

Т. Ф. ДЕМИДЕНКО, Н. В. СТЕПАНОВА, В. И. ШМАЛЬГАУЗЕН

## РАСПАВШАЯСЯ СТРУЯ ВОДЫ КАК ИСТОЧНИК СЛУЧАЙНОЙ СИЛЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Струя жидкости, истекающая из малого отверстия, представляет собой практически точечный, легко осуществимый источник случайной силы. В работе теоретически рассчитана спектральная плотность шума, возникающего при падении распавшейся струи на твердую поверхность. Экспериментальные измерения шума струи с помощью пьезоэлемента хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Для оценки эффективности шум- и виброизоляции различных устройств желательно иметь точечный источник шумового воздействия, обладающий широким спектром, достаточно стабильный и легко воспроизводимый. Обычно применяемые для этой цели электромеханические силовозбудители имеют ограниченный диапазон рабочих частот, а характер возбуждения исследуемого устройства существенно зависит от способа присоединения вибратора.

Д. Г. Тонконоговым было предложено использовать в качестве источника случайной силы незатопленную струю воды, истекающую под давлением 1—4 атм из малого отверстия ( $\Phi$  0,3—0,6 мм). Известно, что струя воды в воздухе неустойчива и на некотором расстоянии от сопла разбивается на отдельные капли. Каждая капля, падая на твердую поверхность, создает импульс силы, длительность которого по порядку величины определяется отношением радиуса капли к скорости ее движения. Если, например,  $v=25$  м/сек, а  $R=0,5$  мм, то  $T \simeq 2 \cdot 10^{-5}$  сек, т. е. получаются очень короткие импульсы, спектр которых простирается до десятков килогерц.

Опыты показали, что при хорошей обработке отверстия спектральная плотность шума, возникающего на пьезокристалле при попадании на него разбившейся струи, зависит только от диаметра отверстия и скорости струи. Таким образом, распавшаяся струя воды может служить калиброванным, легко воспроизводимым точечным источником случайной силы. В настоящей статье приведены результаты исследования спектральных свойств шума, возбуждаемого распавшейся струей жидкости.

### § 1. Определение параметров распавшейся струи

Для количественных оценок спектра шума струи необходимо измерить (или рассчитать теоретически) основные параметры распавшейся

струи — скорость, размеры капель, форму и амплитуду отдельного импульса, возникающего при падении капли на твердую стенку, частоту следования импульсов.

Определение скорости струи. Использовались два способа определения скорости струи: непосредственно по давлению, измеренному манометром в резервуаре перед соплом, и по секунднему расходу воды. В случае хорошо обработанных отверстий оба способа давали совпадающие результаты.

Определение размеров капель. Причины разбиения струи на капли заключены в неустойчивости цилиндрического столба

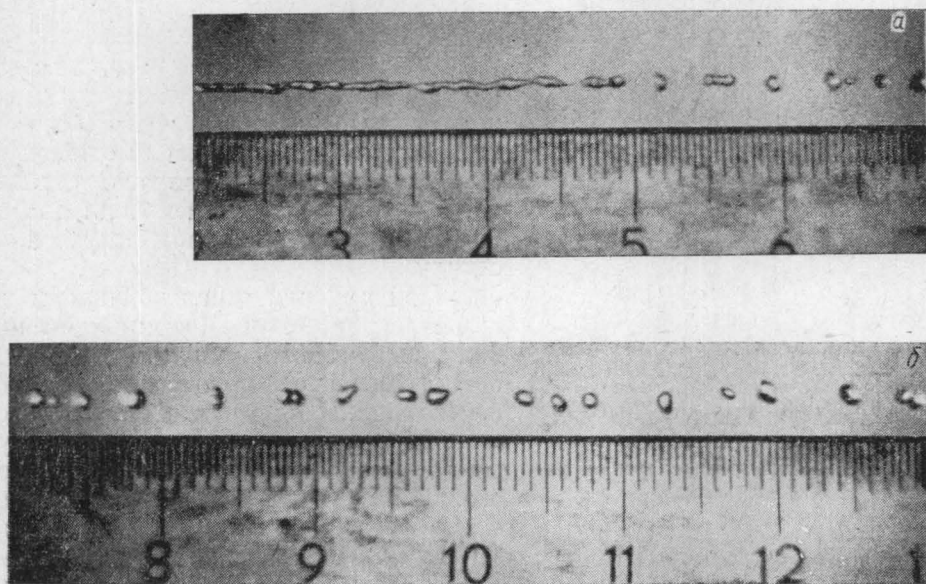


Рис. 1. Фотографии струи воды, вытекающей из отверстия диаметром 1 мм под давлением 0,8 атм. Нуль/масштабной линейки совмещен с соплом. Начальный участок струи 2—7 см (а) и участок 7—13 см (б)

жидкости: случайно возникающие осесимметричные возмущения при некоторых длинах волн начинают нарастать вдоль потока, пока не возникнут перетяжки и струя не разобьется на капли. На рис. 1 изображены последовательные стадии распада струи. Съемка производилась при импульсном освещении, время экспозиции составляло  $\sim 10$  мк сек. Как видно из приведенных фотографий, капли различны по размерам и в полете не сохраняют сферическую форму.

Рэлей<sup>1</sup> рассчитал, что максимальная неустойчивость возникает при длине волны  $\lambda = 4,5d$  ( $d$  — диаметр сопла). Отсюда можно получить по порядку величины значение наиболее вероятного радиуса капли  $\bar{R}$ :

$$\frac{4}{3} \pi \rho \bar{R}^3 \approx \lambda \rho \frac{\pi d^2}{2}, \text{ т. е.}$$

$$\bar{R} \approx d. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Рэлей. Теория звука, ч. II, М., ГИТТЛ, 1955.

Для определения массы капель был поставлен эксперимент. Капли на излете горизонтально истекающей струи падали в стеклянную ювету с маслом, где сохраняли достаточное время сферическую форму. Ювета фотографировалась контактным способом и по отпечаткам определялись размеры капель.

Экспериментально полученная гистограмма функции распределения радиусов капель приведена на рис. 2 ( $x$ -отношение  $R/d$ ). Сплошная кривая на том же рисунке — аппроксимация функции распределения гауссовой кривой со средним значением  $\bar{x}=1$  и дисперсией  $\sigma=0,17$ :

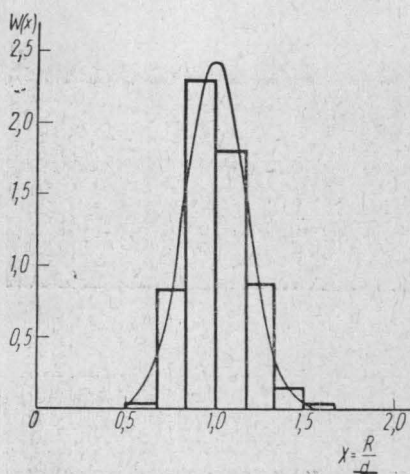


Рис. 2. Функция распределения радиусов капель

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (2)$$

Форма, величина и длительность импульса. Для определения формы импульса силы  $F(t)$ , возникающего при ударе капли о твердую поверхность, использовалась установка, в которой падающие капли разбивались о пьезокристаллическую пластинку.

При падении отдельной капли на пьезоэлектрическом приемнике возник электрический импульс. На рис. 3 представлена осциллограмма изменения напряжения на приемнике. В качестве масштаба времени служит синусоидальный сигнал частоты 5 кГц. (Постоянная времени чувствительного элемента в этом опыте не превышала 10 мксек.) Характерно, что импульс

имеет крутой передний фронт и более пологий спад. Как и предполагалось, длительность импульса того же порядка (величины, что и  $T = \frac{R}{v}$  (на рис. 3 соответствует  $T=0,45$  мсек). Поскольку другие постоянные времени, связанные с поверхностным натяжением и скоростью звука, существенно отличаются от  $T$ , то можно предположить, что  $T$  является единственным параметром, определяющим форму импульса.

Для теоретических расчетов оказалось удобным аппроксимировать импульс силы следующей эмпирической формулой:

$$F(t) = C(v, R) e^{-\frac{t}{\beta T}} \left(\frac{t}{\beta T}\right)^{\alpha-1}, \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  — величины порядка единицы. В дальнейшем предполагается, что эти параметры не меняются значительно при изменении скорости струи и радиуса капель. Амплитуду  $C(v, R)$  можно определить из закона сохранения количества движения:

$$\int_0^{\infty} F(t) dt = \frac{4}{3} \pi \rho R^3 v, \text{ т. е.} \\ C(v, R) = \frac{4\pi R^3 \rho v}{3\beta T \Gamma(\alpha)}. \quad (4)$$

Определение средней частоты следования импульсов. Так как процесс разбиения струи на капли случайный, то можно считать все капли летящими независимо друг от друга; тогда для расчетов необходимо определить только среднюю частоту следования капель  $\bar{v}$ .

Если предположить, что все капли одинаковые (радиуса  $\bar{R}$ ), то из закона сохранения массы получим

$$\frac{\pi d^2}{4} \rho v = \bar{v} \frac{4}{3} \pi \bar{R}^3 \rho.$$

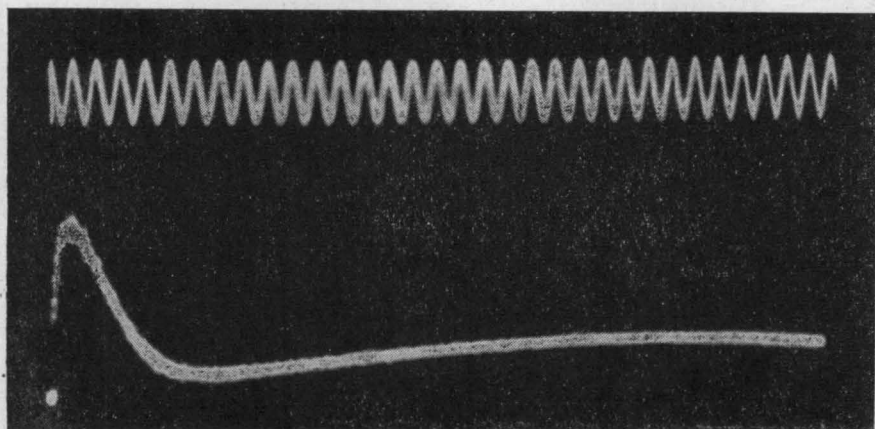


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения на приемнике

Воспользовавшись соотношением (1), запишем

$$\bar{v}_1 = \frac{3}{16} \frac{v}{\bar{R}} = \frac{3}{16} \frac{1}{T}. \quad (5a)$$

Если же учесть, что размеры капель распределены вокруг среднего значения по закону (2), то нужно ввести «дифференциальную» частоту следования — число капель в единицу времени, имеющих размеры от  $r$  до  $r + dr$ :

$$dv = N_0 W(r) dr,$$

где  $N_0$  — полное число капель в единицу времени; его можно определить также из закона сохранения массы:

$$N_0 = \frac{\pi d^2}{4} \rho v \frac{3}{4\pi \bar{R} (3\sigma^2 + \bar{R}^2)}. \quad (5b)$$

## § 2. Расчет спектральной плотности шума струи

Будем рассматривать сначала распавшуюся струю как поток одинаковых капель, случайно следующих друг за другом. Определим спектральную плотность силы, возникающей при ударе капель о твердую стенку.

Спектр одиночного импульса, форма и амплитуда которого заданы выражениями (3) и (4), будет

$$Q(\omega) = \int_0^{\infty} F(t) e^{i\omega t} dt = 4\pi \bar{R}^3 \rho v (1 - i\omega\beta T)^{-\alpha}. \quad (6)$$

Для случайной последовательности таких импульсов, следующих со средней частотой  $\nu$ , спектральная плотность определится выражением

$$S(\omega) = \bar{\nu} Q(\omega) Q^*(\omega) = \frac{\pi^2}{3} \rho^2 v^3 \bar{R}^5 [1 + (\beta\omega T)^2]^{-\alpha} = S_0 [1 + \Omega^2]^{-\alpha}. \quad (7)$$

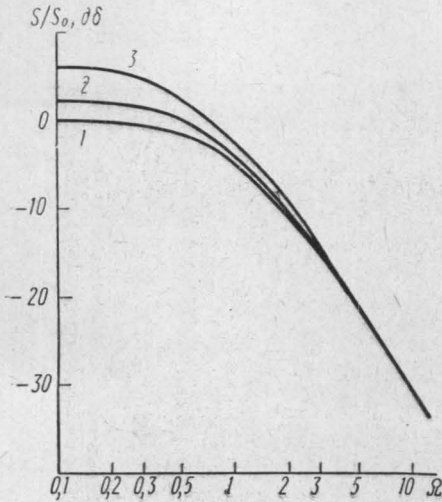


Рис. 4. Теоретические кривые спектральной плотности при  $\alpha=1$  и  $\beta=1,0$  и различных значениях  $\sigma$ :

$$1-\sigma=0; \quad 2-\sigma=\frac{1}{4}; \quad 3-\sigma=\frac{1}{2}$$

Здесь  $S_0$ — значение спектральной плотности при  $\omega=0$ ;  $\Omega=\beta\omega T$ — безразмерная частота.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , характеризующие форму импульса, могут быть определены экспериментально. Например, для импульса, изображенного на рис. 3,  $\alpha=1,5$ ,  $\beta=0,8$ .

На рис. 4 представлены в логарифмическом масштабе теоретические кривые спектральной плотности в функции безразмерной частоты  $\Omega$  при  $\alpha=1,5$ . По оси ординат отложены значения в децибеллах относительно  $S_0$ .

Кривая (1) построена по формуле (7) для случая, когда все капли считаются одинаковыми. Кривые (2) и (3) получены по аналогичным формулам в предположении, что размеры капель распределены по нормальному закону с дисперсиями  $\sigma_2 = \frac{1}{4}$  и  $\sigma_3 = \frac{1}{2}$  соответственно.

Мы видим, что учет функции распределения приводит лишь к некоторому увеличению спектральной плотности в области низких частот и не влияет на наклон спектра в области высоких частот.

### § 3. Экспериментальное определение спектра струи

Для экспериментального определения спектра шума струи был использован пьезоэлектрический приемник — специальный герметичный гидрофон, собственные частоты которого лежат выше интересующей нас области частот (10—100 кГц). Струя направлялась перпендикулярно к поверхности гидрофона. Гидрофон можно было передвигать, располагая на различных расстояниях  $L$  от отверстия. Электрический сигнал с приемника подавался через усилитель на спектроанализатор С5-2; спектр шума записывался с помощью самописца Н-110.

На рис. 5 приведено несколько спектрограмм, показывающих изменение спектра шума при удалении гидрофона от отверстия. Внизу на спектрограмме нанесены частоты в килогерцах.

В этом опыте диаметр сопла  $d=0,21$  мм, скорость струи  $v=30$  м/сек. Расстояния  $L$  от отверстия сопла до гидрофона представлены на рис. 4. При  $L=1$  см (кривая 1) струя еще не распалась, при  $L=2$  см начинается распадение струи на капли, при  $L \geq 3$  см — струя полностью распадается. После распада струи уровень шума сильно

возрастает (кривые 2 и 3), далее спектр все более выравнивается, так как последовательность капель по мере удаления от места образования

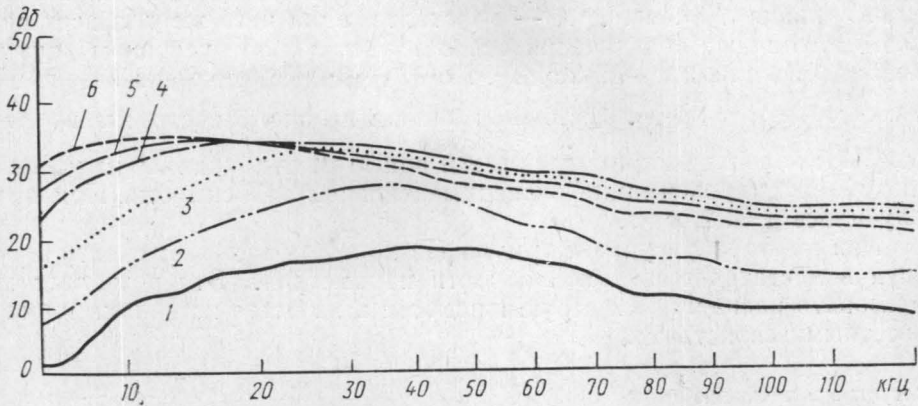


Рис. 5. Спектрограммы шума струи при удалении гидрофона от отверстия.  
1— $L=1$ ; 2— $L=2$ ; 3— $L=3$ ; 4— $L=5,2$ ; 5— $L=6,2$  и 6— $L=35$  см

приобретает более случайный характер (см. рис. 1). Начиная с некоторого расстояния, спектр практически не меняется (кривые 4 и 5). При

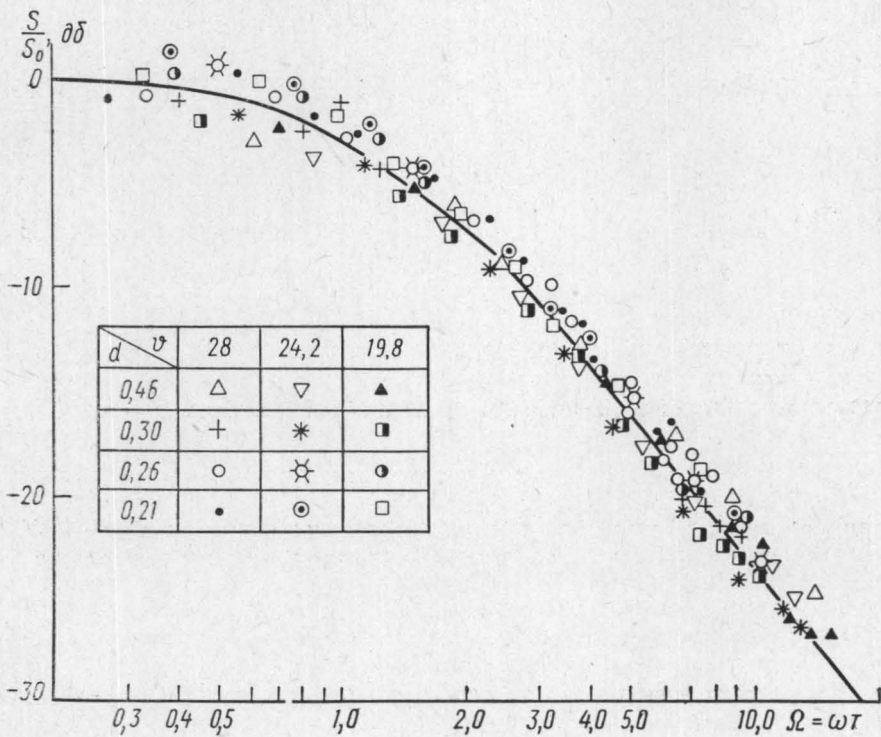


Рис. 6. Спектральная плотность шума струи для различных скоростей струи  $v$  (м/сек) и диаметров отверстий  $d$  (мм)

значительном удалении (кривая 6) уровень шума начинает снижаться из-за уменьшения скорости капель.

Спектры полностью распавшейся струи были сняты для разных диаметров отверстий и скоростей истечения. На рис. 6 нанесены экспериментальные значения спектральной плотности в децибеллах относительно уровня  $S_0 = Ad^5v^3$ . ( $A$  — константа, одна и та же для всех случаев.) Различные обозначения относятся к разным условиям опыта, указанным в таблице на рисунке. По оси абсцисс отложена безразмерная частота  $\Omega = \omega\beta \frac{d}{v}$ . Сплошная кривая на рис. 6 построена по формуле (7); значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  при этом подбирались из условия наилучшей аппроксимации экспериментальной зависимости. При этом получилось  $\alpha = 1,2$ ,  $\beta = 1$ .

Как видно из рисунка, формула (7) хорошо описывает спектр шума струи в достаточно широкой области параметров. Это позволяет использовать распавшуюся струю жидкости в качестве источника шума с известными свойствами.

Поступила в редакцию  
26.7 1970 г.

Кафедра  
общей физики для мехмата