

УДК 532.529

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ КАПЕЛЬ НА МОДЕЛЬ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦЕМ

© 2021 г. А. Ю. Вараксин^{1, 2, *}, Н. В. Васильев^{1, 2}, С. Н. Вавилов¹, К. А. Ходаков¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

*E-mail: varaksin_a@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2020 г.

После доработки 15.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

В работе предпринята попытка экспериментального изучения некоторых эффектов, наблюдаемых при гравитационном осаждении капель на модель с полусферическим торцем. Путем покадрового анализа видеозаписей проанализированы особенности взаимодействия капель с поверхностью модели. Получены данные по скоростям и размерам как мелких (вторичные капли), так и крупных (осколки) капель в случае высокой (близкой к динамической температуре Лейденфроста) температуры модели. Выявлен эффект образования капель, имеющих околонулевые скорости вблизи поверхности модели, в результате коагуляции и обмена импульсом падающих и отраженных капель. Получены данные по снижению коэффициента восстановления скорости с ростом инерционности капля в случае их взаимодействия с криволинейными поверхностями. Обнаружен эффект несовпадения точек касания и отскока (отрыва) капля от поверхности, усиливающийся с ростом размера капля.

DOI: 10.31857/S0040364421050203

ВВЕДЕНИЕ

Газокапельные методы охлаждения различных поверхностей находят применение во многих отраслях промышленности [1–3]. Проблема защиты различных летательных аппаратов, движущихся в дождевой атмосфере, также предполагает исследования газокапельных потоков [4–6]. Присутствие капля в потоке может приводить к значительному (порой многократному) увеличению тепловых потоков, а также к эрозионному износу обтекаемой поверхности. Этим обусловлен интерес многочисленных групп исследователей к изучению взаимодействия движущихся капля с высокотемпературными твердыми стенками.

Для математического моделирования газокапельных потоков необходим учет многочисленных физических процессов, информация о каждом из которых влияет на достоверность модели. Помимо собственно изучения тепло- и массообмена поверхности с газокапельным 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 капля, конфигурацию растекающейся капли и многое другое.

Имеется значительное количество исследований, в которых авторы изучали особенности падения, как правило, одиночных капля на горизонтальную поверхность в большом диапазоне

изменения определяющих параметров (см. [7–12]). Влияние угла наклона поверхности на столкновение капли с поверхностью исследовано, например, в [13]. Особенности процесса столкновения двух следующих друг за другом капля со стенкой изучены в работе [14].

Одним из важнейших факторов, определяющих процесс осаждения капля, является нагрев поверхности, температура которой может быть ниже либо выше температуры Лейденфроста. Данная температура разделяет режимы между переходным и пленочным режимами кипения капли, лежащей на поверхности. При температуре поверхности, равной температуре Лейденфроста, между каплей и стенкой начинает образовываться тонкая прослойка пара, препятствующая осаждению капли на поверхность. Величина данной температуры определялась многими исследователями на протяжении десятилетий [15].

Все осложняется в случае капля, падающих на нагретую поверхность с некоторой скоростью. Наличие импульса у капли увеличивает температуру Лейденфроста. Так называемая динамическая температура Лейденфроста, превышающая соответствующую статическую температуру, была предложена в работе [16] и является минимальной температурой стенки, при которой формирующийся паровой слой заставляет падающую каплю отскакивать, не разбиваясь [17]. Экспериментально по-

казано, что динамическая температура Лейденфроста превышает температуру кипения жидких топлив на 90–120°C, а для воды на 180–210°C [18]. В [13] исследовано влияние скорости удара и наклона стенки на динамическую температуру Лейденфроста, показано снижение данной характеристики с увеличением скорости падения и уменьшением угла удара.

Существует большое количество работ, где изучены различные аспекты столкновения капель между собой (см. обзор [19]). Необходимо отметить, что процесс столкновения капель определяется такими безразмерными критериями, как числа Вебера We , Рейнольдса Re , построенные по относительной скорости и диаметру мелкой капли, и Онезорге $Oh = \sqrt{We}/Re$. Помимо указанных критериев, на процесс столкновения двух капель оказывает влияние отношение их диаметров и прицельный параметр. В [20, 21] в зависимости от конкретных значений определяющих параметров (число Вебера, прицельный параметр и др.) найдены области существования различных режимов межкапельных столкновений: отскок, слияние (коагуляция), слияние с последующим “растягивающим” и “возвратным” разделением.

Целью настоящей работы является анализ некоторых особенностей гравитационного осаждения водяных капель на нагретую модель с полусферическим торцем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на простой экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

В качестве модели использовался медный цилиндр 1 диаметром 20 мм и длиной 82 мм с передней кромкой в форме полусферы. Модель погружалась на 60 мм в нагреватель 2 для разогрева. Мощность нагрева регулировалась с помощью автотрансформатора (модель АОСН-8-220-82-УХЛ4) и не превышала 300 Вт.

Температура поверхности модели варьировалась в диапазоне 150–305°C. Предполагалось (согласно данным [18]), что для верхней границы указанного

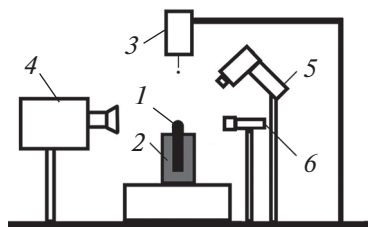


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель, 2 – нагреватель с теплоизоляцией, 3 – генератор капель, 4 – скоростная видеокамера, 5 – тепловизор, 6 – подсветка.

температурного диапазона температура поверхности будет приближаться к динамической температуре Лейденфроста (280–310°C).

Капли дистиллированной воды диаметрами $d_d = 0.4–2.8$ мм создавались с помощью специального генератора капель 3, расположенного на расстоянии 95 мм от критической точки модели.

Для удаления окислов меди и прочих загрязнений поверхности модели перед проведением каждого эксперимента медная полусфера шлифовалась. В результате шлифования поверхность модели соответствовала шестому классу точности. Краевой угол смачивания поверхности измерялся методом одиночной капли и был равен приблизительно 60°.

Видеосъемка процесса взаимодействия капель с поверхностью нагретой медной полусферы осуществлялась с использованием высокоскоростной камеры 4 (модель Photron Fastcam SA4) с частотой кадров 5 кГц и экспозицией 20 мкс.

Измерения температуры модели производились с помощью тепловизора 5 (модель Satir E8) и дублировались хромель-копелевой термопарой. Для улучшения качества видеосъемки использовалась подсветка 6.

ВОЗМОЖНОСТИ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация особенностей взаимодействия капель с поверхностью тела осуществлялась путем видеосъемки. Покадровый анализ видеозаписей позволяет получать обширную информацию о следующих основных кинематических, геометрических и временных параметрах, определяющих процесс взаимодействия капель с поверхностью модели: 1) скорости движения падающих капель; 2) скорости движения отраженных капель; 3) скорости распыла мелких вторичных капель; 4) скорости разлета осколков (крупные капли); 5) диаметре падающих капель; 6) деформации (изменении размера) капли при ее взаимодействии с поверхностью тела; 7) деформации отраженных капель; 8) диаметре мелких вторичных капель; 9) диаметре осколков (крупные капли); 10) времени взаимодействия капель со стенкой; 11) периоде осцилляции отраженных капель и др.

Деформация и дробление капель. В отличие от случая осаждения твердых частиц, когда их разрушение начинается при выполнении определенных условий (относительно высокие скорости, низкая прочность материала частиц и др.), при осаждении капель столкновения их между собой и с поверхностью модели, как правило, сопровождаются процессами деформации и дробления.

На рис. 2 и 3 представлены выборочные кадры видеосъемки взаимодействия крупных ка-

пель ($d_d = 2.8$ мм) с поверхностью модели при различных температурах последней.

В случае низкой температуры модели ($T_W = 175^\circ\text{C}$) процесс взаимодействия “капля—поверхность модели” состоит из следующих этапов: движение капли к модели (рис. 2а), касание ее поверхности (рис. 2б), деформирование (растекание) капли (рис. 2в, 2г), собирание капли (рис. 2д, 2е), отрыв капли от поверхности (рис. 2ж), движение капли от модели (рис. 2з).

При растекании капли ее кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию поверхностного натяжения. Данный процесс заканчивается, когда диаметр “расплющенной” капли принимает максимальное значение (рис. 2г). Для условий настоящих экспериментов он равнялся $d_{\max} = 8.5$ мм. С этого момента начинается процесс собирания капли под действием сил поверхностного натяжения.

Можно сделать вывод о том, что собирание капли на приведенных кадрах видеозаписи (рис. 2) свидетельствует в пользу того, что в данном случае температура поверхности ($T_W = 175^\circ\text{C}$) не достигала динамической температуры Лейденфроста.

В случае высокой ($T_W = 305^\circ\text{C}$) температуры модели (рис. 3) процесс взаимодействия “капля—поверхность модели” протекает совершенно иным образом и состоит из следующих этапов: движение

капли к модели (рис. 3а), касание ее поверхности (рис. 3б), деформирование капли (рис. 3в), начало фрагментации капли и распыла мелких вторичных капель (рис. 3г, 3д), распыл мелких вторичных капель и формирование крупных осколков (рис. 3е, 3ж), отскок осколков от поверхности (рис. 3з).

Рост температуры поверхности приводит к тому, что при деформировании капли и ее утончении начинается процесс интенсивного вскипания, приводящий к формированию и распылу мелких вторичных капель — брызг.

Сделаем вывод о том, что интенсивный процесс “разбивания” капли на приведенных кадрах видеозаписи (рис. 3) свидетельствует в пользу того, что в данном случае температура поверхности ($T_W = 305^\circ\text{C}$) близка к динамической температуре Лейденфроста.

Для большей наглядности на рис. 4 приведен выборочный кадр видеозаписи (рис. 3), где области распыла вторичных капель и образования крупных брызг показаны в увеличенном масштабе. Отсчет времени соответствует отсчету времени рис. 3.

При увеличении размера выборочных кадров видеозаписи удалось произвести некоторые оценки размера и скорости вторичных капель. Было выявлено, что их движение осуществляется по нормали к поверхности модели, а диаметр и скорость лежат в

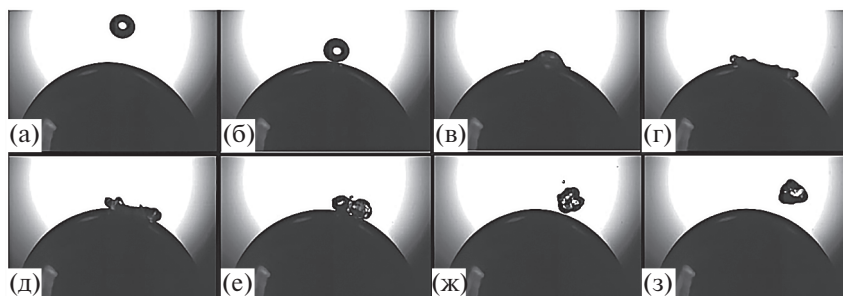


Рис. 2. Иллюстрация процесса отскока капли при падении на модель с полусферическим торцем ($d_d = 2.8$ мм, $V_d = 1.37$ м/с, $We = 72$, $T_W = 175^\circ\text{C}$): (а) — $\tau = 0$ мс, (б) — 2, (в) — 3, (г) — 7.6, (д) — 9.8, (е) — 12.4, (ж) — 15.6, (з) — 22.8.

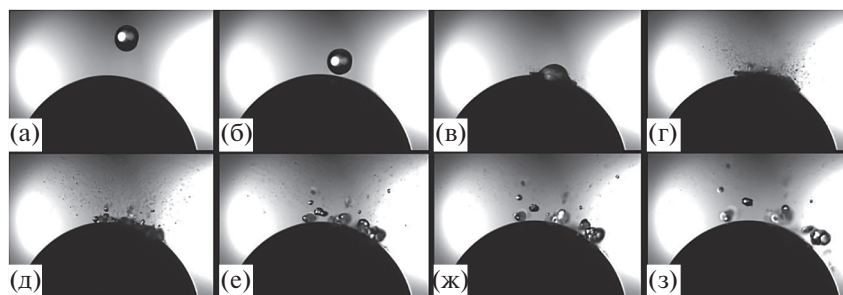


Рис. 3. Иллюстрация процесса дробления капли при падении на модель с полусферическим торцем ($d_d = 2.8$ мм, $V_d = 1.37$ м/с, $We = 72$, $T_W = 305^\circ\text{C}$): (а) — $\tau = 0$ мс, (б) — 2, (в) — 3.2, (г) — 5, (д) — 6.6, (е) — 9, (ж) — 11, (з) — 15.

диапазонах $d_{ds} = 0.05\text{--}0.2$ мм и $V_{ds} = 2\text{--}2.5$ м/с соответственно.

Описанный выше процесс формирования и распыла мелких вторичных капель нарушает существующие приповерхностные межмолекулярные связи и делает невозможным процесс сближения капли как единого целого, что приводит к ее дроблению на осколки (крупные капли). Эксперименты показали, что движение осколков осуществляется практически вдоль поверхности модели, а диаметр и скорость лежат в диапазонах $d_{dl} = 0.4\text{--}1.0$ мм и $V_{dl} = 0.3\text{--}0.5$ м/с соответственно.

Коагуляция капель. В отличие от случая твердых частиц при осаждении каплей рост вероятности практических столкновений будет начинаться при относительно небольших концентрациях и может приводить как к деформации поверхности каплей, так и к их слиянию (коагуляции).

Проведенные эксперименты выявили два основных физических механизма, оказывающих влияние на процесс столкновения каплей вблизи поверхности модели:

1) процесс деформации капли при столкновении с моделью увеличивает как время ее нахождения на поверхности, так и “эффективный” размер вследствие растекания, что способствует росту сечения (ядра) столкновений при прочих равных условиях;

2) при близком к центральному (малый прицельный параметр) столкновению между падающими и отраженными каплями, имеющими схожие размеры и скорости, происходит их коагуляция. В результате образуется “суммарная” капля с очень малой (близкой к нулю) скоростью. Это приводит к росту сечения столкновений, так как суммарная

капля находится в течение длительного времени (практически левитирует) вблизи поверхности модели и является своеобразной мишенью как для падающих, так и для отраженных капель.

Наглядной иллюстрацией последнего из упомянутых факторов может служить рис. 5, где приведены выборочные кадры видеозаписи процесса столкновения падающей и отраженной каплей.

Весь процесс слияния падающей и отраженной каплей можно разбить на несколько этапов: движение обеих каплей к модели (рис. 5а), касание первой (ставшей впоследствии отраженной) каплей поверхности и ее деформирование (рис. 5б–5г), столкновение падающей и отраженной каплей и их коагуляция (рис. 5д), столкновение суммарной капли с поверхностью и ее отскок (рис. 5е, 5ж), движение суммарной капли от модели (рис. 5з).

Собирание первой и суммарной каплей на приведенных кадрах видеозаписи (рис. 5) свидетельствует в пользу того, что в данном случае температура поверхности ($T_W = 295^\circ\text{C}$) не достигала динамической температуры Лейденфроста.

Несколько слов о количественных характеристиках. Диаметры первой (находящейся ближе к модели) и второй из показанных на рис. 5а каплей равны $d_{d1} = 0.45$ и $d_{d2} = 0.55$ мм соответственно. Обе капли имеют одинаковую начальную скорость, т.е. $V_{d1} = V_{d2} = 1.44$ м/с.

Необходимо отметить, что первая капля теряет свой импульс в процессе столкновения с поверхностью и ее скорость становится уже существенно меньше при столкновении со второй каплей. Вследствие этого она тормозит вторую каплю не так сильно как могла бы. В процессе коагуляции первой и второй каплей образуется суммарная капля диаметром $d_{d\Sigma} = 0.63$ мм (рис. 5е, 5ж), также

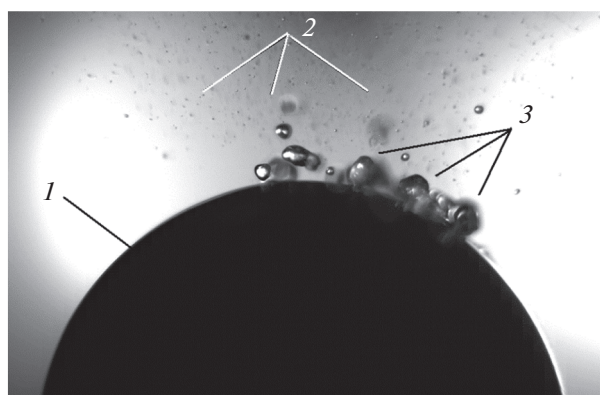


Рис. 4. Иллюстрация процессов распыла мелких вторичных капель и образования крупных осколков при падении крупной капли на модель с полусферическим торцем ($d_d = 2.8$ мм, $V_d = 1.37$ м/с, $We = 72$, $T_W = 305^\circ\text{C}$, $\tau = 8.4$ мс): 1 – поверхность модели, 2 – область распыла мелких вторичных капель, 3 – область формирования крупных осколков (брызг).

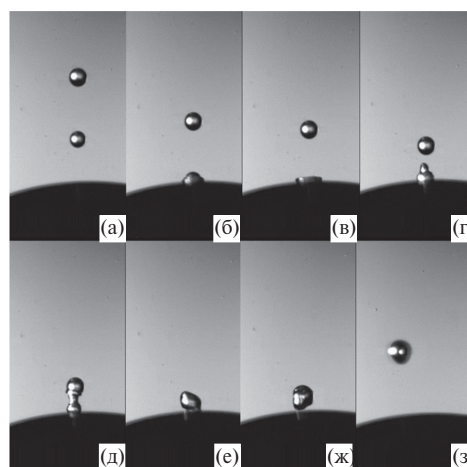


Рис. 5. Иллюстрация процесса коагуляции падающей и отраженной каплей ($T_W = 295^\circ\text{C}$): (а) – $\tau = 0$ мс, (б) – 1, (в) – 1.2, (г) – 1.6, (д) – 1.8, (е) – 2.4, (ж) – 3.8, (з) – 12.6.

взаимодействующая с моделью и передающая ей свой импульс. Измеренная скорость движения суммарной капли от модели $V_{\Sigma} \approx 0.2$ м/с (рис. 5з).

Коэффициент восстановления скорости. Коэффициент восстановления скорости является параметром, определяющим передачу импульса и энергии от частицы (или капли) к телу. Из этого следует, что коэффициент восстановления скорости характеризует интенсивность всех видов воздействий (силовое, тепловое, эрозионное), сопровождающих обтекание тел двухфазными потоками. Покадровый анализ видеосъемки позволяет осуществлять наблюдение за движением отдельных капель при их падении на тело, деформировании и последующем отскоке.

Известно, что основными параметрами, определяющими величину коэффициента восстановления скорости, являются угол удара частицы о поверхность, ее скорость, а также физико-механические свойства материала частицы и тела [22].

Также известно, что соударение твердых частиц с поверхностью представляет собой сложный физический процесс, сопровождающийся деформацией поверхности частицы и стенки, а также выделением тепла. Обычный диапазон [23] определяемых эмпирическим путем коэффициентов восстановления нормальной скорости для жесткой стенки (из металла) лежит в области $k_n = 0.7-0.8$ (материал частиц – стекло), а в случае “мягкой” стенки имеет меньшее значение $k_n = 0.5$. Это снижение происходит вследствие больших величин упругих деформаций материала стенки и, как следствие, большей потери импульса частиц.

В случае движения капель все усложняется. Даже в случае, когда капля восстанавливает свою форму после соударения, коэффициент восстановления скорости существенно меньше из-за увеличения потери импульса по причине большой длительности взаимодействия капель с поверхностью. Настоящие эксперименты показали, что коэффициент восстановления скорости падал с ростом размера капель. Так, для капель с $d_d = 0.4-0.65$ мм при длительности их взаимодействия $\tau_w = 0.8-1.4$ мс он равнялся $k_n = 0.35-0.5$. Для самых крупных (из использованных в экспериментах) капель $d_d = 2.8$ мм время взаимодействия с поверхностью увеличилось до $\tau_w = 12-13$ мс при снижении коэффициента восстановления скорости до $k_n = 0.15-0.2$.

Важной особенностью поведения капель является несовпадение точки касания поверхности модели при падении капли и точки отрыва при ее отскоке. Вероятно, отмеченная особенность оказывает влияние на величину коэффициента восстановления скорости.

Наглядной иллюстрацией сказанного могут служить рис. 6 и 7, где приведены выборочные кадры видеозаписи процесса отскока относительно мелкой и крупной капель соответственно.

В случае относительно мелкой частицы процесс взаимодействия капли с поверхностью можно разбить на такие этапы: движение капли к модели (рис. 6а), касание ее поверхности (рис. 6б), растекание капли (рис. 6в, 6г), собирание капли (рис. 6д, 6е), отрыв капли от поверхности (рис. 6ж), движение капли от модели (рис. 6з).

Сравнивая рис. 6б и 6ж, можно сделать вывод о том, что точка касания капель поверхности модели и точка отскока отстоят друг от друга на некоторое расстояние (для условий данных экспериментов оно равно 2 мм).

Собирание капель после ее растекания на приведенных кадрах видеозаписи (рис. 6) свидетельствует в пользу того, что в данном случае температура поверхности ($T_W = 235^\circ\text{C}$) не достигала динамической температуры Лейденфроста.

В случае отскока крупной капли (рис. 7) процесс протекает отличным образом. Взаимодействие крупной капли с поверхностью также можно разбить на несколько этапов: движение капли к модели (рис. 7а), касание ее поверхности (рис. 7б), растекание капли (рис. 7в–7д), стекание капли, сопровождающееся ее вскипанием (рис. 7е, 7ж), отрыв и движение капли от модели (рис. 7з).

Отсутствие режима пленочного кипения капли на приведенных кадрах видеозаписи (рис. 7) свидетельствует в пользу того, что в данном случае темпе-

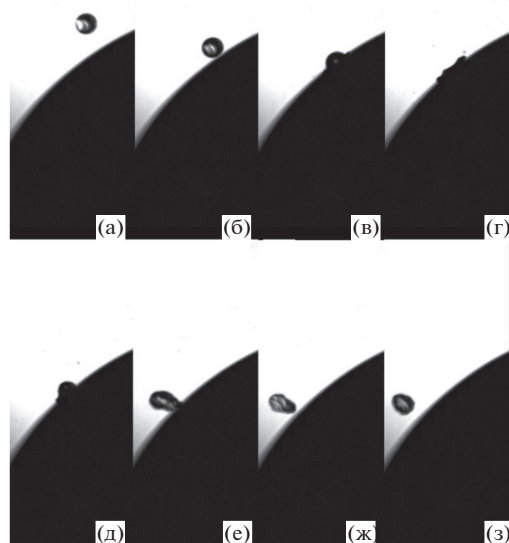


Рис. 6. Иллюстрация процесса отскока относительно мелкой капли при падении на модель с полусферическим торцом ($d_d = 0.73$ мм, $V_d = 1.28$ м/с, $We = 16$, $T_W = 235^\circ\text{C}$): (а) – $\tau = 0$ мс, (б) – 0.6, (в) – 1, (г) – 1.6, (д) – 2, (е) – 3, (ж) – 3.4, (з) – 3.6.

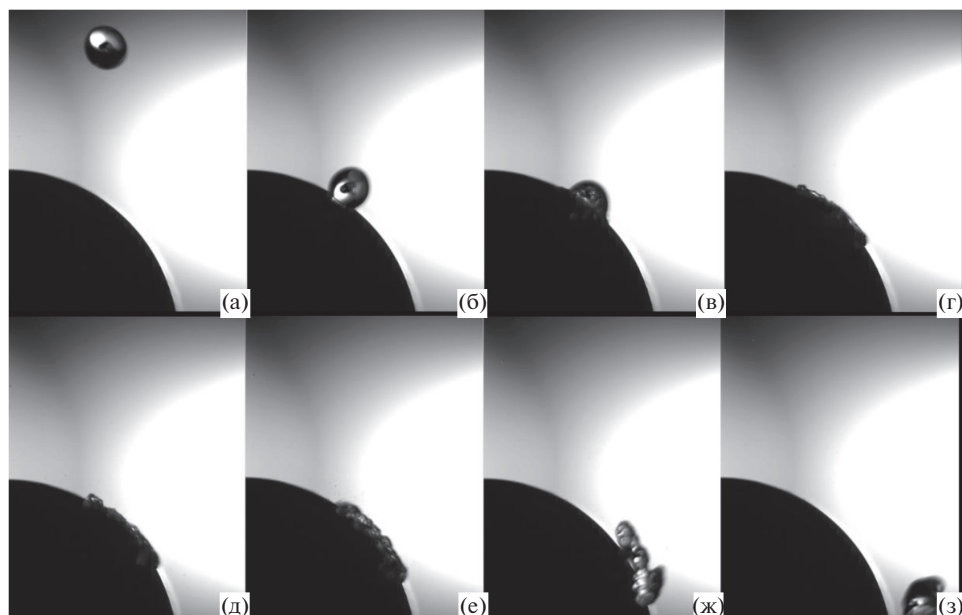


Рис. 7. Иллюстрация процесса отскока крупной капли при падении на модель с полусферическим торцом ($d_d = 2.5$ мм, $V_d = 1.37$ м/с, $We = 64$, $T_W = 235^\circ\text{C}$): (а) – $\tau = 0$ мс, (б) – 6, (в) – 6.6, (г) – 7.8, (д) – 8.8, (е) – 10.2, (ж) – 13, (з) – 17.4.

ратура поверхности ($T_W = 235^\circ\text{C}$) не достигала динамической температуры Лейденфроста.

По-видимому, имеются две основные причины описанного механизма взаимодействия. Во-первых, с ростом размера капли время взаимодействия ее с поверхностью модели увеличивается. Сказанное приводит к тому, что процесс собирания капли сопровождается ее вскипанием (рис. 7ж). Во-вторых, с увеличением размера капли усиливается эффект от силы тяжести, оказывающей значительное влияние на процесс ее взаимодействия со стенкой и приводящей к тому, что отскок капли сменяется ее стеканием с поверхности модели. Упомянутые причины приводят к тому, что точки касания и отскока в случае крупных капель отстоят друг от друга на значительно большее расстояние (для условий данных экспериментов оно равно 7–8 мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность детального анализа геометрических, кинематических и временных характеристик столкновительных процессов, сопровождающих гравитационное осаждение капель на модель с полусферическим торцом, с использованием скоростной видеосъемки.

Получены данные по скоростям и размерам как мелких (вторичные капли), так и крупных (осколки) капель в случае высокой (близкой к динамической температуре Лейденфроста) температуры модели.

Для малых прицельных параметров получены данные, касающиеся столкновений падающих и отраженных капель. Показано, что в результате взаимодействия таких капель вследствие коагуляции и обмена импульсом образуется “суммарная” капля, имеющая околонулевую скорость и практически левитирующая вблизи модели. Образование указанной капли приводит к росту сечения столкновений, так как она является своеобразной мишенью как для падающих, так и для отраженных капель.

Получены данные о влиянии размеров капель на коэффициент восстановления скорости при их взаимодействии с криволинейной поверхностью. Эксперименты выявили снижение коэффициента восстановления скорости с ростом инерционности капель из-за большей потери импульса вследствие более длительного взаимодействия с поверхностью.

Выявлен эффект несовпадения точек касания и отскока капель при их взаимодействии с криволинейной поверхностью модели. Обнаружено, что с ростом размера капли усиливается влияние силы тяжести, что приводит к смене отскока капли на ее стекание. Указанный эффект способствует увеличению времени взаимодействия капли с моделью и расстояния между точками касания и отрыва от поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00551).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. Новосибирск: НГТУ, 2008. 284 с.
2. Пахомов М.А., Терехов В.И. Структура течения и турбулентный теплоперенос в лобовой точке импактной импульсной газочапельной струи // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 588.
3. Пахомов М.А., Терехов В.И. Распределение концентрации частиц в газочапельном ограниченном закрученном потоке. Эйлеров и лагранжьев подходы // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 896.
4. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. М.: ЯНУС-К, 2007. 392 с.
5. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термоэрозийное разрушение тепловой защиты. М.: Янус-К, 2011. 520 с.
6. Вараксин А.Ю. Двухфазный пограничный слой с твердыми частицами // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789.
7. Ko Y.S., Chung S.H. An Experiment on the Breakup of Impinging Droplets on a Hot Surface // Exp. Fluids. 1996. V. 21. P. 118.
8. Bernardin J.D., Stebbins C.J., Mudawar I. Mapping of Impact and Heat Transfer Regimes of Water Drops Impinging on a Polished Surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. V. 40. P. 247.
9. Гуликов А.В., Берлин И.И., Карнышев А.В. Модель соударения капли жидкости с высокотемпературной твердой поверхностью // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 921.
10. Castanet G., Lienart T., Lemoine F. Dynamics and Temperature of Droplets Impacting onto a Heated Wall // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 670.
11. Khavari M., Sun C., Lohse D., Tran T. Fingering Patterns During Droplet Impact on Heated Surfaces // Soft Matter. 2015. V. 11. P. 3298.
12. Liang G., Mudawar I. Review of Drop Impact on Heated Walls // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 103.
13. Celata G.P., Cumo M., Mariani A., Zummo G. Visualization of the Impact of Water Drops on a Hot Surface: Effect of Drop Velocity and Surface Inclination // Heat Mass Transfer. 2006. V. 42. P. 885.
14. Fujimoto H., Ito S., Takezaki I. Experimental Study of Successive Collision of Two Water Droplets with a Solid // Exp. Fluids. 2002. V. 33. P. 500.
15. Bernardin J.D., Mudawar I. The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment of Existing Models // Trans. ASME. 1999. V. 121. P. 894.
16. Rein M. Drop-Surface Interactions. Vienna: Springer, 2002.
17. Tran T., Staat H.J.J., Prosperetty A., Sun S., Lohse D. Drop Impact on Superheated Surfaces // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. 036101.
18. Xiong T.Y., Yuen M.C. Evaporation of a Liquid Droplet on a Hot Plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1991. V. 34. P. 1881.
19. Вараксин А.Ю. Столкновения частиц и капель в турбулентных двухфазных потоках // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 588.
20. Oian J., Law C.K. Regimes of Coalescence and Separation in Droplet Collision // J. Fluid Mech. 1997. V. 331. P. 59.
21. Pasternak L., Sommerfeld M. Experimental Investigation of Size Effects in Colliding Droplets // ILASS-Europe 2017. Proc. 28th Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems. Valencia, Spain, 2017. 4781.
22. Лауков В.А. Коэффициенты восстановления скорости при ударе твердых частиц газовзвеси о поверхность тела. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ, 2012. 379 с.
23. Sommerfeld M., Huber N. Experimental Analysis and Modelling of Particle-Wall Collisions // Int. J. Multi-phase Flow. 1999. V. 25. P. 1457.