

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

УДК 532.542.4:534

© 1992 г. В.Г. Акимов, В.В. Зосимов, А.Л. Сушков

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ ПРИСТЕНОЧНЫХ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ

В последние годы интенсивно исследуется присущая развитой гидродинамической турбулентности перемежаемость, различные проявления которой (аномальный скейлинг структурных функций скорости, перемежаемость концентрации пассивной примеси и т.д.) обусловлены сильной неоднородностью поля диссипации энергии. Основным результатом этих работ можно считать установление мультифрактальной структуры флуктуаций диссипации энергии [1, 2].

Перемежаемость процесса турбулентных пристеночных пульсаций давления исследовалась в работе [3] путем определения эксцесса распределений амплитуд пульсаций в различных полосах частот с целью определения влияния мелкомасштабных структур в пограничном слое.

В нашей работе представлены результаты исследований перемежаемости процесса турбулентных пристеночных пульсаций давления на масштабах, превышающих масштаб их корреляции. Исследования проводились на гидроканале гравитационного типа с рабочим участком длиной 3 м, представляющим собой трубу прямоугольного ($2 \times 7 \text{ см}^2$) сечения, при средних по сечению скоростях потока 5; 7; 10 м/с. Подробное описание канала содержится в работах [4, 5].

Пьезокерамические датчики пульсаций давления с круглой чувствительной поверхностью диаметром 1; 10 и 20 мм устанавливались заподлицо с поверхностью в центре верхней широкой стенки канала на расстоянии 2,5 м от входа, соединенного через конфузор с напорным баком. На этом участке канала течение представляет собой установившееся турбулентное течение в трубе [4].

Сигналы датчиков после усиления в полосе 100 Гц – 10 кГц подавались на вход анализатора спектров 2033 фирмы Брюль и Кьер, связанном через интерфейс КОП с ЭВМ ДВК-3, в которую считывались массивы цифровых отсчетов сигналов длиной 10 240 отсчетов. Период отсчетов – $2 \cdot 10^{-5}$ с. Отсчеты записывались на диск и затем обрабатывались.

Алгоритм обработки, вычисляющий так называемый спектр сингулярностей $f(\alpha)$, описан в [1]. Исходным для этого алгоритма является вычисление величин

$$P_{eq} = \sum_{l=1}^{N(l)} \left(\sum_{j=1}^l P_j^2 \right)^q,$$

где внутренняя сумма – сумма квадратов давления по l отсчетам – имеет смысл оценки средней мощности пульсаций давления на интервале длины l , а $N(l)$ во внешней сумме – число интервалов длины l в полной записи.

В отсутствие перемежаемости для интервалов, длина которых превышает длину корреляции процесса, должно, очевидно, быть $P_{eq} \sim l^{q-1}$, так как $N(l) \sim l^{-1}$.

Полученные нами записи пульсаций давления показали другое поведение.

В диапазоне масштабов, больших 256 ($5,12 \times 10^{-3}$ с), превышающих масштаб корреляции для всех видов датчиков и всех скоростей потока, имела место степенная зависимость $P_{eq} \sim l^{d_q}$ с $d_q \neq q - 1$.

На рис. 1, а показан пример поведения величины P_{eq} в этом интервале, а на рис. 1, б представлена зависимость d_q , сопоставленная с зависимостью $d_q = q - 1$ (пунктир) и полученной экспериментально зависимостью d_q , для сигнала датчика ϕ 2 см в отсутствие потока при возбуждении звука в канале пьезоизлучателем ϕ 5 см, расположенным в диффузоре, который возбуждался генератором белого шума в диапазоне 40 Гц – 12 кГц.

Зависимость d_q для турбулентных пульсаций давления интерпретировалась нами в терминах мультифрактальной модели [1]. В этой модели предполагается, что реализация процесса содержит совокупность фрактальных множеств точек разных размерностей $f(\alpha)$. Вблизи каждой точки любого из этих множеств величины $P_{eq} \sim e^{\alpha q}$. Тогда [1, 2] d_q и $f(\alpha)$ получают одно из другого преобразованием Лежандра. В нашей работе использовался прямой метод определения спектра сингуляр-

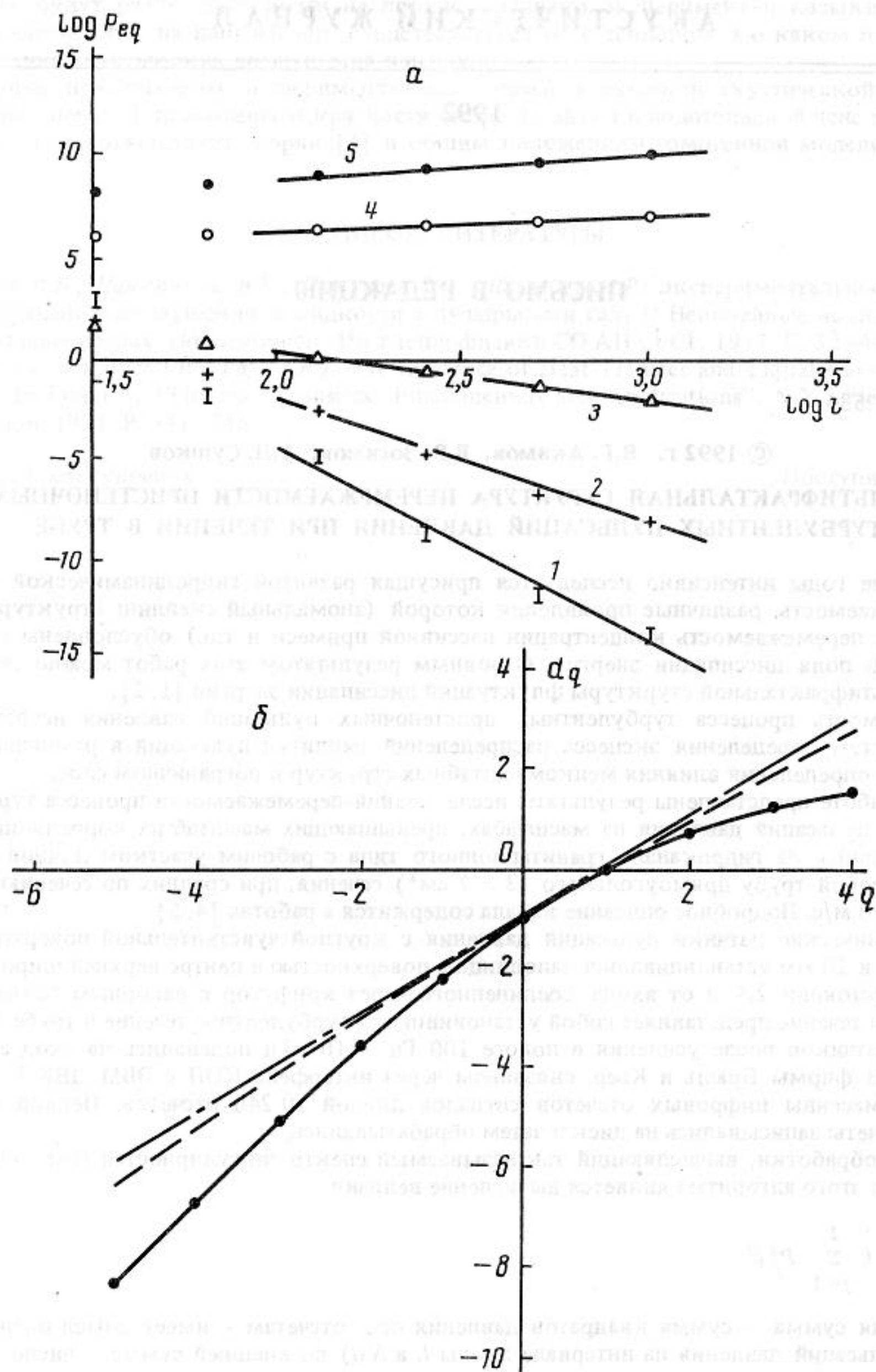


Рис. 1. Сейлинговое поведение пульсаций давления для датчика ϕ 1 см и скорости потока 10 м/с: а – зависимости $\log P_{eq}$ от $\log l$ для $q = -5$ (1), $q = -3$ (2), $q = -1$ (3), $q = 2$ (4), $q = 3$ (5); б – зависимость dq

ностей $f(\alpha)$ (минуя преобразование Лежандра d_q), опробованный в [2] применительно к диссипации энергии. В прямом методе определяются показатели скейлинга величины

$$\sum_1^{N(l)} \mu_{ql} \log \mu_{eq} \sim l^{f(q)}, \quad (1)$$

$$\sum_1^{N(l)} \mu_{ql} \log P_{l1} \sim l^{\alpha(q)}, \quad (2)$$

где $\mu_{ql} = (\sum_1^l P^2)^q / P_{lq}$, показатели $f(q)$ и $\alpha(q)$ дают неявное представление для $f(\alpha)$.

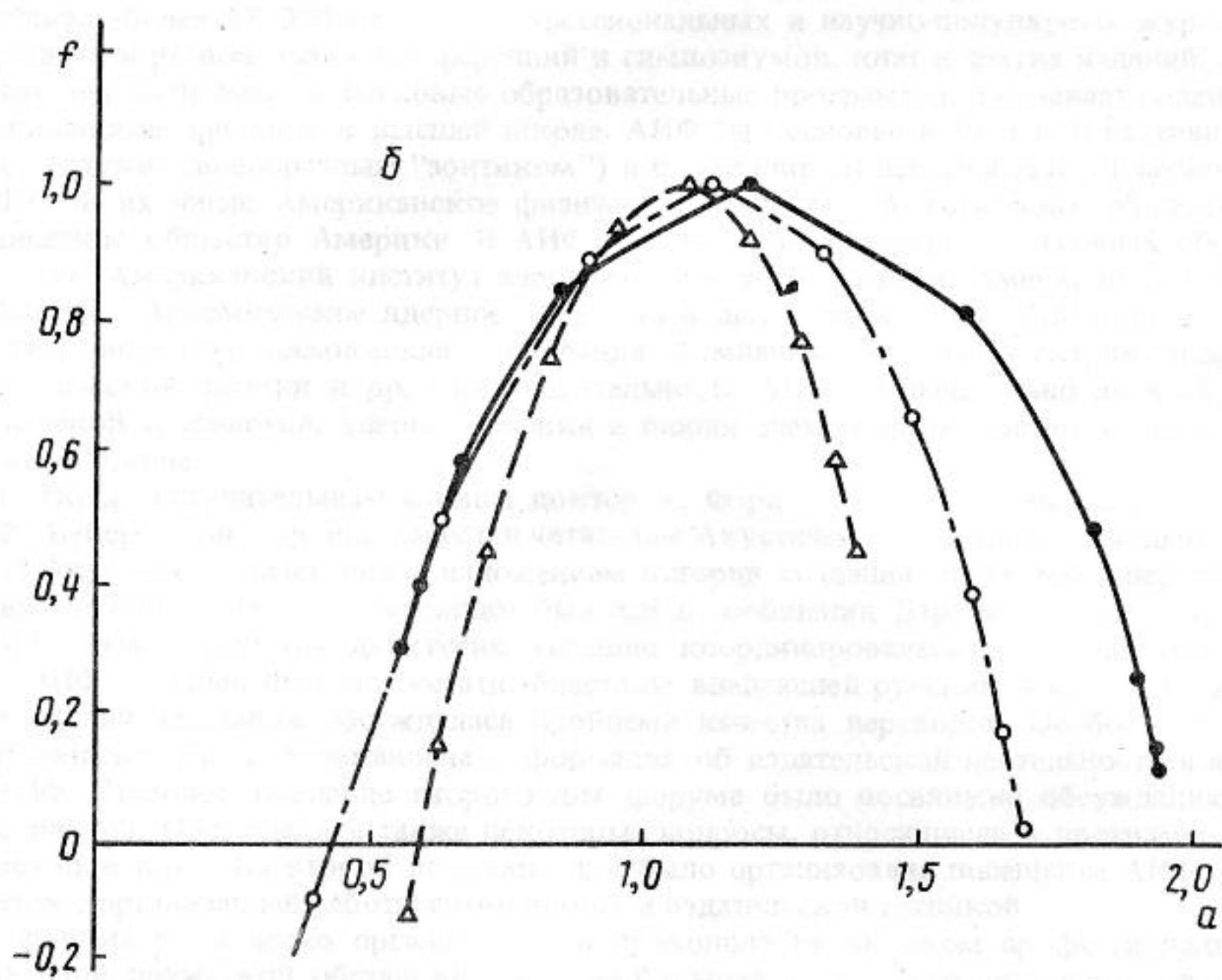
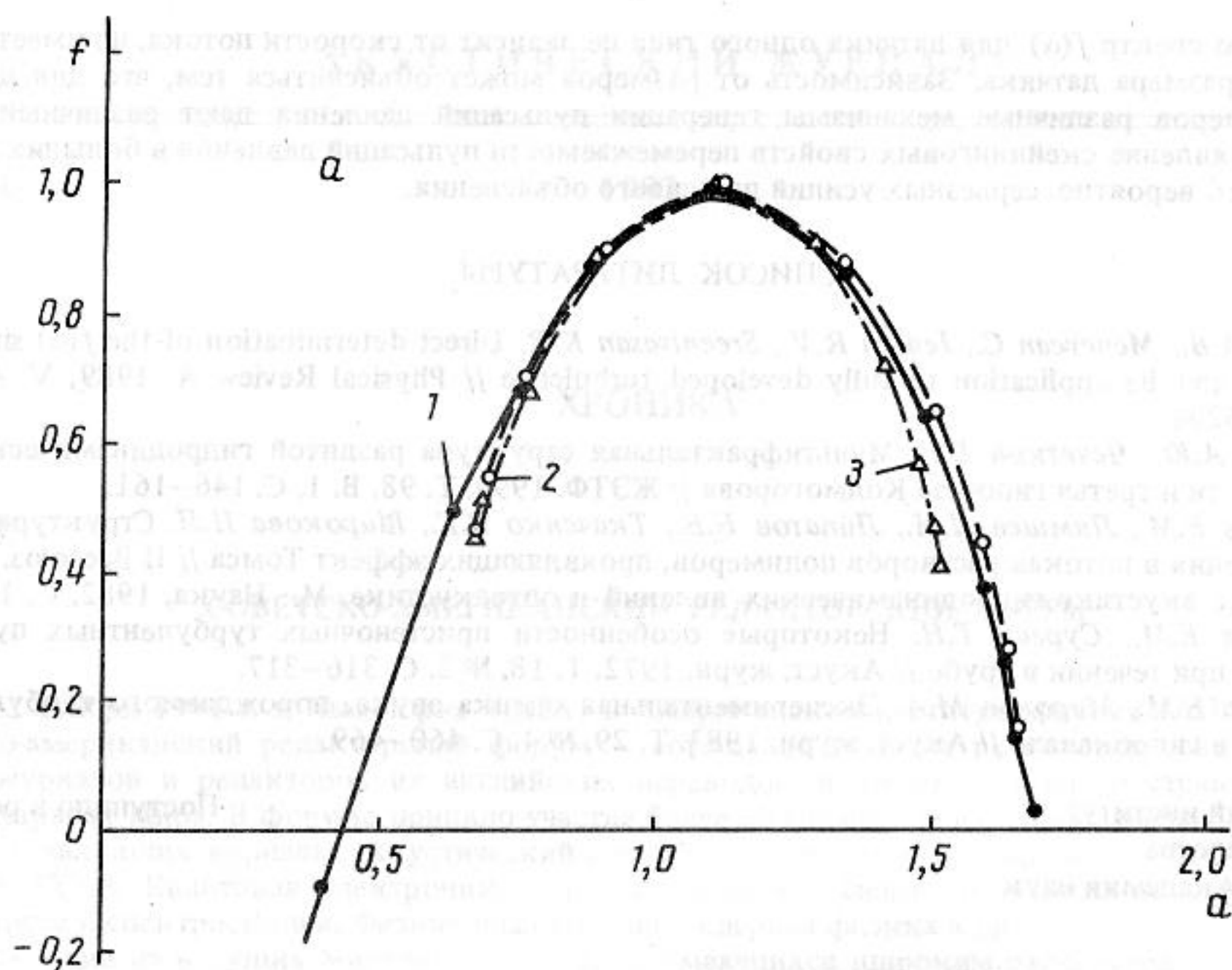


Рис. 2. Спектры сингулярностей $f(\alpha)$ для перемежаемости пульсаций давления: a — для различных скоростей 1 — 10; 2—7 — 3—5 м/с; b — для датчиков различных размеров 1—2 см, 2—1 см; 3—1 мм

На рис. 2, a , b показаны вычисленные по (1), (2) спектры сингулярностей $f(\alpha)$, для диапазона l — 256—1024 (с шагом $\times 2$) и $q = -5$ — $+4$ (с шагом 1). Для вычислений использовались 3—4 массива по 10 240 отсчетов в каждом режиме. Показатели вычислялись методом наименьших квадратов. Обработка показала стабильность результатов $f(\alpha)$ для разных массивов, соответствующих одному режиму (разброс $\pm 0,05$ для f и α на правом крыле спектра и значительно меньше на левом, т.е. при $q > 0$).

Видно, что спектр $f(\alpha)$ для датчика одного типа не зависит от скорости потока, но имеется зависимость от размера датчика. Зависимость от размеров может объясняться тем, что для датчиков разных размеров различные механизмы генерации пульсаций давления дают различный вклад. Само же проявление скейлинговых свойств перемежаемости пульсаций давления в больших масштабах потребует, вероятно, серьезных усилий для своего объяснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chhabra A.B., Menevean C., Jensen R.V., Sreenivasan K.R. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum and its application to fully developed turbulence // Physical Review A. 1989. V. 40. № 9. P. 5284–5294.
2. Турыгин А.Ю., Чечеткин В.Р. Мультифрактальная структура развитой гидродинамической турбулентности и третья гипотеза Колмогорова // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. В. 1. С. 146–161.
3. Грешилов Е.М., Лямшев Л.М., Липатов Б.В., Ткаченко В.Г., Широкова Н.Л. Структура пульсаций давления в потоках растворов полимеров, проявляющих эффект Томса // II Всесоюз. симпоз. по физике акустико-гидродинамических явлений и оптоакустике. М.: Наука, 1982. С. 127–130.
4. Грешилов Е.М., Сурган Т.Н. Некоторые особенности пристеночных турбулентных пульсаций давления при течении в трубе // Акуст. журн. 1972. Т. 18. № 2. С. 316–317.
5. Грешилов Е.М., Миронов М.А. Экспериментальная оценка звука, порождаемого турбулентным течением в гидроканале // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 4. С. 460–469.

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

Поступило в редакцию
12.07.91