

Тонкие структуры всплеска капли, ударяющей о поверхность покоящейся жидкости

Ильиных Андрей Юрьевич

Сотрудник компании

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия

E-mail: firs_@mail.ru

Столкновение капелек жидкости с твердыми стенками, поверхностью жидкости и другими капельками имеет место во многих технологических и природных процессах широкого диапазона масштабов, что обуславливает интерес к проведению теоретических и экспериментальных исследований. Несмотря на фундаментальность задачи, ряд вопросов до сих пор остается открытым.

Традиционно экспериментальные исследования всплеска капли проводились с использованием методов фото- и, позднее, видеорегистрации. В ранних работах, посвященных удару капли о поверхность покоящейся жидкости, была проведена классификация режимов, описаны основные компоненты течений, реализующие перенос вещества и энергии капли [1]. В режиме формирования выраженной обратной струи изучались: геометрия полусферического углубления (каверны) на поверхности слоя жидкости и окружающей его короны [2], обратная струя, вторичные капельки и брызги, разлетающиеся из заострений венца [3], кольцевые капиллярные волны на поверхности жидкости [4]. По мере развития регистрирующей аппаратуры визуализированы радиальная пелена первичного контакта [5], система стримеров, капиллярные волны на поверхности венца [6].

В современных работах большое внимание уделено формированию, структуре и динамике течений, развивающихся в момент контакта капли с поверхностью жидкости (кольцевой пелене стримеров и брызг, разлетающихся из области первичного контакта [5]), роли поверхностной потенциальной энергии в развитии процесса всплеска капли. Исследовалось развитие вихревых течений на границе подстилающего слоя жидкости и погружающейся капельки. Однако влияние параметров взаимодействующих сред на картину первоначального всплеска детально не изучалось. Не изученными оставались и процессы, происходящие на поверхности самой капли, которым было уделено особое внимание в данной работе.

Исследования проводились в режиме формирования выраженной обратной струи, который задавался путем выбора высоты свободного падения h и диаметра капли D_d . В большинстве экспериментов капли жидкости диаметром 5 мм свободно падали в поле силы тяжести с высоты $h = 50 - 600$ см, достигая скорости U_d от 2,5 до 3,6 м/с в момент контакта.

На картину течения влияют также параметры всех трех сред (жидкости капли, подстилающей жидкости и воздуха). К размерным параметрам задачи относятся: плотности капли ρ_d , принимающей жидкости ρ_t и воздуха ρ_a , вязкости ν_d , ν_t и ν_a , коэффициенты поверхностного натяжения σ_d , σ_t .

Отношения размерных параметров формируют большое число безразмерных комбинаций, среди которых традиционно выделяются числа Рейнольдса, Вебера, Фруда, Бонда, Онезорге, и набор масштабов длины, времени и скорости. Поведение и структура брызг и стримеров определяются отношением коэффициентов поверхностного натяжения $R_\sigma = (\sigma_t - \sigma_d)/\sigma_t$. Чистая вода, подсолнечное масло, растворы спирта и водные растворы соли использовались в качестве подстилающей и каплеобразующей жидкостей в различных комбинациях.

Для получения экспериментальных данных была реализована высокоразрешающая оптическая установки, позволяющая разрешить некоторые быстрые компоненты малого масштаба (менее сотни микрометров). Установка представляет собой источник света, систему линз, фотоаппарат или высокоскоростную видеокамеру и исследуемый объект, помещенный между ними. Для получения необходимой фазы процесса ударного взаимодействия

использовался автоматизированный блок задержки. Прерывание лазерного луча падающей каплей является сигналом для срабатывания блока, запуска счетчика времени и начала регистрации процесса.

Начальный момент всплеска капли сопровождается деформацией поверхности подстилающей жидкости. По мере погружения капли в слой жидкости, уничтожаются свободные поверхности, выделяется свободная энергия, формируется пелена брызг и стримеров, которая вылетает из вершины кольцевого валика, окружающего формирующуюся каверну. Траектория выброса брызг и стримеров определяется отношением коэффициентов поверхностного натяжения R_σ . Формирование тонких струй происходит в некотором угловом диапазоне. Отдельные струйки могут ударять по поверхности погружающейся капли, порождая ряд коротких волн, причем эти волны имеют капиллярный масштаб. Методом фотометрии определялась длина капиллярных волн на поверхности капли, для этого в поле объектива кратковременно устанавливалась эталонная сетка, затем регистрировался удар капли о поверхность слоя жидкости. Полученное изображение масштабировалось, задавался профиль, вдоль которого измерялась интенсивность света в относительных единицах для определения длины капиллярных волн и пространственного распределения и размеров струек растущего шеврона.

Из дисперсионного соотношения для капиллярных волн по расстояниям между гребнями капиллярных волн оцениваются их фазовые скорости, которые лежат в диапазоне от 20 до 30 м/с. Следует отметить, что тонкие струйки и, соответственно, ряд капиллярных волн наблюдались уже с первых моментов взаимодействия. Кроме того, между струйками наблюдаются некоторые вертикальные периодические структуры, которые трансформируются в цилиндрический венец на более поздних стадиях процесса.

Выводы. Уничтожение свободных поверхностей свободно падающей капли и подстилающей жидкости и, соответственно, выделение энергии приводит к образованию струек и генерации ряда волн на поверхности капли и слоя жидкости, причем волны имеют капиллярный масштаб. Число, характер и скорости капиллярных волн зависят от свойств используемых жидкостей. На направление разлета брызг влияет знак отношения коэффициентов поверхностного натяжения и, если $R_\sigma > 0$, генерации капиллярных волн не происходит.

Источники и литература

- 1) Rein M. The transitional regime between coalescing and splashing drop // J. Fluid Mech. 1996. V. 306. P. 145-165.
- 2) Worthington A.M. The splash of the drop. Series "The romance of science" Published by Society for Promoting Christian Knowledge: N. Y.- London: E. & J.B. Young & Co. 1895.
- 3) Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Тонкая структура всплеска при падении капли на свободную поверхность покоящейся жидкости. Доклады Академии Наук, 2011, № 6, стр. 768-773.
- 4) Zhu G. Z. Li Z. H., Fu D. Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop // Chinese Science Bulletin. 2008. V. 53. No 11. P. 1634-1638.
- 5) Thoroddsen S.T., Thoraval M.J., Takehara K., Etoh T.G. Droplet splashing by a slingshot mechanism // Physical review letters. 2011. PRL 106, 034501 – (1-4).
- 6) Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Гидродинамика удара капли: короткие волны на поверхности венца, Доклады Академии наук, 2013, том. 451, № 1, с. 41–45.