

УДК 534.222.2

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ СО СТОРОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА НА ОГРАНИЧЕННУЮ ОБТЕКАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Грешилов Е. М., Миронов М. А., Ткаченко В. Г.

Изложены результаты экспериментального исследования касательных сил, действующих на обтекаемую поверхность со стороны турбулентного течения — основных источников гидродинамического звука и вибраций при обтекании гладких однородных поверхностей.

Как следует из работ [1—5], основной вклад в излучение звука турбулентностью над гладкой поверхностью вносят пульсации касательных сил, действующих на среду со стороны обтекаемой поверхности. Основной характеристикой турбулентности как источника звука и вибраций является спектр касательных сил $F^2(f)$, где f — частота. Он равен интегралу по переменным разделения x, y взаимного спектра касательных напряжений $\Pi_\tau(f, x, y)$, действующих на поверхность:

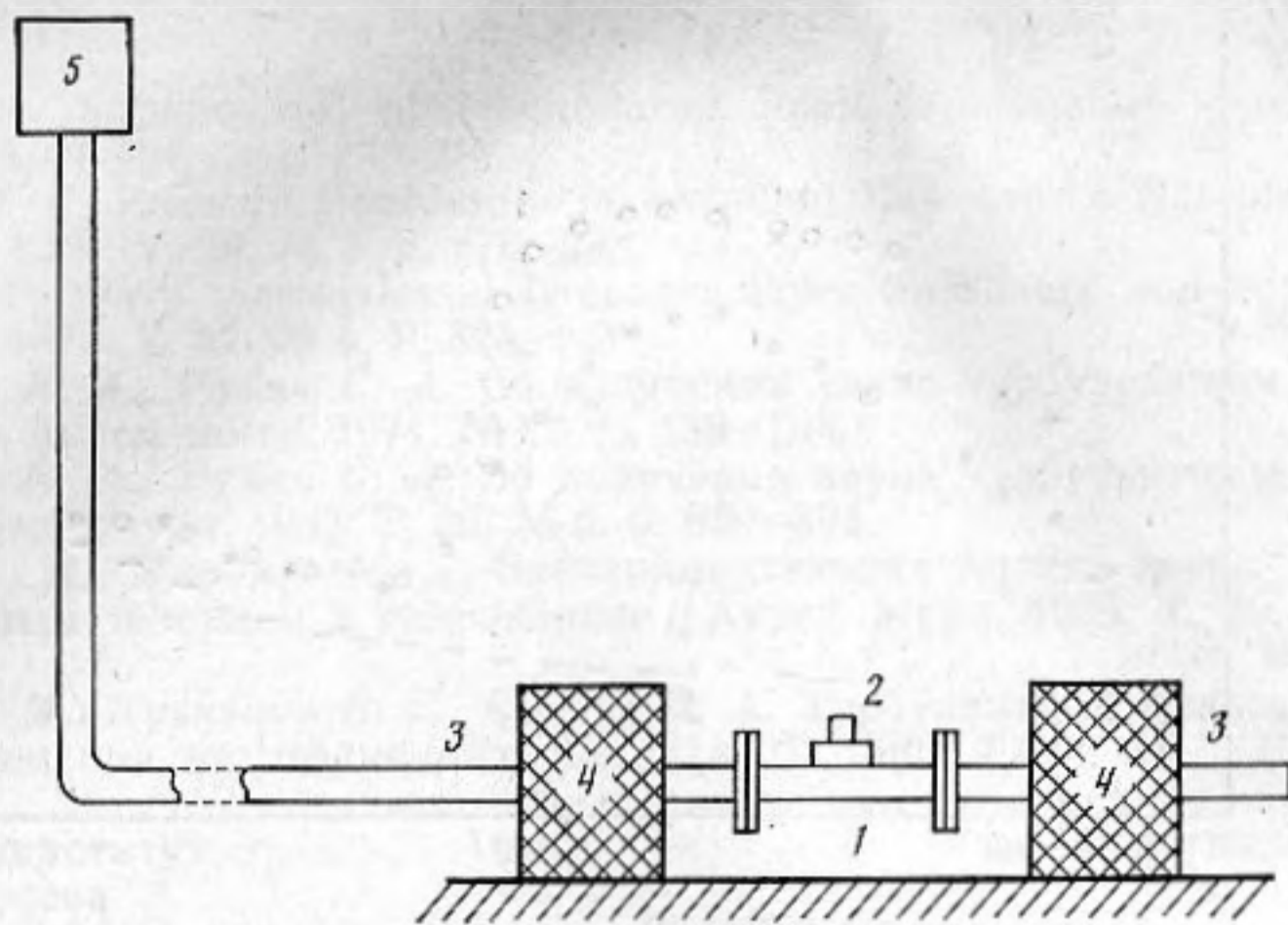
$$F^2(f) = \int \Pi_\tau(f, x, y) dx dy = \tau^2(f) \sigma(f). \quad (1)$$

Подчеркнем, что для расчета спектра излучаемого звука (или вибраций в случае податливой границы) необходимо знать именно произведение спектра касательных напряжений $\tau^2(f)$ на площадь их корреляции $\sigma(f)$. Учитывая это, а также очевидные трудности измерения пространственной корреляционной функции касательных напряжений с точностью, достаточной для надежного определения площади корреляции, представляется правильным измерять непосредственно произведение спектра напряжений на площадь их корреляции, т. е. спектр касательной силы. Для этого необходимо измерить спектр силы, действующей на достаточно большой элемент обтекаемой поверхности такой, чтобы его размеры значительно превосходили масштабы корреляции касательных напряжений. Деля измеренный спектр на площадь этой поверхности, получим спектр силы, действующий на единичную площадь. Размерность этой величины — $\text{Н}^2/\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$ (размерность спектра касательных напряжений — $\text{Па}^2/\text{Гц}$). Зная спектр касательных сил, можно рассчитать спектр звука, излучаемого пристенной турбулентностью, спектр продольных и изгибных волн, возбуждаемых при обтекании оболочки и т. д.

В настоящей работе изложены результаты измерения спектра касательных сил посредством измерения спектра касательных ускорений элемента обтекаемой поверхности. Если размеры этого элемента много меньше длин волн (продольной и изгибной), а сам он достаточно хорошо виброизолирован от остальной поверхности, искомый спектр касательной силы $F^2(f)$ связан с измеряемым спектром ускорений $a^2(f)$ простым соотношением:

$$F^2(f) = \frac{m^2}{S} a^2(f). \quad (2)$$

Здесь m — масса элемента, S — площадь его обтекаемой поверхности. Исследованы осевые вибрации отрезка круглой трубы, возбуждаемой турбулентным течением воды внутри нее. Установка показана на фиг. 1. Здесь

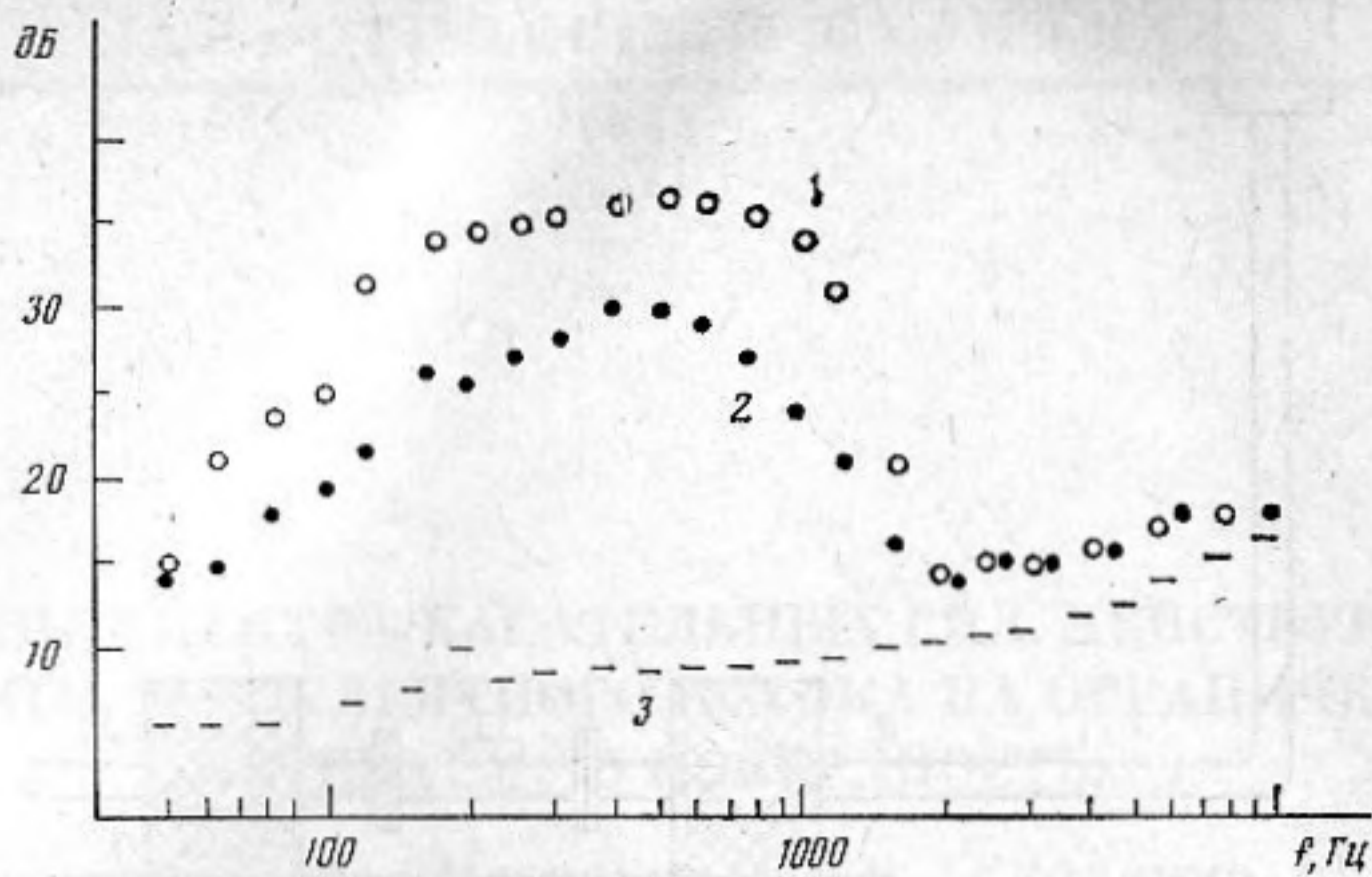


Фиг. 1. Схема экспериментальной установки

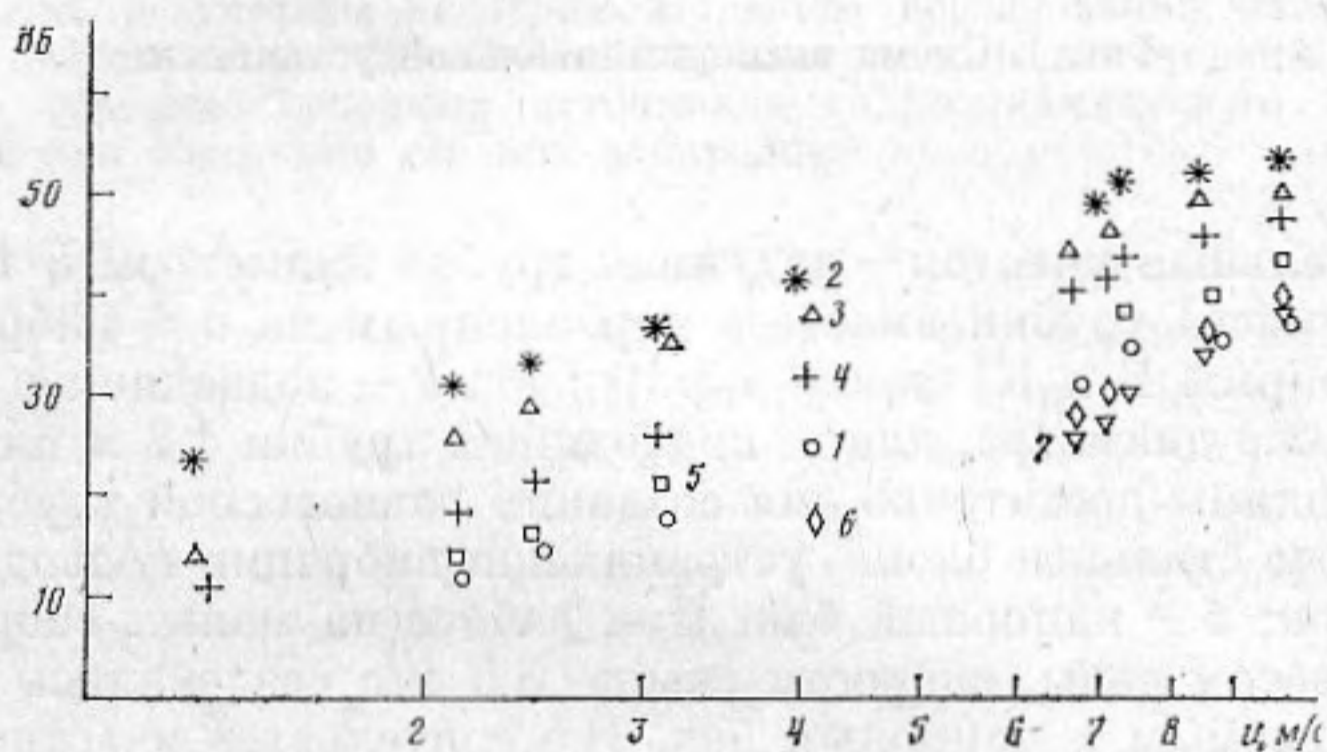
1 — измерительный участок — латунная трубка диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ м и длиной 10^{-1} м, масса трубки вместе с укрепленным на ней вибродатчиком 2 (тип 4333 фирмы Б и К) равна $4,3 \cdot 10^{-2}$ кг; 3 — подводящая и отводящая трубки того же диаметра, длина подводящей трубки 1,2 м или 120 калибров (такой длины достаточно для создания равновесной турбулентности); 4 — массивные стальные блоки, устраняющие вибрации подводящей и отводящей трубок; 5 — напорный бак. При работе на малых скоростях напор создавался весом воды, скорости свыше 3,5 м/с создавались сжатым воздухом, подаваемым в напорный бак. Измерительный участок соединялся с подводящей и отводящей трубками специальными резиновыми муфтами, служащими для центровки и виброразвязывания измерительного участка. Специальными экспериментами определялась эффективность виброразвязывания, которая на частотах выше 200 Гц была не хуже 10 дБ.

Измерения вибраций измерительного участка, генерируемых турбулентным потоком, показали, прежде всего, что осевые вибрации превосходят вибрации в перпендикулярных к оси направлениях. На фиг. 2 приведены для примера спектры вибраций. Скоростные зависимости осевых вибраций для разных частотных диапазонов в $1/3$ -октавных полосах частот представлены на фиг. 3. С повышением частоты наклон, как видно, увеличивается. Если аппроксимировать представленные зависимости степенными функциями $a^2 \sim u^n$, то показатель n меняется от 3 на низких частотах (до 630 Гц) и до 7 на частоте 8 кГц. Следует обратить внимание на изменение наклона при увеличении скорости на низких частотах. На фиг. 4 приведен спектр касательной силы в полосе 1 Гц, рассчитанный по формуле (2) по измеренным спектрам ускорений трубки.

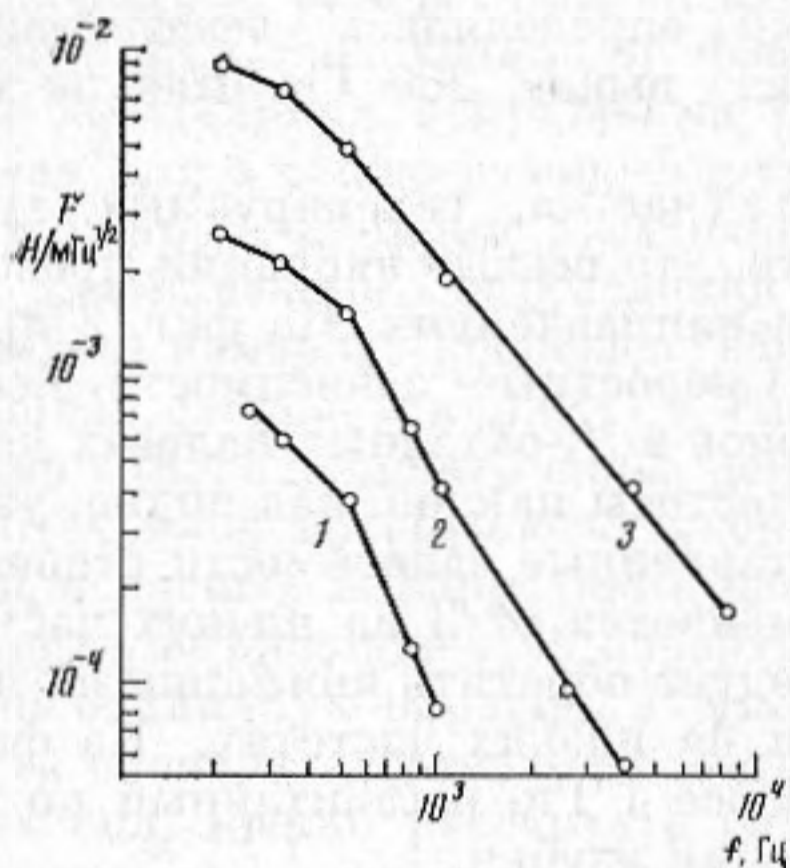
Если предположить, что пульсации касательных сил на плоской обтекаемой границе совпадают (по крайней мере по порядку величины) с пульсациями касательных сил, измеренными в нашем эксперименте при равенстве скорости обтекания плоскости скорости на оси трубки (скорость на оси u_0 связана со средней по сечению скоростью u соотношением $u_0 \sim 1,2u$), то по спектрам силы фиг. 4 можно рассчитать спектр приведенного звукового давления, порождаемого турбулентным пограничным слоем над жесткой поверхностью. Оценки показывают, что спектр приведенного звукового давления, рассчитанный по измеренному спектру касательных сил, удовлетворительно совпадает, несмотря на различия методик измерения, со спектром приведенного звукового давления, полученном при прямом измерении звука в гидроканале [6]. Незначительные расхождения в результатах, вероятно, связаны с особенностями течений и различием в толщинах пограничных слоев. Прямые измерения взаимного спектра



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 2. Спектры вибраций трубки при скорости течения 3,5 м/с: 1 — осевых, 2 — нормальных к оси ускорений измерительной трубки, 3 — электрическая помеха

Фиг. 3. Скоростные зависимости уровней вибраций для некоторых частот: 1 — 125 Гц, 2 — 250, 3 — 630, Гц; 4 — 1,6 кГц; 5 — 3,15; 6 — 6,3; 7 — 8 кГц

Фиг. 4. Спектры касательных сил для разных скоростей течения: 1 — $u_{ср} = 2,1$ м/с, 2 — 4,1, 3 — 8,6 м/с

касательных напряжений проведены в работе [7] для пристенных течений воздуха. Детальное сопоставление наших результатов с результатами [7] выходит за рамки настоящей работы в основном из-за неопределенности в методике пересчета.

Результаты, полученные в настоящей работе, указывают на работоспособность предложенного метода экспериментального исследования источников звука и вибраций в пристенной турбулентности. Представляется, что он будет полезен и для исследования влияния уступов и шероховатостей обтекаемой поверхности, различных добавок в обтекающую жидкость и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Curle N.* The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound // *Proc. Roy. Soc. A.* 1955. № 231.
2. *Kraichnan R. H.* Pressure fluctuation in turbulent flow over a flat plate // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1956. V. 28. № 3. P. 378-390.
3. *Landahl M. T.* Wave mechanics of boundary layer turbulence and noise // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1975. V. 57. № 4. P. 824-831.
4. *Наугольных К. А., Рыбак С. А.* Об излучении звука турбулентным пограничным слоем // *Тр. Акуст. ин-та.* 1971. № 16. С. 129-134.
5. *Наугольных К. А., Рыбак С. А.* Об излучении звука турбулентным пограничным слоем // *Акуст. журн.* 1980. Т. 26. № 6. С. 890-894.
6. *Грешилов Е. М., Миронов М. А.* Экспериментальная оценка звука, порождаемого турбулентным течением в гидроканале // *Акуст. журн.* 1983. Т. 29. № 4. С. 460-469.
7. *Ефимцов Б. М., Кузнецов В. Б., Сысоев В. А.* Турбулентные пульсации касательного напряжения на стенке // *Уч. зап. ЦАГИ.* 1983. Т. 14. № 2. С. 67-76.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15.VIII.1986