



Динамика отрыва от сопла заряженных капель¹

Прохоров В.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва

Процесс отрыва капли изучается в рамках многих направлений фундаментальной науки и, в то же время, является ключевым процессом многих технологий. Потребности промышленности, сельского хозяйства, медицины и других отраслей в сочетании с огромным научным интересом стимулировали развитие теории, методики и техники экспериментальных исследований. Солидная часть работ посвящена каплям, обладающим электрическим зарядом. В настоящей работе по данным высокоскоростной визуализации гравитационного отрыва капли исследуется динамика геометрических параметров структурных элементов, образующихся при распаде капли, которая перед отрывом приобретает электрический заряд с помощью внешнего источника высокого напряжения.

Опыты выполнены на установке «Моделирование динамики капельных течений в электрическом поле» [1] из состава комплекса «ГФК ИПМех РАН» [2]. Капля отрывалась от сопла и свободно падала в кювету с водой высоты 50 см. На дне кюветы располагался алюминиевый лист, к которому подведен отрицательный полюс высоковольтного

источника; положительный полюс соединен с металлическим наконечником сопла.

На Рис. 1а-г капли показаны в момент первичного отрыва от перемычки. При нулевом напряжении ($U = 0$) вытекающая из сопла жидкость постепенно формируется в виде собственно маточной жидкости (примыкающей к соплу), перемычки и капли (Рис. 1а). Нижний конец перемычки быстро истончается, после чего происходит отрыв капли. Сходный сценарий повторяется ($U = 8$ кВ, Рис. 1б) и при подаче напряжения, при условии, что оно не превышает определенной величины – в данных опытах 14 кВ. В последнем случае отрыв происходил у верхнего конца перемычки вместе с формирующейся каплей (Рис. 1в), которая в дальнейшем отделялась от истончающегося нижнего конца перемычки [1]. С ростом напряжения ($U = 16$) капля в момент отрыва становится булавообразной (Рис. 1г), а далее в ее средней части возникает быстро сужающаяся перетяжка, которая разрывается, разделяя каплю на остаток перемычки и собственно каплю [1].

В предположении, что отрывающиеся комплексы „перемычка-капля“ представляют собой тела вращения, построены их контуры (Рис. 1д) и вычислены объемы по методике [3]. Из Рис. 1д видно, что с ростом напряжения в растёт размер перемычки и одновременно уменьшается размер капли. При этом суммарный объем комплексов „перемычка-капля“ уменьшается с увеличени-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-19-00598-П “Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью”)

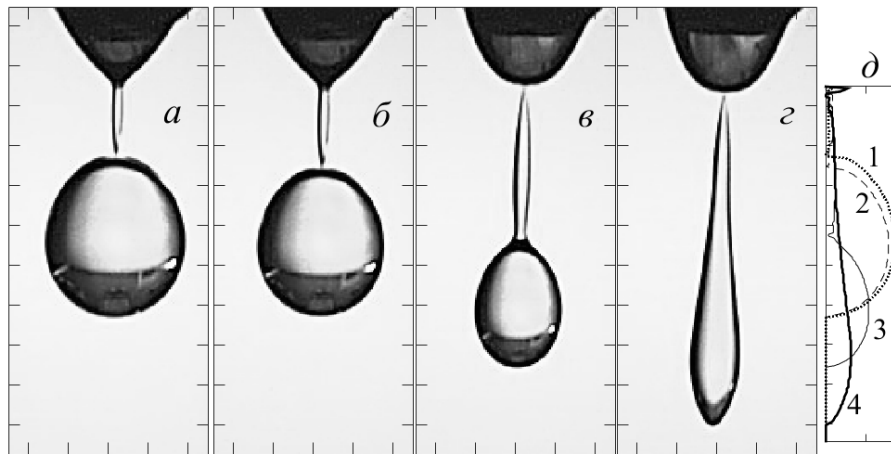


Рис. 1. Гравитационный отрыв капли воды от сопла под действием высокого напряжения. а-г: $U = 0, 8, 14, 16$ кВ. д: 1-4 правые половины контуров „перемычка-капля“ а-г в прямоугольных координатах. Деление по осям $X, Y - 2$ мм

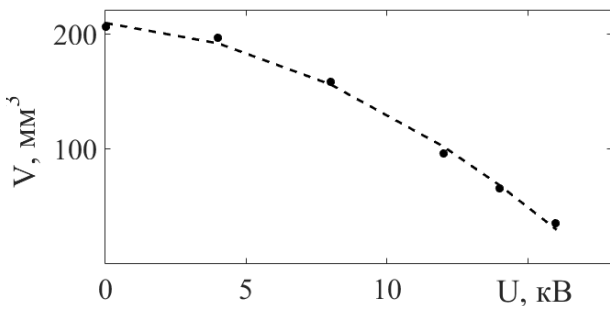


Рис. 2. Объем жидкости, отрывающейся от сопла в диапазоне напряжений $U = 0 - 16$ кВ. Точки – эксперимент, кривая – аппроксимация.

ем напряжения от 0 до 16 кВ (Рис. 2). Экспериментальные точки хорошо описываются квадратичной аппроксимацией, в данных опытах $V = p_1 U^2 + p_2 U + p_3$, где $p_1 = -0.56, p_2 = -2.17, p_3 = 209.3$.

Динамику движения структурных элементов заряженной капли – перемычки и собственно капли после их разделения иллюстрирует Рис. 3.

Верхний конец перемычки перемещается относительно равномерно, его координата во времени аппроксимируется полиномом $Z_1 = 0.7t + 8.5$ (Рис. 3а, кривая 1). Его скорость на участке 0-10 мс флуктуирует вблизи среднего значения 0.7 м/с (Рис. 3б, кривая 1).

Движение нижнего конца – неравномерное (Рис. 3а, кривая 2) и аппроксимируется двумя временными зависимостями – линейной $Z_b = 0.75t + 15.3$ ($t \leq 3.2$ мс) и квадратичной $Z_b = 0.04t^2 +$

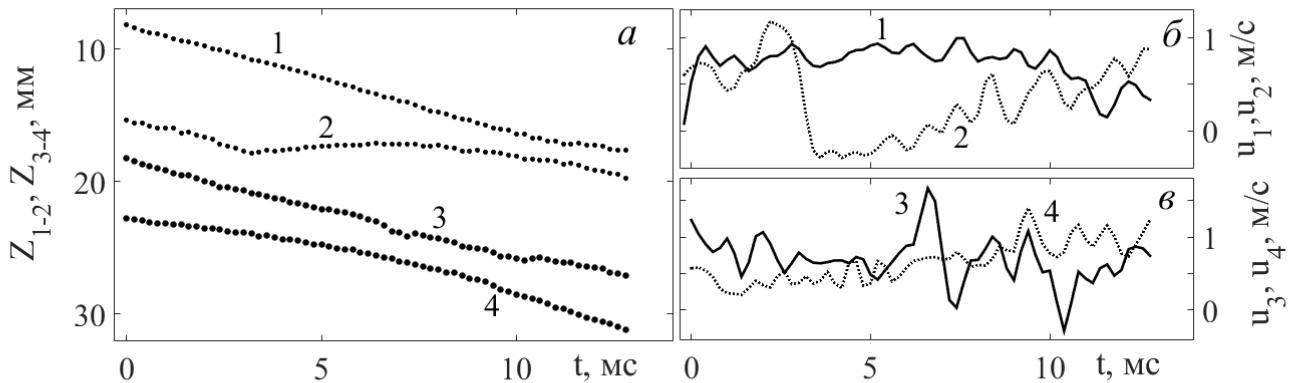


Рис. 3. Отрыв заряженной капли. а – Положение верхнего и нижнего концов перемычки (1 и 2) и капли (3 и 4). б и в – вертикальные скорости верхних (1 и 3) и нижних (2 и 4) концов перемычки. Время – от момента отрыва нижнего конца перемычки.

$0.52t + 18.8$ ($t > 3.2$ мс). График мгновенной скорости движения (Рис. 3б, кривая 2) свидетельствует о чередовании быстрых и медленных флуктуаций положения нижнего конца, отражающих сложную динамику тонких процессов в остатке перемычки. В диапазоне 4.5–10.5 мс заметны осцилляции скоростей обоих концов, пики и впадин которых совпадают по времени (Рис. 3б, кривые 1 и 2).

Перемещение верхней и нижней кромок капли (Рис. 3а) после ее отделения от перемычки: аппроксимируется слабонелинейными полиномами, соответственно, $-0.013t^2 + 0.86t + 18.26$ (Рис. 3а, кривая 3) и $0.04t^2 + 0.18t + 23.0$ (Рис. 3а, кривая 4). Вследствие различия в знаках ускорений (квадратичные члены) кромки сначала сближаются до момента $t_c = 7.0$ мс, а затем расходятся.

Скорости опускания нижней и верхней кромок капли на этом временном отрезке сильно различаются по величине и по характеру осцилляций

(Рис. 3в). В основном обе кромки движутся вниз, хотя и крайне неравномерно, но при этом верхняя на отдельных временных интервалах (вблизи 7.0 и 10.0 мс) меняет направление на противоположное. В обеих кривых на интервале 8–13 мс выделяются почти синхронные флуктуации скорости на основной частоте 600 Гц (по данным спектрального анализа).

Список литературы

- [1] Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Визуализация картины течения импакта свободно падающей капли при генерации звуковых пакетов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23. № 5.
- [2] УИУ «ГФК ИПМех РАН: Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере: site <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
- [3] Prokhorov V.E. Acoustics of oscillating bubbles when a drop hits the water surface // Phys. Fluids. 2021. V. 33. p. 083314.