каждой из диаграмм n-лучевой рефлекторной антенны появляются $n-1$ «всплесков» в направлениях основных лепестков остальных $n-1$ диаграмм.

Покажем это на примере двухлучевой антенны. Ниже приведены расчетные и экспериментальные диаграммы направленности акустической антенны с параболическим рефлектором, работающей в жидкости и схематически изображенной на фиг. 1, где Р — рефлектор, Пр — преобразователь. Размеры антенны даны в длинах волн. В качестве преобразователей были взяты несколько отличающиеся по параметрам пластинчатые пьезокерамические преобразователи, работающие на частоте механического резонанса.

На фиг. 2 кривые *1*, *2* — нормированные экспериментальные диаграммы направленности в плоскости, совпадающей с плоскостью фигуры (ввиду неидентичности используемых преобразователей «всплески» по уровню несколько отличаются друг от друга); кривые *3*, *4* — нормированные диаграммы направленности, рассчитанные с учетом акустического взаимодействия преобразователей и неидентичности последних (формула (4)); кривые *5*, *6* — диаграммы направленности, рассчитанные без учета акустического взаимодействия преобразователей, т. е. $|F_i(\mathbf{u})|$. Сопоставляя диаграммы *1*, *2* с *5*, *6* видим, сколь значительное влияние может оказать акустическое взаимодействие преобразователей на направленные свойства многолучевых рефлекторных антенн. Удовлетворительное совпадение диаграмм *1* с *3* и *2* с *4* говорит о том, что эффект влияния акустического взаимодействия преобразователей на направленные свойства может быть с достаточной для практики точностью учтен расчетным путем.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Карновский. Линейная теория акустических резонаторов. Ж. техн. физ., 1943, 12, 11—12, 667—683.
2. В. И. Маяцкий. Оценка направленных свойств приемных антенн с учетом акустического взаимодействия их элементов. Вестн. Киевск. политехн. ин-та, Сер. радиотехн., 1966, 3, 119—125.

Киев

Поступило в редакцию
27 декабря 1967 г.

УДК 534:532.526

О СПЕКТРЕ И КОРРЕЛЯЦИИ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ СТЕНКИ

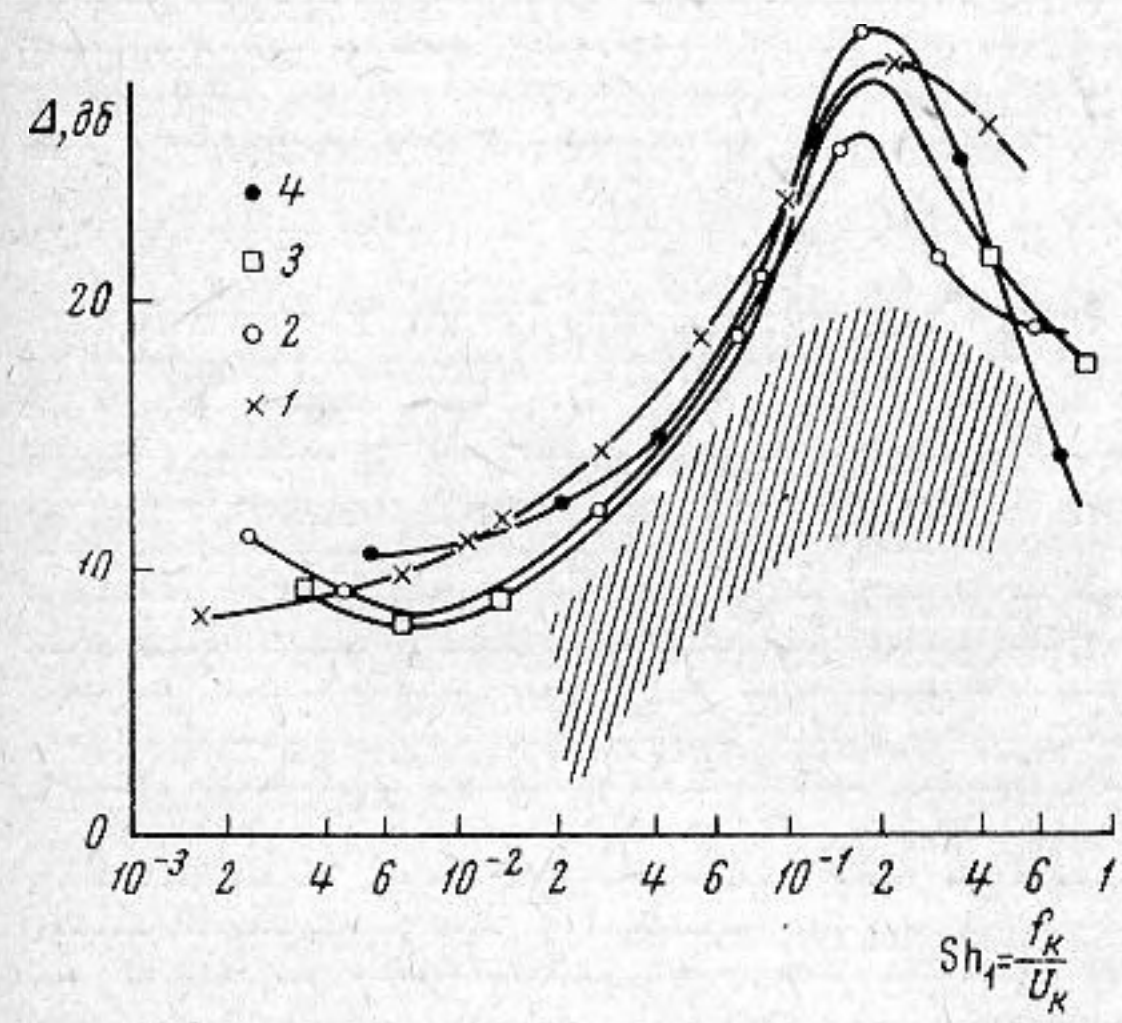
Е. М. Грешилов, Л. М. Лямшев

В публикациях [1—3] отмечалось, что равномерная микрошероховатость поверхности оказывает весьма сильное влияние на спектральные свойства пристеночных пульсаций давления, однако приведенные в указанных работах результаты имеют, казалось бы, противоречивый характер, что до сих пор, насколько нам известно, не нашло объяснения.

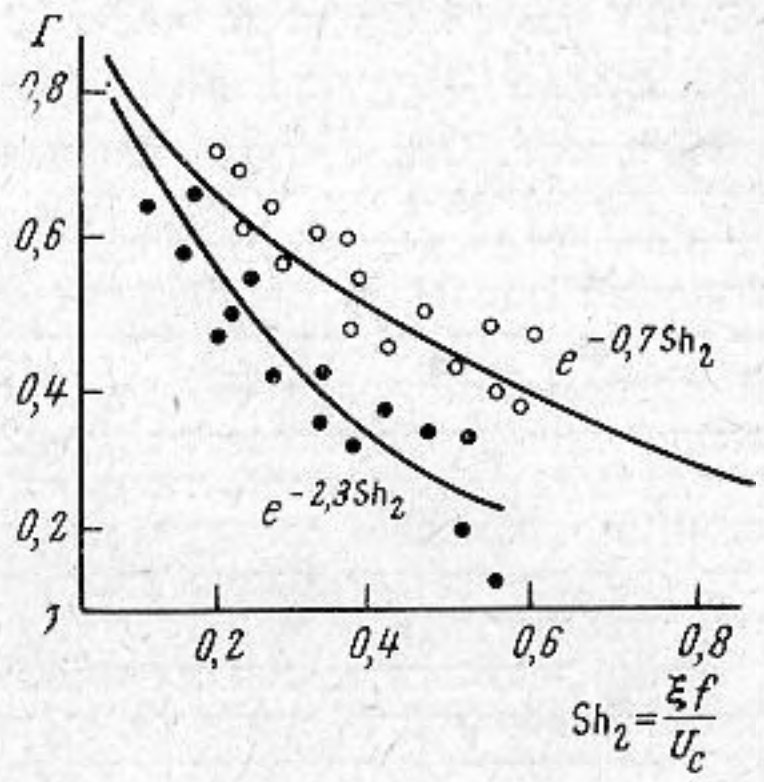
Экспериментальное исследование спектральных и корреляционных свойств пристеночных пульсаций давления при обтекании шероховатой стенки проводилось нами на гидродинамической установке напорного типа. Рабочая часть установки была выполнена в виде прямоугольного канала сечением 2×7 *см*. В центре съемной плиты длиной 80 *см* заподлицо с ее внутренней поверхностью устанавливались восемь идентичных приемников давления диаметром 0,25 *см*, расположенных вдоль потока так, что расстояние между их центрами составляло 0,4 *см*. На свеже-покрашенной поверхности плиты создавалась искусственная шероховатость в виде абразивного песка, средний размер зерен которого был равен $6 \cdot 10^{-2}$; $1{,}2 \cdot 10^{-2}$; $0{,}6 \cdot 10^{-2}$ *см*. Песок наносился на всю поверхность плиты, в том числе и на поверхности измерительных приемников. Было установлено, что нанесение песка не влияет на чувствительность приемников. Измерения проводились на расстоянии 1,5 *м* от входа в канал, где имелось полностью установившееся течение.

Во время опытов электрический сигнал с выхода приемников подавался на усилитель, а затем на анализатор спектра. Спектральный анализ сигнала осуществлялся в третьоктавных полосах в диапазоне частот от 640 *гц* до 10 *кгц*. При корреляционных измерениях осуществлялась запись электрических сигналов с выхода той или иной пары приемников на двухканальный магнитофон. Корреляционный анализ осуществлялся в третьоктавных полосах коррелометром типа К3-3Т в диапазоне частот от 120 *гц* до 5 *кгц*. В процессе эксперимента определялась средняя скорость потока в канале, которая от опыта к опыту могла быть изменяема в пределах от 5 до 10 *м/сек*; измерялся также перепад давления в рабочей части канала на участке длиной 50 *см*. Было установлено, что разброс результатов измерений составил около 3 *дб*.

Измерения показали, что при изменении скорости потока в пределах от 5 до 10 *м/сек*, наличие шероховатости приводит в основном к увеличению спектральной плотности пристеночных пульсаций давления по сравнению со случаем гладкой поверхности на 10—20 *дб* в диапазоне высоких частот. При этом характер изменения спектра зависит от высоты шероховатости. Так, для крупной шероховатости это увеличение наблюдается уже на частотах несколько выше 2 *кгц* и имеет широкополосный характер. Напротив, повышение спектральных уровней при наличии самой мелкой шероховатости происходит на частотах 6—10 *кгц* и имеет сравнительно



Фиг. 1



Фиг. 2

узкополосный характер. С изменением скорости потока характерная частота, на которой обнаруживалось максимальное увеличение спектральной плотности пульсаций давления, изменялась пропорционально скорости потока. Было обнаружено также, что шероховатость приводит к некоторой трансформации спектра пульсаций давления и в диапазоне низких частот; так, например, спектральные уровни на частотах ниже 1 *кгц* поднимались, на частоте 640 *гц* это превышение составляло 2—7 *дб*.

Возрастание спектральных уровней в высокочастотной области показано на фиг. 1. На этой фигуре по вертикальной оси отложены значения спектральной надбавки, представляющей собой превышение в децибеллах спектральной плотности пульсаций давления на шероховатой стенке над спектральной плотностью пульсаций давления на гладкой поверхности, а по горизонтальной оси откладываются значения числа Струхаля $\mathrm{Sh} = fk / Uk$ (U_k — характерная скорость обтекания гребня выступа, которая определялась расчетным путем по результатам измерений средней скорости потока воды в канале и перепаду давления в его рабочем участке, по формулам, предложенным в работе [4], а k — высота выступа, за которую принимался размер зерен песка).

Оказалось, что все высокочастотные спектральные надбавки, полученные в процессе измерений укладываются в заштрихованную область. Видно, что при обтекании шероховатой стенки спектральная надбавка имеет приближенно универсальный характер в диапазоне локальных чисел Струхаля $2 \cdot 10^{-2} < \mathrm{Sh}_1 < 6 \cdot 10^{-1}$ и при изменении локальных чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{U_{k \cdot k}}{\nu}$ в пределах $10^2 < \mathrm{Re} < 2{,}5 \cdot 10^3$; максимальное значение спектральной надбавки соответствует локальным числам Струхаля $10^{-1} < \mathrm{Sh}_1 < 6 \cdot 10^{-1}$ и достигает 10—20 *дб*.

Можно приближенно сравнить данные, приведенные в работах [1—3] с полученными результатами, если иметь в виду, что величина U_k по порядку равна скорости потока. При этом оказывается, что эксперименты [1] с вращающимся цилиндром, где были получены эффекты в 20—30 *дб*, соответствуют изменению чисел Струхаля в пределах $0{,}1 < \mathrm{Sh} < 0{,}4$, т. е. в области, где величина шероховатости весьма существенно влияет на спектральные характеристики пристеночных пульсаций давления. Значения локальных чисел Струхаля в экспериментах, описанных в работах [2, 3] не превосходят $\mathrm{Sh} < 10^{-2}$, что объясняет небольшие полученные спектральные надбавки в 3 *дб*.

Для выяснения влияния характера неоднородности поверхности на спектральные свойства пульсаций давления представляет интерес проведение экспериментов с регулярной периодической шероховатостью. Эти эксперименты были проведены на установке, где каналом служила хлорвиниловая трубка диаметром 10 *мм*. Шероховатость создавалась обжимом трубки на заранее изготовленных матрицах —

стержнях с профилем поверхности в виде резьбы. В процессе экспериментов проводились измерения вибраций поверхности трубки с помощью виброщупа.

На фиг. 1 приведены результаты экспериментов с трубками. Данные, относящиеся к скорости потока для *1* — 9,3; *2* — 7; *3* — 4,7; *4* — 3 *м/сек*. Результаты опытов относятся к поверхностям с шероховатостями высотой $1{,}2\cdot10^{-2}$ *см* и периодом 10^{-1} *см*.

Можно видеть, что для пульсаций давления в случае регулярной, двумерной шероховатости характерны большие спектральные надбавки, причем их максимальное значение соответствует числу Струхаля $Sh_1 \sim 0{,}2$—$0{,}4$.

Выше уже отмечалось, что наряду со спектральными характеристиками изучались корреляционные свойства пристеночных пульсаций давления у шероховатой поверхности. На фиг. 2 приведены кривые нормированного взаимного спектра Γ мощности пульсаций давления у гладкой стенки и шероховатой поверхности ($k = 6\cdot10^{-2}$ *см*) в функции числа Струхаля $Sh_2 = \frac{f\xi}{U_c}$, где ξ — расстояние между приемниками U_c — скорость переноса вихрей, которая была близка к средней скорости потока. Эти кривые строились по результатам экспериментального изучения пространственно-временных корреляционных функций и данным измерений скорости переноса вихрей аналогично тому, как это делалось в работе [5] при изучении пульсаций давления на гладкой стенке. Если для гладкой стенки экспериментальные точки (они показаны светлыми кружочками) практически совпадают с известной кривой Бейквелла [5], то для шероховатой поверхности показатель степени в экспоненте увеличивается до 2,3. При этом следует отметить, что поскольку корреляция наблюдалась лишь на частотах меньших 1—2 *кгц*, полученные корреляционные кривые следует интерпретировать как результат влияния шероховатости стенки на внешнюю часть пограничного слоя, заполненную крупномасштабными вихрями.

Итак, результаты измерений показывают, что основное действие равномерной микрошероховатости сводится к повышению высокочастотных турбулентных пульсаций давления в придонном слое, соответствующих пульсирующему течению во впадинах шероховатости [6]. Шероховатость воздействует также и на внешнюю часть пограничного слоя, при этом происходит некоторое повышение низкочастотных пульсаций давления на стенке, соответствующее усилению крупномасштабной турбулентности [7]. Причем, оказывается, что крупномасштабные вихри при наличии шероховатости вырождаются быстрее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. «Подводная акустика», М., «Мир», 1965, стр. 329.
2. L. W. Wilson. Experimental investigation of the noise generated by the turbulent flow around a rotating cylinder. J. Acoust. Soc. America, 1960, 32, 10, 1203—1207.
3. W. W. Willmarth, G. E. Woodrige. Measurements of the fluctuating pressure at the wall beaneth a thick turbulent boundary layer. J. fluid. Mech., 1962, 14, 2, 187—210.
4. И. К. Никитин. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
5. H. P. Bakewell. Longitudinal space-time correlation function in turbulent airflow. J. Acoust. Soc. America, 1963, 35, 6, 936—937.
6. М. В. Ханин. Исследование течения потока газа около шероховатой стенки. Пр. матем. и теор. физ., 1966, 6, 88—93.
7. Б. А. Фидман. О влиянии шероховатости стенок на структуру турбулентного потока. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1948, 12, 3, 255—260.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
1 марта 1968 г.

УДК 534.222:532.526.4

К ВОПРОСУ ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ЗВУКА ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

И. И. Долгова

Рассмотрим влияние упругой пластины на излучение звука турбулентным пограничным слоем. Предположим, что пластина лежит в плоскости XOY. Пусть p_1 — давление в пограничном слое толщиной δ над пластиной при $z > 0$, а p_2 — звуковое давление в полупространстве под пластиной при $z < 0$. Для функции p_1 справедливо уравнение распространения звука в турбулентной среде [1]:

$$\Delta p_1(\mathbf{r}) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p_1(\mathbf{r})}{\partial t^2} = f(\mathbf{r}), \tag{1}$$