

УДК 534:532.526.5

О СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОТРЫВЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА ВЫСТУПОМ НА ГЛАДКОЙ СТЕНКЕ

Е. М. Грешилов, А. В. Евтушенко, Л. М. Лямшев

Приводятся результаты экспериментального изучения спектральных характеристик пульсаций давления за одиночным выступом на гладкой стенке. Опыты проводились в гидродинамическом канале с малым уровнем вибрационных и акустических помех. Скорость потока воды изменялась в пределах от 5 до 10 м/сек; высота выступа варьировалась от 2 до 4 мм. Спектральный анализ проводился в полуоктавных полосах в диапазоне частот от 50 гц до 8 кгц.

Установлено, что на участке присоединения пограничного слоя за выступом пульсации давления оказываются существенно выше по сравнению с тем, что наблюдается на гладкой стенке, без выступа. Полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с элементарной физической моделью, на основании которой делается попытка описать поле пульсаций давления при отрыве и присоединении пограничного слоя. Указано на существование некоторой универсальной зависимости спектра пульсаций давления от безразмерной частоты (число Струхала) в области присоединения пограничного слоя.

Статистические свойства и спектр пристеночных пульсаций давления для безградиентного потока исследовались многими авторами. Между тем, движение тел произвольной формы в жидкости всегда сопровождается появлением в пограничном слое градиента давления. Поэтому важно знать, как свойства пристеночных пульсаций давления зависят от градиента давления.

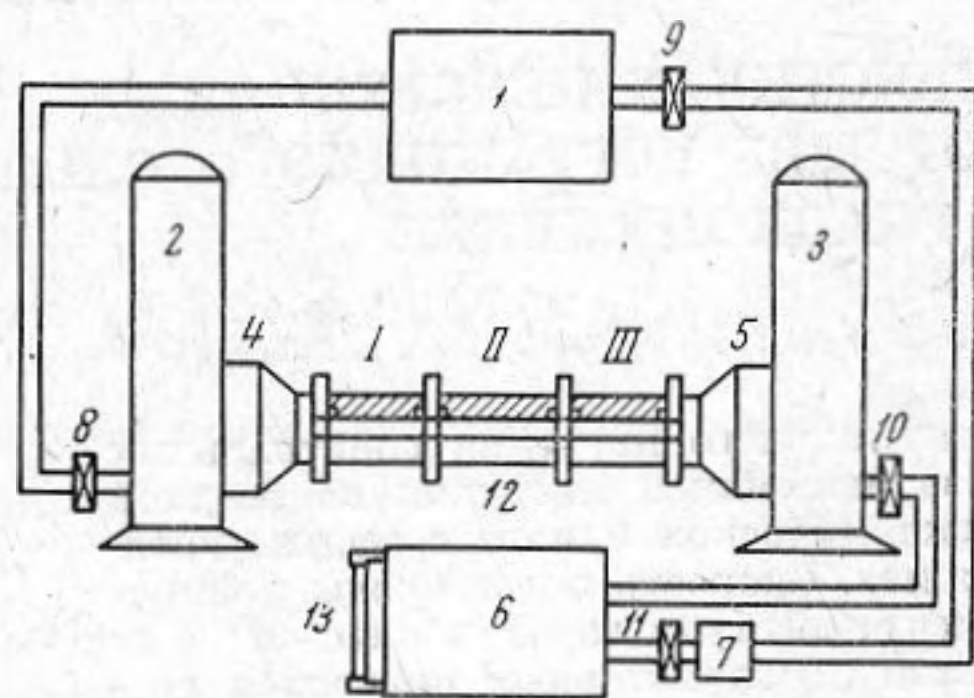
Влияние умеренного положительного и отрицательного продольного градиентов, возникающих при обтекании тел с малой кривизной, на спектральную плотность мощности и корреляционные функции пристеночных пульсаций давления исследовалось в работе [1]. Оказалось, что отрицательный градиент давления усиливает низкочастотные компоненты пульсаций и не оказывает существенного влияния на высокочастотную часть их спектра. Положительный градиент давления приводит к заметному повышению высокочастотных составляющих спектра пульсаций.

Обтекание тел с большой кривизной характеризуется наличием сильных отрицательных градиентов давления, что при определенных условиях приводит к отрыву пограничного слоя. Влияние отрыва пограничного слоя на структуру пристеночных пульсаций давления при дозвуковых скоростях в литературе практически не рассматривалось. Имеются лишь отдельные сообщения, в которых отмечается, что отрыв пограничного слоя сопровождается резким увеличением среднеквадратичного значения пристеночных пульсаций давления на величину до 10—20 дб [2]. Однако в настоящее время отсутствуют какие-либо данные о спектре этих пульсаций и их пространственной структуре.

Распределение пульсаций давления в срывной зоне определяется картиной осредненного течения, которая в свою очередь зависит от конкретных условий отрыва. Известно, что наиболее простая геометрия срывного

течения наблюдается при обтекании двумерного выступа, лежащего на плоскости стенки и имеющего острую заднюю грань, фиксирующую точку отрыва. Этот вид срывного течения целесообразно было положить в основу экспериментального исследования.

Измерения спектральной плотности пристеночных пульсаций давления и их пространственное распределение при отрыве пограничного слоя за выступом проводились в специально сконструированном гидроканале. Схематическое изображение гидроканала представлено на фиг. 1. Из верхнего напорного бака 1 вода поступает через успокоительную и звукоизолирующую системы 2, 3 в рабочую часть канала 12, а затем в сливной бак 6. Запас воды в верхнем баке 1 обеспечивает работу канала при средней скорости потока 7 м/сек в течение 15 мин. Перекачивание воды в верхний бак производится с помощью насоса 7, после чего установка готова к новому циклу работы. Установка имеет серию задвижек 8, 9, 10, 11, позволяющих регулировать скорость потока воды в канале.



Фиг. 1

Рабочая часть канала, имеющая длину 3 м и поперечное сечение 20×70 мм, выполнена в виде трех массивных стальных секций I, II, III с толщиной стенок 50 мм. Перед входом в рабочую часть канала имеется конфузор 4 в виде профилированного сопла с коэффициентом поджатия 22, а на выходе — диффузор 5. Средняя скорость потока в рабочей части канала измеряется расходным способом по водомерному стеклу 13.

Измерения проводились на расстоянии 1,5 м от входа в рабочую часть в центральном участке канала, где наблюдалось полностью установившееся течение с эквивалентной толщиной σ пограничного слоя, равной 10 мм. Исследовалось отрывное обтекание, вызванное одиночными крупными выступами, высота которых k была равна 2 и 4 мм. Форма выступов и расположение приемников за ними показаны в верхнем правом углу фиг. 3.

Измерение пульсаций давления осуществлялось восемью приемниками давления, причем каждый приемник диаметром 2,5 мм устанавливался за выступом в направлении потока заподлицо со стенкой канала. Расстояние между центрами соседних приемников составляло 4 мм; общая база, перекрываемая приемниками, составляла 28 мм. В качестве чувствительного элемента использовались пьезопластинки, работающие на изгиб. Чувствительность приемников составляла около 1,5 мкв/бар, частотная характеристика была равномерной до 6 кгц. В процессе измерений электрический сигнал с выхода каждого приемника усиливался, после чего поступал на вход полуоктавного фильтра и далее записывался на регистраторе уровня Н-110. Спектральный анализ сигналов проводился непосредственно во время эксперимента.

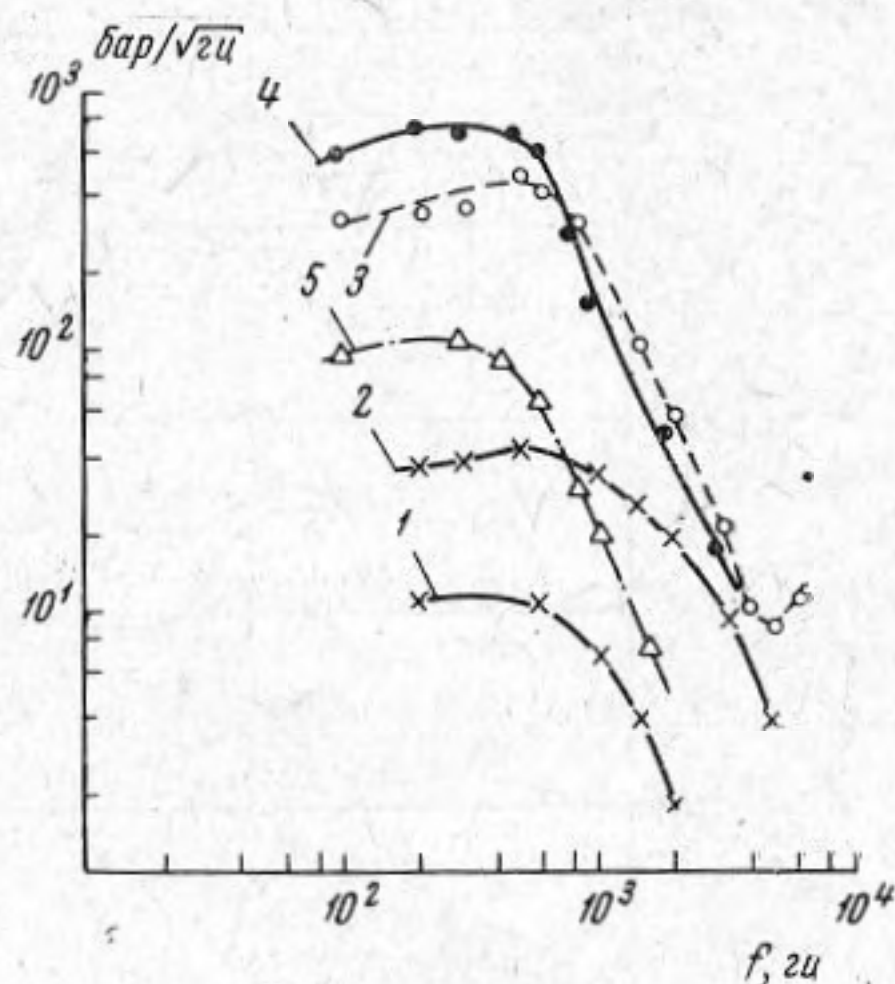
Важно было выяснить, имеют ли пульсации давления, измеряемые на гладкой стенке без выступа и с выступом, псевдозвуковой характер. Специально поставленные эксперименты показали, что в рабочей части гидроканала уровни звуковой и вибрационной помех лежат существенно ниже псевдозвуковых пульсаций давления во всем диапазоне частот вплоть до 10 кгц. Интегральный уровень пульсаций давления, зарегистрированный при безотрывном обтекании гладкой стенки, составил около $0,004 \cdot \frac{1}{2} \rho U_{\text{ср}}^2$, где $U_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока воды в канале, что близко к измерениям других авторов. Спектральные уровни пульсаций давления в бар/√гц

при безотрывном обтекании гладкой стенки, составил около $0,004 \cdot \frac{1}{2} \rho U_{\text{ср}}^2$, где $U_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока воды в канале, что близко к измерениям других авторов. Спектральные уровни пульсаций давления в бар/√гц

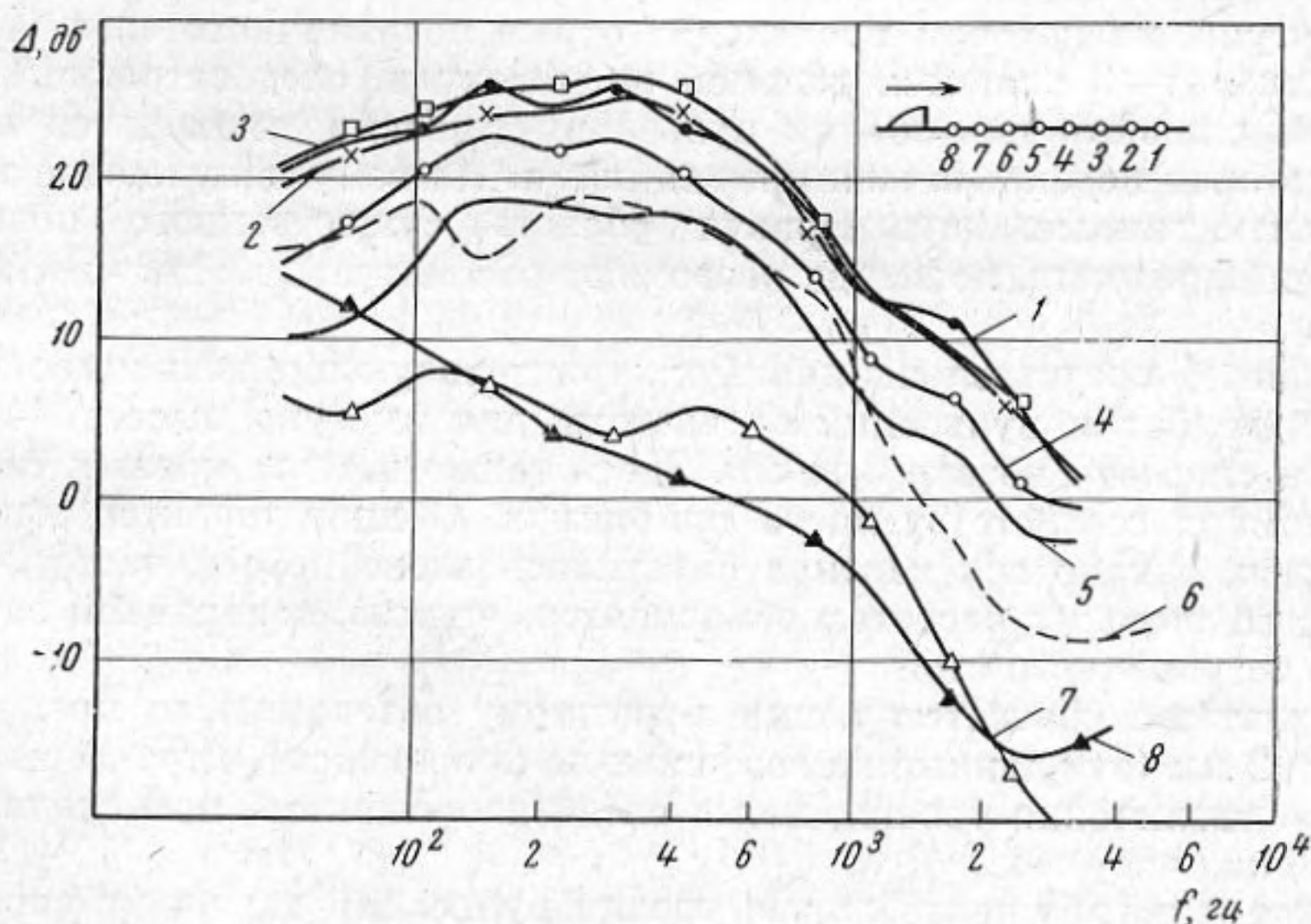
для средних скоростей потока $U_{\text{ср}} = 5$ и 10 м/сек представлены на фиг. 2 кривыми 1 и 2. При наличии уступов максимальные значения интегральных уровней пульсаций давления возрастали в 5—7 раз.

Результаты спектральных измерений представлены ниже в виде превышения спектральных уровней пульсаций давления при отрывном обтекании над соответственными уровнями, наблюдаемыми при обтекании гладкой стенки. Эти превышения в $\delta\text{б}$ мы будем в дальнейшем, для краткости, называть «спектральными надбавками».

На фиг. 3 приведены данные, характеризующие превышение спектральных уровней (спектральную надбавку) пульсаций давления при наличии отрыва пограничного слоя за выступом высотой 4 мм при скорости потока 10 м/сек. Здесь изображено семейство кривых, построенных по показаниям, снятым с различных приемников; номера кривых на фиг. 3 соответствуют номерам соответственных приемников. Заметим, что задняя кромка выступа находилась на расстоянии 2 мм от центра восьмого приемника. Для всех кривых характерен подъем на низких частотах и плавный спад, начиная примерно от частоты 600 гц . Максимальное повышение спектрального уровня пульсаций давления наблюдалось на третьем приемнике. Уровень пульсаций давления в этом случае на 26 дб выше уровня на гладкой поверхности. Для большинства кривых можно определить область, где превышение



Фиг. 2



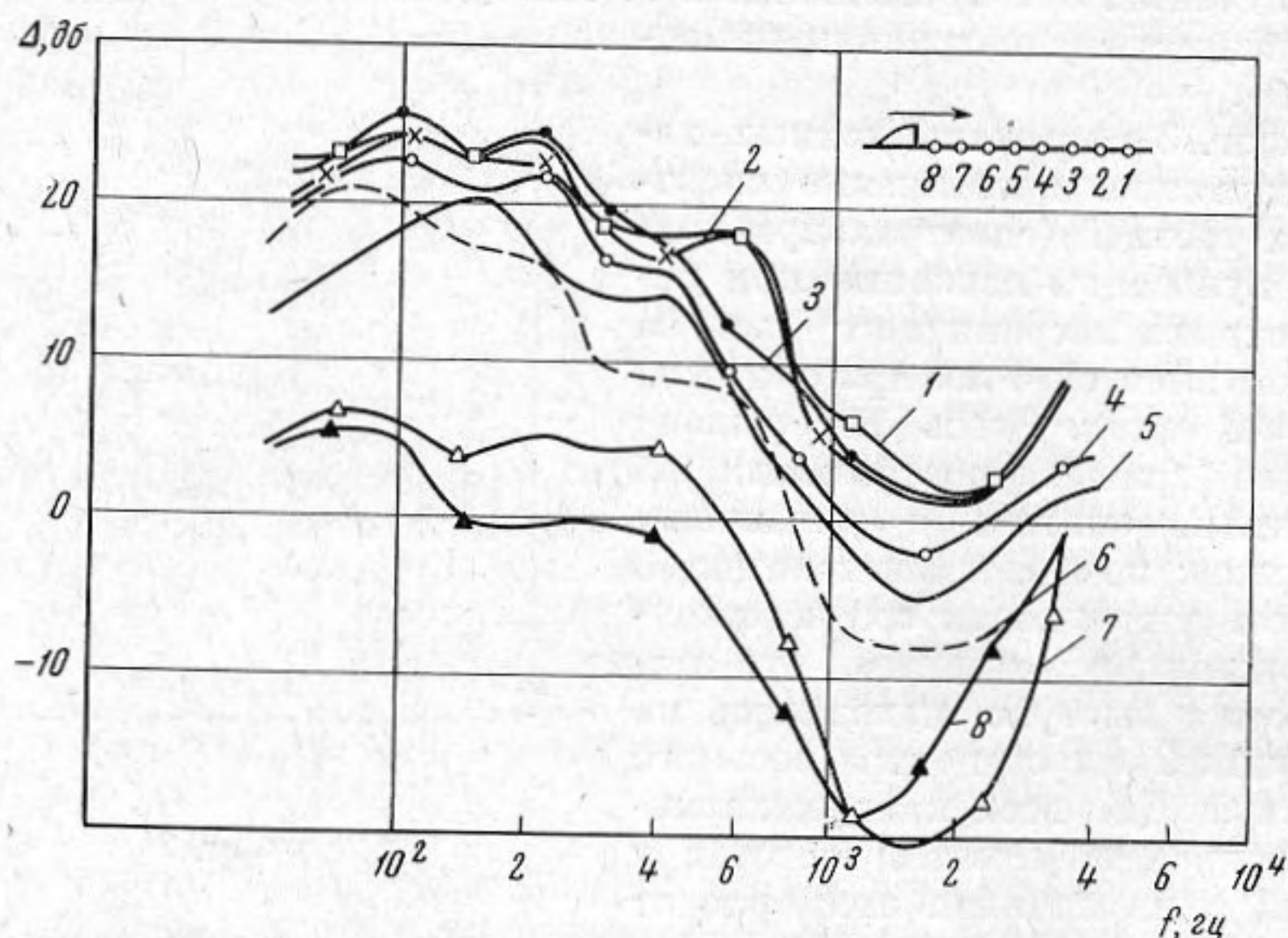
Фиг. 3

имеет максимальное значение. Эта область находится примерно в районе 200—400 гц .

Интересно поведение кривых, относящихся к седьмому и восьмому приемникам. Пульсации давления, регистрируемые этими приемниками в области частот до 600—800 гц , несколько выше пульсаций на гладкой поверхности. В области же частот 800—1000 гц наблюдается уменьшение

спектральной плотности пульсаций давления по сравнению с уровнем пульсаций на гладкой стенке, т. е. спектральные надбавки становятся отрицательными.

Кривые, характеризующие пульсации давления, регистрируемые первыми шестью приемниками, группируются на довольно близком расстоянии друг от друга, а кривые, относящиеся к трем первым приемникам, отличаются не более чем на 2 дб. Это указывает на существование довольно



Фиг. 4

протяженной области сильного повышения пульсаций давления за выступом. Напомним, что восьмой приемник находится непосредственно за кромкой выступа, на котором происходит отрыв пограничного слоя, а группа приемников 1—3 является дальней по потоку и, следовательно, область наиболее сильного повышения пульсаций давления находится на краю зоны, которая перекрывается приемниками. Поэтому полученные экспериментальные данные, характеризующая область существенного повышения пульсаций давления, не всегда позволяют рассмотреть их дальнейшую эволюцию.

На фиг. 4 представлены данные, характеризующие зависимость спектральной надбавки пульсаций от частоты для выступа высотой 4 мм, но уже при скорости потока 5 м/сек. Здесь также номера кривых соответствуют номеру соответствующего приемника. Общий характер кривых не изменился, однако вся картина сместилась влево по оси частот. Подъем кривых на высоких частотах объясняется, видимо, генерацией звука при отрыве пограничного слоя.

Результаты, соответствующие отрывному обтеканию за препятствием высотой 2 мм (эти данные на графиках не приводятся), характеризовались тем, что увеличение уровня, как и следовало ожидать, происходит на более высоких частотах.

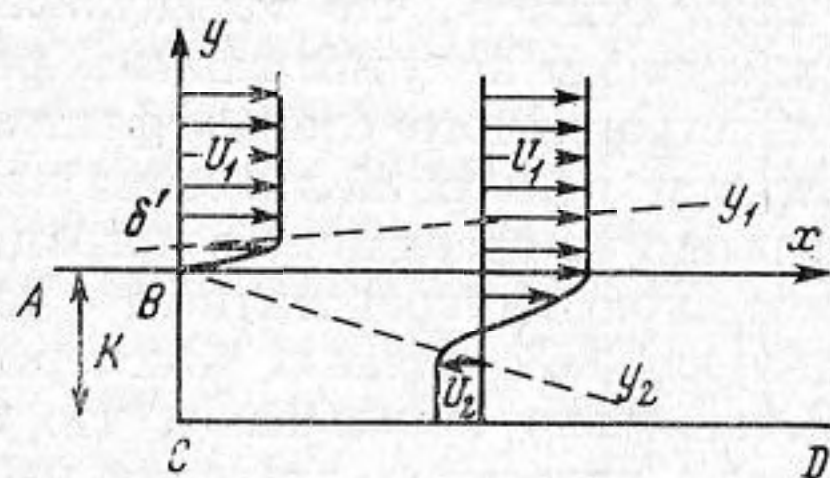
Максимальные спектральные уровни пульсаций давления, зарегистрированные при обтекании выступов, приведены на фиг. 2. Здесь кривые 3 и 4 соответствуют выступам с высотой $k = 2$ и 4 мм и $U_{\text{ср}} = 10$ м/сек. Кривая 5 соответствует $k = 2$ мм и $U_{\text{ср}} = 5$ м/сек. Как видно, наличие выступов приводит к увеличению спектральных уровней в области низких частот, при этом характерная частота определяется высотой выступа и скоростью потока.

Попытаемся обсудить полученные результаты, пользуясь простой физической моделью. За основу возьмем течение за уступом, обтекаемым одно-

родным потоком. Осредненные параметры течения такого типа при достаточно больших числах Рейнольдса известны [3]. В нашем эксперименте числа Рейнольдса, составленные по высоте выступов, составляют 10^4 — 10^5 .

На фиг. 5 приведена картина течения за уступом ABCD высотой k , если на него набегают поток жидкости, скорость которого обозначим через U_1 , а толщину пограничного слоя над уступом — через δ_1 .

Результирующую картину срывного течения в непосредственной близости за точкой отрыва можно представить состоящей из двух зон с постоянными скоростями U_1 (скорость прямого потока) и U_2 (скорость возвратного течения). На границе этих зон вследствие действия интенсивного сдвига скорости $\partial U / \partial y$ образуется клиновидная область сильного перемешивания, ширина которой является линейной функцией расстояния $y_1 - y_2 \approx 0,3 x$. От нижней стенки эта область отделена слоем относительно спокойной жидкости с обратной циркуляцией. В зоне смешения профиль скорости принимает следующий универсальный вид:



Фиг. 5

$$\frac{U_1 - U}{U_1 - U_2} = (1 - \eta^{1,5})^2, \quad \text{где} \quad \eta = \frac{y - y_1}{y_1 - y_2}.$$

Участок формирования турбулентности свободным сдвигом простирается приблизительно до пяти высот уступа, а затем происходит присоединение оторвавшегося пограничного слоя. Следует ожидать, что влияние отрыва пограничного слоя на уровень пульсаций давления на стенке в основном сведется к повышению пульсаций давления в области присоединения интенсивной свободной турбулентности. Это повышение будет всегда происходить на расстоянии около пяти высот уступа независимо от скорости потока.

Попытаемся теперь сугубо приближенно оценить интегральный уровень пульсаций давления, действующих в области свободного сдвига. (Более строгое решение может быть найдено на основе результатов работы [4].) Следуя Крейчану [5], напишем выражение для среднеквадратичного значения пульсаций давления в потоке с однородной турбулентностью при наличии сдвига скорости:

$$\sqrt{\overline{p^2}} \simeq 1/3 \div 1/4 \cdot \rho \cdot \partial U / \partial y \cdot v_t \cdot L_l, \quad (1)$$

где v_t — поперечная компонента пульсаций скорости, L_l — ее продольный масштаб.

Для рассматриваемой физической модели, на основании расчета получим, что сдвиг скорости принимает максимальное значение при $\eta = 0,4$, а среднее значение сдвига будет

$$(\partial U / \partial y)_{\text{ср}} = 0,9 \frac{U_1 - U_2}{y_1 - y_2}. \quad (2)$$

Естественно считать, что продольный масштаб в зоне смешения определяется ее шириной:

$$L_l \simeq y_1 - y_2. \quad (3)$$

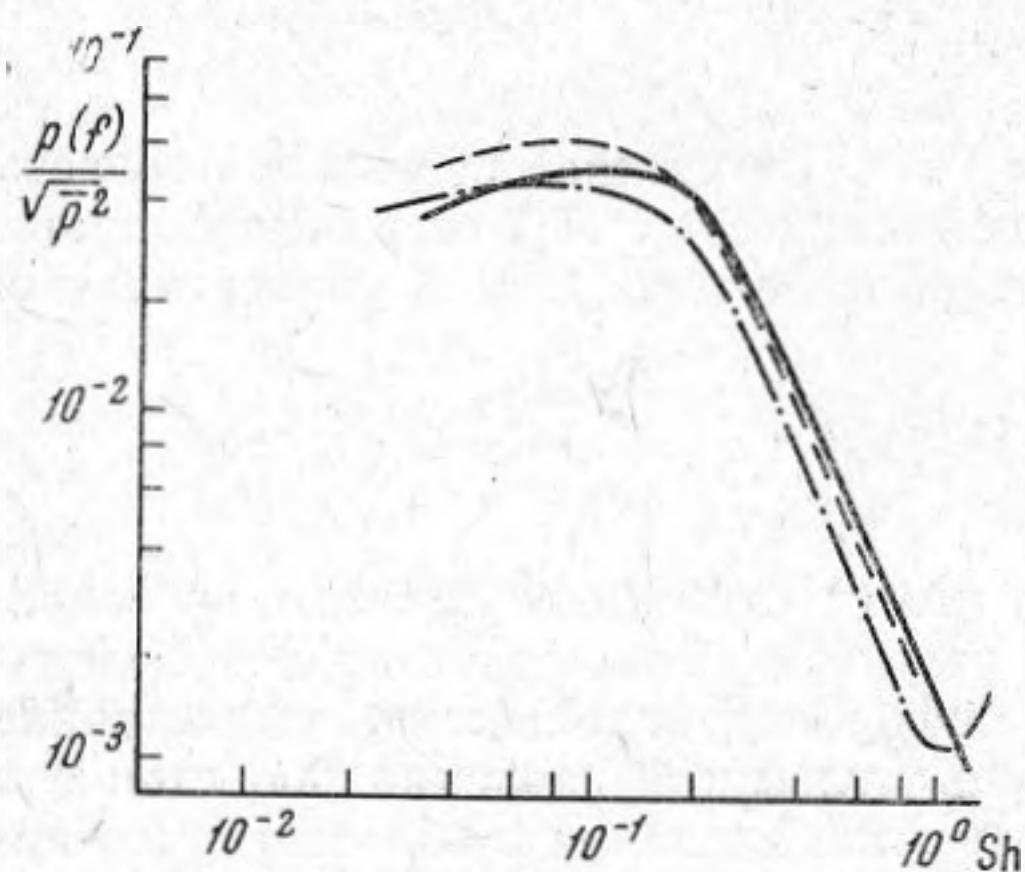
Для оценки величины поперечной компоненты пульсаций скорости воспользуемся экспериментальными фактами, установленными для свободной зоны смешения струй [6, 7]:

$$v_t = 0,7 v_l, \quad v_l = 0,2 L_l \cdot \partial U / \partial y. \quad (4)$$

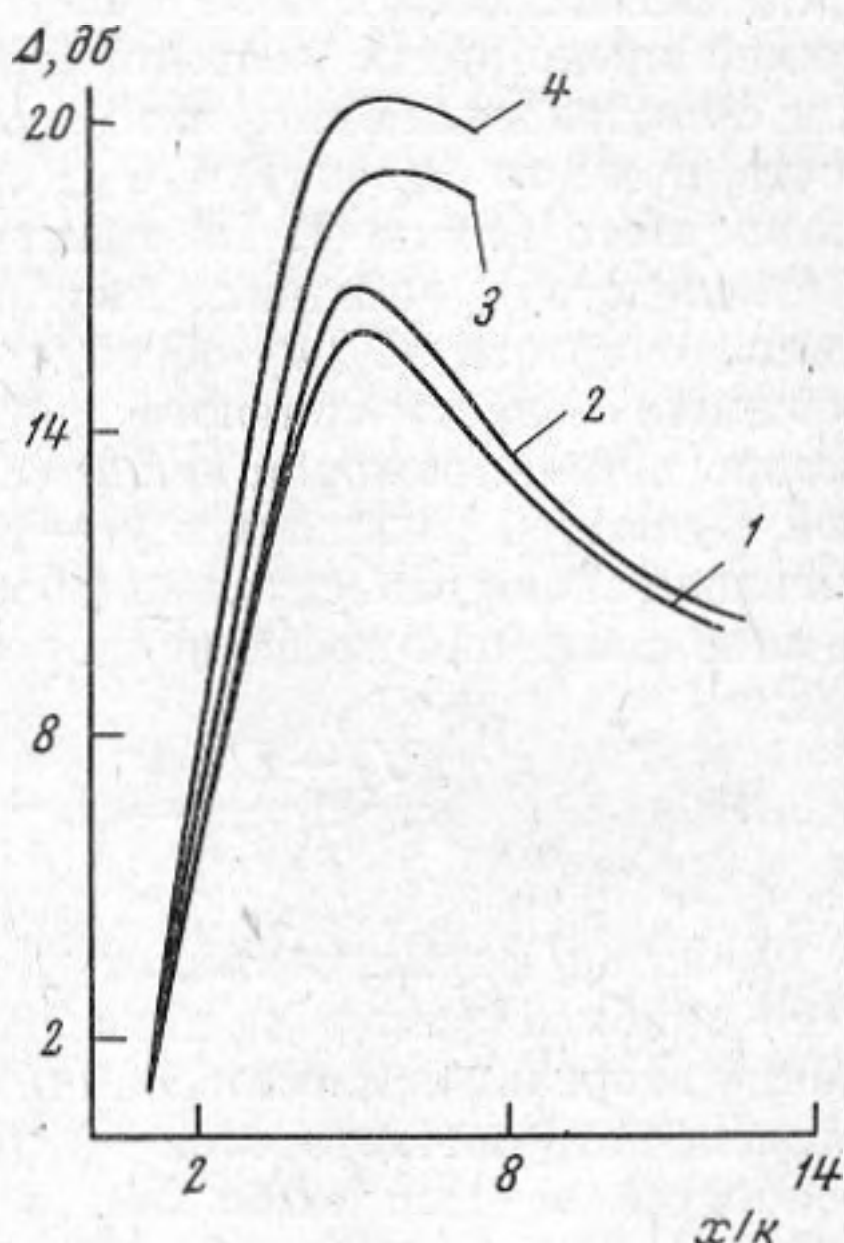
Подставляя выражение (2) — (4) в формулу (1), получаем $\sqrt{\bar{p}^2} \simeq 0,06 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho (U_1 - U_2)^2$.

В области присоединения пограничного слоя $U_2 = 0$ и, таким образом, интегральный уровень пульсаций давления в зоне смешения будет иметь порядок $\sqrt{\bar{p}^2} \simeq 0,06 \cdot \frac{1}{2} \rho U_1^2$.

Если считать, что эти пульсации давления полностью передадутся стенке, то мы получим важный результат: при присоединении оторвавшегося пограничного слоя эффективность генерации пульсаций давления на порядок выше по сравнению с пограничным слоем при безградиентном течении вдоль гладкой стенки. Эксперименты действительно показывают, что максимальные пульсации давления наблюда-



Фиг. 6



Фиг. 7

ются в области присоединения пограничного слоя, находящейся, независимо от скорости потока, на расстоянии 5—6 высот выступа от задней кромки последнего.

Из соображений размерности следует, что характерная частота пульсаций давления в оторвавшемся пограничном слое должна определяться отношением конвективной скорости вихрей к их продольному масштабу (ширине зоны смешения). Поскольку в поперечном направлении сдвиг имеет максимум при $\eta = 0,4$, то естественно ожидать, что сами пульсации давления здесь наиболее интенсивны. Из выражения для профиля скорости следует, что в области присоединения пограничного слоя скорость потока при $\eta = 0,4$ равна примерно $0,4 U_1$, а ширина зоны смешения равна $1,5 k$; имея это в виду для характерной частоты в зоне присоединения пограничного слоя, получаем $f_0 \simeq 0,2 U_1 / k$.

На фиг. 6 спектры пульсаций давления в зоне присоединения пограничного слоя, приведенные нами ранее на фиг. 2, представлены в безразмерном виде в функции чисел Струхала. Спектральные уровни нормировались среднеквадратичным значением пульсаций давления, а число Струхала строилось по высоте выступа и характерной скорости обтекания выступа, за которую принималась средняя скорость потока. Видно, что в зоне присоединения спектр пульсаций давления имеет универсальный вид, и можно выделить некоторую характерную частоту, соответствующую числу Струхала 0,1—0,2.

Как известно, для характерной частоты пульсаций давления на гладкой стенке f_0' приближенно справедливо выражение: $f_0' \simeq U_{cp} / \delta$. Отсюда

следует, что наличие крупного выступа ($k > 0,2 \delta$) должно приводить к повышению спектральных уровней пульсаций давления в области низких частот.

Пространственное распределение спектральной надбавки для чисел Струхала $Sh = 0,15$ приведено на фиг. 7.

Кривая 1 относится к опытам, когда высота выступа была равна 2 мм, а скорость потока $U_{cp} = 5$ м/сек, и кривые 2, 3, 4 соответственно к опытам, для которых $k = 2$ мм и $U_{cp} = 10$ м/сек; $k = 4$ мм, $U_{cp} = 5$ м/сек; $k = 4$ мм и $U_{cp} = 10$ м/сек. По горизонтальной оси откладывается величина отношения расстояния приемника от задней кромки выступа к высоте выступа, по вертикальной оси — величина спектральной надбавки в децибелах. Видно, что спектральная надбавка на характерной частоте при отрыве пограничного слоя за выступом имеет резко выраженную пространственную неоднородность, соответствующую формированию свободной интенсивной турбулентности, ее присоединению к стенке и последующему вырождению. Максимальные эффекты наблюдаются в области присоединения пограничного слоя, находящейся независимо от скорости потока на расстоянии пяти-шести высот выступа.

Обнаруженное понижение высокочастотных пульсаций давления в непосредственной близости за задней кромкой выступа объясняется экранирующим действием застойной зоны. Как видим, полученные экспериментальные результаты находятся в качественном согласии с соображениями, вытекающими из физической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. N. Schloemer. Effects of Pressure gradients on turbulent boundary layer wall — pressure fluctuations. J. Acoust. Soc. America, 1967, 42, 1, 93—113.
2. Сб. «Подводная акустика». М., «Мир», 1965, стр. 350.
3. C. Oikhine, F. Sananes. Structure de l'écoulement à l'aval d'une paroi en forme de marche. C. r. Acad. Sc. Paris. 1966, 262, 962—965.
4. В. М. Лятхер. Гидродинамические нагрузки на элементы гидротехнических сооружений. Тр. координац. совещания по гидротехнике. 1966, 28, 25—48.
5. R. H. Kraichnan. Pressure fluctuations in turbulent flow over a flat plate. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 3, 378—390.
6. Е. В. Власов. Исследование турбулентности в связи с определением акустических характеристик струи. Инж.-физ. ж., 1965, 5, 568—573.
7. P. O. Davis, M. J. Fisher, M. J. Baratt. The Characteristics of the turbulence in the mixing region of a round jet. J. of fluid Mech., 1963, 15, 3, 337—367.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
1 марта 1968 г.