

03;08;12

Волновое распыление жидкости струной

© В.А. Александров

Институт прикладной механики УРО РАН, Ижевск

E-mail: ipm@ipm.uni.udm.ru

Поступило в Редакцию 16 декабря 2002 г.

Обнаружено волновое транспортирование и распыление жидкости возбужденной ударом струной при частичном погружении струны в жидкость под углом к ее поверхности. Распыление наблюдается на отдельных участках струны при определенных частотах ее возбуждения. Установлена закономерность условий возникновения этого явления, объясняемая колебаниями участков струны с различной разностью фаз в них поперечной и продольной волн.

Распыление жидкости с помощью акустических колебаний звукового и ультразвукового диапазона [1] осуществляют устройствами, содержащими источник колебаний в виде пьезокерамического преобразователя и распыляющий узел, обычно представляющий собой пластинку, мембрану или фланец [2]. Конструкции этих распылителей не позволяют применять их для распыления жидкостей, оказывающих химическое или физическое воздействие на пьезопреобразователь. В настоящей работе проведено исследование взаимодействия металлической струны с водой при частичном погружении струны в воду под углом к ее поверхности и ударном возбуждении струны источником, не имеющим непосредственного контакта с жидкостью. Ударное воздействие на струну представляет интерес в связи с возможностью возбуждения в струне одновременно продольных и поперечных волн, посредством которых возможно волновое транспортирование соприкасающихся с поверхностью струны частиц [3,4].

С целью проведения экспериментов изготовлено простое устройство, представляющее собой закрепленную в корпусе из дюралюминия Д16 размером $220 \times 15 \times 3$ мм металлическую струну из нихрома 20×80 Н диаметром $\varnothing = 0.62$ мм и длиной $L = 200$ мм. Плотность и модуль Юнга нихрома составляли соответственно $\rho = 8.2 \cdot 10^3$ кг/м³ и $E = 228 \cdot 10^9$ Па. Сила натяжения струны равнялась $F = 134$ Н. Ударное возбуждение струны осуществлялось пьезоэлементом ЗП-4, установлен-

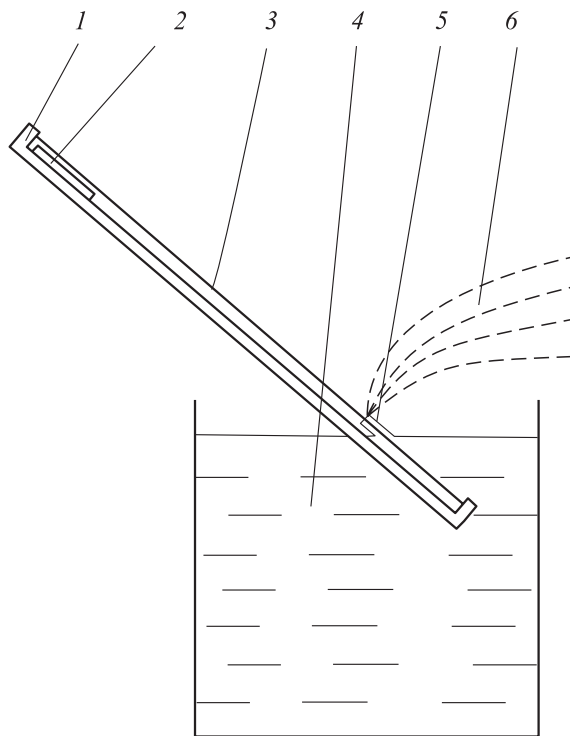


Рис. 1. Распыление воды струной: 1 — корпус устройства, 2 — пьезоэлемент, 3 — струна, 4 — вода, 5 — транспортируемый слой воды, 6 — аэрозоль.

ным в зазоре в 1 mm между корпусом и струной. Точка воздействия пьезоэлемента на струну находилась на расстоянии 20 mm от одного из ее концов. Для исследования взаимодействия возбужденной ударом струны с жидкостью струна вместе с корпусом частично погружалась в воду под углом $15-45^\circ$ к ее поверхности. На пьезоэлемент подавалось электрическое напряжение амплитудой 60 V от генератора низкой частоты.

Исследованиями установлено, что при частичном погружении в воду струны на определенную глубину при определенной частоте подаваемого на пьезоэлемент электрического напряжения наблюдается

вибрационно-волновое транспортирование и распыление воды струной (рис. 1). Наиболее интенсивное распыление происходит, когда струна погружена менее чем на половину длины. При этом от участка поверхности жидкости между корпусом и струной вода поднимается по струне небольшим слоем толщиной 0.1–0.3 mm. Достигая определенного участка струны на расстоянии 5–10 mm от поверхности, она распыляется мелкими частицами размером 10–40 μm . При погружении струны на глубину 8–12 mm обнаруживаются два участка распыления на расстоянии 2–4 mm друг от друга. Производительность распыления устройства при потребляемой мощности 0.6 W на частоте 4024 Hz составила 300 cm^3 в час.

Расстояние от источника до участка распыления определялось с точностью ± 0.5 mm. Изменение частоты электрического напряжения на пьезоэлементе, при которой исчезало распыление, составило ± 3 Hz. Частота колебаний пьезоэлемента и расстояния от источника волн до различных участков струны, в которых наблюдается распыление воды, приведены в таблице:

M	0	1	2	3	4	5
f_m , Hz	3810	3862	3911	3951	3988	4024
x_m , mm	16	46	76	106	135	164(161)

Расчеты показали, что для полученных частот колебаний и расстояний от источника до участков распыления существует следующая простая закономерность:

$$f_{m+n}x_{m+n}/f_mx_m = 1 + 2n/(2m + 1). \quad (1)$$

Оказалось, что эта закономерность связана со следующим.

При ударном воздействии на струну в ней от места удара одновременно распространяются независимо друг от друга две пары продольной и поперечной волн. Скорости продольной и поперечной волн в струне соответственно равны $v_\xi = (E/\rho)^{1/2}$ и $v_\eta = (F/\rho S)^{1/2}$, где E — модуль Юнга, ρ — плотность материала струны, F — натяжение, S — площадь поперечного сечения струны. Для каждой из пар продольной и поперечной волн, распространяющихся от точечного источника на расстояние x , можно записать следующие выражения, отличающиеся

амплитудой и волновым числом:

$$\xi(t) = A_\xi \cos(\omega t + k_\xi x + \varphi_0), \quad (2)$$

$$\eta(t) = A_\eta \cos(\omega t + k_\eta x + \varphi_0), \quad (3)$$

где A_ξ и A_η — амплитуды продольной и поперечной волны, ω — круговая частота волн, k_ξ и k_η — волновые числа, φ_0 — начальная фаза.

Колебания в участках струны на некотором расстоянии от источника можно представить как результат сложения в них продольной и поперечной волн. Таким колебаниям удовлетворяет выражение эллиптически поляризованных колебаний:

$$\begin{aligned} & [\xi^2(t)/A_\xi^2] + [\eta^2(t)/A_\eta^2] \\ & - [2\xi(t) \cdot \eta(t)/A_\xi \cdot A_\eta] \cos(k_\eta - k_\xi)x = \sin^2(k_\eta - k_\xi)x. \end{aligned} \quad (4)$$

Аргумент $(k_\eta - k_\xi)x$ в этом выражении представляет собой разность фаз $\Delta\Phi$ поперечной и продольной волн в наблюдаемой точке. Учитывая, что $k_\eta = \omega/v_\eta$, $k_\xi = \omega/v_\xi$ и $\omega = 2\pi f$, где f — частота волн и колебаний источника, разность фаз поперечной и продольной волн может быть записана в виде

$$\Delta\Phi = 2\pi [(1/v_\eta) - (1/v_\xi)]fx. \quad (5)$$

Из этого выражения видно, что при одновременном распространении в струне продольной и поперечной волн разность их фаз в наблюдаемой точке зависит от частоты волн и расстояния от источника. Расстояние между двумя точками струны с различными соотношениями фаз в них поперечной и продольной волн при фиксированной частоте может быть определено из уравнения

$$x_2 - x_1 = (\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1)/2\pi [(1/v_\eta) - (1/v_\xi)]f. \quad (6)$$

Разность фаз поперечной и продольной волн в различных участках струны может принимать определенные значения при некоторых частотах ее возбуждения. От ее значения зависит форма колебаний участков струны (рис. 2). Так, при $\Delta\Phi = (2m + 1)\pi/2$ ($m = 0; 1; 2; \dots$) форма колебаний представляет эллипс с полуосьями, одна из которых направлена вдоль струны, а вторая — перпендикулярна струне:

$$[\xi^2(t)/A_\xi^2] + [\eta^2(t)/A_\eta^2] = 1. \quad (7)$$

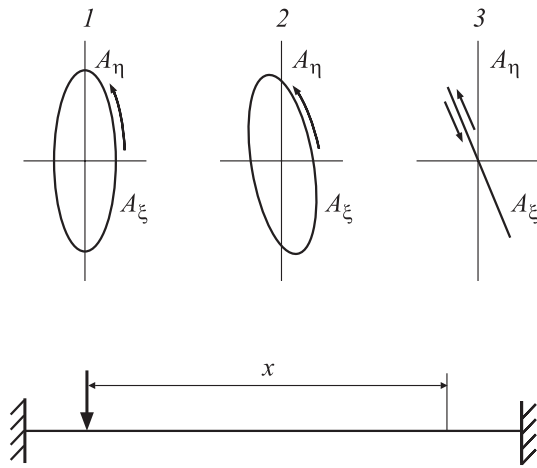


Рис. 2. Колебания участков струны при определенных значениях разности фаз в них поперечной и продольной волн: 1 — $\Delta\Phi = (2m + 1)\pi/2$; 2 — $\Delta\Phi = [(2m + 1)\pi/2] + \pi/4$; 3 — $\Delta\Phi = m\pi$.

При разности фаз поперечной и продольной волн $\Delta\Phi = [(2m + 1)\pi/2] \pm \pi/4$ оси эллипса находятся под углом к струне, а при $\Delta\Phi = m\pi$ колебания представляют собой отрезки прямой, составляющей со струной угол $\varphi = \arctg[(A_\eta/A_\xi) \cos m\pi]$.

В условиях колебаний с $\Delta\Phi = (2m + 1)\pi/2$ для различных m соотношение разностей фаз поперечной и продольной волн равно:

$$\Delta\Phi_{m+n}/\Delta\Phi_m = 1 + 2n/(2m + 1). \quad (8)$$

Подстановкой (5) в это выражение можно получить соотношение установленной закономерности (1) для экспериментально определенных частот колебаний источника волн и расстояний от него до участков распыления.

Это позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемое в эксперименте распыление возникает на отдельных участках струны при тех частотах волн, когда разность фаз поперечной и продольной волн на этих участках составляет $\Delta\Phi = (2m + 1)\pi/2$.

Другим условием распыления жидкости струной является вибрационное транспортирование струной частиц воды с ее поверхности до

участков распыления. Из экспериментально определенных расстояний от поверхности воды до участка распыления ($\Delta x = 5-10$ mm) возможно определение значения разности фаз поперечной и продольной волн в участке струны непосредственно на поверхности воды. Преобразование (6) дает для нее следующее выражение:

$$\Delta\Phi = (1 + \Delta x/x_m) \cdot (2m + 1)\pi/2. \quad (9)$$

Оно отличается от разности поперечной и продольной волн в участках распыления слагаемым $\Delta\varphi = (\Delta x/x_m) \cdot (2m + 1)\pi/2$, расчетное значение которого в соответствии с экспериментом составляет $\Delta\varphi = (0.16 - 0.33)\pi$, а среднее значение — $\Delta\varphi = \pi/4$. Тогда для разности фаз поперечной и продольной волн в участке струны вблизи поверхности воды в условиях транспортирования струной частиц воды можно записать значение $\Delta\Phi = [(2m + 1)\pi/2] + \pi/4$.

В проведенных экспериментах распыление жидкости струной происходит в достаточно узком интервале частот возбуждаемых волн 3810–4024 Hz и расстояние между участками, в которых наблюдалось распыление, составило около 30 mm. Длина поперечной волны на этих частотах в соответствии с формулой $\lambda_\eta = v_\eta/f$ составляет около 60 mm. Такое же значение можно получить исходя из 6 обнаруженных участков на длине 180 mm от источника до конца струны при условии, что на этой длине укладывается 3 длины поперечной волны. Это указывает на резонансный характер поперечных колебаний в струне, на максимумы которых приходится участки распыления. Изменение частоты вблизи резонанса приводит к возникновению колебаний с разностью фаз поперечной и продольной волн $\Delta\Phi = \pi/2$ последовательно в каждом из этих максимумов.

Появление второго участка распыления на расстоянии от источника $x_5 = 161$ mm на частоте $f_5 = 4024$ Hz вызвано возникновением в струне продольной стоячей волны длиной $\lambda_\xi = 6L$ в результате встречной интерференции двух продольных волн, распространяющихся от источника. Одна из пучностей этой стоячей волны приходится на место воздействия источника, а вторая образуется на расстоянии от источника $x = 160$ mm. В пучностях продольной стоячей волны происходит местная деформация струны с частотой волн. Это приводит к радиальным колебаниям в струне и передаче импульса частицам жидкости при наличии слоя жидкости на поверхности струны. Определенные в соответствии с размерами струны длина и скорость продольной волны при

этом составили $\lambda_\xi = 1200$ mm и $v_\xi = 4828$ m/s. Различие полученного значения скорости продольной волны от значения, определенного через модуль Юнга ($v_\xi = 5273$ m/s), скорее всего, вызвано ее дисперсией поперечными колебаниями в струне.

Таким образом, обнаруженное в работе волновое транспортирование и распыление жидкости струной вызвано ее ударным возбуждением, в результате которого в струне одновременно распространяются поперечные и продольные волны. Установленная закономерность условий возникновения распыления жидкости струной объясняется колебаниями участков струны с различной разностью фаз в них поперечной и продольной волн. Участки струны с разностью фаз в них поперечной и продольной волн $\Delta\Phi = [(2m + 1)\pi/2] + \pi/4$ осуществляют волновое транспортирование воды, а участки с $\Delta\Phi = (2m + 1)\pi/2$ — ее распыление. Результаты исследования этого явления могут быть использованы на практике для разработки распылителей различных жидкостей.

Список литературы

- [1] *Ультразвук*. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.
- [2] *Вибрационные преобразователи движения*. Л.: Машиностроение, 1984. 64 с.
- [3] *Вибрации в технике: Справочник*. Т. 4. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
- [4] Александров В.А. // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 35–36.