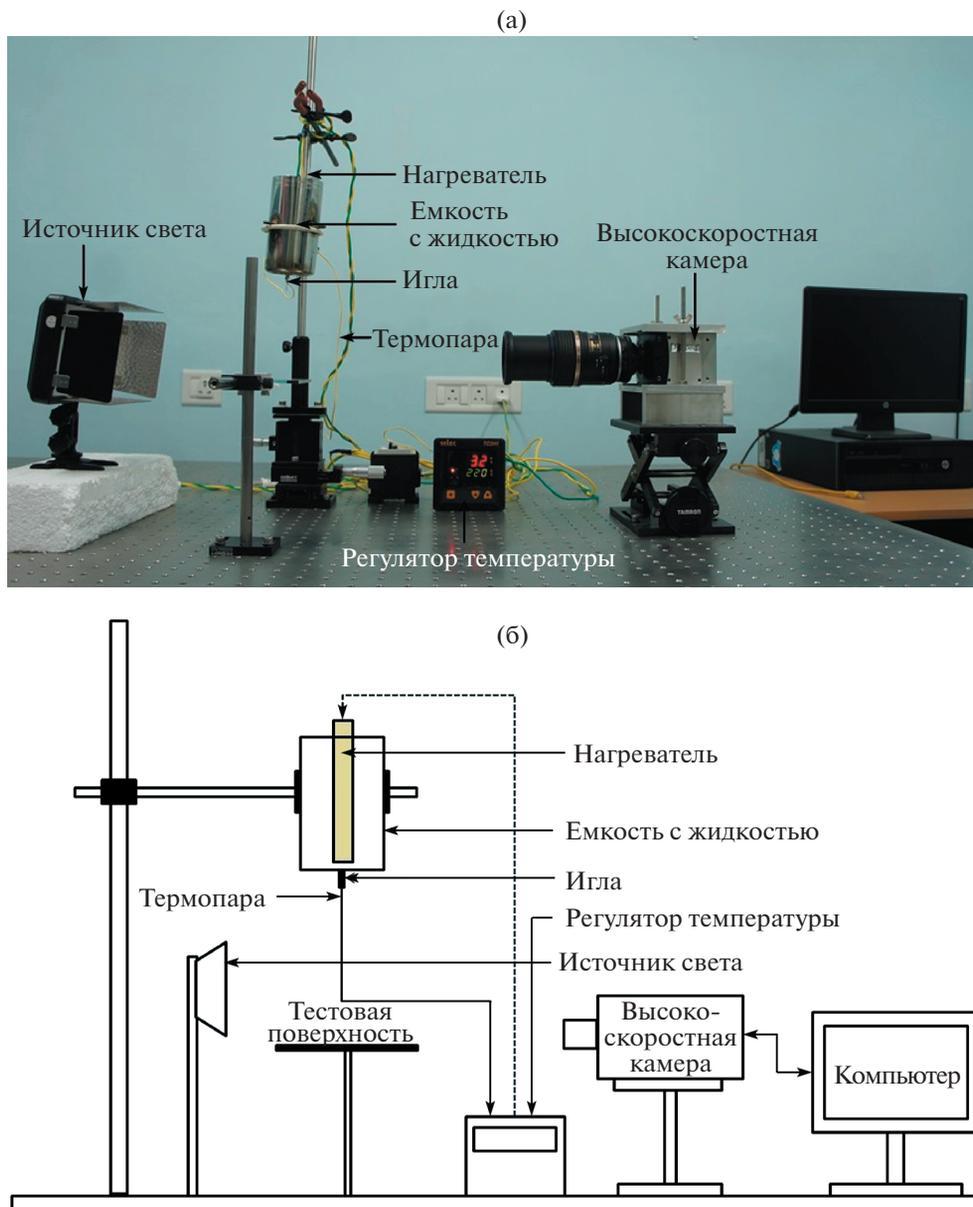
В этом разделе объясняются методы подготовки гидрофобной поверхности, принципы настройки экспериментальной установки и процедура регистрации соударения капель. В настоящем исследовании созданы условия для того, чтобы капли воды в диапазоне температуры от 5 до 85°C могли сталкиваться с тремя разными поверхностями при меняющихся условиях их смачиваемости. Для настоящих экспериментов в качестве гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных поверхностей были выбраны соответственно: кварцевое предметное стекло с краевым углом смачивания  $\theta_c = 50.7^\circ \pm 5^\circ$ , стеклянная поверхность с покрытием из олиго-*p*-фенилэневинилена с краевым углом смачивания  $\theta_c = 105^\circ \pm 3^\circ$ , и стекло, покрытое олиго-*p*-фенилэневиниленовыми (OPV) углеродными нанотрубками (CNT) с  $\theta_c = 168^\circ \pm 2$ . Технологический метод “снизу-вверх”, основанный на объединении атомов, молекул и их совокупностей до получения наночастиц, был развернут для самосборки молекул при изготовлении супергидрофобного покрытия, состоящего из CNT и OPV. В этом случае было допущено, чтобы углеродные нанотрубки (CNT) были разбавлены в органическом растворителе. В дальнейшем покрытие было нанесено на гидрофильные поверхности такие, как стекло или металл, чтобы образовать поверхности с большим краевым углом смачивания. Измерения статического краевого угла смачивания производились при комнатной температуре (28°C). Детали нанотекстурирования поверхности и получения характеристик гидрофобных поверхностей могут быть найдены в других исследованиях [43].

Как показано на рис. 1, экспериментальная установка состоит из модуля нагрева дозированных капелек, регулятора температуры, высокоскоростной камеры, источника света, гидрофобных поверхностей и компьютера для анализа данных. Система дозирования капелек состоит из емкости с жидкостью с регулируемой температурой и иглой, присоединенной к плечу с тремя степенями свободы. Динамика соударения капель с вышеуказанными подложками исследуется с помощью высокоскоростной фотографии. Последовательно регистрировалась временная эволюция деформации капли во время соударения. Для продуктивной записи изображений взаимодействия капли с поверхностью были выбраны частота съемки 5000 кадров в секунду при разрешении  $320 \times 244$  пикселей и быстродействии затвора 75  $\mu$ s, а также пакет программ ImageJ использовался для представления в количественной форме геометрических параметров из последовательности фотографий. Хирургическая игла 22 размера использовалась для создания монодисперсных капель эксперимента. Для этой гравитационной раздаточной системы размер капли есть функция исключительно диаметра сопла и свойств жидкости. Светодиодный источник света использовался для освещения и теплые изображения соударения капель были зарегистрированы и запоминались в компьютере для дальнейшей обработки. При анализе изображений ошибка счетчика отсчета пикселей составляла приблизительно  $\sim 0.04081$  мм на один пиксель и максимальная неопределенность во времени разброса равна 0.2 мс, когда записи производились при частоте съемки 5000 кадров в секунду.

Отметим, что в рассматриваемом тепловом режиме (5–85°C) свойства жидкости такие, как плотность, вязкость и поверхностное натяжение, которые определяют динамику соударения капли, имеют обратную зависимость от роста температуры. Поскольку поверхностное натяжение воды чувствительно к изменениям температуры, наблюдаемое изменение среднего диаметра капли от  $2.91 \pm 0.05$  мм до  $2.55 \pm 0.04$  мм соответствует крайним значениям температурного диапазона, равным 5 и 85°C. Как было отмечено, изменение диаметра капли при варьировании температуры следует линейному тренду  $D_0(T) = [-0.0021T + 2.8076]$  мм, где  $T$  измеряется в °C, как на рис. 2. Более того, на основании метода Клайна–МакКлинтока [25, 26], использованного для нахождения максимальных экспериментальных неопределенностей, были найдены их значения, равные 2.08, 3.02, 4.74, 2.06 и 0.66% для начального диаметра капли, скорости соударения, числа Вебера столкновения, диаметра при максимальном удлинении и температуры капли соответственно.

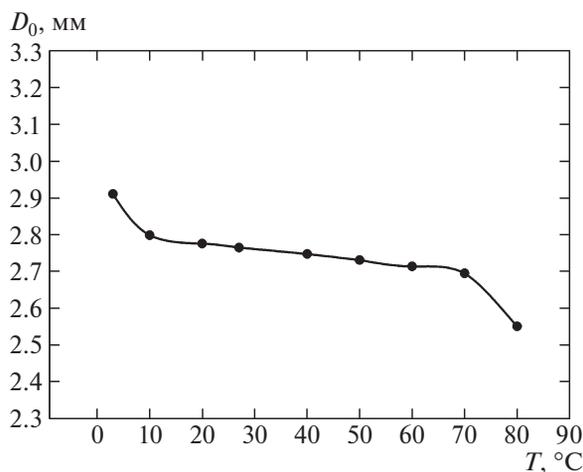
## 2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАПЛИ НА ДИНАМИКУ ОТНОСИТЕЛЬНОГО УДЛИНЕНИЯ

Прежде всего морфология капли исследована во время столкновения для качественного суждения о явлении столкновения. Произведенным монодисперсным каплям было позволено столкнуться с твердой подложкой под действием силы тяжести. Капли воды падали отдельно на гидрофильную, гидрофобную и супергидрофобную поверхность при  $We = 60.2$  и температурах



**Рис. 1.** Эксперимент по исследованию динамики соударения капель: экспериментальная установка (а) и схематическая диаграмма (б). Конфигурация системы состоит из раздатчика капель, регулятора температуры жидкости, высокоскоростной камеры, светодиодного источника света и компьютера.

капли 5 и 85°C. В настоящем исследовании оценка числа Вебера была произведена с использованием свойств жидкости при лабораторной температуре, конкретно, 28°C для выполнения условия согласованности. На рис. 3 и 4 воспроизведена морфология капли как функция времени на гидрофильной и гидрофобной поверхностях. Для этих поверхностей наблюдается четкое различие во временной эволюции формы капли при крайних значениях температуры. Относительное удлинение больше для той капли, что имеет более высокую температуру, и как гидрофильная, так и гидрофобная поверхности показывают морфологию, подобную той, что воспроизведена на рис. 3 и 4. Более того, капля прилипает к поверхности независимо от температуры капли и смачиваемости. Однако, как видно из рис. 5, изменение формы капли во время столкновения с супергидрофобной поверхностью происходит иначе при тех же термических условиях. Ощутимая разница в картине эволюции может быть отмечена для супергидрофобной поверхности, капля отскакивает назад, когда ее температура низкая; однако капля прилипает к поверхности, ко-

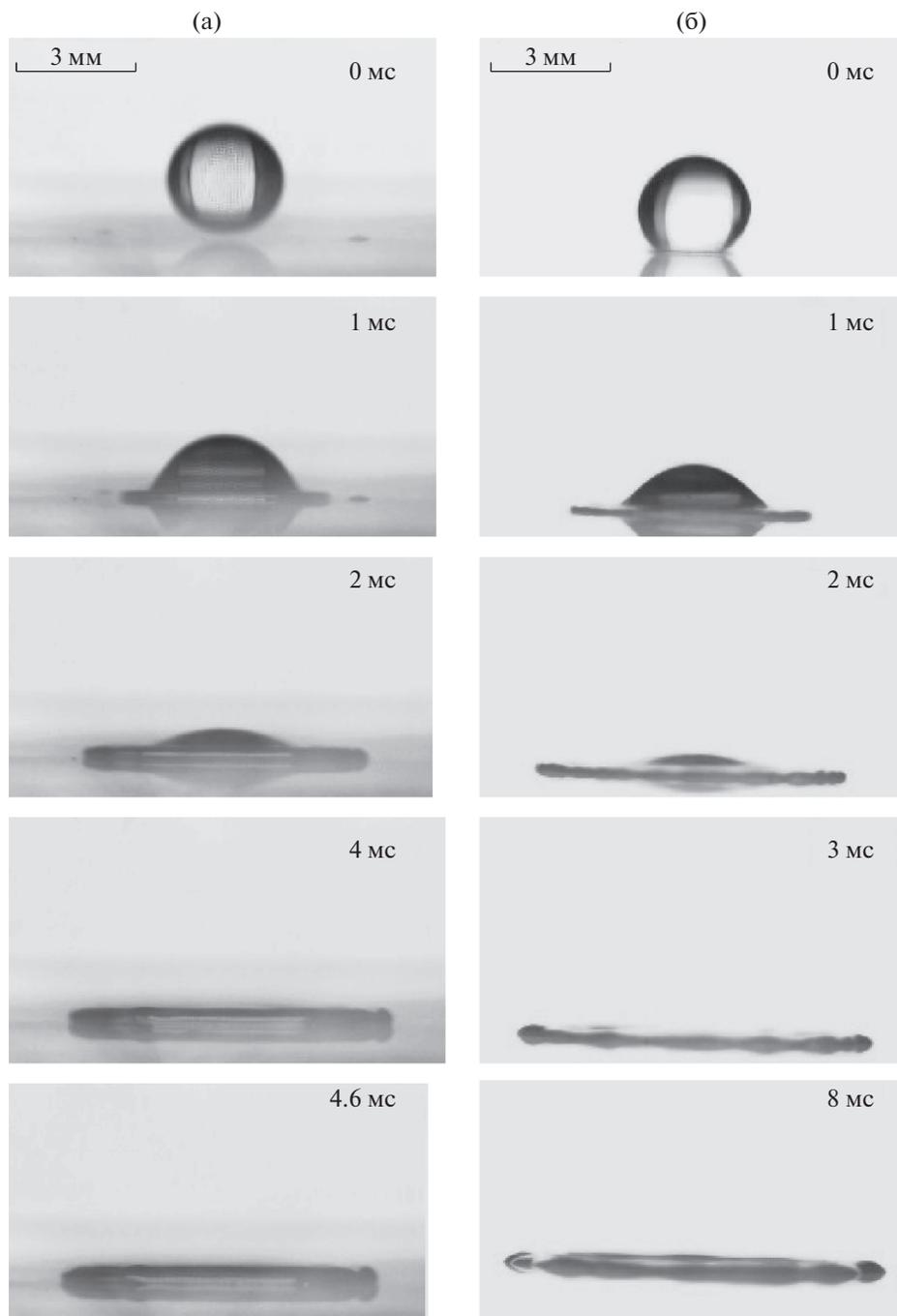


**Рис. 2.** Изменение размера капли при изменении температуры. Диаметр капли уменьшается при росте температуры.

гда ее температуры равна 85°C. Такое поведение ожидаемо, поскольку силы поверхностного натяжения максимальны при более низких температурах и режим Касси–Бакстера доминирует. В дальнейшем направление количества движения превращается из радиального в вертикальное и капля начинает рикошетировать. Хотя вязкая сила достигает максимума при более низких температурах, из верхней области отскакивающей капли, где формируется струйка, генерируется сателлитная капля, как показано на рис. 5. В то же время поверхностное натяжение снижается при высокой температуре (85°C) и возвращающие силы уменьшаются. Вдобавок, при повышенных температурах граница раздела жидкость–газ разрывается и вода проникает в нано/микроструктуру и в результате получается состояние Венцеля.

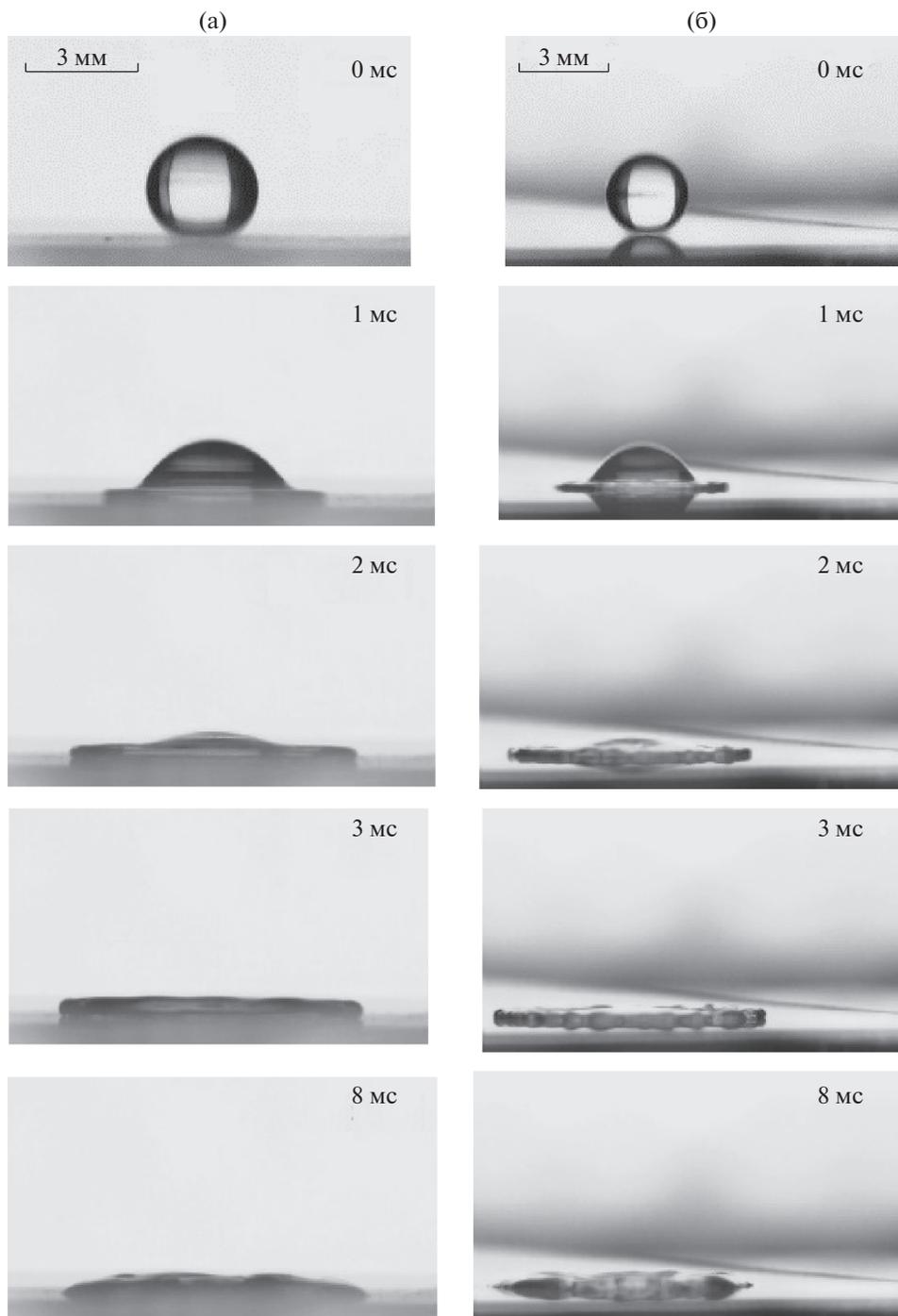
Далее, чтобы провести качественное сравнение, на рис. 6 изображена временная эволюция диаметра капли во время столкновения при условии равенства температуры двум крайним значениям из рассматриваемого интервала температур для всех трех тестируемых подложек при  $We = 60.2$ . В низкотемпературном режиме капля удлиняется в радиальном направлении и мгновенный диаметр капли  $D(t)$  вначале возрастает до максимального значения  $D_{max}$ , а затем уменьшается. Похожая тенденция наблюдается для всех поверхностей независимо от условий смачивания. Однако удлинение капли намного больше при ее высокой температуре, что объясняется уменьшением вязких сил и сил поверхностного натяжения. Далее наблюдалось, что имеет место увеличение на 62.7% максимального значения коэффициента удлинения  $\beta_{max} = D_{max}/D_0$  для гидрофильной поверхности при температуре падающей капли 85°C, по сравнению с удлинением при минимальной температуре 5°C. Однако можно отметить, что процент роста  $\beta_{max}$  для гидрофобной и супергидрофобной поверхностей равен 27.76 и 20.52% соответственно.

Чтобы иметь возможность провести относительное сравнение динамики удлинения капли с результатами представленных экспериментов, расширение капли на гидрофильной [35], гидрофобной [44] и перегретой [14] поверхностях также изображено сбоку на рис. 6 для  $We \sim 15-60$ . Примечательно, что при повышенных температурах паровая подушка, которая образуется между каплей и нагретой поверхностью, вынуждает падающую каплю расширяться и отскочить благодаря эффекту Лейденфроста [21]. На рис. 7 представлены результаты экспериментов для зависимости  $\beta_{max}$  от температуры при промежуточных значениях температуры капли. При заданной температуре максимальное удлинение наблюдается для гидрофильной поверхности. Как изображено на рис. 7, для гидрофильной поверхности значение  $\beta_{max}$  много больше по сравнению с его значениями для гидрофобной и супергидрофобной поверхностей. Пониженное межфазное натяжение играет значительную роль в расширении капли и смачивании поверхностей. Радикальное изменение  $\beta_{max}$  наблюдается при повышенных температурах поверхности (>50°C) в случае смачиваемой поверхности, в то время как на гидрофобной или супергидрофобной поверхностях удлинение капли нарастает постепенно при росте температуры.



**Рис. 3.** Морфология капли для гидрофильной поверхности ( $\theta_c = 50.7^\circ$ ) при  $We = 60.2$  для температуры  $5^\circ\text{C}$  (а) и  $85^\circ\text{C}$  (б).

Относительные интенсивности инерциальных и вязких сил и сил поверхностного натяжения, а также энтальпия, влияют на динамику падения нагретых капель. Следующим шагом группы значимых безразмерных параметров будут идентифицированы. В дополнение к числу Вебера  $We$ , числа Рейнольдса и Эккерта ( $Re = \rho V_0 D_0 / \mu$  и  $Ec = C_p \Delta T / V_0^2$ ) обуславливают динамику соударения нагретых капель. На рис. 8 приведены экспериментальные данные, полученные для различных значений чисел Вебера и Рейнольдса и температур. На основе регрессионного анализа, для мак-

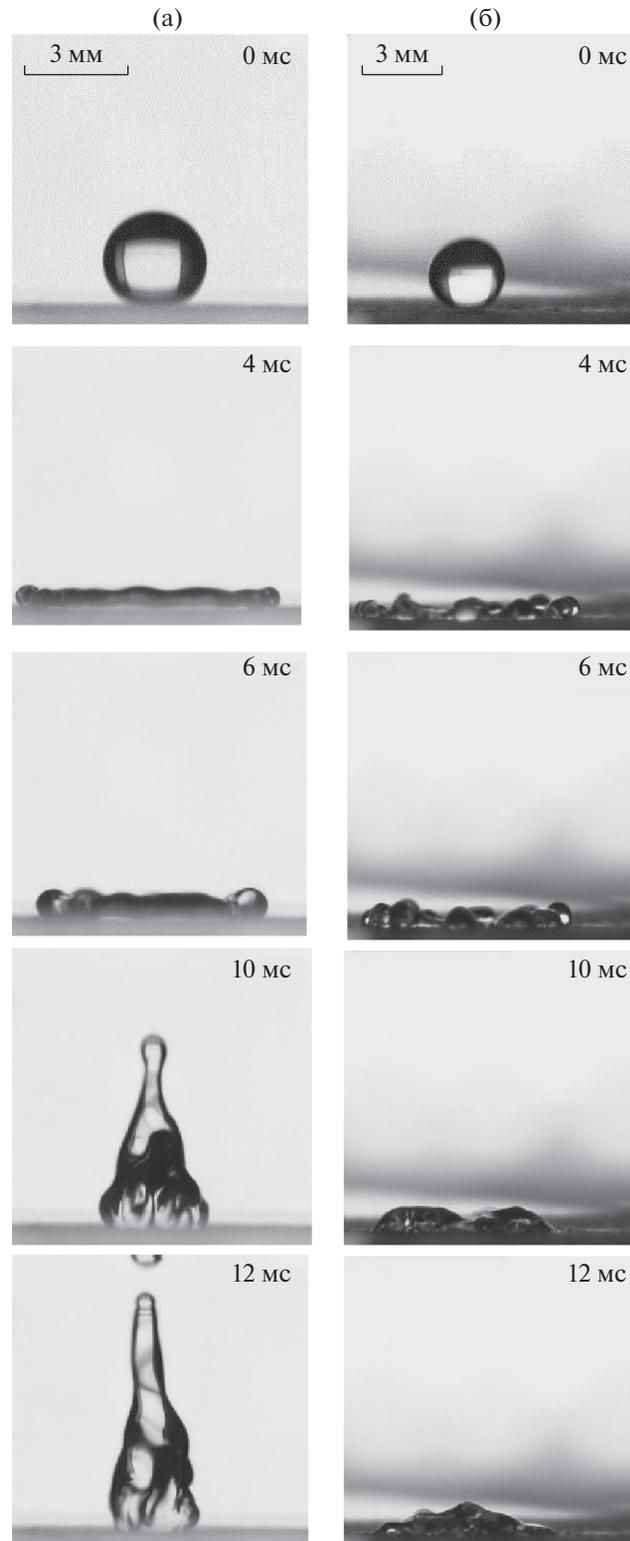


**Рис. 4.** Морфология капли для гидрофобной поверхности ( $\theta_c = 105^\circ$ ) при  $We = 60.2$  для температуры  $5^\circ\text{C}$  (а) и  $85^\circ\text{C}$  (б).

симального коэффициента растяжения предлагается эмпирическая модель, которая задается соотношением

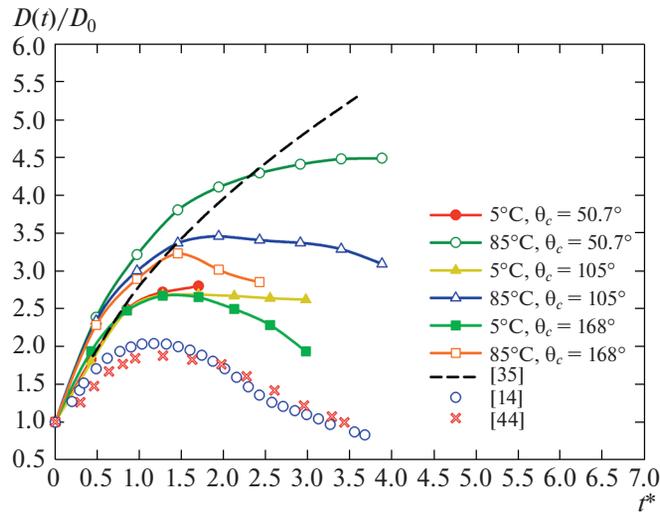
$$\beta = K We^a Re^b Ec^c, \tag{2.1}$$

где  $K, a, b$  и  $c$  – эмпирические константы. Для гидрофильной поверхности эти параметры равны  $K = 0.202, a = 0.238, b = 0.135, c = -0.067$ , тогда как для гидрофобной поверхности  $K = 0.406, a = 0.101, b = 0.247, c = 0.048$  и для супергидрофобной поверхности ( $\theta_c = 168^\circ$ )  $K = 46.06, a = -1.11,$

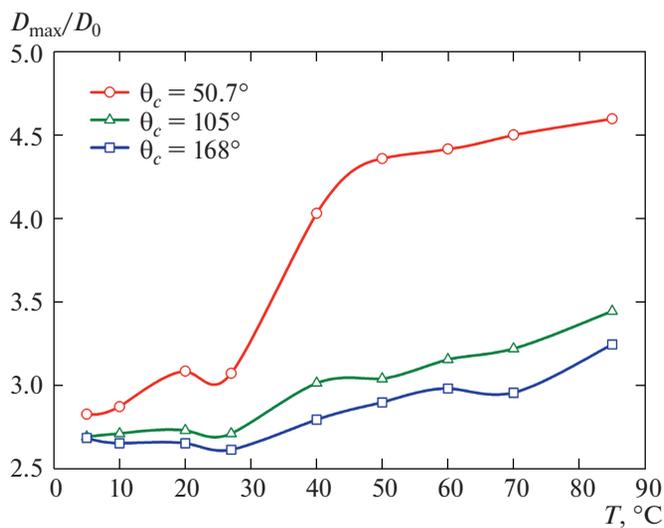


**Рис. 5.** Морфология капли для супергидрофобной поверхности ( $\theta_c = 168^\circ$ ) при  $We = 60.2$  для температуры  $5^\circ\text{C}$  (а) и  $85^\circ\text{C}$  (б).

$b = 0.301$ ,  $c = -0.069$ . Этот график паритета на рис. 8 отражает наличие совместного влияния теплосодержания капли и смачиваемости поверхности на удлинение капли.



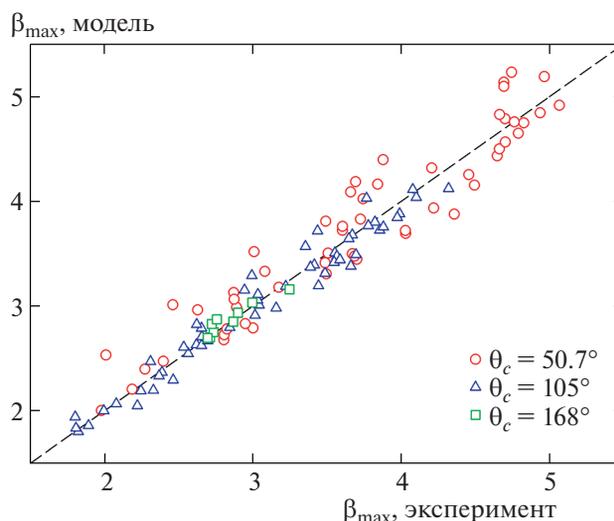
**Рис. 6.** Временная эволюция капли во время соударения для гидрофильной, гидрофобной и супергидрофобной поверхностей при 5 и 85°C и числе Вебера 60.2. Представленные экспериментальные значения удлинения капли на гидрофильной [35], гидрофобной [44] и перегретой [14] поверхностях изображены наряду с текущими результатами в близких по числу Вебера  $We$  режимах.



**Рис. 7.** Изменение коэффициента максимального удлинения капли ( $\beta_{max}$ ) в зависимости от температуры для гидрофильной, гидрофобной и супергидрофобной подложек при  $We = 60.2$ .

### 3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАПЛИ НА ЧИСЛО ОТСКОКОВ

Обычно рикошетирующие капли воды используются как метод определения смачиваемости посредством подсчета числа отскоков капли на твердой поверхности, в частности, от гидрофобной поверхности [38]. Способность капель воды, сталкивающихся с текстурированной поверхностью, отскакивать исследуется посредством варьирования температуры капли. Умеренное значение числа Вебера ( $We = 5.5$ ) было выбрано для того, чтобы была возможность сосчитать количество отскоков, когда капля приобретает достаточное количество движения, чтобы отскокнуть без какой-либо фрагментации. Капли с различными температурами в диапазоне от 5 до 85°C высвобождались с одной и той же высоты дозирования ( $h = 10$  мм), и последовательность изображений была записана. На рис. 9 воспроизведена морфология столкновения капли для



**Рис. 8.** Сравнение предсказаний модели для безразмерного диаметра максимального удлинения капли, выраженного соотношением (2.1), с данными эксперимента. Число Вебера изменялось в диапазоне 14.5–160, а температура между 5 и 85°C.

крайних значений в исследованном диапазоне температур от 5 до 80°C. Из рассмотрения рис. 9 можно видеть, что динамика столкновения капли полностью отличается при этих крайних значениях температуры. Число отскоков капли после ее соударения было подсчитано и изображено на рис. 10 для разных температур. Как видно из рис. 10, те капли, которые отскакивали при низкой температуре (5–40°C), переставали отскакивать при повышенной температуре (50–80°C). Переход от рикошета к прилипанию объясняется чувствительностью свойств жидкости таких, как плотность, вязкость и поверхностное натяжение, к изменениям температуры. По причине видоизменения этих свойств жидкости превращение радиального количества движения в вертикальное, которое существенно для отскока, прекращается. Уменьшение поверхностного натяжения снижает способность капли сжиматься и в итоге отскакивание прекращалось при  $T > 40^\circ\text{C}$ .

## ВЫВОДЫ

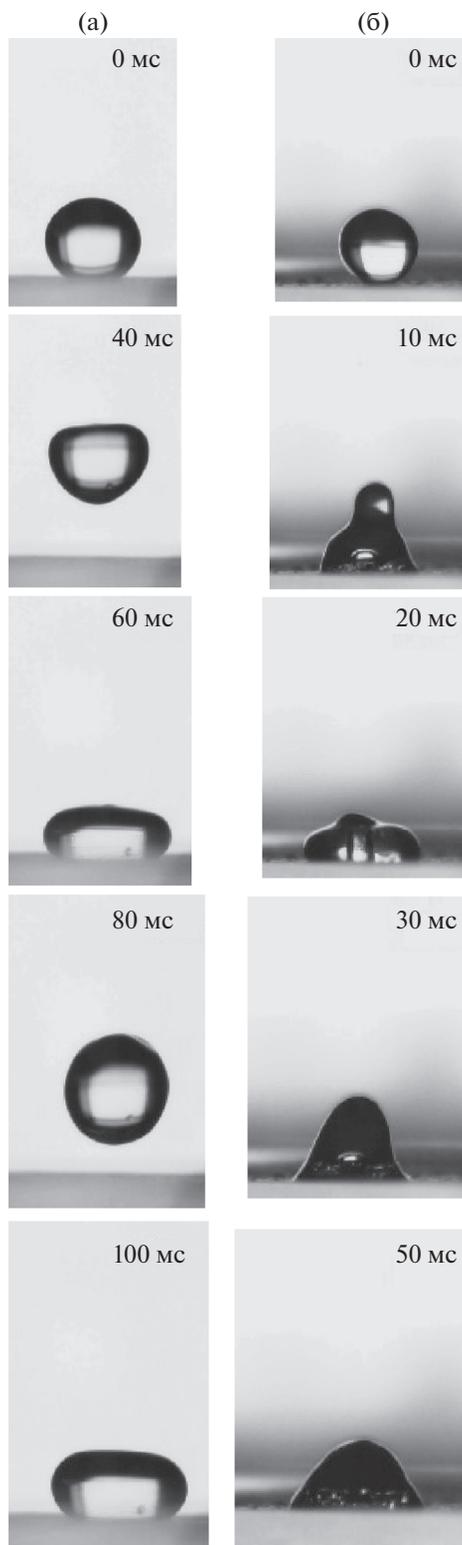
В настоящем исследовании с помощью высокоскоростной фотосъемки экспериментально исследовано влияние температуры капли на динамику ее соударения с твердой поверхностью. Наблюдалось, что поведение капли на поверхностях с различными условиями смачивания было разным при различных температурах. Главные выводы можно суммировать следующим образом:

1) Отмечено, что параметр максимального удлинения достигает минимума, когда температура капли наиболее низкая. Однако при высокой температуре поверхностное натяжение, вязкость и плотность жидкости уменьшаются и соответственно удлинение капли возрастает. Таким образом, капли, высвобождаемые с одной и той же высоты и имеющие низкую (5°C) и высокую (85°C) температуру, обнаруживают при столкновении состояния Касси–Бакстера и Венцеля соответственно.

2) Отмечено, что удлинение капли находится одновременно под влиянием смачиваемости поверхности и температуры капли. Кроме того, для гидрофильной, гидрофобной и супергидрофобной подложек предложено эмпирическое соотношение для  $\beta_{\max}$ , зависящее от  $We$ ,  $Re$  и  $Ec$ .

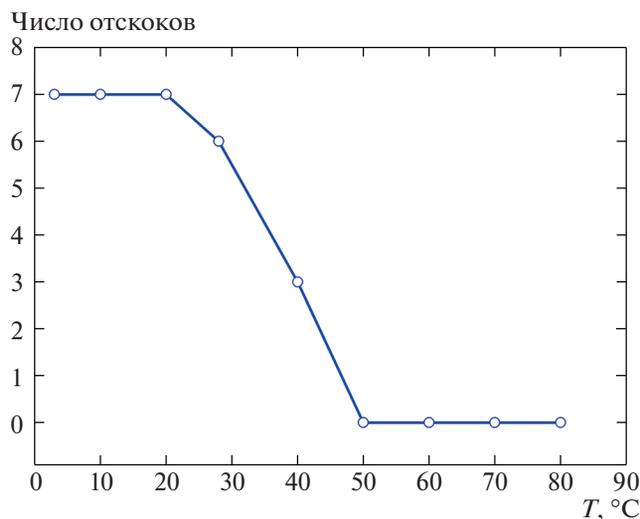
3) Найдено, что число отскоков капли от супергидрофобной поверхности уменьшается при росте температуры капли. Это объясняется чувствительностью таких свойств жидкости, как плотность, вязкость и поверхностное натяжение к изменениям температуры.

Требуются углубленные исследования, чтобы расшифровать полную термо- и гидродинамику поведения капли при изменении свойств капли, обусловленных влиянием температуры. Ожида-



**Рис. 9.** Морфология капли с  $\theta_c = 168^\circ$  при температуре 5 и 80°C для  $We = 5.5$ .

ется, что эти наблюдения обеспечат большее понимание глубинных причин и взаимосвязей в исследованиях динамики столкновения капли в связи с многими практическими приложениями.



**Рис. 10.** График числа отскоков капли от супергидрофобной поверхности в зависимости от роста температуры при  $We = 5.5$ .

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность доктору наук А. Аджаягошу и м-ру Б. Ведханарайану за помощь, а также Национальному институту междисциплинарных наук и технологии (CSIR), Тривандрам, Индия, за предоставление гидрофобных и супергидрофобных подложек для экспериментов с каплями.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарны за финансовую поддержку организации FIST–DST, Правительству Индии и SARD–KSCSTE, штат Керала, Индия, полученную для проведения настоящего исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moreira A., Moita A., Panao M.* Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. V. 36. № 5. P. 554–580.
2. *Rein M.* Drop–Surface Interactions. Springer. 2014. V. 456.
3. *Gilet T., Bourouiba L.* Rain-induced ejection of pathogens from leaves: revisiting the hypothesis of splash-on-film using high-speed visualization // *Integrative and Comparative Biology*. 2014. V. 54. № 6. P. 974–984.
4. *Bartolo D., Bouamrène F., Verneuil E., Buguin A., Silberzan P., Moulinet S.* Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces // *Europhysics Letters*. 2006. V. 74. № 2. P. 299.
5. *Gradeck M., Seiler N., Ruyer P., Maillet D.* Heat transfer for leidenfrost drops bouncing onto a hot surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013. V. 47. P. 14–25.
6. *Gulyaev I., Solonenko O.* Hollow droplets impacting onto a solid surface // *Experiments in Fluids*. 2013. V. 54. № 1. P. 1432.
7. *Cheung F., Bajorek S.* Dynamics of droplet breakup through a grid spacer in a rod bundle // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. V. 241. № 1. P. 236–244.
8. *Patil N.D., Bhardwaj R., Sharma A.* Droplet impact dynamics on micro pillared hydrophobic surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. V. 74. P. 195–206.
9. *Yarin A.* Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2006. V. 38. P. 159–192.
10. *Josserand C., Thoroddsen S.* Drop impact on a solid surface // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2016. V. 48. P. 365–391.
11. *Marengo M., Antonini C., Roisman I.V., Tropea C.* Drop collisions with simple and complex surfaces // *Current Opinion in Colloids & Interface Science*. 2011. V. 16. № 4. P. 292–302.
12. *Mitrakusuma W.H., Kamal S., Susila M.D.* The dynamics of the water droplet impacting onto hot solid surfaces at medium weber numbers // *Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 53. № 10. P. 3085–3097.

13. Макарихин И.Ю., Макаров С.О., Рыбкин К.А. Замечания о падении капли на свободную поверхность другой жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2010. Т. 45. № 1. С. 40–44.
14. Tran T., Staat H.J., Susarrey-Arce A., Foertsch T.C., van Houselt A., Gardeniers H.J., Prosperetti A., Lohse D., Sun C. Droplet impact on superheated micro-structured surfaces // *Soft Matter*. 2013. V. 9. № 12. P. 3272–3282.
15. Mitra S., Sathe M.J., Doroodchi E., Utikar R., Shah M.K., Pareek V., Joshi J.B., Evans G.M. Droplet impact dynamics on a spherical particle // *Chemical Engineering Science*. 2013. V. 100. P. 105–119.
16. Okawa T., Shiraishi T., Mori T. Production of secondary drops during the single water drop impact onto a plane water surface // *Experiments in Fluids*. 2006. V. 41. № 6. P. 965.
17. Quere D., Mathilde C. On water repellency // *Soft Matter*. 2005. V. 1. P. 55–61.
18. Директор Л.Б., Майков И.Л. Численное моделирование динамики капли вязкой жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2009. Т. 44. № 5. С. 101–109.
19. Bhushan B., Jung Y.C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction // *Progress in Materials Science*. 2011. V. 56. № 1. P. 1–108.
20. Gilet T., Bush J.W.M. Droplets bouncing on a wet, inclined surface // *Phys. Fluid*. 2012. V. 24. № 12.
21. Quere D. Leidenfrost dynamics // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2013. V. 45. P. 197–215.
22. Jin Z., Wang Z., Sui D., Yang Z. The impact and freezing processes of a water droplet on different inclined cold surfaces // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. V. 97. P. 211–223.
23. Karlsson L., Ljung A.L., Lundström T.S. Modelling the dynamics of the flow within freezing water droplets // *Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 54. № 12. P. 1–9.
24. Liu Y., Andrew M., Li J., Yeomans J.M., Wang Z. Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces // *Nature Communications*. 2015. V. 6. № 10034.
25. Kline S.J., McClintock F. Describing uncertainties in single-sample experiments // *Mechanical Engineering*. 1953. V. 75. № 1. P. 3–8.
26. Rajesh R.S., Naveen P.T., Krishnakumar K., Ranjith S.K. Dynamics of single droplet impact on cylindrically-curved superheated surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. V. 101. P. 251–262.
27. Quintero E.S., Riboux G., Gordillo J.M. Splashing of droplets impacting superhydrophobic substrates // *J. Fluid Mech*. 2019. V. 870. P. 175–188.
28. Guo C., Zhao D., Sun Y., Wang M., Liu Y. Droplet impact on anisotropic superhydrophobic surfaces // *Langmuir*. 2018. V. 34. № 11. P. 3533–3540.
29. Ma J., Weisensee P.B., Shin Y.H., Chang Y., Tian J., King W.P., Miljkovic N. Water droplet impact on vibrating rigid superhydrophobic surfaces // *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. World Academy of Science Engineering and Technology. 2017. V. 4. № 4.
30. Granick S., Zhu Y., Lee H. Slippery questions about complex fluids flowing past solids // *Nature Materials*. 2003. V. 2. № 4. P. 221–227.
31. Rothstein J. Slip on superhydrophobic surfaces // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2010. V. 42. P. 89–109.
32. Wang M.J., Hung Y.L., Lin F.H., Lin S.Y. Dynamic behaviors of droplet impact and spreading: a universal relationship study of dimensionless wetting diameter and droplet height // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009. V. 33. № 7. P. 1112–1118.
33. Chae J.Y., Bharat B. Dynamic effects of bouncing water droplets on superhydrophobic surfaces // *Langmuir*. 2008. V. 24. № 12. P. 6262–6269.
34. Bird J.C., Dhiman R., Kwon H.M., Varanasi K.K. Reducing the contact time of a bouncing drop // *Nature*. 2013. V. 503. № 7476. P. 385–388.
35. Rioboo R., Tropea C., Marengo M. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces // *Experiments in Fluids*. 2001. V. 33. P. 112–124.
36. Chandra S., Avedisian C. On the collision of a droplet with a solid surface. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society. 1991.
37. Scheller B.L., Bousfield D.W. Newtonian drop impact with a solid surface // *AIChE J*. 1995. V. 41. № 6. P. 1357–1367.
38. Crick C.R., Parkin I.P. Water droplet bouncing a definition for superhydrophobic Surfaces // *Chemical Communications*. 2011. V. 47. № 44. P. 59–112.
39. Shiri S., Bird J.C. Heat exchange between a bouncing drop and a superhydrophobic substrate // *Proc. Natural Academy of Science, United States of America*. 2017.
40. Jiajun J., Zhigang Y., Xian Y., Zheyang J. Experimental investigation of the impact and freezing processes of a hot water droplet on an ice surface // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31. № 5. P. 57–107.
41. Liu Y., Chen X., Xin J.H. Can superhydrophobic surfaces repel hot water? // *J. Materials Chemistry*. 2009. V. 19. P. 5602–5611
42. Etienne G., Jean-Pierre H., Luc P., Catalin D.M. *Drop-Surface Interactions*. Springer. 2014. V. 456.

43. *Srinivasan S., Praveen V.K., Philip R., Ajayaghosh A.* Bioinspired superhydrophobic coatings of carbon nanotubes and linear  $\pi$  systems based on the bottom-up self-assembly approach // *Angewandte Chemie*. 2008. V. 120. № 31. P. 5834–5838.
44. *Dash S., Alt M.T., Garimella S.V.* Hybrid surface design for robust superhydrophobicity // *Langmuir*. 2011. V. 28. № 25. P. 9606–9615.

*Перевод с англ. Е.А. Пушкаря*

## **Simultaneous Effect of Droplet Temperature and Surface Wettability on Single Drop Impact Dynamics**

**P. T. Naveen<sup>a, #</sup>, R. R. Simhadri<sup>a, ##</sup>, and S. K. Ranjith<sup>a, ###</sup>**

<sup>a</sup> *Micro/nanofluidics Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering Trivandrum, Trivandrum, Kerala, India – 695016*

<sup>#</sup>*e-mail: naveenpt.nite@gmail.com*

<sup>##</sup>*e-mail: rajeshsimhadri78@gmail.com*

<sup>###</sup>*e-mail: ranjith@cet.ac.in*

In this paper, the influence of the liquid droplet temperature on thermo-hydrodynamics of a single droplet impinging on surfaces having different hydrophobicities is experimentally investigated. Variation in the liquid temperature typically results in alteration of properties such as the density, the viscosity, the surface tension, and the enthalpy, consequently, the droplet dynamics gets to be modified. Employing high-speed imaging technique, the morphology and spreading pattern are investigated for water droplet collision on hydrophilic, hydrophobic and super-hydrophobic surfaces. The droplet deformation is monitored qualitatively and quantitatively for drops in the temperature range from 5 to 85°C and the Weber number between 14.5 and 160. It is observed that with an increase in the liquid temperature the spreading factor increases owing to the combined effect of reduction in the density, the surface tension, the viscosity and the contact angle of the solid surface. The differences in extension of droplets under the extreme temperatures for hydrophilic, hydrophobic and super-hydrophobic surfaces are noted to be 62.7, 27.76 and 20.52% respectively. At the low temperature, the surface tension force dominates and the Cassie–Baxter state prevails on a textured super-hydrophobic surface and the droplets bounce off. In contrast at elevated temperatures, the liquid–solid interface ruptures and liquid penetrates into the cavities and results in the Wenzel state. Furthermore, the drop which exhibits multiple bounces in the low temperature regime is found sticking on a super-hydrophobic substrate at the high droplet temperature irrespective of the Weber number.

*Key words:* droplet temperature, hydrophobic surfaces, droplet extension, droplet bouncing, Weber number