

01;03

Получение полидисперсного двухмодального жидкокапельного аэрозоля в генераторе с вибрирующим стержнем

© В.А. Александров, Г.М. Михеев

Институт прикладной механики УрО РАН,
426067 Ижевск, Россия
e-mail: ava@udman.ru

(Поступило в Редакцию 1 декабря 2009 г. В окончательной редакции 30 апреля 2010 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования диспергирования жидкости частично погруженным в нее колеблющимся с высокой частотой тонким стержнем, имеющим изогнутый конец. Показано, что в зависимости от условия погружения стержня возможно получение мелкодисперсной фазы жидкокапельного аэрозоля за счет возбуждения капиллярных стоячих волн и крупной фракции капелек, исходящих в виде направленной струи от торцевой поверхности стержня за счет инерционных сил.

Введение

В природе и технике часто можно наблюдать взаимодействие твердого тела с жидкостью вблизи ее свободной поверхности на границе разделов различных фаз (жидкость—газ, твердое тело—газ). В большинстве случаев газ — это воздух, а твердое тело — стенки сосуда, в котором находится жидкость или тело, частично погруженное в сосуд с жидкостью. Свободная поверхность жидкости вблизи поверхности твердого тела искривляется из-за явления смачивания. Взаимодействие жидкости с твердыми телами, имеющими узкие щели или поры, приводит к известному явлению капиллярного подъема смачивающей жидкости. Менее выраженный капиллярный подъем жидкости наблюдается и на поверхности тонких стержней при их частичном погружении в жидкость вертикально или под углом к свободной поверхности жидкости (рис. 1). При смачивании каплей жидкости небольшого участка тонкого круглого стержня жидкость обволакивает стержень.

В работах [1,2] было показано, что при частичном погружении в жидкость возбужденных пьезоэлементом вибрирующей металлической струны и вибрирующего тонкого стержня наблюдается распыление жидкости с их поверхности (рис. 2). В случае струны распыление жидкости происходит на участке с пучностью стоячей поперечной волны в струне. При погружении в поверхностный слой жидкости вибрирующего тонкого стержня с изогнутым концом распыление может сопровождаться генерацией струи, исходящей практически от свободного торца стержня (рис. 2, c). Эти явления можно использовать для создания пьезоэлектрических распылителей, в которых в качестве рабочего узла служат металлическая струна и стержень с изогнутым концом [3,4]. Нами в качестве струны и стержня использовалась металлическая проволока диаметром 0.62 mm и длиной соответственно 200 и 60 mm. Для их возбуждения в устройствах применили пьезопреобразователь ЗП-4, на электроды которого подавалось переменное напряжение амплитудой до 30 V от генератора звуковой частоты.

Устройство со струной при потребляемой мощности 600 mW на частоте 3.5 kHz распыляло воду и бензин с производительностью соответственно 300 и 500 cm³/h, а производительность распыления устройства со стержнем (рис. 3) при потребляемой мощности 180 mW на частоте 2.2 kHz для воды составила 600 cm³/h и для бензина — 1000 cm³/h.

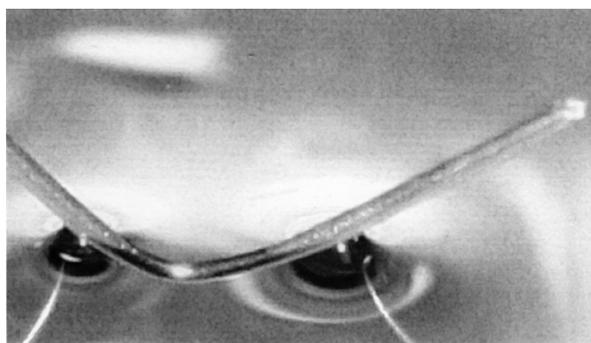


Рис. 1. Искривление свободной поверхности воды частично погруженным в нее изогнутым стержнем.

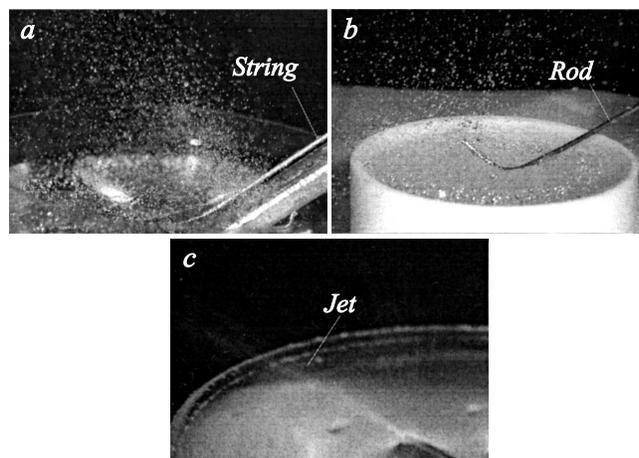


Рис. 2. Распыление жидкости струной (a) и стержнем (b, c).

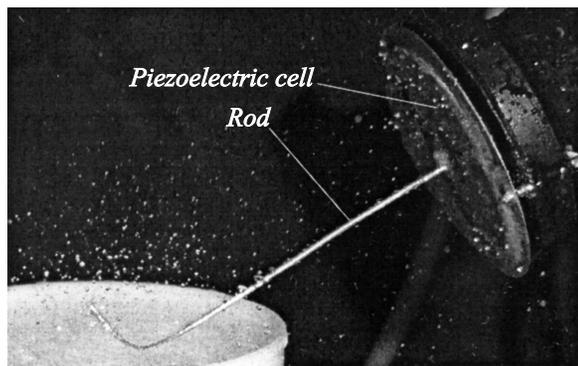


Рис. 3. Пьезоэлектрический стержневой распылитель.

Вместе с этим было обнаружено, что частично погруженные в жидкость вибрирующие струна и стержень являются источниками вихревых течений как на поверхности, так и в глубине жидкости. Эти явления представляют интерес для выявления механизма перемещения слоя жидкости по поверхности вибрирующего тонкого стержня, а также генерации струи жидкости стержнем, что и является целью настоящей работы.

Генерация мелкодисперсной фазы жидкокапельного аэрозоля

Изгибные колебания тонких стержней, так же как и струны, являются поперечными. При возбуждении изгибных колебаний отдельные участки стержня совершают колебания в перпендикулярном направлении к его оси. Для анализа взаимодействия вибрирующего стержня или вибрирующей струны с жидкостью на ее поверхности достаточно рассмотреть взаимодействие участка стержня с жидкостью вблизи ее свободной поверхности.

Частично погруженный в жидкость под каким-либо углом колеблющийся участок стержня вследствие наличия периодически изменяющихся колебательных скорости и ускорения оказывает действие на жидкость через обволакивающий его тонкий пристеночный слой как в глубине жидкости, так и непосредственно на ее поверхности. Периодически возникающее давление на микроскопический объем смачивающего слоя жидкости на границе раздела фаз приводит к растеканию смачивающего слоя жидкости по поверхности стержня и продвижению смачивающей границы вдоль оси стержня. Вместе с колебаниями стержня в растекающемся по его поверхности слое жидкости возбуждаются колебания в виде капиллярных стоячих волн, от пучностей которых при достаточной амплитуде колебаний может происходить отрыв капель жидкости (рис. 4. *b*). В результате периодического процесса происходит одновременно растекание смачивающего слоя жидкости по поверхности вибрирующего стержня и ее распыление с образованием мелкодисперсной фазы аэрозоля.

Частота колебания стержня находится в звуковом диапазоне частот и поэтому колебания его участка поверхности, смачиваемого жидкостью, можно рассматривать как акустические, при которых проявляется известный механизм акустического распыления жидкости в слое [5]. Длина капиллярной волны в жидкости при акустическом возбуждении равна

$$\lambda_k = \sqrt[3]{8\pi\sigma_n\rho f^2},$$

где σ_n — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность жидкости, f — частота колебаний поверхности твердого тела. Диаметр капель аэрозоля при распылении в слое составляет $d \approx 0.3\lambda_k$.

Возможно, что в образовании мелкодисперсной фазы аэрозоля вносят вклад кавитационные явления на поверхности стержня в окрестности свободной поверхности жидкости. Обоснование этого требует более детального рассмотрения процесса взаимодействия колеблющегося стержня с искривленной поверхностью смачивающего слоя жидкости.

Более интересные результаты взаимодействия с жидкостью можно получить в случае, когда стержень имеет на свободном конце изогнутый участок, который играет роль инертной массы и нарушает осевую симметрию стержня. Вследствие этого продольные колебания стержня как целого возбуждают его изгибные колебания,

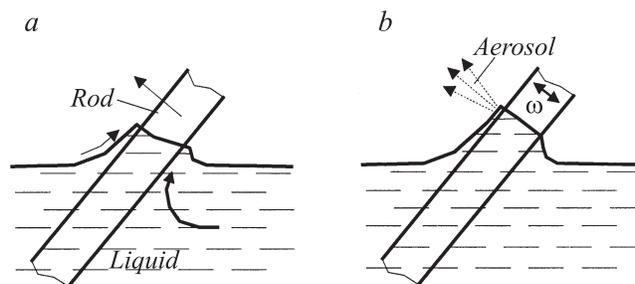


Рис. 4. Движение жидкости при ускоренном движении вибрирующего участка стержня, частично погруженного в жидкость (*a*), и распыление жидкости от смачиваемой поверхности стержня (*b*).



Рис. 5. Возбуждение стержнем капиллярных волн на поверхности жидкости.

амплитуда которых возрастает вблизи резонансной частоты. Так как при этом пучность изгибных колебаний стержня приходится на свободный конец, то изогнутый участок приобретает продольную составляющую колебаний и совершает колебательные движения по криволинейной траектории. Амплитуда изгибных колебаний стержня с изогнутым концом значительно больше амплитуды изгибных колебаний прямого стержня. Это существенно изменяет характер воздействия на жидкость частично погруженного в нее вибрирующего стержня. Так, при погружении вибрирующего стержня под углом в жидкость на определенную глубину стержень возбуждает на поверхности жидкости капиллярные волны, исходящие от поверхности разных участков стержня (рис. 5).

Вихревые течения

При погружении вглубь вязкой жидкости изогнутого конца стержня он за счет вибраций увлекает своей поверхностью частицы жидкости и приводит ее в движение. Визуализацию движения жидкости, вызванного колебаниями стержня, можно осуществить с помощью микрочастиц. Фотографированием с малой выдержкой процесса вибрационного диспергирования стержнем водной суспензии наночастиц углерода в оптической кювете нами обнаружены вихревые течения в жидкости, возникающие вблизи свободного конца вибрирующего стержня [6]. Эти фотографии, представленные на рис. 6, наглядно демонстрируют, что стержень создает вихревые течения, в которых движение жидкости происходит в направлении вдоль оси изогнутого участка конца стержня.

Возникновению вихревых течений способствует то, что свободный конец стержня при резонансных изгибных колебаниях стержня совершает периодические дви-

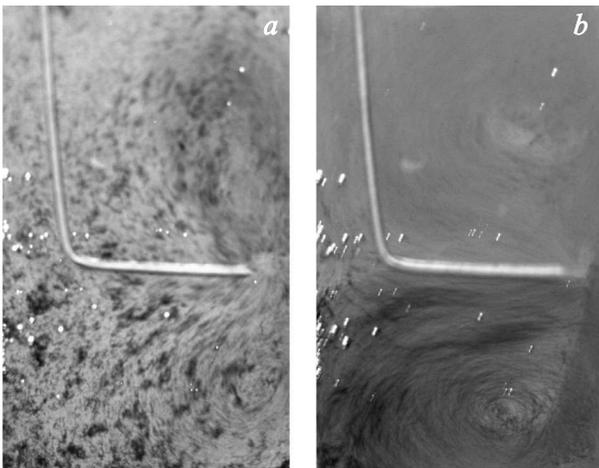


Рис. 6. Вихревые течения в водной суспензии наночастиц углерода в процессе ее вибрационного диспергирования на частоте 3.5 kHz стержнем с изогнутым концом: *a* — после 10 s диспергирования, *b* — после 30 s.

жения по криволинейной дугообразной траектории в виде фигуры Лиссажу, соответствующей колебаниям точки во взаимно перпендикулярных направлениях с разными амплитудами и частотами, различающимися в два раза и разностью фаз колебаний $\pi/2$. При этом практически можно считать, что при изгибных колебаниях стержня с частотой ω его свободный конец совершает колебания по дуге окружности R , ограниченной углом θ_0 :

$$l = R\theta_0 \cos \omega t.$$

Колебательная скорость конца стержня равна

$$dl/dt = -\omega R\theta_0 \sin \omega t.$$

При погружении в жидкость он своей торцевой поверхностью придает жидкости в пограничном слое скорость, пропорциональную амплитуде и частоте колебаний. Возникновение вихревых течений обусловлено вязкостью жидкости, о чем достаточно хорошо известно [7].

Генерация крупной фракции капелек

В случае, если вибрирующий конец стержня выступает над уровнем свободной поверхности жидкости, то его взаимодействие с жидкостью происходит в основном с нижней стороны конца стержня. С верхней стороны поверхности конца стержня остается смачивающий слой жидкости. При движении конца стержня вверх он частью торцевой поверхности увлекает объем жидкости, который приобретает скорость и с началом торможения стержня по инерции сбрасывает наружу в виде достаточно большой капли. Так как торец стержня совершает колебательное движение по дуге, то он приобретает центробежное ускорение, направленное вдоль оси стержня на его конце:

$$(dl/dt)^2/R = R\theta_0^2\omega^2 \sin^2 \omega t.$$

Это выражение можно привести к виду

$$(dl/dt)^2/R = R\theta_0^2\omega^2/2 - (R\theta_0^2\omega^2/2) \cos 2\omega t.$$

Отсюда можно сделать вывод, что при изгибных колебаниях стержня его свободный конец получает центробежное ускорение, пульсирующее с частотой, равной удвоенной частоте изгибных колебаний. Величина ускорения при этом изменяется от нуля до $R\theta_0^2\omega^2$. Вместе с торцом стержня это ускорение приобретает и обволакивающий его поверхность микроскопический объем жидкости. Поэтому в процессе колебательного движения конца стержня центробежная сила инерции сбрасывает с него этот объем жидкости в виде капли, движущейся практически со скоростью, равной амплитуде скорости колебательного движения конца стержня. Этот процесс является периодическим, в котором происходят одновременно распыление жидкости в смачивающем слое

на верхней поверхности конца стержня в виде мелкодисперсной фракции и генерация струи, образуемой каплями жидкости, исходящими от поверхности торца стержня (рис. 7, *a*).

Фотографирование струи с выдержкой 0.1 ms показало, что она представляет собой ряд капелек жидкости, исходящих от выпуклой поверхности жидкости, прилегающей к торцу стержня (рис. 7, *b*). Из фотографии можно непосредственно определить расстояние l между капельками. Это позволяет оценить скорость капелек в струе по формуле $v = lf$, где f — частота колебаний пьезоэлемента, возбуждающего изгибные колебания стержня. Расчеты показывают, что скорость движущихся капелек в струе воды при частоте 2.2 и 8 kHz составила соответственно 10–12 и 25–30 м/с.

Необходимо отметить, что генерация струи стержнем имеет некоторую аналогию с возникновением струи вблизи тонкого вращающегося диска, обод которого касается поверхности жидкости [8].

Как показали эксперименты, в процессе распыления уровень жидкости понижается и поэтому для поддержания распыления рабочий участок стержня необходимо поддерживать на определенном уровне и под определенным углом относительно свободной поверхности

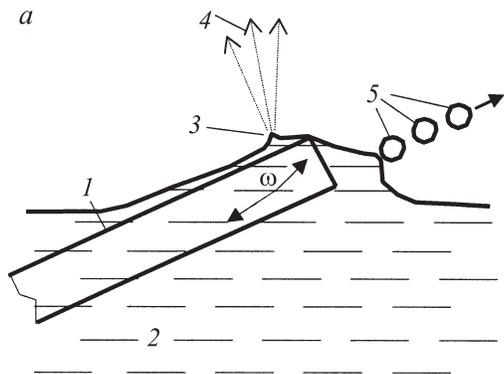


Рис. 7. Генерация струи и распыление стержнем (*a*: 1 — стержень, 2 — жидкость, 3 — капиллярная волна, 4 — аэрозоль, 5 — капли жидкости), капли воды, периодически выбрасываемые изогнутым концом стержня при частоте колебаний 2.2 kHz (*b*).

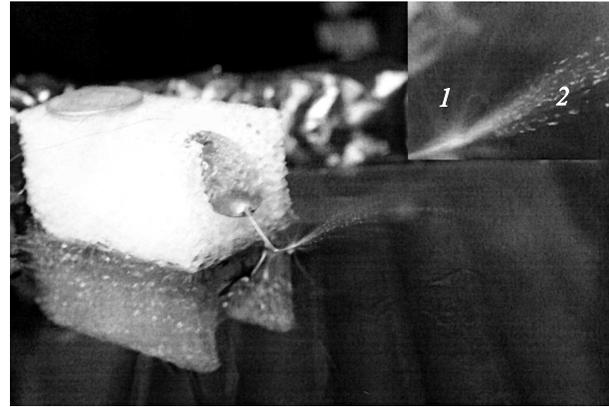


Рис. 8. Макет лодки с пьезоэлектрическим стержневым двигателем (на врезке — увеличенное изображение аэрозоля вблизи торца стержня, 1 и 2 — мелкодисперсная и крупнодисперсная фракции соответственно).

жидкости. Этого можно избежать, если стержневой распылитель установить на плавающее тело, например, на кусок пенопласта (рис. 8). Необходимо добавить, что в условиях генерации струи такое тело может перемещаться по поверхности воды за счет реакции струи, исходящей от поверхности воды. Таким образом, плавающее тело, снабженное пьезоэлектрическим стержневым распылителем, представляет собой макет лодки. Эксперименты показали, что макет может передвигаться по поверхности жидкости и в том случае, когда свободный конец стержня погружается вглубь жидкости. Очевидно, что движение макета происходит за счет создаваемого устройством вихревого течения в жидкости.

Таким образом, в зависимости от глубины погружения изогнутого конца стержня в жидкость картина генерации каплей может быть различной. Когда изогнутый торец стержня значительно выступает над уровнем жидкости, как показано на рис. 1, то происходит генерация мелкодисперсных капелек с приторцевой поверхности стержня. Если торец стержня значительно погружен в жидкость, как показано на рис. 7, *b*, то происходит выбрасывание крупных капелек жидкости в виде направленной струи. В промежуточном положении глубины погружения происходит одновременная генерация мелкодисперсных и крупных капелек жидкости (см. вкладку на рис. 8), т.е. возможно получение полидисперсного двухмодального жидкокапельного аэрозоля.

Выводы

Таким образом, в зависимости от условия погружения торца вибрирующего изогнутого стержня с частотой колебаний в несколько килогерц возможно получение жидкокапельного аэрозоля, имеющем в своем составе мелкодисперсную фазу и крупную фракцию капелек жидкости, исходящих от торцевой поверхности стержня

за счет инерционных сил. Полученные результаты могут быть использованы для разработки стержневых распылителей, диспергаторов суспензий, микродвигателей и других технических средств, а также, вполне возможно, и для моделирования движения рыб в воде.

Список литературы

- [1] Александров В.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 88–94.
- [2] Александров В.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 3. С. 21–26.
- [3] Пат. РФ № 2234381. В.А. Александров, Г.М. Михеев. 2004. Бюл. № 23.
- [4] Пат. РФ № 233776. В.А. Александров. 2008. Бюл. № 31.
- [5] Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 297.
- [6] Александров В.А., Михеев Г.М. // Мат. III. Всеросс. конф. по наноматериалам НАНО 2009. Екатеринбург: Уральское изд-во, 2009. С. 859.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. С. 121.
- [8] Александров В.А. // Химическая физика и мезоскопия. 2008. Т. 10. № 1. С. 112–117.