

$(R_{x2}, R_{y2})$  описывает дифракционное уширение в соответствующей плоскости. На рис. 5 изображены зависимости относительного уширения пучка  $R_{x2}/a$  и  $R_{y2}/b$  от отношения  $L/a$  и  $L/b$  для различных волновых размеров  $K_0L$  кристалла в плоскостях  $(1\bar{1}0)$  и  $(001)$  в парателлурите.

Допустим, что нам нужно получить в кристалле парателлурита длиной  $L=4$  см на частоте  $f=100$  МГц акустический пучок с параметрами  $R_{x2}/a = R_{y2}/b = 1,5$ ,  $R_{x1}/a = R_{y1}/b = 2$ . Из неравенств (8) и (9) и из графиков на рис. 5 определяем, что для данного волнового размера кристалла ( $K_0L=4 \cdot 10^4$ ) размеры преобразователя должны быть:  $a \geq L/40$ ,  $b \geq L/20$ . Если мы выберем размеры преобразователя минимальными ( $2a = 2$  мм,  $2b = 4$  мм), то отклонение плоскости поперечного среза кристалла от кристаллографической плоскости  $(110)$  не должно превышать 7'. Поперечные размеры кристалла при этом должны быть:  $R_x \geq 3,5a = 3,5$  мм,  $R_y \geq 3,5b = 7,0$  мм.

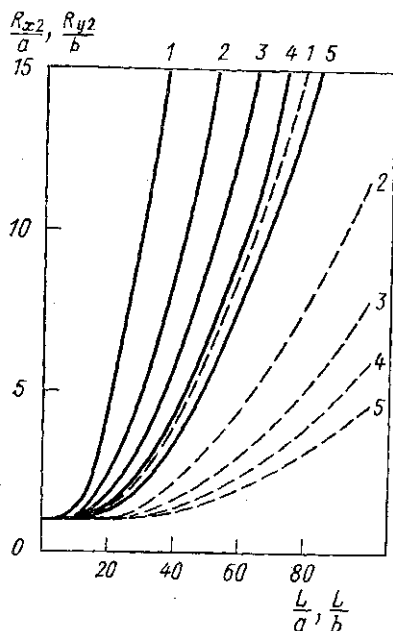


Рис. 5. Зависимость относительного дифракционного уширения акустического пучка  $R_{x2}/a$  от отношения  $L/a$  (пунктирные линии) и  $R_{y2}/b$  от  $L/b$  (сплошные) в парателлурите для различных волновых размеров кристалла:  $K_0L=10^4$  (1),  $2 \cdot 10^4$  (2),  $3 \cdot 10^4$  (3),  $4 \cdot 10^4$  (4),  $5 \cdot 10^4$  (5)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М., 1985. [2] Kharusi M. S., Farnell G. W.//J. Acoust. Soc. Am. 1970. 48, N 3 (pt 2). P. 665—670. [3] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. 2-е изд. М., 1979. [4] Ohmachi Y., Uchida N.//J. Appl. Phys. 1970. 41, N 6. P. 2307—2311. [5] Сильвестрова И. М. и др. Кристаллография. 1975. 20, № 2. С. 359—365. [6] Хаткевич А. Г.//Акуст. журн. 1978. 24, № 1. С. 108—115. [7] Демидов В. П., Якименко В. А.//Гам же. 1981. 27, № 5. С. 787—790.

Поступила в редакцию  
26.03.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

УДК 534.83;534.88

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ШАРА ПРИ ОБТЕКАНИИ ЕГО ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Ф. В. Рожин, О. С. Тонаканов, С. Г. Михайлов

(кафедра акустики)

Анализ литературы по шумам обтекания показывает, что в подавляющем большинстве авторы экспериментальных работ изучали шумы обтекания на гидрофонах, чувствительные элементы которых

значительно превышали толщину пограничного слоя, а стало быть, и характерный размер турбулентных пульсаций давления. То есть известные данные относятся к усредненным значениям пульсаций давления на гидрофонах. Нам известна лишь одна работа, где диаметр датчика был около 2 мм [1]. В связи с этим исследование распределения пульсаций давления на поверхности приемника при обтекании его потоком жидкости представляет интерес.

В опыте использовались гладкие металлические шары диаметрами  $d=50$  и 100 мм. Устройство для изучения тонкой структуры пульсаций давления представляло собой полый металлический шар 1 (рис. 1) с небольшим отверстием 3 диаметром 1,2 мм в его стенке. Внутри шара размещался сферический пьезокерамический приемник 2, внутренняя полость которого сообщалась с отверстием 3. Диаметр этого отверстия и определял размер чувствительного элемента на поверхности жесткого шара. Перед измерениями приемник с помощью шприца заполнялся водой, что обеспечивало передачу пульсаций давления внутрь пьезокерамической сферы. Сигнал с приемника через кабель 4 подавался на усилитель, далее на узкополосный спектроанализатор и регистрировался после усреднения на многоканальном интеграторе самописцем. Частотный диапазон измерений составил 1,5–50 Гц, полоса анализа 0,44 Гц, время усреднения около 260 с. Выбор полосы определялся в основном размерами пьезоприемника и отверстия. Пьезоприемник, рассматриваемый как резонатор Гельмгольца, при заданных диаметрах сферы и отверстия имел собственные частоты выше 1 кГц, т. е. значительно выше рабочего диапазона измерений. Кроме того, для достаточно точного измерения пульсаций давления характерный размер турбулентности  $\lambda = v/f$  ( $v \leq 0,5$  м/с — скорость потока,  $f$  — наибольшая частота в диапазоне измерений) должен быть больше диаметра отверстия. Это требование выполнялось, когда отверстие имело диаметр 1,2 мм.

При измерениях малое отверстие, сообщающееся с пьезокерамической сферой, располагалось в плоскости большого круга, параллельной вектору скорости набегающего потока. Вращением шара вокруг вертикальной оси можно было изменять угол между направлением потока и положением отверстия в шаре, что позволяло измерять спектр пульсаций давления в любой точке большого круга поверхности шара.

Для создания потока жидкости вокруг шара использовалась карусельная установка с двухступенчатой акустической развязкой для предохранения приемника от вибропомех. Период вращения составлял 12 с. При этом скорость спутного течения, в которое попадал шар, имела величину не более 2–3 см/с. Начальные участки цикла измерений исключались как нестационарные. Уровень пульсаций давления превышал собственные шумы гидробассейна (размер  $10 \times 4 \times 4$  м) на величину около 30 дБ. Разброс значений пульсаций давления для различных циклов измерений при одном и том же угловом положении чувствительного элемента в диапазоне частот 1,5–50 Гц и при углах  $90 \div 180^\circ$  не превышал 3 дБ. При углах, близких к  $0^\circ$ , шум определялся

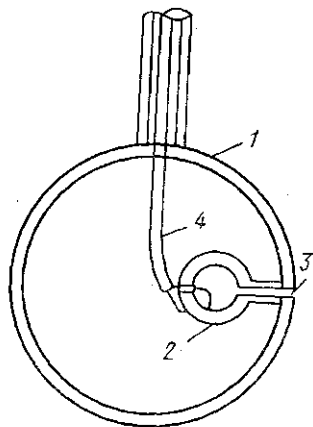


Рис. 1. Металлическая сфера с малым чувствительным элементом

вибрациями установки и собственными шумами бассейна и изменялся в пределах 6 дБ. Результаты измерений практически не зависели от глубины погружения, которая составляла более 15 см. Шары жестко крепились к металлической штанге, которая соединялась с карусельной установкой через ленточные резиновые амортизаторы. К штанге крепился также груз, служащий для уменьшения вибраций приемника. Положение груза выбиралось таким образом, чтобы поперечное перемещение шара, вызываемое гидродинамическими силами, практически отсутствовало. В ходе измерений было определено, что поперечные автоколебания шара диаметром 50 мм на частоте 2 Гц с амплитудой 5 мм вызывают увеличение пульсаций давления при  $\theta = 180^\circ$  ( $\theta$  отсчитывается от передней критической точки) до 10 дБ, а при  $\theta = 60^\circ$  существенно изменяют форму спектра. При углах  $\theta = 0^\circ$  и  $120^\circ$  изменения менее существенны.

Условия гидродинамического обтекания шаров при скоростях потока 0,25 и 0,5 м/с соответствуют значениям числа Рейнольдса  $Re = vd/\nu (1,24 \div 5) \cdot 10^4$ . Данным числам Рейнольдса соответствует число Струхала  $\kappa(Re) \approx 0,2$  и обусловленные им частоты Струхала  $f = \kappa(Re)v/d$  порядка нескольких герц. В этих условиях течение в пограничном слое до точки отрыва имеет ламинарный характер, а за точкой отрыва становится турбулентным в ограниченной области за обтекаемым телом.

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 2—4, показывают, что в диапазоне частот 2÷50 Гц при всех исследованных значениях скоростей набегающего потока, диаметров шаров и углов расположения чувствительных элементов на их поверхности спек-

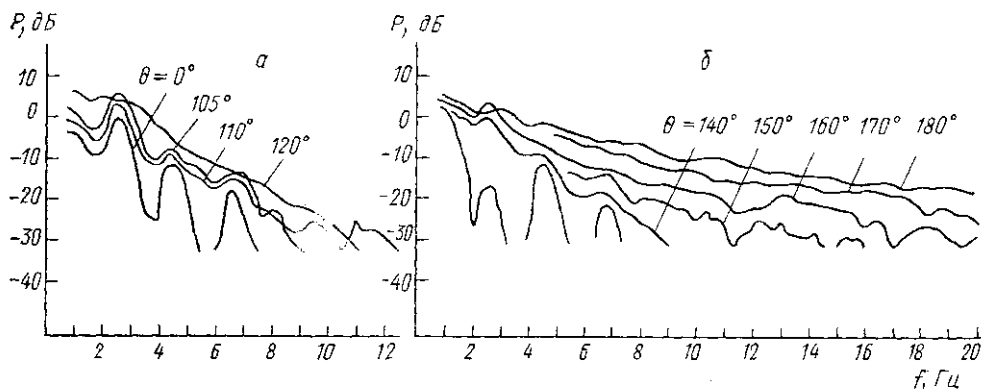


Рис. 2. Спектры пульсаций давления при диаметре шара 50 мм, скорости потока 0,25 м/с и углах между направлением потока жидкости и направлением на чувствительный элемент  $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  (а) и  $140^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (б). Без обозначений показаны кривые, характеризующие уровень помех. Нуль шкалы  $P$  в децибелах соответствует  $1 \text{ Па} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$

тральная плотность пульсаций давления убывает с увеличением частоты. В области углов  $\theta$  от 0 до  $100^\circ$  для обоих шаров и всех скоростей спектр пульсаций давления практически остается неизменным. При углах более  $100^\circ$  происходит изменение характера спектральных зависимостей и уровень пульсаций давления начинает возрастать. Этот факт должен быть связан с происходящими в указанной области углов явлениями отрыва и турбулизации пограничного слоя. Результа-

ты эксперимента позволяют сделать заключение, что уровень пульсаций давления резко возрастает в интервале углов  $100 \div 110^\circ$ . Как показывают литературные данные [2], угол отрыва ламинарного пограничного слоя при докритическом обтекании шара равен  $90^\circ$ . Таким образом, развитое турбулентное течение наблюдается позади линии отрыва слоя, что вполне соответствует существующим представлениям.

Динамика спектров пульсаций давления, воспринимаемых малым чувствительным элементом, на примере шара диаметром 50 мм показана на рис. 2,3 для двух скоростей потока: 0,25 и 0,5 м/с. Параметр

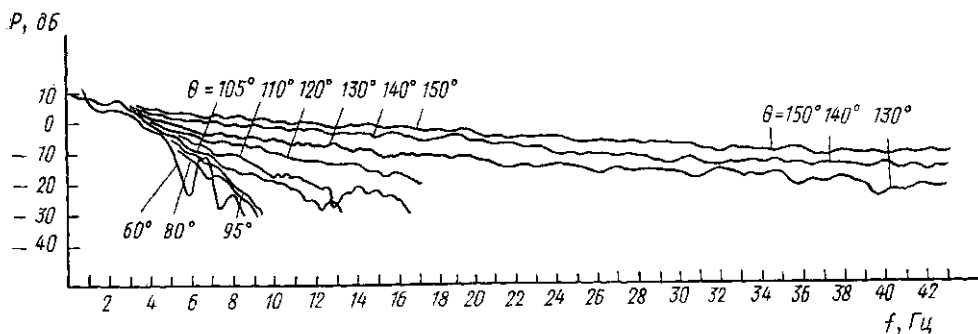
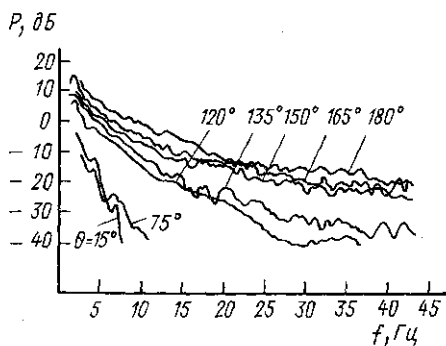


Рис. 3. Спектры пульсаций давления при диаметре шара 50 мм и скорости потока 0,5 м/с. Углы  $\theta$  меняются в пределах  $60^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ . Нуль шкалы  $P$  — как на рис. 2

ром является угол расположения точки приема пульсаций  $\theta$ . Как следует из фиг. 2, а, при  $\theta=0^\circ$  спектр носит нерегулярный характер и определяется собственными шумами бассейна и вибрациями установки. По мере приближения  $\theta$  к углу отрыва спектры приобретают плавный, спадающий с частотой вид. При увеличении углов  $\theta$  от  $110$  до  $180^\circ$  при обеих скоростях потока уровень пульсаций давления возрастает, однако по мере увеличения угла прирост становится все меньше (рис. 2, б и 3).

Рис. 4. Спектры пульсаций давления при диаметре шара 100 мм, скорости потока 0,5 м/с. Углы  $\theta$  меняются в пределах  $150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ . Нуль шкалы  $P$  — как на рис. 2



В случае шара с большим диаметром (100 мм, рис. 4) уровень пульсаций давления при одинаковых скоростях набегающего потока и расположениях чувствительного элемента меньше, чем для шара диаметром 50 мм. Так, для  $f=20$  Гц,  $v=0,5$  м/с уровень пульсаций на поверхности шара диаметром 50 мм при  $\theta=120^\circ$  выше на 13 дБ, а при  $\theta=150^\circ$  — на 11 дБ, чем на поверхности шара диаметром 100 мм.

При увеличении скорости потока вдвое (с 0,25 до 0,5 м/с, рис. 2, б, 3) характер спектра пульсаций также меняется. Уровень пульсаций давления возрастает, и в спектре увеличивается доля высокочастотных составляющих. Высокочастотная часть пульсаций дав-

ления при изменении угла  $\theta$  изменяется быстрее, чем низкочастотная. Так, для шара диаметром 50 мм и  $v=0,5$  м/с с уменьшением угла от  $150$  до  $120^\circ$  уровень пульсаций при  $f=20$  Гц падает на 18 дБ, при  $f=12$  Гц — на 12 дБ, а при  $f=5$  Гц — на 4 дБ.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, б и 3, показал, что зависимость уровня пульсаций давления от скорости в интервале частот  $5 \div 8$  Гц менее резкая (если предположить степенную зависимость уровня от скорости, то она имеет вид  $\sim v^3$ ), чем при более высоких частотах ( $\sim v^4$ ). Теоретические оценки, приводимые в [3] для обтекания плоской поверхности, дают пропорциональность пульсаций давления скорости потока в степени, близкой к трем ( $p \sim v^{14/5}$ ). Но, как отмечается в этой же работе, при обтекании криволинейной поверхности вблизи зоны перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на некоторых частотах могут наблюдаться отклонения от теоретических предсказаний.

Анализ экспериментальных данных показывает, что спад уровня пульсаций с ростом частоты на различных углах пропорционален  $f^{-1} \div f^{-2}$ , что согласуется с теоретическими данными [3], по которым уменьшение уровня пульсаций с ростом частоты происходит по закону  $p \sim f^{-5/3}$ . Известно, что спектр пульсаций давления условно можно представить состоящим из двух участков. Первый участок характеризуется слабой зависимостью от частоты ( $p \approx \text{const}$ ,  $f < f_0$ ); второй, начинающийся с граничной частоты  $f_0$ , — уменьшением пульсаций давления по закону, близкому к  $p \sim f^{-3}$ . В нашем эксперименте граничная частота находилась, видимо, вблизи частоты Струхала и составляла величину порядка нескольких герц, так как экспериментальные спектральные плотности уменьшались с частотой. Сравнение результатов, полученных на шарах диаметрами 50 и 100 мм, показывает, что пульсации давления убывают с увеличением диаметра, причем различие существенно зависит от частоты.

Таким образом, на основе экспериментальных данных можно заключить, что основной причиной возникновения шумов обтекания на гидрофонах является наличие турбулизованной области, локализованной в «теневой» части приемника. Очевидно, что уровень шумов обтекания на шаровом, в частности, приемнике с полностью чувствительной поверхностью не должен совпадать с уровнем, измеренным малым чувствительным элементом на поверхности шара, из-за усреднения по поверхности. Это наблюдалось авторами данного сообщения на опыте, однако количественное заключение о величине пульсаций при их усреднении можно сделать лишь после изучения пространственной корреляции пульсаций давления при обтекании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Миниович И. Я. и др. Гидродинамические источники звука. Л., 1972. С. 213. [2] Чжен П. Отрывные течения. М., 1972. Т. 1. С. 13—29. [3] Петровский В. С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума. Л., 1966. С. 56—67.

Поступила в редакцию  
01.04.86