

УДК 532.529

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ОСАЖДЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ НА МОДЕЛЬ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2024 г. А. Ю. Вараксин^{1, 2, *}, Н. В. Васильев^{1, 2}, С. Н. Вавилов¹, Н. С. Зуб²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

* E-mail: varaksin_a@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

В работе предпринята попытка экспериментального изучения некоторых эффектов, наблюдаемых при гравитационном осаждении одной или двух капель на модель с полусферическим торцем при различных температурах. Путем покадрового анализа видеозаписей проанализированы особенности взаимодействия капель с поверхностью модели. Эксперименты показали, что в случае комнатных температур капли ($T_d = 25\text{--}27^\circ\text{C}$) и поверхности модели ($T_w = 25\text{--}27^\circ\text{C}$) процессы растекания и собирания второй капли проходят не на поверхности модели, а на поверхности первой капли, и сопровождаются повторным растеканием первой капли и ее повторным собиранием. В случае пониженных температур капли ($T_d = 7\text{--}9^\circ\text{C}$) и поверхности ($T_w = -3\text{...}+0.5^\circ\text{C}$) процесс собирания первой капли отсутствовал, а процесс растекания второй капли отличался от растекания первой капли. Полученные результаты призваны улучшить понимание механизма взаимодействия между каплями и поверхностью в процессе ударного замораживания и совершенствовать технологии защиты от обледенения.

DOI: 10.31857/S0040364424040105

ВВЕДЕНИЕ

Явления соударения переохлажденной капли воды с холодной поверхностью широко распространены в природных и технических процессах. Примером может служить процесс обледенения самолета [1, 2], вызываемый ударами и замерзанием переохлажденных капель воды на крыле, фюзеляже и воздухозаборнике, значительно снижающий подъемную силу и увеличивающий лобовое сопротивление. Аналогичным образом обледенение ветряных турбин или воздушных линий электропередачи в энергетическом секторе может привести к различным проблемам [3].

Для математического моделирования газокapельных потоков необходим учет многочисленных физических процессов, информация о каждом из которых влияет на достоверность модели [4–6]. Помимо собственно изучения тепло- и массообмена поверхности с газокapельным потоком большое значение приобретает изучение отдельных единичных процессов и актов. Среди таких процессов можно выделить: акт столкновения отдельной капли и стенки, столкновение

падающих и отраженных капель, конфигурацию (морфологию) растекающейся капли и многое другое.

Численные и экспериментальные результаты [7] показывают, что капля в процессе удара с охлажденной поверхностью растекается и собирается медленнее, чем при взаимодействии с поверхностью, имеющей температуру окружающей среды. Это приводит к эффекту снижения максимального диаметра растекания капли. Кроме того, в процессе ударного замораживания переохлажденной капли на холодной гидрофобной поверхности идентифицированы три различных сценария: полный отскок, частичный отскок и полная адгезия. Предложена унифицированная карта возможных сценариев отскока и адгезии в зависимости от числа Вебера, степени переохлаждения и угла смачивания для ударно замерзающего поведения капли.

Проведенные исследования посвящены, как правило, процессу соударения капли с плоской холодной стенкой. К настоящему времени имеется несколько исследований удара капель с на-

клонной холодной стенкой. В [8] изучено воздействие капли на супергидрофобную холодную стенку при разных углах удара и выявлен доминирующий фактор противообледенительной защиты. В [9] найдено, что время контакта и высота отскока капель, ударяющихся о холодную стенку, уменьшаются с увеличением угла удара. Показано, что за счет тангенциальной составляющей силы тяжести ширина капли перед отскоком увеличивается, а ее растяжение, наоборот, уменьшается. В [10] изучен отскок высокотемпературных капель оксида алюминия при ударе о холодную наклонную стенку твердотопливного ракетного двигателя. Обнаружено, что по мере увеличения угла от 10° до 45° наблюдаются три типа морфологии отскакивающих капель: режим «острых углов», режим одиночного «хвоста» и режим «сердце». С уменьшением размера капли два первых режима исчезают. Найдено, что с увеличением угла падения безразмерное время контакта капли, получаемое нормированием на отношение диаметра капли к ее скорости, уменьшается. Также установлена зависимость между безразмерным временем контакта и нормальным числом Вебера капли.

Анализ работ показывает, что к настоящему времени отсутствуют исследования, в которых изучены особенности последовательного осаждения одиночных капель на поверхность.

Целью настоящей работы является анализ некоторых особенностей гравитационного осаждения одной или двух водяных капель на модель с полусферическим торцем при различных температурах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. В качестве рабочего участка (модели) использовался цилиндр 1 диаметром 20 мм и длиной 35 мм с передней кромкой в форме полусферы из дюрала Д16Т.

Температура капель воды варьировалась в диапазоне $7\text{--}27^\circ\text{C}$, температура поверхности модели — от -3 до 27°C . Температура в комнате составляла $25\text{--}27^\circ\text{C}$. Требуемая температура модели достигалась с помощью охлаждения в теплообменном аппарате 2 по типу радиатора для силового диода с использованием в качестве теплоносителя этиленгликоля. Теплоноситель сбрасывал отводимое от модели тепло во втором контуре, представляющем собой специально изготовленную холодильную установку.

Капли дистиллированной воды диаметром $d_d = 3.0\text{--}3.1$ мм создавались с помощью специального генератора капель 3, расположенного на расстоянии 100 мм от критической точки мо-

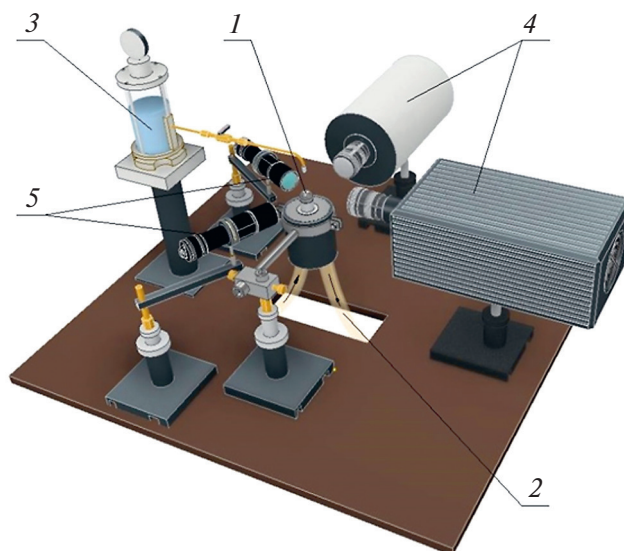


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — модель, 2 — контур охлаждения рабочего участка, 3 — генератор капель, 4 — скоростные видеокамеры, 5 — фонари подсветки.

дели. Варьирование температуры капли и расстояния между генератором капель и критической точкой модели позволяет изменять числа Вебера и Рейнольдса в следующих диапазонах: $We = 35\text{--}140$ и $Re = 2000\text{--}5000$.

Время между генерацией первой и второй капли выбиралось таким образом, чтобы оно заведомо превышало время «полного цикла» (момент удара, растекание, собирание, колебания и др.) взаимодействия первой капли с поверхностью (это время в рассматриваемых случаях лежит в диапазоне $10\text{--}100$ мс). Для описываемых экспериментов указанное время составляло $200\text{--}1000$ мс. Необходимо отметить, если это время будет меньше (или сравнимо) времени взаимодействия первой капли (такие случаи нередки на практике), то процесс осаждения второй капли изменится и это требует дополнительного изучения.

Измерения температуры модели и воды в генераторе капель производились с помощью хромель-копелевой термопары.

В двух взаимно перпендикулярных плоскостях проводилась синхронизированная скоростная видеосъемка взаимодействия капель с поверхностью рабочего участка на видеокамеры ВидеоСпринт/C/G4 и ВидеоСпринт/G2 4 с частотой 2 кГц и временем экспозиции 500 мкс, что позволяло получать наиболее полную информацию о процессе. Синхронизация камер осуществлялась с помощью импульса, создаваемого генератором марки Г6-53. Подсветка

для улучшения качества видеосъемок производилась двумя мощными светодиодными фонарями Fenix TK20R 5 с максимальной яркостью 1000 люмен.

ВОЗМОЖНОСТИ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация особенностей взаимодействия капель с поверхностью тела осуществлялась путем видеосъемки. Покадровый анализ видеозаписей позволяет получать обширную информацию о кинематических, геометрических и временных параметрах, определяющих процесс взаимодействия капель с поверхностью модели и между собой. К таковым относятся: 1) скорость движения падающих капель, 2) диаметр падающих капель, 3) скорость растекания капли, 4) максимальный диаметр при растекании, 5) скорость собирания капли, 6) максимальная высота капли после собирания, 7) деформация (изменение морфологии) капли при ее взаимодействии с поверхностью тела и с последующими каплями, 8) время растекания капли, 9) время собирания капли, 10) время осцилляций поверхности капель после завершения процесса взаимодействия и др.

Были выполнены эксперименты на предмет установления особенностей гравитационного осаждения капель на поверхность модели и взаимодействия первой и второй капель при различных температурах. Осаждение капель осуществлялось в непосредственной близости от критической точки модели, что препятствовало их стеканию с поверхности модели вследствие действия силы тяжести. В силу кратковременности изучаемых процессов предполагалось, что испарение капли в процессе ее движения и взаимодействия с поверхностью модели пренебрежимо мало. Анализируемые ниже данные получены при близких значениях чисел Вебера We и Рейнольдса Re .

Взаимодействие капель с поверхностью модели и между собой (случай комнатной температуры). На рис. 2 приведены 10 выборочных кадров видеозаписи, иллюстрирующие процесс последовательного соударения двух капель с моделью.

Рис. 2а соответствует моменту касания первой капли ($d_{d1} = 3.0$ мм) поверхности модели ($\tau_1 = 0$). Далее начинается процесс растекания капли, при котором часть ее кинетической энергии переходит в потенциальную энергию поверхностного натяжения. Процесс интенсивного растекания капли показан на рис. 2б. Уже через $\tau_1 = 1$ мс диаметр растекания капли составляет $d_{d1} = 6.4$ мм. Далее процесс растекания капли замедляется и формируется характерный ободок по ее периметру (рис. 2в), внутренний фронт ко-

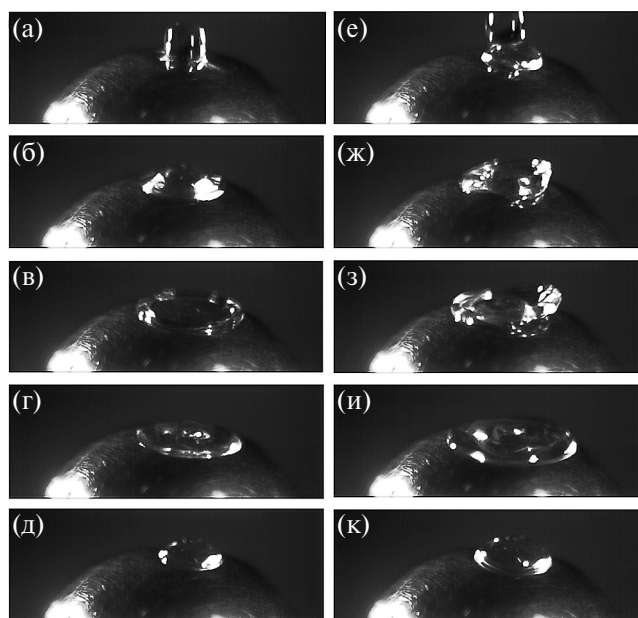


Рис. 2. Иллюстрация процесса последовательного соударения двух капель с поверхностью модели с полусферическим торцем ($d_d = 3.0$ мм, $V_d = 1.3$ м/с, $We = 70$, $Re = 4300$, $T_d = 25^\circ\text{C}$, $T_w = 27^\circ\text{C}$): (а) – $\tau_1 = 0$, (б) – 1 мс, (в) – 3.5, (г) – 7, (д) – 31.5, (е) – $\tau_2 = 0$, (ж) – 2, (з) – 3, (и) – 9.5, (к) – 67.5.

торого впоследствии начинает распространяться к центру капли. Процесс растекания капли завершается через $\tau_1 = 7$ мс после касания поверхности. Максимальный диаметр растекания капли составляет $d_{d1\max} = 7.8$ мм. Затем начинается процесс собирания капли, сопровождающийся характерным волновым процессом на ее поверхности и последующим уменьшением диаметра растекания (рис. 2г). На рис. 2д приведен момент окончания процесса собирания капли ($d_{df} = 4.8$ мм), при котором заканчивается колебательный процесс на ее поверхности.

На рис. 2е показан момент касания второй капли ($d_{d2} = 3.0$ мм) поверхности первой капли ($\tau_2 = 0$). Время между касанием поверхности модели первой капли и прилетом второй капли составляло 552 мс. Процесс растекания и последующего собирания второй капли носит качественно отличный характер.

Так, процесс интенсивного растекания второй капли происходит не на поверхности модели, а на первой осевшей капле (рис. 2ж). Передача импульса от второй капли к первой приводит к повторному растеканию первой капли на поверхности модели. Процесс растекания второй капли на поверхности первой происходит с нарушением осевой симметрии. По-видимому, это связано с тем, что соударение капель не является строго центральным (рис. 2е). В процессе рас-

текания второй капли также формируется характерный ободок по ее периметру (рис. 2з), стекающий по поверхности первой капли и распространяющийся за ее границу. Следствием этого является большое значение максимального диаметра растекания двух капель $d_{d2\max} = 9.4$ мм (рис. 2и). Затем начинается процесс собирания двух капель, также сопровождающийся характерным волновым процессом и последующим уменьшением диаметра растекания. На рис. 2к приведен момент окончания процесса собирания двух капель ($d_{df} = 6.2$ мм). Отметим, что в отличие от случая собирания одной капли колебательный процесс продолжается значительно дольше (сотни миллисекунд) после процесса собирания двух капель.

Взаимодействие капель с поверхностью модели и между собой (случай пониженных температур). На рис. 3 приведены 10 выборочных кадров видеозаписи, иллюстрирующие процесс последовательного соударения двух капель с моделью.

На рис. 3а показан момент касания первой капли ($d_{d1} = 3.0$ мм) поверхности модели ($\tau_1 = 0$). Далее начинается растекание капли, интенсивная фаза которого приведена на рис. 3б. Уже через $\tau_1 = 1$ мс диаметр растекания капли составляет $d_{d1} = 5.8$ мм, что достаточно близко к первому рассмотренному случаю. Далее растекание капли замедляется и формируется, как и в случае теплой капли, характерный ободок по ее пе-

риметру (рис. 3в), внутренний фронт которого впоследствии начинает распространяться к центру капли. Процесс растекания капли завершается через $\tau_1 = 6.5$ мс после касания поверхности. Максимальный диаметр капли составляет $d_{d1\max} = 9.4$ мм.

Отметим, что полученные данные по характерным временам растекания первой капли и максимальному диаметру ее растекания хорошо согласуются с данными работы [7] для близких экспериментальных условий (капля воды, ее диаметр, скорость соударения с поверхностью).

Дальнейшее поведение капли происходило по совершенно иному (по сравнению с первым случаем) сценарию. В экспериментах наблюдался волновой процесс распространения внутреннего фронта ободка к центру растекшейся капли (рис. 3г), но при этом процесс собирания капли абсолютно отсутствовал (рис. 3д). По-видимому, дальнейшее расхолаживание капли при растекании по охлажденной поверхности приводит к ослаблению приповерхностных межмолекулярных связей и делает невозможным процесс ее собирания. Вероятно, что в процессе растекания охлажденной капли происходит ее отвердевание, вследствие чего капля «вмораживается» в поверхность. Указанные предположения требуют дополнительного изучения и проведения необходимых оценок.

На рис. 3е показан момент касания второй капли ($d_{d2} = 3.0$ мм) поверхности первой капли ($\tau_2 = 0$). Время между касанием поверхности модели первой капли и прилетом второй капли составляло 281 мс.

Растекание второй капли происходит несколько отличным образом. Это связано, по-видимому, с тем, что оно происходит не на поверхности модели, а на поверхности первой капли. Интенсивная фаза растекания второй капли показана на рис. 3ж. Уже через $\tau_2 = 1$ мс диаметр растекания второй капли составляет $d_{d2} = 6.5$ мм, что достаточно близко к значению для первой капли. Далее процесс растекания второй капли замедляется и формируется, как и в случае первой капли, характерный ободок по ее периметру (рис. 3з), внешний фронт которого начинает впоследствии стекать с первой капли (рис. 3и). Стеkanie ободка второй капли сопровождается его деформированием и приводит к формированию отличной от окружности формы периметра растекшейся капли. Растекание второй капли завершается через $\tau_2 = 4.5$ мс, а ее максимальный диаметр составляет $d_{d2\max} = 11.7$ мм.

Отметим, что процесс собирания второй капли также отсутствовал. На рис. 3к приведен момент окончательного завершения волнового процесса на поверхности.

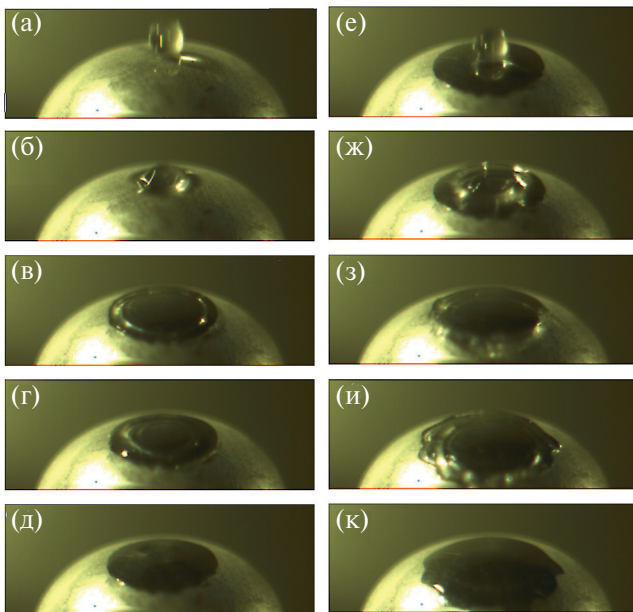


Рис. 3. Иллюстрация процесса последовательного соударения двух капель с поверхностью модели с полусферическим торцем ($d_d = 3.0$ мм, $V_d = 1.3$ м/с, $We = 68$, $Re = 2600$, $T_d = 7^\circ\text{C}$, $T_w = -0.7^\circ\text{C}$): (а) — $\tau_1 = 0$, (б) — 1 мс, (в) — 4, (г) — 6.5, (д) — 10.5, (е) — $\tau_2 = 0$, (ж) — 1, (з) — 3, (и) — 4.5, (к) — 32.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продemonстрирована возможность детального анализа кинематических, геометрических и временных характеристик процесса последовательного осаждения одной и двух капель на модель с использованием скоростной видеосъемки.

В случае комнатных температур капли и поверхности модели процессы растекания и собирания второй капли происходят отличным образом от соответствующих процессов для первой капли. Эти различия предопределяются тем, что растекание и собирание второй капли проходят не на поверхности модели, а на поверхности первой капли и сопровождаются повторным растеканием первой капли и ее повторным собиранием.

В случае пониженных температур капли и поверхности процесс собирания первой капли отсутствовал. Что касается второй капли, то ее растекание также отличалось от растекания первой капли. Как и в случае комнатной температуры, это различие обуславливается тем обстоятельством, что растекание второй капли происходит не на поверхности модели, а на поверхности первой капли.

Обнаруженные в экспериментах различия в процессах осаждения первой и последующих капель должны учитываться в имеющихся и перспективных математических моделях многочисленных процессов (в том числе и обледенения), сопровождающих обтекание тел газокапельными потоками.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00734.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao Y., Wu Z., Su Y., Xu Z. Aircraft Flight Characteristics in Icing Conditions // Prog. Aerosp. Sci. 2015. V. 74. P. 62.
2. Zhang X., Wu X.M., Min J.C. Aircraft Icing Model Considering Both Rime Ice Property Variability and Runback Water Effect // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 104. P. 510.
3. Dalili N., Edrisy A., Carriveau R. A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance // Renew. Sustain. Energy Rev. 2009. V. 13. P. 428.
4. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
5. Вараксин А.Ю. Двухфазный пограничный слой с твердыми частицами // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789.
6. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков с твердыми частицами, каплями и пузырями (обзор) // ТВТ. 2023. Т. 61. № 6. С. 926.
7. Chang S., Qi H., Zhou S., Yang Y. Experimental Study on Freezing Characteristics of Water Droplets on Cold Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 194. 123108.
8. Ding B., Wang H., Zhu X., Chen R., Liao Q. Water Droplet Impact on Superhydrophobic Surfaces with Various Inclinations and Supercooling Degrees // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 138. P. 844.
9. Wang X., Tang Z., Xu B. Anti-freezing Characteristics of Water Droplet Impinging the Superhydrophobic Surface: an Experimental and Predictive Study // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 566. 150717.
10. Zhu G., Li J., Li Z., Li K., Hu B., Yan O. Experimental Study on the Rebound Characteristics of High Temperature Alumina Droplets Impacting on an Inclined Cold Water // Acta Astronautica. 2022. V. 198. P. 1.