

УДК 532.542.4:534

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПЕСОЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА СПЕКТР ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ТРУБЕ

Е. М. Грешилов

Приводятся результаты экспериментального изучения зависимости спектральных характеристик турбулентных флюктуаций давления от шероховатости обтекаемой стенки. В опытах скорость потока воды изменялась от 2 до 10 м/сек, а относительная высота шероховатости изменялась от 10^{-2} до $5,2 \cdot 10^{-2}$. Повышения спектральных уровней пристеночных флюктуаций давления представлены в функции безразмерного числа Струхалия, обсуждается их связь с двухслойной моделью турбулентности на шероховатой стенке.

Влияние распределенной песочной шероховатости на спектр пристеночных пульсаций давления рассматривалось в работах [1—4]. Оказалось, что в турбулентном потоке шероховатости обтекаемой стенки высотой около 10^{-2} см могут повысить спектральные уровни на 3—30 дБ в звуковом диапазоне частот. В нашей работе [5] сделана попытка представить повышения спектральных уровней пристеночных пульсаций давления в виде функции безразмерных локальных чисел Струхалия. В настоящей работе сообщаются результаты дальнейших экспериментальных исследований.

Измерения проводились в трубе с прямоугольным поперечным сечением 2×7 см на расстоянии 150 см от входа, где имелось полностью установившееся течение с эквивалентной толщиной пограничного слоя, равной 1 см. Средняя скорость течения $U_{\text{ср}}$ изменялась от 2 до 10 м/сек. Экспериментальная установка детально описана в работе [6]. Заподлицо со стенкой трубы устанавливался приемник пульсаций давления с диаметром мембраны $2,5 \cdot 10^{-1}$ см и чувствительностью около 1,2 мкв/бар. Сигнал анализировался в $1/3$ октавных полосах частот в диапазоне 20—20 000 гц. В диапазоне 100—20 000 гц неравномерность частотной характеристики измерительного тракта не превышала ± 1 дБ. Параллельно с измерением пульсаций давления регистрировались средняя скорость потока и перепад статического давления на длине 50 см.

Ошибка в определении спектральных уровней составила около 1 дБ. Точность измерения безразмерной величины $\sqrt{\bar{p}^2} / \sqrt{1/2 \rho U_0^2}$, характеризующей связь уровня пульсаций давления с динамическим напором потока на оси канала (эту величину в дальнейшем будем называть коэффициентом псевдозвуковой трансформации) составила $1 \div 2$ дБ.

Равномерно распределенная микрошероховатость искусственно создавалась на верхней широкой стенке трубы. На поверхности съемной плиты размером 7×80 см² наносились шероховатости трех видов, при этом приемник пульсаций давления устанавливался в центре плиты. Было установлено, что чувствительность приемника при этом не изменялась. Распределенная песочная шероховатость создавалась песчинками с максимально плотным расположением. Песчинки наносились на свежепокрашенную поверхность плиты, а затем покрывались тонким слоем лака.

Каждый образец шероховатости мы стремились получить с максимально возможной монодисперсностью. Визуальное наблюдение с помощью микроскопа и измерения на профилографе показали, что средние значения высот шероховатостей k принимали значения 10^{-2} см, $2,2 \cdot 10^{-2}$ см и $5,2 \cdot 10^{-2}$ см. Напомним, что в наших условиях эквивалентная толщина пограничного слоя составляет 1 см; таким образом, при опытах использовались шероховатости с относительной высотой k/δ , равной 10^{-2} , $2,2 \cdot 10^{-2}$ и $5,2 \cdot 10^{-2}$. Результаты гидродинамических измерений зависимости перепада давления ΔH в мм рт. ст. от средней скорости потока $U_{ср}$ для гладкой стенки и для различных шероховатостей приведены в таблице. Кроме того, в таблице

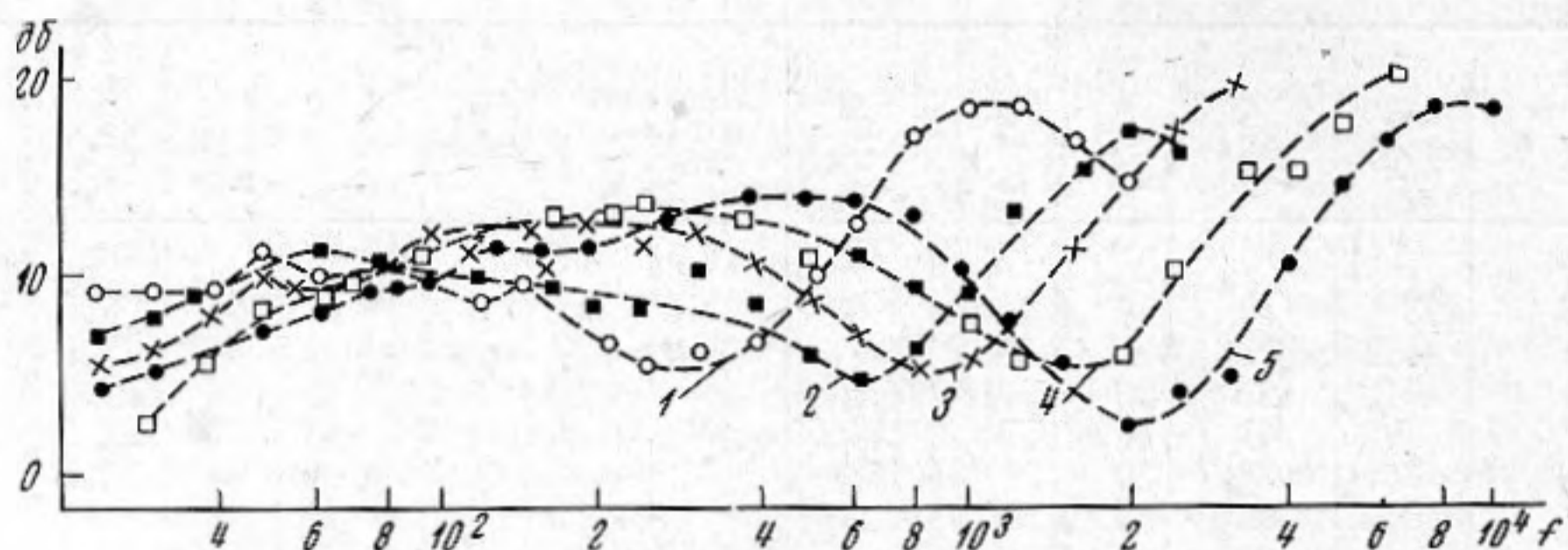
Высота шероховатости k , см	$U_{ср}$, м/сек	ΔH , мм рт. ст.	V^* , см/сек	$\sqrt{\bar{p}^2} \cdot 10^{-2}$, бар	$\mu \cdot 10^3$	Высота шероховатости k , см	$U_{ср}$, м/сек	ΔH , мм рт. ст.	V^* , см/сек	$\sqrt{\bar{p}^2} \cdot 10^{-2}$, бар	$\mu \cdot 10^3$	
0	3	10	15	3,15	4,9	$2,2 \cdot 10^{-2}$ см	3,4	19	25	6,5	7,9	
	4,2	17	20	5,9	4,7		5,4	50	43	17,8	8,6	
	5,4	27	25	9,4	4,5		8,2	112	64	41,8	8,7	
	7,2	47	33	17	4,4		9,6	153	75	58,5	8,9	
	8,4	65	39	21	4,3		10,4	181	84	73,5	9,8	
	10,6	82	43	29	4,2							
10^{-2} см	1,9	5	12	1,99	5,52	$5,2 \cdot 10^{-2}$ см	3,1	21	28	10	14,5	
	3,3	13	18	4,62	5,8		4,2	39	39	18,8	14,8	
	7,4	70	47	23,2	5,2		7,1	111	67	58,5	15,8	
	8,8	98	55	31,5	5,6		10,0	216	95	105	14,6	

приведены значения динамических скоростей v^* (метод расчета динамической скорости потока в прямоугольной трубе при наличии трех гладких и одной шероховатой стенки был предложен в работе [7]). В таблице представлены также результаты измерений интегрального уровня пульсаций давления $\sqrt{\bar{p}^2}$ и коэффициента псевдозвуковой трансформации $\mu = \sqrt{\bar{p}^2} / \frac{1}{2} \rho U_0^2$ (при расчетах полагалось, что $U_0 \approx 1,2 U_{ср}$). Можно заметить, что присутствие на обтекаемой стенке шероховатости высотой 10^{-2} см приводит к росту интегрального уровня пульсаций давления в 1,2 раза, а присутствие шероховатостей высотой $2,2 \cdot 10^{-2}$ и $5,2 \cdot 10^{-2}$ см к росту пульсаций соответственно в 2 и 3 раза. Видно, что коэффициент псевдозвуковой трансформации μ с точностью до ошибки измерений не зависит от скорости потока при изменении последней от 2 до 10 м/сек. Заметим, что приведенные в таблице значения $\sqrt{\bar{p}^2}$ и μ получены в результате измерений с датчиком конечного размера. В наших измерениях размер приемника имеет величину порядка толщины вытеснения пограничного слоя, в связи с этим истинные значения $\sqrt{\bar{p}^2}$ и μ на 20—30% выше значений, приведенных в таблице.

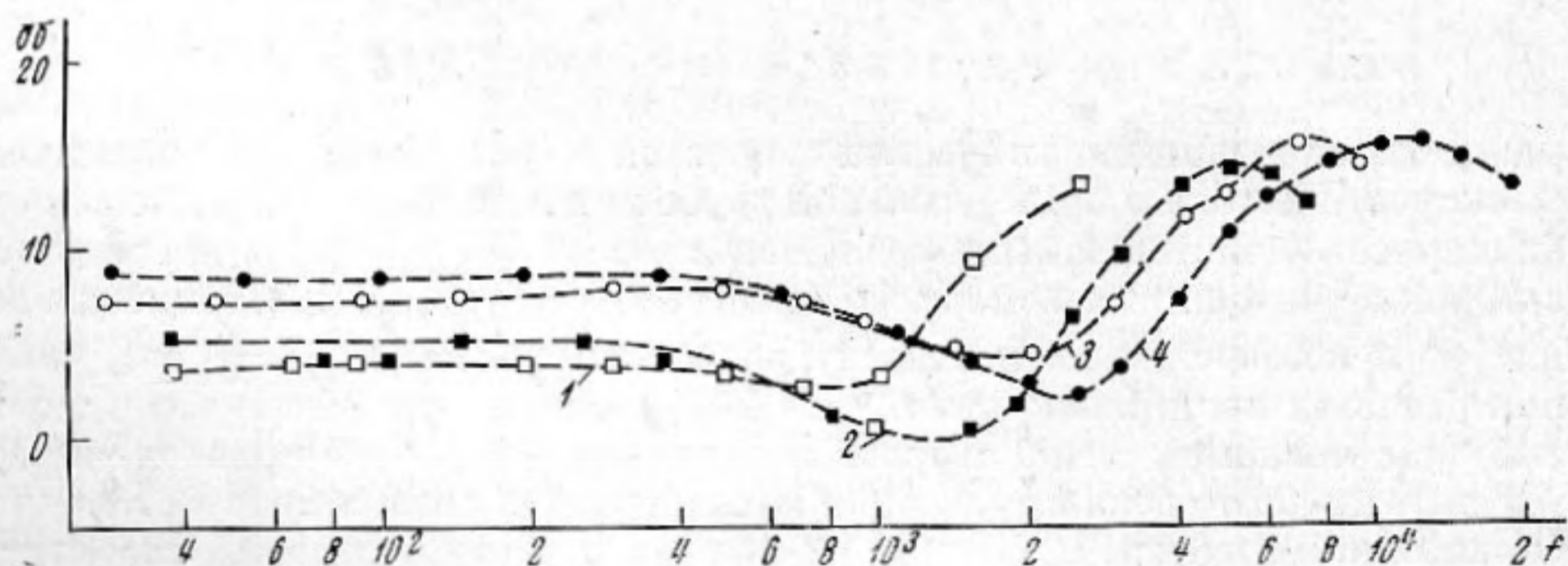
Спектральные измерения проводились непосредственно во время течения жидкости в канале без использования магнитофонной записи. Целесообразно представить все результаты спектральных измерений в виде превышения спектральных уровней на шероховатой стенке над уровнями, соответствующими обтеканию гладкой стенки. Эти превышения мы в дальнейшем для краткости будем называть спектральными добавками. Спектральные добавки, полученные при обтекании стенки с наиболее крупной шероховатостью приведены на фиг. 1, где номера кривых соответствуют значениям скорости потока: 1 — 1,9; 2 — 3,1; 3 — 4,2; 4 — 7,1; 5 — 10 м/сек. Как видно, действие шероховатости высотой $k = 5,2 \cdot 10^{-2}$ см проявляется во всем частотном диапазоне и на всех скоростях потока от 1,9 до 10 м/сек. Спектральные добавки для каждой скорости потока можно разбить на три диапазона: область высоких частот, где превышение составляет до 20 дб; область средних частот, где не наблюдается изменений спектральных уровней, и низкочастотную область, где вновь уровни возрастают на 7—12 дб.

С увеличением скорости потока кривые спектральных добавок сдвигаются вправо по оси частот, причем наибольшие повышения спектральных уровней всегда находятся в области высоких частот при $f > 2$ кГц.

Для более мелких шероховатостей спектральные добавки изображены на фиг. 2 ($k = 2,2 \cdot 10^{-1}$ см) и фиг. 3 ($k = 10^{-1}$ см). Здесь номера кривых соответствуют следующим значениям скорости потока: 1 — 3,4; 2 — 5,4; 3 — 8,2; 4 — 10,4 м/сек. Можно заметить, что с уменьшением высоты шероховатости характерная частота проявления шероховатости сдвигается в сторону более высоких частот; величина высокочастотной добавки составляет



Фиг. 1



Фиг. 2

13 — 18 дБ; величина низкочастотных добавок с уменьшением высоты шероховатости уменьшается. Видно, что наиболее мелкая шероховатость высотой 10^{-2} см приводит только к высокочастотным повышениям спектральных уровней.

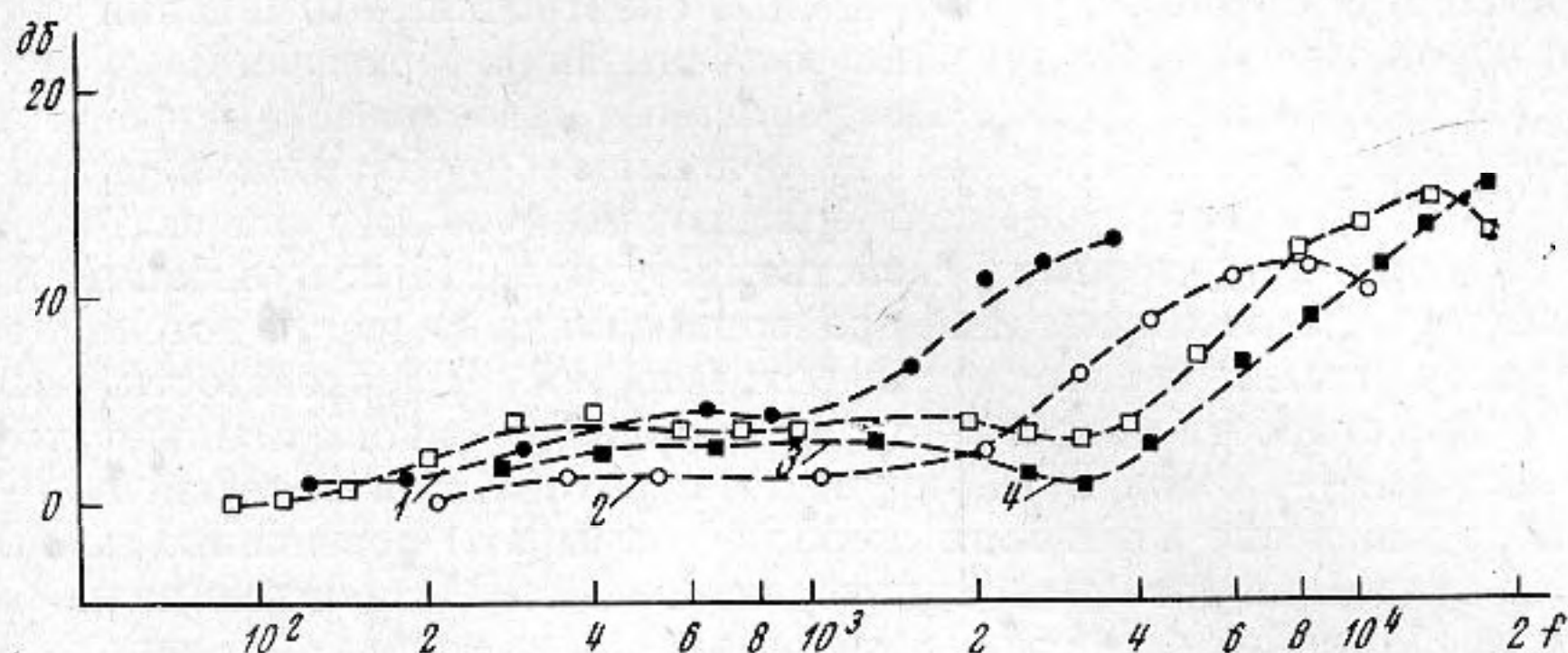
Перейдем к обсуждению полученных результатов. Известно, что при наличии на стенке равномерно распределенной шероховатости существует три области проявления влияния шероховатости на гидродинамическое сопротивление: $kv^* / \nu < 5$ — режим без проявления влияния шероховатости; $5 < kv^* / \nu < 70$ — переходная область; $kv^* / \nu > 70$ — область полного проявления влияния шероховатости.

На основе результатов наших гидродинамических измерений, приведенных в таблице, легко оценить величину kv^* / ν , характеризующую режим проявления влияния шероховатости. Оказалось, что при изменении средней скорости потока от 1,8 до 10 м/сек все песочные шероховатости попадают во 2-ю и 3-ю области проявления, причем наиболее мелкая шероховатость полностью попадает в переходный режим, а наиболее крупная — в область полного проявления.

При $kv^* / \nu < 5$ обтекание элементарных выступов шероховатости происходит в ламинарном режиме. При этом в потоке дополнительные шумы не возникают.

С увеличением высоты шероховатости или скорости потока растут значения чисел Рейнольдса, характеризующие режим обтекания бугорков шероховатостей. При $kv^* / \nu > 5$ обтекание элементарных выступов шероховатостей сопровождается образованием вихрей. Это дополнительное вихреобразование и является источником повышения пристеночных пульсаций давления.

Измерения пульсаций давления при самой мелкой шероховатости высотой $k = 10^{-2}$ см позволяют изучить влияние шероховатости на пристеночные пульсации в переходном режиме.



Фиг. 3

Рассмотрим влияние шероховатости на величину коэффициента псевдозвуковой трансформации μ . Как видно из таблицы, при обтекании потоком гладкой стенки среднее значение $\mu = 4,5 \cdot 10^{-3}$. Для шероховатости $k = 10^{-2}$ см значение μ не зависит от скорости потока и в среднем равно $5,8 \cdot 10^{-3}$. При этом интегральные уровни пристеночных пульсаций давления возрастали в 1,2 раза, а повышения спектральных уровней в диапазоне низких частот составляли $2 \div 3$ дб. Однако значительное изменение спектральных уровней до $12 \div 13$ дб наблюдалось в диапазоне высоких частот. Относительно слабое повышение низкочастотных уровней отражает слабое влияние шероховатости в данном режиме обтекания на процессы в основном ядре потока. Возникновение дополнительных интенсивных высокочастотных пульсаций давления обусловлено появлением высокочастотных пульсаций скорости в пристенном слое [8].

Из соображений размерности можно оценить характерную частоту этих пульсаций. В пристенном слое характерным размером является высота шероховатости k , а характерной скоростью — скорость потока на вершине шероховатости U_k . Характерная частота турбулентных пульсаций в этом слое выразится как $f_0' \sim U_k / k$. Соответственно характерная частота пульсаций давления в основном ядре потока имеет значение $f_0 \sim U_0 / H$ (H — высота трубы). Поскольку $k \ll H$ легко видеть, что $f_0' / f_0 \gg 1$, т. е. на фоне спектра пульсаций давления на гладкой стенке добавочные пульсации давления действительно будут иметь высокочастотный характер.

С увеличением высоты шероховатости при $kv^* / \nu > 70$ наступает режим с полным проявлением влияния шероховатости. Этому режиму соответствуют измерения с наиболее крупной шероховатостью во всем интервале изменений скорости. Как видно из таблицы, при этих измерениях значение μ не зависит от скорости потока и в среднем равно $1,5 \cdot 10^{-2}$. Результаты спектральных измерений, приводившихся на фиг. 1, показывают, что в этом режиме наряду с высокочастотными добавками наблюдается интенсивное повышение пульсаций давления и в области низких частот в среднем на величину около 10 дб.

Повышение пульсаций давления в области низких частот определяется ростом градиента средней скорости и пульсаций скорости в основном ядре потока. Генерация пульсаций давления в основном ядре потока в соответ-

ствии с представлениями Крейчнана [9] определяется взаимодействием турбулентность — сдвиг. Однако высокочастотные добавки, достигающие 20 дб, и в этом режиме обтекания остаются доминирующими. Обтекание шероховатости средней высоты при малых скоростях потока соответствовало второму переходному режиму, а при больших скоростях — третьему квадратичному режиму. Характер спектральных добавок для этой шероховатости (фиг. 2) находится в соответствии с результатами измерений для других типов шероховатости.

Таким образом, можно считать, что во втором и третьем режимах проявления влияния шероховатости основные спектральные изменения энергии пристеночных пульсаций давления вызваны вихреобразованием в пристенном слое. Полученные результаты дополняют ранее известные факты влияния шероховатости на спектры турбулентных пульсаций скорости [8]. В частности, эти результаты подтверждают наличие на шероховатой стенке особого слоя с характерными свойствами турбулентных пульсаций. Характерные частоты этих пульсаций пропорциональны скорости потока и обратно пропорциональны высоте шероховатостей. Шероховатости высотой 10^{-2} см при скорости потока 3—10 м/сек приводят к повышению пульсаций в диапазоне 4—15 кГц. Более крупные шероховатости высотой 5— 10^{-2} см в том же диапазоне изменения скоростей вызывают повышение высокочастотных пульсаций давления в диапазоне 2—8 кГц. Появление низкочастотных и высокочастотных добавок при обтекании шероховатой стенки в третьем квадратичном режиме сопровождается наличием области средних частот, где спектральные уровни пульсаций давления практически не изменяются (фиг. 1). При скорости потока около 1,9 м/сек эта область охватывает частоты 200—600 Гц, а при скорости потока 10 м/сек она смещена в сторону более высоких частот (1—4 кГц). Для объяснения полученных зависимостей вспомним, что низкочастотные добавки пульсаций давления объясняются изменением структуры потока в основном ядре, а высокочастотные добавки пульсаций связаны с турбулизацией потока в пристенной области. Пульсации давления в диапазоне средних частот обуславливаются пульсациями скорости в промежуточном слое. Отсутствие спектральных добавок в этом диапазоне частот объясняется следующим образом. Рассматриваемые пульсации образуются вследствие взаимодействия сдвиг — турбулентность. Хорошо известно [8], что во внутренней части пограничного слоя шероховатость приводит к уменьшению градиента скорости. Оказывается, что рост турбулентных пульсаций скорости компенсируется уменьшением сдвига, что приводит лишь к незначительному изменению пристеночных пульсаций давления в диапазоне средних частот.

Попробуем придать полученным спектральным добавкам универсальный вид, для чего представим их в функции локальных чисел Струхала. На основе вышеизложенных гидродинамических представлений о картине обтекания шероховатой стенки спектральную добавку пульсаций давления Δ в безразмерном виде можно представить следующим образом:

$$\Delta = 20 \log \sqrt{\bar{p}_m^2(f)} / \sqrt{\bar{p}_{rn}^2(f)} = \varphi \left(\frac{k}{\delta}, \text{Sh}, \text{Re} \right),$$

где $\text{Sh} = \frac{f \cdot k}{U_k}$ и $\text{Re} = \frac{k \cdot U_k}{\nu}$ — локальные числа Струхала и Рей-

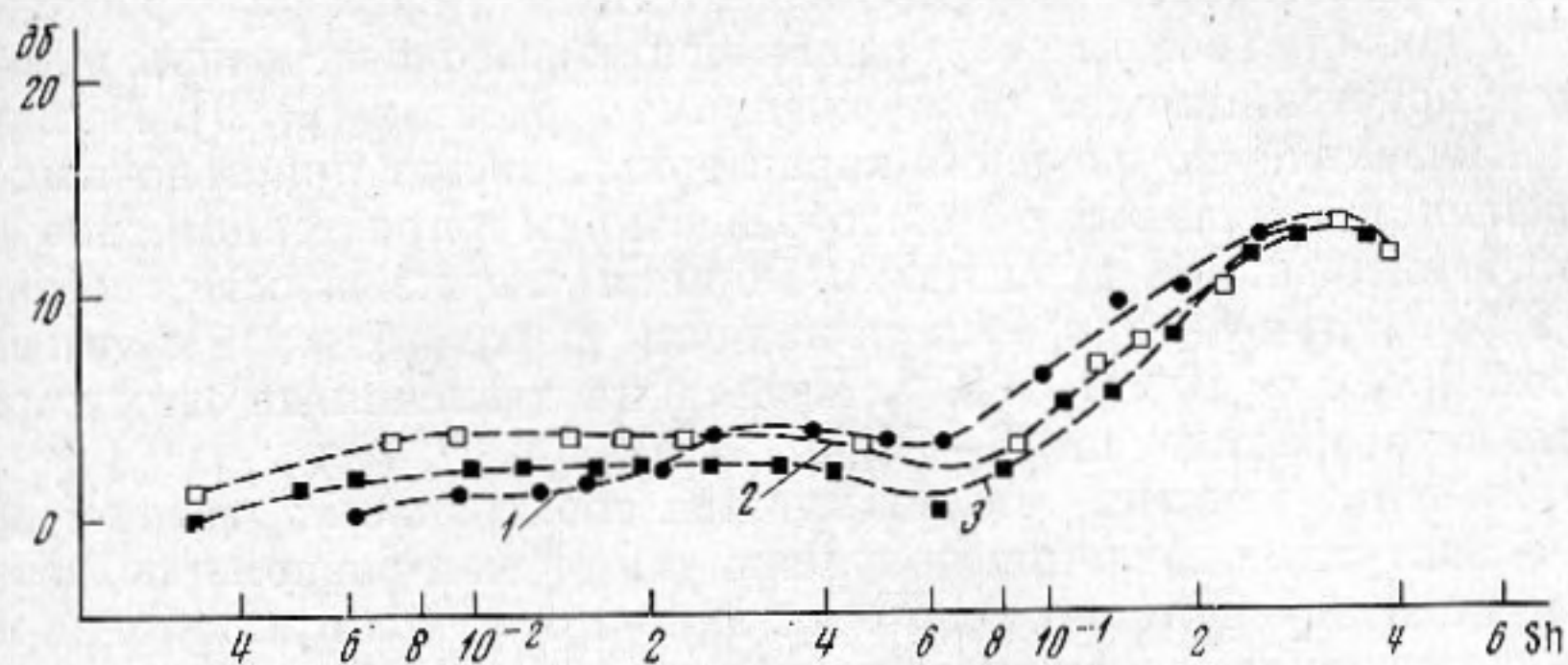
нольдса, составленные по характерной скорости обтекания гребня элементарного выступа высотой k . Характерную скорость на вершине выступа U_k можно получить из логарифмического закона распределения скорости:

$$\frac{U}{v^*} = C_1 + C_2 \ln \frac{y}{k}. \quad \text{Отсюда следует, что на высоте шероховатости } (y =$$

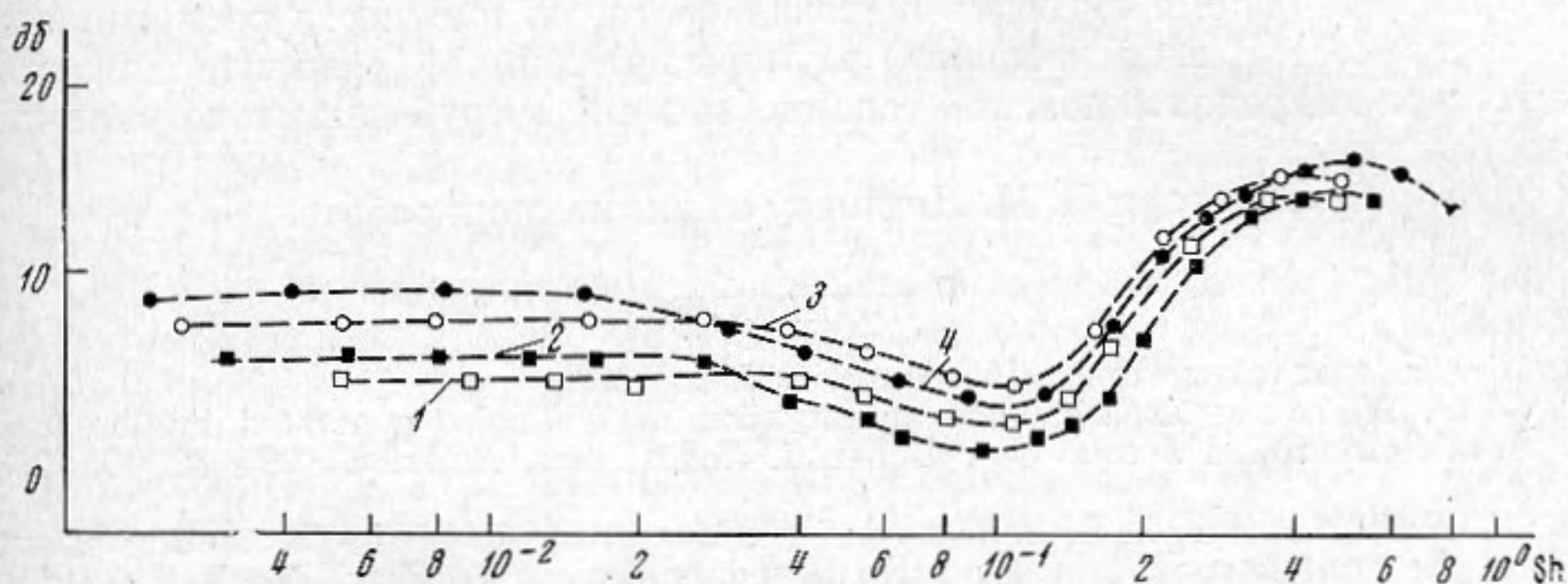
$= k)$ скорость потока $U_k = C_1 v^*$. Константа C_1 , определяемая опытным путем, принимает значения от 5 до 8. Следуя данным, приведенным в работе

[8], положим $C_1 = 5,6$. Тогда, используя известные значения ν^* , можно представить спектральные добавки в функции локальных чисел Струхала.

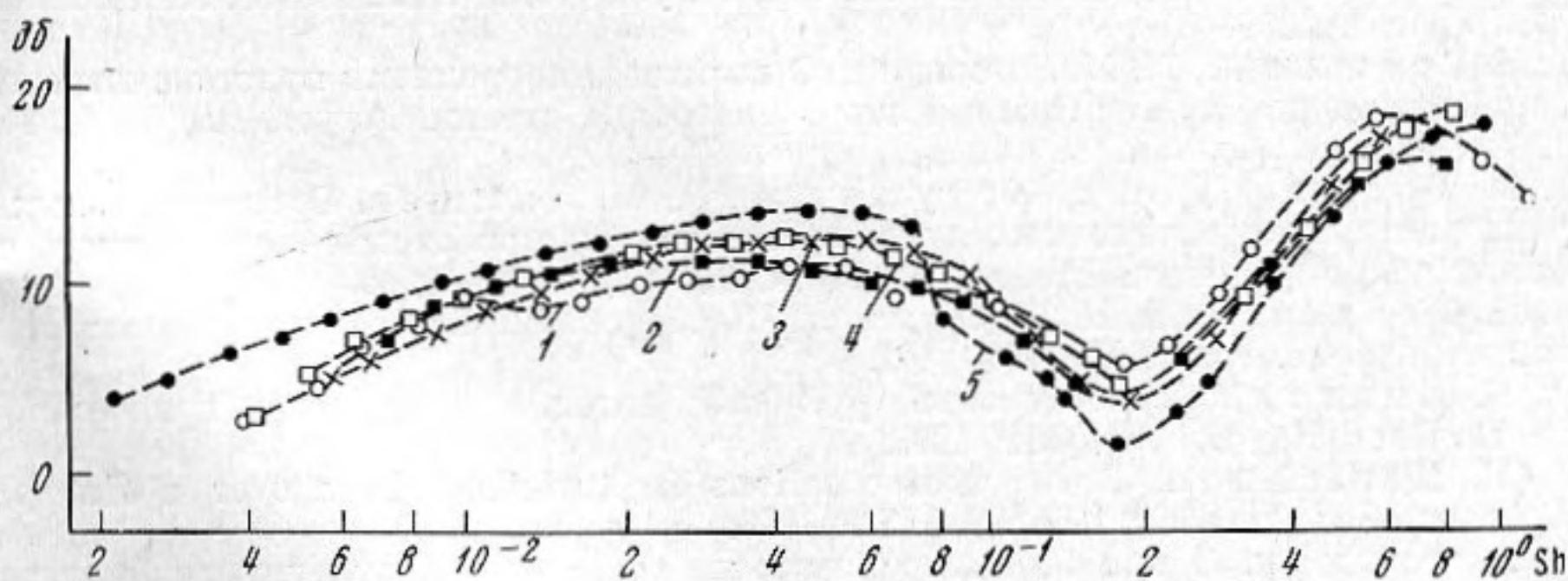
На фиг. 4, 5, 6 изображены безразмерные спектральные добавки, соответствующие обтеканию стенок с равномерно распределенными шероховатостями с относительной высотой соответственно $k/\delta = 10^{-2}$; $2,2 \cdot 10^{-2}$ и



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

$5,2 \cdot 10^{-2}$. Номера кривых на фигурах 4, 5 и 6 соответствуют номерам кривых, приводившихся ранее на фигурах 1, 2 и 3. Введение безразмерной частоты привело к совпадению спектральных добавок, соответствующих обтеканию стенок с различными скоростями для данного типа шероховатости, что подтверждает рациональность введения числа Струхала. Вид спектральных добавок в области $Sh > 2 \cdot 10^{-1}$, обусловленных турбулизацией придонного слоя, оказался слабо зависящим от числа Рейнольдса. Напротив, низкочастотные добавки сильно зависят от высоты шероховатостей или точнее от условий обтекания бугорков шероховатостей. Можно заметить, что низкочастотные спектральные эффекты для $Sh < 10^{-1}$ с переходом от

второго режима обтекания к третьему возрастают от 0 до 10 дб. Максимальные высокочастотные спектральные эффекты во втором и в третьем режимах обтекания наблюдаются при числах Струхала $2 \cdot 10^{-1} < Sh < 8 \cdot 10^{-1}$. Эти высокочастотные эффекты проявления шероховатости соответствуют пульсирующему течению во впадинах шероховатостей. Действие равномерной микрошероховатости на высокочастотный диапазон пристеночных пульсаций давления соответствует повышению высокочастотных пульсаций скорости в пристенном слое, обнаруженному в работах [8, 10]. Наши измерения показывают, что значения характерных частот пристеночных пульсаций давления, связанных с вихреобразованием в пристенном слое во втором и третьем режимах проявления влияния шероховатости, составляют $0,2 \div 0,8 U_k / k$ или $1 \div 4 v^* / k$ при наличии шероховатостей с относительной высотой $k / \delta \sim 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$. Пульсации давления на этих характерных частотах возрастают на 13—20 дб.

В заключение заметим, что повышения спектральных уровней пристеночных флюктуаций давления получены для случая равномерно распределенной монодисперсной шероховатости зернистого типа при течении потока в трубе (внутренняя гидродинамическая задача). В общем случае результаты подобных измерений должны зависеть от характера шероховатости поверхности (форма бугорков шероховатости, их плотность распределения и дисперсность), относительного размера приемника, градиента давления, характера гидродинамической задачи (течение в трубе или в пограничном слое).

Автор признателен Л. М. Лямшеву за внимание к работе.

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 beneath a thick turb. boundary layer. J. Fluid Mech, 1962, 14, 2, 187—210.
4. F. A. Aupperle, R. F. Lambert. Effects of roughness on measured. Wall-pressure fluctuations beneath a turbulent boundary layer. J. Acoust. Soc. America, 1968, 47, 1 (part 2), 359—370.
5. Е. М. Грешилов, Л. М. Лямшев. О спектре и корреляции пристеночных пульсаций давления при обтекании шероховатостей стенки. Акуст. ж., 1969, 15, 1, 126—128.
6. Е. М. Грешилов, А. В. Евтушенко, Л. М. Лямшев. О спектральных характеристиках пристеночных пульсаций давления при отрыве пограничного слоя за выступом на гладкой стенке. Акуст. ж., 1969, 15, 1, 33—39.
7. К. К. Федяевский, Н. Н. Фомина. Исследование влияния шероховатости на сопротивление. Тр. ЦАГИ, 1940, 441.
8. И. К. Никитин. Турбулентный русловый поток и процессы в придонной области. Киев, Изд-во АН УССР, 1963.
9. R. H. Kraichnan. Pressure fluctuations in turbulent flow over a flat plate. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 3, 378—390.
10. 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

Поступила в редакцию
23 ноября 1970 г.