

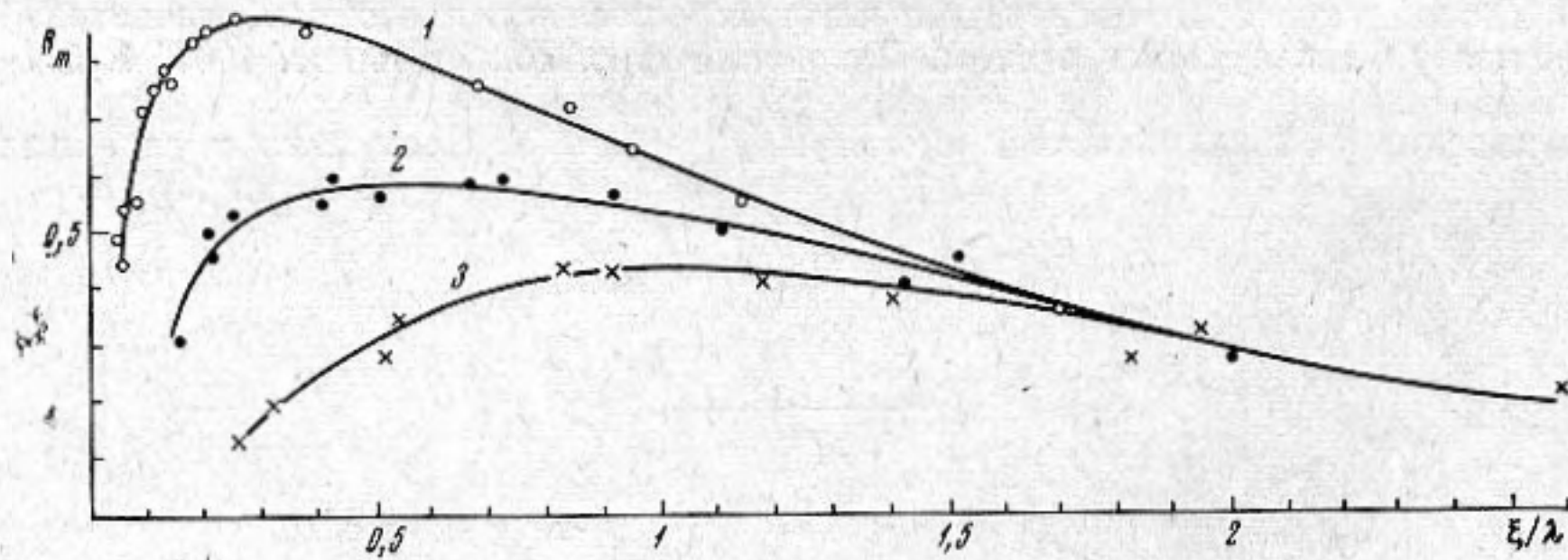
УДК 534.6:533.6.071.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ  
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ**

*И. Ф. Кадыков*

Приводятся результаты экспериментального изучения корреляционных характеристик турбулентных пристеночных пульсаций давления. Измерения производились на поверхности обтекаемой модели, установленной в рабочем участке гидротрубы НИИ механики МГУ. Скорость потока изменялась в пределах от 8 до 24 м/сек. Использовались датчики с диаметром чувствительной поверхности 1,5 мм. Расстояния между датчиками были фиксированными — 4,2, 16 и 20,2 мм. Корреляционный анализ проводился в 1/3-октавных полосах в диапазоне частот 150—3000 гц. Одновременно в более широком диапазоне частот регистрировался спектр пульсационного шума. Установлено, что корреляционные характеристики крупномасштабных турбулентных пульсаций пристеночного давления, для которых длина гидродинамической волны больше толщины пограничного слоя, подчиняются иным зависимостям по сравнению с мелко-масштабными. Статистические свойства крупномасштабных неоднородностей определяются свойствами неоднородностей так называемого основного масштаба, равного толщине пограничного слоя.

Наряду со спектром, важной характеристикой поля турбулентных пульсаций пристеночного давления является коэффициент их пространственно-временной корреляции. Начиная с работы [1] и по настоящее время, изучению корреляционных характеристик поля турбулентных пульсаций уделяется большое внимание. Однако ряд вопросов в этом направлении остается открытым. В частности, отсутствуют данные по корреляционным характеристикам крупномасштабных пульсаций, размеры которых в направлении потока превышают толщину пограничного слоя. Вместе с тем, получение



Фиг. 1

таких характеристик важно для понимания полной физической картины пульсационного процесса в турбулентном пограничном слое.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования максимума коэффициента узкополосной продольной пространственно-временной корреляции пульсаций пристеночного давления. Благодаря тому, что экс-

перименты проводились в тонком пограничном слое, с толщиной вытеснения  $\delta^* = 0,6 \div 0,75$  мм (получена расчетным путем) на поверхности модели, помещенной в гидротрубу, измерения охватывают широкий диапазон масштабов неоднородностей, включая и крупномасштабные. В качестве модели использовалась половина тела вращения с простой формой обводов (носовая часть — четверть шара, средняя — полуцилиндр, хвостовая — полуконус). Модель крепилась своим основанием к внутренней стенке рабочего участка гидротрубы. Опыты проводились на гидротрубе НИИ механики МГУ, позволяющей в широких пределах изменять скорость потока — от 8 до 24 м/сек.

Датчики давления с диаметром чувствительной поверхности 1,5 мм укреплялись примерно по середине модели в области развитого турбулентного пограничного слоя заподлицо с поверхностью модели. Расстояния между датчиками были фиксированными и равными 4,2, 16 и 20,2 мм.

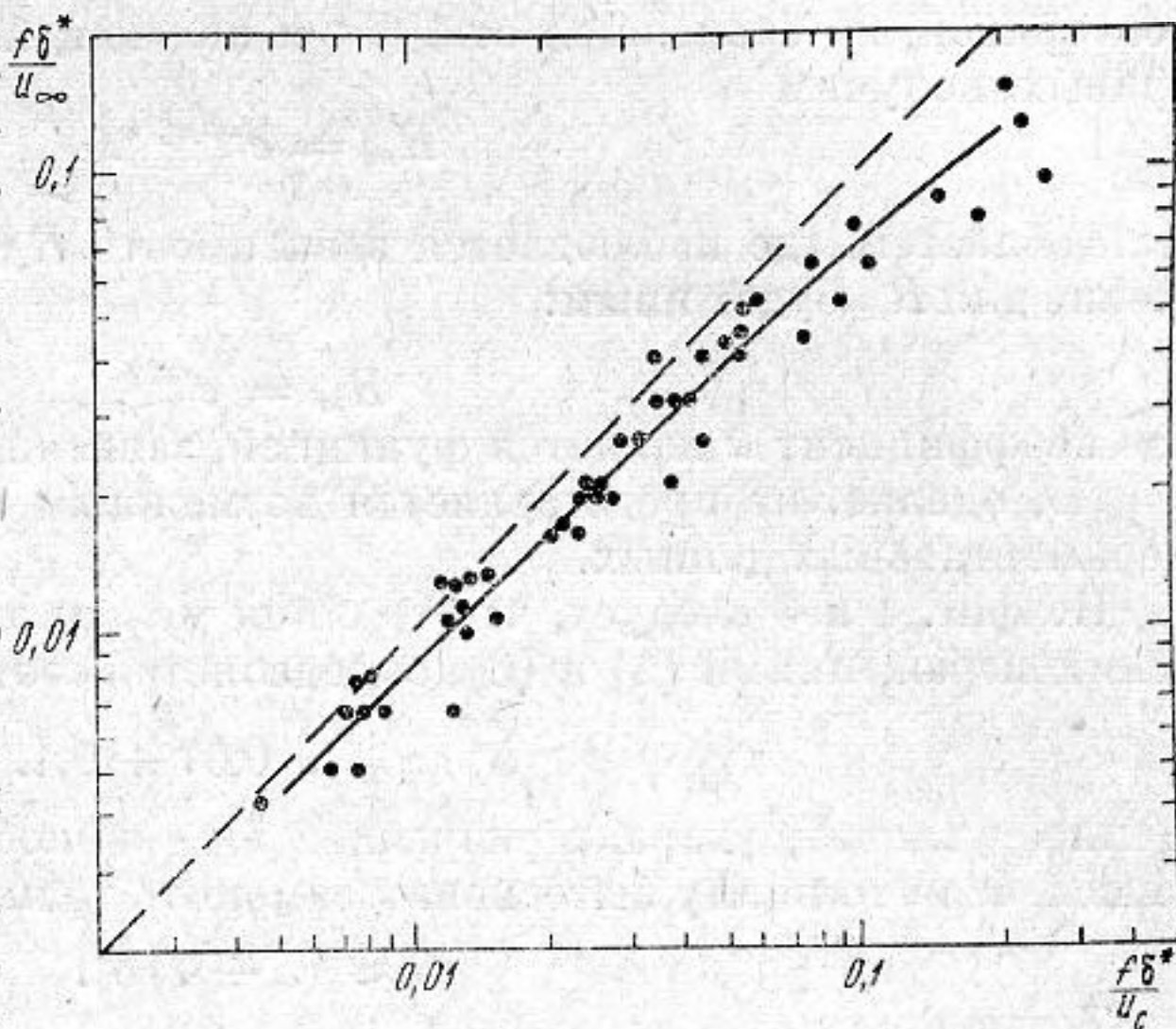
Сигналы с датчиков записывались на четырехканальном ЧМ-магнитофоне в диапазоне частот 0—3000 гц, затем пропускались через  $1/3$ -октавные фильтры и обрабатывались на коррелометре КЗ-ЗТ в звуковом диапазоне частот — 150 ÷ 3000 гц. Одновременно в диапазоне частот 100—10 000 гц контролировался спектр сигналов, поступающих с датчиков. Анализ спектра производился в 10% полосе прибором С4-7.

На фиг. 1 представлены полученные нами результаты корреляционных измерений. Здесь даны максимальные значения  $R_m$  коэффициента узкополосной продольной корреляции в зависимости от безразмерного аргумента  $\xi/\lambda$ , представляющего отношение расстояния  $\xi$  между точками наблюдения к длине гидродинамической волны  $\lambda$ , определяемой как  $\lambda = u_c/f$ , где  $u_c$  — скорость переноса неоднородностей по потоку и  $f$  — частота (полученные для  $u_c$  данные представлены на фиг. 2). В качестве параметра на фиг. 1 принято отношение  $\xi$  к толщине вытеснения  $\delta^*$ . Кривые 1, 2, 3 относятся соответственно к значениям параметра 6,5; 24,5; 31,5.

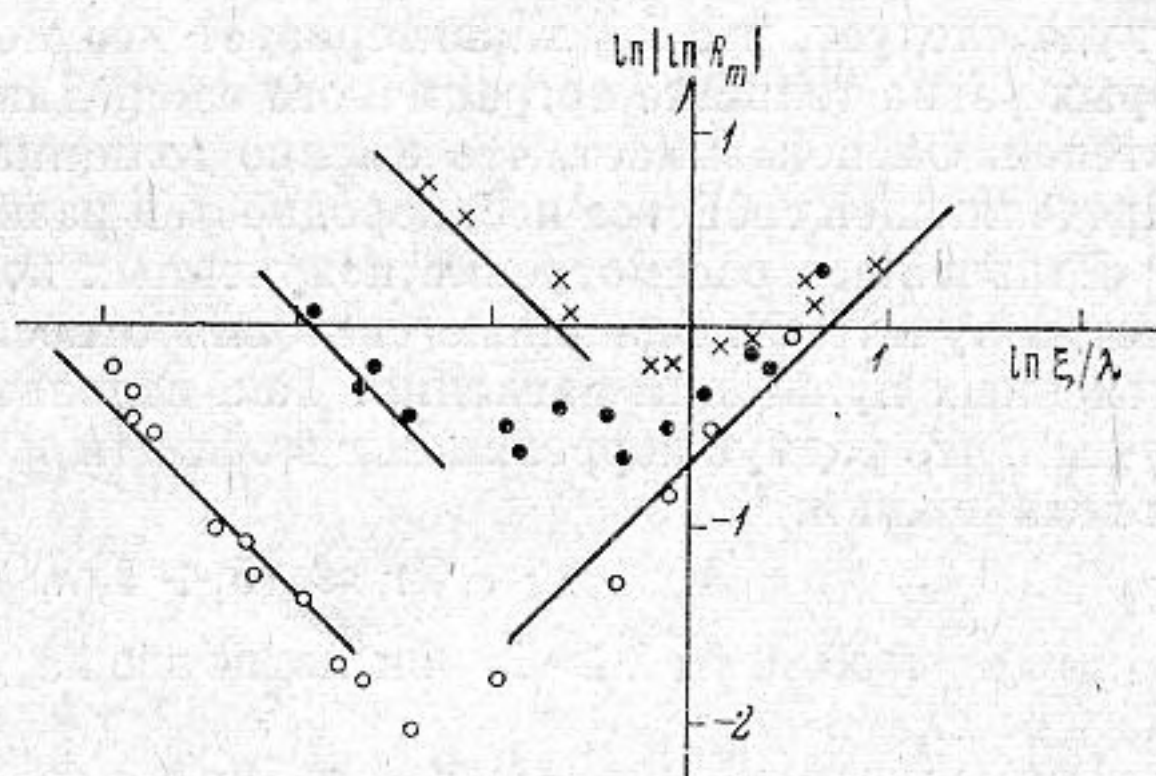
Из фиг. 1 следует, что зависимость коэффициента корреляции от параметра  $\xi/\delta^*$  наблюдается в области малых значений аргумента. При увеличении аргумента экспериментальные точки асимптотически сходятся к некоторой универсальной кривой, зависящей лишь от  $\xi/\lambda$ .

Аналитическое выражение для максимума коэффициента корреляции мы примем в виде

$$R_m = e^{-h(\xi/\lambda)^n}, \quad (1)$$



Фиг. 2



Фиг. 3

где  $k, n$  — коэффициенты, определяемые из эксперимента. С этой целью данные фиг. 1 представлены в логарифмических координатах на фиг. 3. Здесь наблюдаются две области зависимости  $R_m$  от  $\xi/\lambda$ . Определяя коэффициенты  $k$  и  $n$  по наклону прямых, проведенных через экспериментальные точки, получим выражения для каждой из областей. Для универсальной кривой, не зависящей от  $\xi/\delta^*$  и являющейся асимптотой для группы кривых, получим

$$R_m = e^{-0,5\xi/\lambda}. \quad (2)$$

Для областей, где наблюдается зависимость  $R_m$  от параметра  $\xi/\delta^*$ , выражение для  $R_m$  будет иным:

$$R_m = e^{k\xi/\delta^*}, \quad (3)$$

где коэффициент  $k$  является функцией, зависящей от  $\xi/\delta^*$ , определить которую, однако, не представляется возможным ввиду ограниченности экспериментальных данных.

Из фиг. 1 и 3 следует, что граница между двумя областями, описываемыми выражениями (2) и (3), определяется соотношением

$$\delta^*/\lambda_{гр} \approx 0,07 \div 0,1. \quad (4)$$

Данное условие, характеризующее  $\lambda_{гр}$ , приобретает ясный физический смысл, если толщину вытеснения заменить толщиной пограничного слоя

$$\delta \approx (5 \div 7)\delta^*. \quad (5)$$

Тогда

$$\lambda_{гр} \approx 2\delta, \quad (6)$$

откуда следует, что  $\lambda_{гр}$  характеризует неоднородности, протяженность которых равна толщине пограничного слоя. Данный результат весьма примечателен. Он показывает, что именно толщина пограничного слоя является определяющей свойства неоднородностей разных масштабов.

Дальнейшее рассмотрение полученных корреляционных данных позволяет получить более полные сведения относительно структуры поля пристеночных пульсаций давления. Так, используя данные фиг. 1, можно получить, что радиус корреляции  $r$  в области малых  $\lambda$  полностью определяется величиной  $\lambda$ :

$$r \approx (5 \div 7)\lambda, \quad (7)$$

тогда как в области  $\lambda > \lambda_{гр}$  он является не зависящей от  $\lambda$  величиной, равной

$$r \approx (5 \div 7) \cdot 2\delta \approx (5 \div 7)\lambda_{гр}. \quad (8)$$

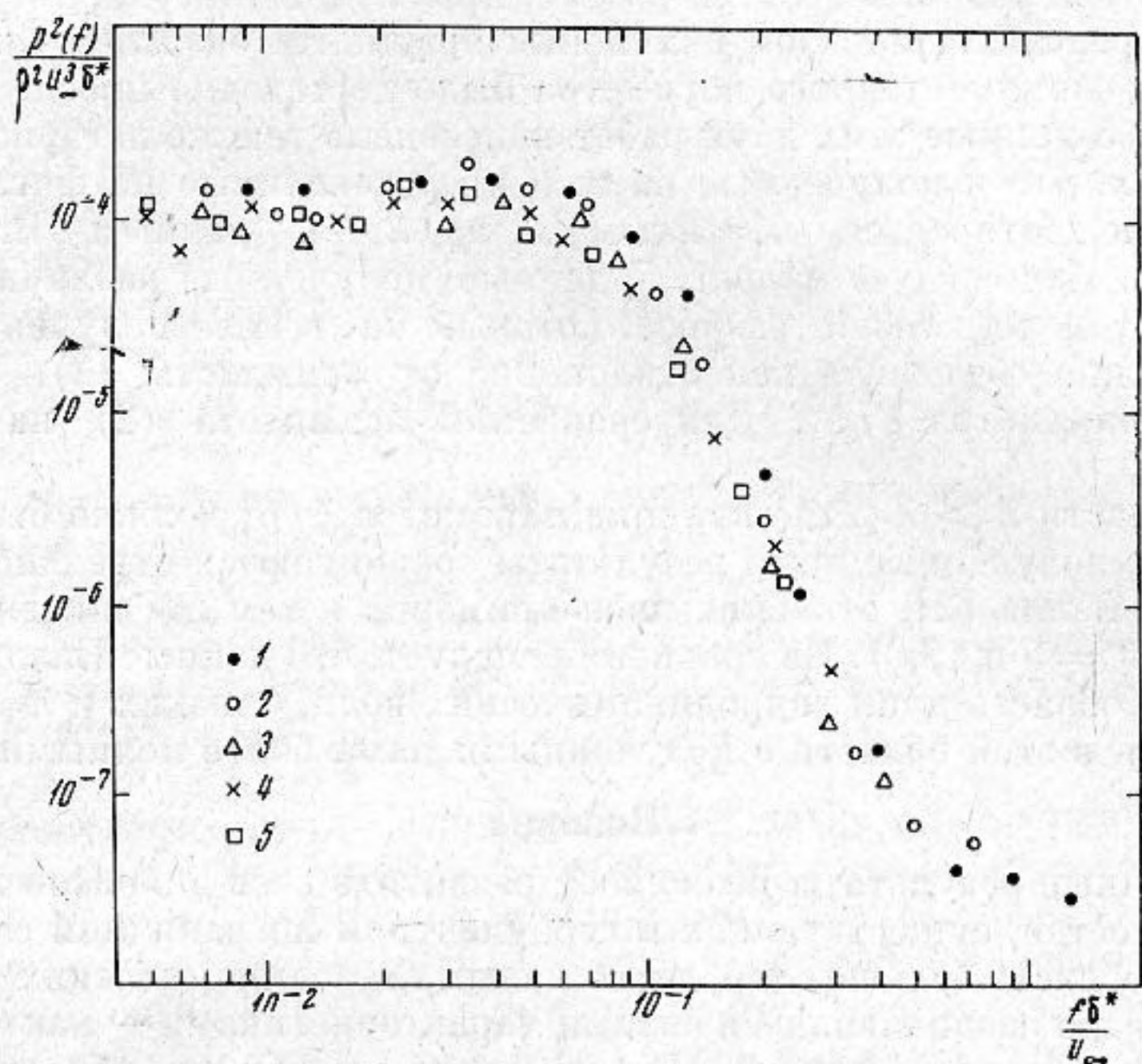
Сходство обоих выражений указывает на то, что выражение (8) по аналогии с (7) можно рассматривать как меру связи радиуса корреляции с масштабом неоднородностей. Масштаб же неоднородностей, соответствующих  $\lambda_{гр}$ , как было получено выше, равен  $\delta$ . То, что радиус корреляции в области  $\lambda > \lambda_{гр}$  является постоянной величиной, определяемой выражением (8), означает, таким образом, что эта область создается неоднородностями одного масштаба, равного толщине пограничного слоя.

Сопоставим полученные на основе корреляционных результатов данные со спектральными характеристиками поля турбулентных пульсаций пристеночного давления также измеренными нами в процессе эксперимента и представленными на фиг. 4. Спектральная плотность мощности  $\overline{p^2}(f)$  сигналов представлена здесь в безразмерной форме в виде универсальной зависимости:

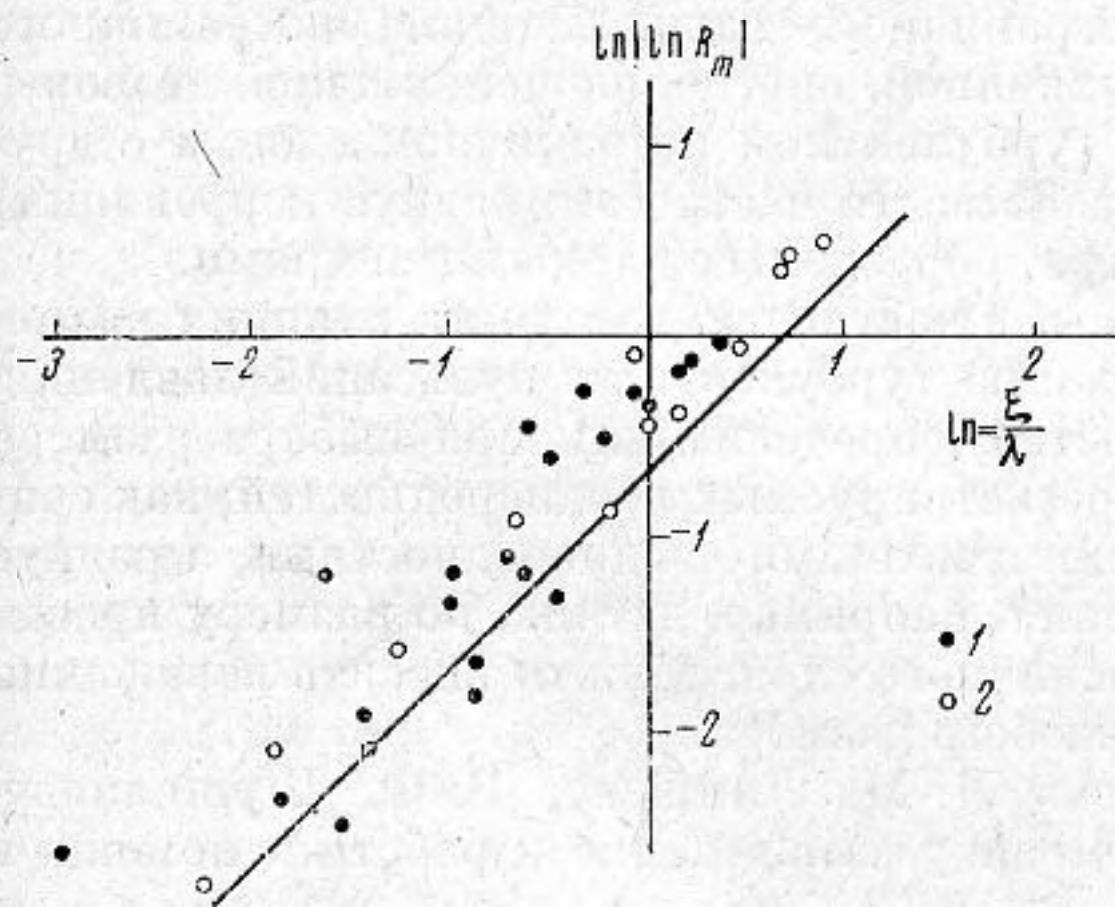
$$\frac{\overline{p^2}(f)}{\rho^2 u_\infty^3 \delta^*} \left( \frac{f\delta^*}{u_\infty} \right). \quad (9)$$

Точки 1—5 относятся к скорости потока воды в трубе  $u_\infty$  соответственно 6, 10, 15, 20, 24 м/сек.

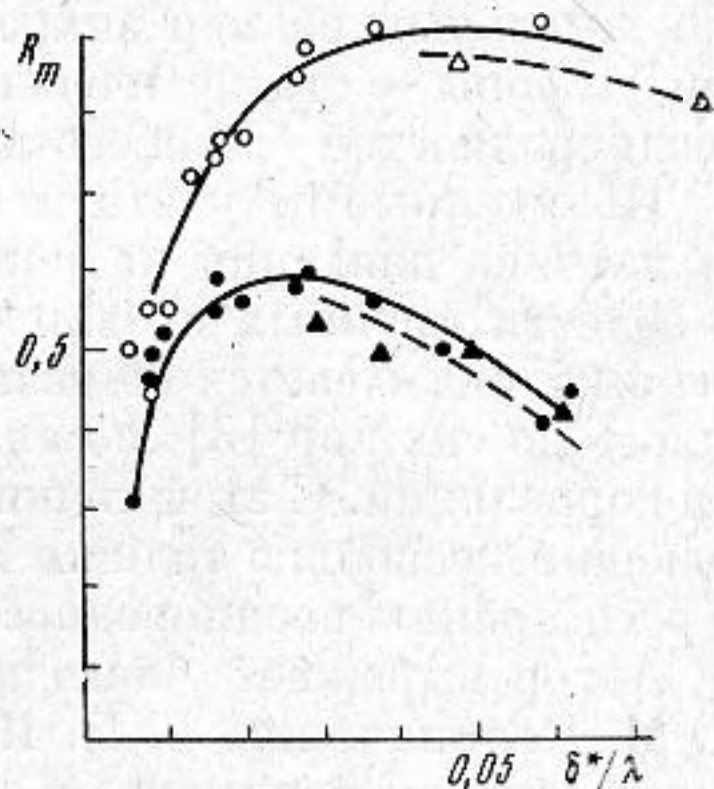
Из фиг. 4 следует, что полученные нами из корреляционных характеристик значения  $\lambda_{гр}$  в случае спектра также соответствуют граничному значению аргумента, разделяющему спектр на две области с различным характером зависимости спектральной плотности от длины гидродинамической волны. При этом постоянство величины спектральной плотности в области



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

$\lambda > \lambda_{гр}$  хорошо согласуется с полученным на основе корреляционных характеристик основным результатом — с тем, что данная область создается неоднородностями одного основного масштаба. Образование сигналов с длинами гидродинамических волн больших  $\lambda_{гр}$  можно представить при этом как статистическое сложение неоднородностей основного размера. При этом, как следует из полученных данных, статистические свойства этих более крупных образований целиком определяются соответствующими характеристиками образующих их неоднородностей основного размера.

В заключение сопоставим полученные нами корреляционные характеристики с данными других авторов. Сразу же заметим, что в известных ра-

ботах не проводилось специальных исследований зависимости  $R_m$  от параметра  $\xi/\delta^*$ . Выбор данного параметра оказывался, как правило, случайным. Так, в работе Вилмарса и Вулдриджа [1] каждому экспериментальному значению  $R_m$  соответствует свое значение параметра  $\xi/\delta^*$ . Попытка определения зависимости  $R_m$  от  $\xi/\delta^*$  была предпринята Баллом [2], однако, как мы увидим ниже, в этой работе, при изменении параметра  $\xi/\delta^*$  в широких пределах, диапазон изменения аргумента оказался слишком узким, чтобы влияние данного параметра было достаточно прослежено.

На фиг. 5 данные этих двух работ нанесены в тех же логарифмических координатах, что и полученные нами и представленные на фиг. 3 результаты. Точки 1 относятся к данным Балла, 2 — к данным Вилмарса и Вулдриджа. Как следует из фиг. 5, данные, полученные различными авторами имеют между собой разброс, который на основе полученных нами данных можно объяснить как отклонение от асимптоты (2), вызванное влиянием параметра  $\xi/\delta^*$ . Для сравнения асимптота (2) нанесена на фиг. 5.

Для области  $\lambda > \lambda_{гр}$ , где влияние параметра  $\xi/\delta^*$  должно быть особенно заметно, полученные нами результаты сравниваются отдельно на фиг. 6 с данными Балла [2], относящимися примерно к тем же значениям параметра ( $\xi/\delta^* = 5$  и 19,8). Из сравнения следует, что данные Балла захватывают лишь область длин гидродинамических волн, близких к  $\lambda_{гр}$  и хорошо согласуются в этой области с полученными нами более полными данными.

### Выводы

Полученные результаты позволяют разделить весь диапазон масштабов неоднородностей, существующих в турбулентном пограничном слое, на две области — область больших и область малых гидродинамических длин волн, довольно резко различающиеся своими характеристиками — как спектральными, так и корреляционными. При этом оказывается, что область больших длин гидродинамических волн создается неоднородностями одного основного размера, равного толщине пограничного слоя. Толщина пограничного слоя является, таким образом, величиной, определяющей, с одной стороны, максимальный размер вихрей в турбулентном пограничном слое, а с другой стороны — статистические свойства (в частности, радиус корреляции) неоднородностей большего размера, образуемых данными вихрями.

Полученные результаты важны, в частности, для учета влияния размера датчика давления на регистрацию турбулентных пульсаций давления. В области крупных неоднородностей определяющим при выборе размера датчика, оказывается не размер регистрируемых неоднородностей, как считалось до сих пор [3], по аналогии с мелкими неоднородностями, а радиус их корреляции. С этой точки зрения, например, датчик, по размеру превышающий несколько толщин пограничного слоя, должен вносить искажения в регистрацию неоднородностей любого размера.

Автор выражает благодарность Л. М. Лямшеву, В. Ф. Шушпанову, Н. М. Калининскому, Г. И. Шоломовичу за внимание к работе и помощь в проведении экспериментов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. W. W. Wilmarth, C. E. Wooldridge. Measurements of the fluctuating pressure of the wall beneath a thick turbulent boundary layer. *J. Fluid. Mech.*, 1962, 14, 2, 187—210.
2. M. K. Bull. Wall-pressure fluctuations associated with subsonic turbulent boundary layer flow. *J. Fluid. Mech.*, 1967, 28, 4, 719—754.
3. G. M. Corcos. The structure of the turbulent pressure field in boundary-layer flow. *J. Fluid. Mech.*, 1964, 18, 3, 353—378.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
6 января 1970 г.