

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ В ЭЛАСТИЧНОЙ ТРУБЕ СО СТЕНОЗОМ

О. И. ВОВК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 6.01.98

Рассмотрен метод экспериментальной оценки акустических шумов, генерируемых потоком жидкости в эластичной трубе со стенозом. Предложена и теоретически обоснована конструкция измерительной камеры, позволяющая существенно снизить искажения измеряемых статистических характеристик шумов, которые могут появляться за счет паразитных колебаний камеры и резонансов объема жидкости в камере. Показана принципиальная возможность проводить расчетную оценку колебаний стенок эластичной трубы, используя экспериментальные данные об акустических шумах. Собрана установка, реализующая предложенный метод, и подтверждена ее работоспособность. Показано, в частности, что при прочих равных условиях уровень акустического шума, генерируемого турбулизированным потоком при наличии стеноза, намного превышает шум пограничного слоя в трубке при отсутствии стеноза.

ВВЕДЕНИЕ

Генерация звука потоком жидкости в трубах и каналах является весьма интересной проблемой современной механики, имеющей большое практическое значение [1–7]. Однако, несмотря на серьезные усилия многих исследователей, эта проблема продолжает оставаться далекой от своего решения. Это связано как с большими математическими трудностями, возникающими при постановке и решении соответствующих задач математической физики [1–3, 6, 8], так и со сравнительно небольшим объемом существующих на сегодняшний день экспериментальных данных, которые можно было бы использовать при построении адекватных математических моделей [2, 4, 7]. Вместе с тем, проблема генерации звука в трубах приобрела особую остроту в связи с открывшимися сравнительно недавно перспективами в диагностике заболеваний кровеносной и респираторной систем человека [9–12]. Было в частности показано, что при возникновении патологий кровеносных сосудов, выражающихся в их локальных сужениях (стенозах), за счет турбулизации потока крови в местах стеноза и возникновения флуктуаций давления на стенках сосудов генерируется акустический шум, который, распространяясь по окружающим сосуды тканям, вызывает колебания кожи. Эти колебания можно эффективно регистрировать с помощью акселерометров, установленных на коже, и современной электронной аппаратуры. Предполагается, что по характеру шумов в принципе можно определить не

только наличие стеноза, но и его геометрические параметры и место расположения. Еще большие возможности ожидаются в диагностике патологий респираторной системы. Как известно, поток воздуха в бронхиальном дереве при вдохе и выдохе сильно турбулизуется на сужениях и разветвлениях (бифуркациях) бронхов. При этом генерируются акустические шумы, несущие к поверхности тела большой объем информации о состоянии элементов респираторной системы, которая несомненно может быть использована в целях диагностики [1].

В настоящее время практически отсутствуют математические модели для описания характеристик шумов гидродинамической природы даже в самых простых случаях течений, связанных с турбулизацией потока. В связи с этим особое значение приобретает постановка целенаправленного эксперимента в контролируемых условиях, позволяющего выяснить основные особенности генерации шума в некоторых типичных ситуациях. Ниже предлагается один из возможных методов экспериментальной оценки акустических шумов, возникающих за счет турбулизации потока жидкости на нерегулярностях в эластичной трубке, и вибраций стенок трубы. При разработке модельной установки преследовались следующие цели. Во-первых, разработать установку, которая позволила бы максимально снизить помехи и, тем самым, более точно оценивать снимаемые данные (в частности, акустические шумы) и более строго их интерпретировать. Это является весьма существенным, поскольку в конечном итоге необхо-

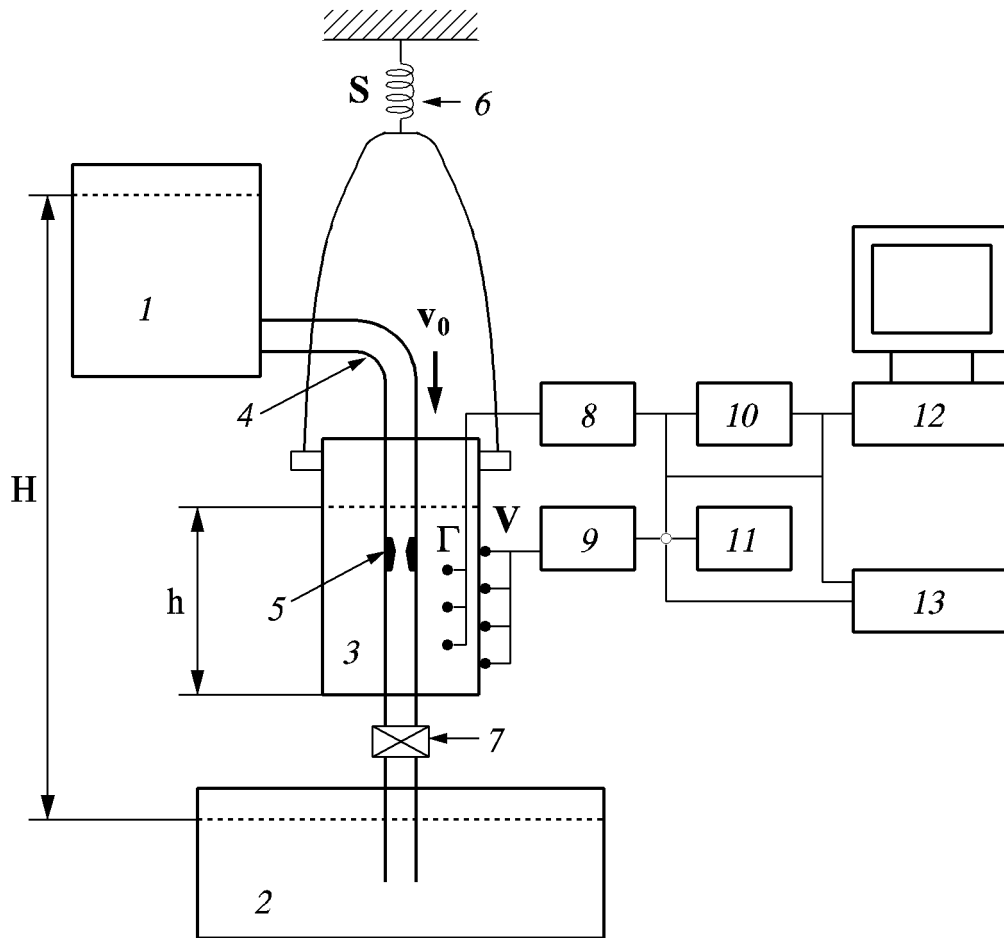


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

димо решать обратную задачу, т. е. по измеренным данным надо определять место расположения и геометрию стеноза. Во-вторых, создать достаточно универсальную установку, которая позволила бы проводить эксперименты для разных видов нерегулярностей, характерных прежде всего для биологических объектов, как, например, стенозы в сосудах, стенозы в элементах бронхиального дерева, бифуркация в бронхиальном дереве и др. Последняя, но отнюдь не менее важная задача, состоит в построении ряда типов нерегулярностей в зависимости от энергетической эффективности создаваемых ими шумов.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1 схематически изображена экспериментальная установка, состоящая из гидравлической

системы и системы измерения и обработки акустических шумов. Основными элементами гидравлической системы являются: 1, 2 – сливной (верхний) и приемный (нижний) резервуары с водой соответственно; 3 – измерительная камера с водой; 4 – эластичная (резиновая) трубка; 5 – цилиндрическая вставка с отверстием (имитирующая стеноз); 6 – амортизатор (резиновый жгут); 7 – вентиль. Основными элементами системы измерения и обработки шумов являются: Г – гидроакустические датчики давления (гидрофоны), размещенные в камере 3; V – датчики колебательной скорости, закрепленные на внешней поверхности камеры 3; 8, 9 – многоканальные усилители электрических сигналов; 10, 11 – многоканальные аналого-цифровые преобразователи (АЦП); 12 – персональный компьютер (PC); 13 – многоканальный магнитофон. Установка работает следующим образом. После открытия вентилей 7 вода из резер-

вуара 1 по трубке 4 начинает перетекать в резервуар 2. Наличие стеноза 5 способствует турбулизации потока и, как следствие, возникновению пульсаций давления, которые в свою очередь вызывают колебания стенок трубки 4. Эти колебания создают звуковое поле в жидкости, заполняющей измерительную камеру. Компоненты этого звукового поля преобразуются в электрические сигналы гидрофонами Г и датчиками скорости V. Далее сигналы через усилители 8 и 9 поступают на АЦП и после преобразования подаются для обработки на РС и документируются с помощью магнитофона 13. Остановимся на некоторых характерных требованиях, которым должна отвечать установка. Во-первых, резервуары 1 и 2 должны быть достаточно большого объема, так чтобы на протяжении времени одного измерения (практически в течение 10–15 с) уровень жидкости в резервуаре 1 мало изменялся. Для этого достаточно, чтобы выполнялось неравенство $\Delta h \ll H$ (где Δh – изменение уровня жидкости в резервуаре 1 за время Δt одного измерения, H – разность между уровнями жидкостей в резервуарах 1 и 2). Это условие позволяет поддерживать практически неизменной скорость потока V_0 в трубке 4. Заметим, что скорость V_0 легко определяется, если знать площадь S_0 зеркала жидкости в резервуаре 1, изменение в нем уровня Δh жидкости за время Δt одного измерения и внутренний диаметр $d = 2r_0$ трубки 4. Тогда $V_0 = 4S_0 \Delta h / \Delta t \pi d^2$.

Во-вторых, измерительная камера 3 должна подвешиваться через амортизатор 6. Это позволяет ослабить возможные колебания камеры за счет колебаний помещения, в котором производятся измерения и, тем самым уменьшить погрешности измерений. Упругость S амортизатора вместе с массой M камеры 3 образует механический контур с резонансной частотой $\omega_0 = [S/M]^{1/2}$. Если выполняется условие $\omega_1 \ll \omega_0$ (где ω_1 – нижняя частота диапазона измерений), то нетрудно показать, что колебания измерительного резервуара по сравнению с колебаниями точки закрепления пружины будут ослаблены в $(\omega/\omega_0)^2 - 1$ раз.

Перейдем к описанию главного элемента гидравлической системы – измерительной камеры, конструкция которой принципиальным образом отличается от конструкций измерительных камер известных установок. Например, в [7] в качестве измерительной камеры использовался открытый заполненный водой сосуд прямоугольного сечения с упругими (стеклянными) стенками без крышки. Резиновая трубка заводилась в этот сосуд и выводилась из него через открытый верх камеры, в результате чего трубка неизбежно перегибалась

под углом до 90 градусов несколько раз вблизи расположения стеноза. Указанная конструкция измерительной камеры и способ размещения в ней трубки приводил к тому, что измеренный спектр акустических шумов, вызываемый турбулизацией на стенозе, был в значительной мере искажен за счет резонансных колебаний упругих стенок камеры и появления стоячих волн в заполняющей ее жидкости (на эти факторы автор [7] указывал в своей работе). Кроме того, не исключено появление дополнительной турбулизации жидкости в местах перегиба трубки, что создает дополнительные акустические шумы.

Предлагаемая нами конструкция измерительной камеры практически лишена указанных недостатков. Она выполнена в виде цилиндрического стакана из резины, по оси которого проходит трубка со стенозом (см. рис. 1). Учитывая что волновое сопротивление резины близко к волновому сопротивлению воды и на несколько порядков больше волнового сопротивления окружающего стакан воздуха, а резиновые стенки стакана практически лишены изгибной жесткости, можно с хорошим приближением считать стенки стакана (и, естественно, поверхность воды в стакане) акустически мягкими. Если надлежащим образом выбрать размеры такой измерительной камеры (ниже будет показано, как это сделать), то в ней можно обеспечить полное отсутствие стоячих волн (резонансов объема жидкости) в интересующем нас диапазоне частот. Иными словами, измерительную камеру можно сделать нерезонансной. Кроме того, трубка 4 практически не имеет перегибов вблизи места расположения стеноза. Предложенная конструкция измерительной камеры создает предпосылки не только проводить измерения акустических шумов без искажений, но и выполнить оценку пульсаций нормальной составляющей колебательной скорости стенки трубки 4, что возможно окажется полезным для оценки характеристик турбулизированного потока внутри трубки 4. Покажем, как это можно реализовать.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Учитывая осевую симметрию измерительной камеры и полагая, в первом приближении, что колебания стенок трубки 4 обладают осевой симметрией, введем цилиндрическую систему координат (r, z) , показанную на рис. 2. Принимая во внимание высказанные соображения об акустических свойствах стенок камеры, сформулируем следующие граничные условия:

$$\Phi(r, z) = 0, \text{ при } z = 0; z = h; r_0 \leq r \leq R_0; \quad (1)$$

$$\Phi(r, z) = 0, \text{ при } r = R_0; 0 \leq z \leq h; \quad (2)$$

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial r} = V(z, r_0) \text{ при } r = r_0; 0 \leq z \leq h; \quad (3)$$

где Φ – потенциал скорости в области $0 \leq z \leq h$; $r_0 \leq r \leq R_0$; $V(z, r_0)$ – неизвестная функция распределения нормальной составляющей колебательной скорости стенок трубки 4.

Полагая, что акустические колебания в жидкости камеры подчиняются уравнению Гельмгольца, звуковое поле представим в следующей форме [13]:

$$\Phi(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n L_0(k_n r) + B_n M_0(k_n r)] \sin \alpha_n z; \quad (4)$$

где

$$L_0(k_n r) = \begin{cases} J_0(k_n r); & k \geq \alpha_n; \\ I_0(k_n r); & k < \alpha_n; \end{cases} \quad (5)$$

$$M_0(k_n r) = \begin{cases} N_0(k_n r); & k \geq \alpha_n; \\ K_0(k_n r); & k < \alpha_n; \end{cases}$$

$$k_n = \sqrt{k^2 - \alpha_n^2};$$

A_n, B_n – неизвестные комплексные коэффициенты; $J_0(k_n r), N_0(k_n r), I_0(k_n r), K_0(k_n r)$ – функции Бесселя, Неймана, Инфельда и Макдональда.

Условие (2) позволяет установить связь между коэффициентами A_n и B_n :

$$B_n = -A_n \frac{L_0(k_n R_0)}{M_0(k_n R_0)}; \quad (6)$$

а из условия (1) определяем постоянную разделения α_n :

$$\alpha_n = n\pi/h. \quad (7)$$

С учетом полученных выражений для B_n и α_n потенциал Φ представим в виде:

$$\Phi(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n [L_0(k_n R_0) - \frac{L_0(k_n R_0)}{M_0(k_n R_0)} M_0(k_n r)] \sin \frac{n\pi}{h} z. \quad (8)$$

Рассмотрим более подробно последнее выражение. С учетом (5) величина $k_n = k\sqrt{1 - (n\lambda/2h)^2}$ (здесь λ – длина волны). Очевидно, что в сумме (8) могут присутствовать как распространяющиеся моды (когда $n\lambda/2h < 1$), так и нераспространяющиеся моды (когда $n\lambda/2h > 1$). При наличии распространяющихся мод в объеме жидкости, находящейся в камере, могут возникнуть резонансные

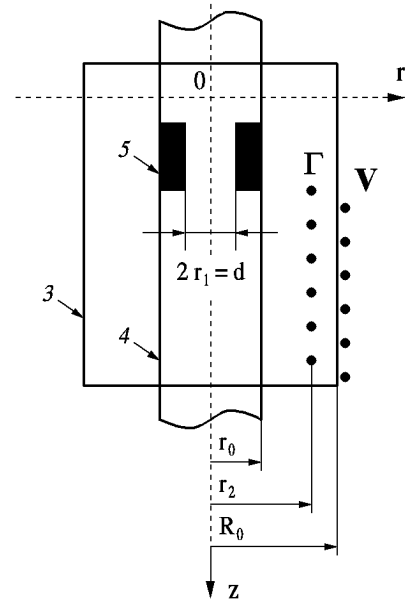


Рис. 2. Система координат, связанная с трубкой

явления, когда величина Φ будет принимать бесконечные значения (реально, за счет потерь, эти значения будут просто достаточно велики). Это становится очевидным, если учесть, что функция Неймана осциллирует вокруг оси $k_n r$ и всегда найдется такое значение $k_n R_0$, когда $N_0(k_n r) = 0$ и множитель, заключенный в квадратные скобки (а следовательно и величина Φ), могут принимать бесконечные значения. Действительно, полагая $k_n R_0 = \gamma_q$ (здесь γ_q – корень функции Неймана, q – номер корня), нетрудно определить частоту резонанса объема жидкости в камере:

$$f_{qn} = \frac{c}{h} \cdot [(\frac{\gamma_q h}{2\pi R_0})^2 + (\frac{n}{2})^2]^{1/2}. \quad (9)$$

Таким образом, наличие распространяющихся мод в камере может внести существенные ошибки в результаты измерений акустических шумов, генерируемых турбулизированным потоком в трубке 4 (о чем упоминалось в [7]). Если $n\lambda/2h > 1$, то будут существовать только нераспространяющиеся моды, и никаких резонансов объема жидкости в камере наблюдаться не будет. Это непосредственно следует из того, что функция Макдональда ни при каких значениях аргумента не принимает нулевые значения. Учитывая изложенное, нетрудно определить верхнюю частоту f_v измеряемого диапазона частот, при котором обеспечивается отсутствие в камере распространяющихся

мод. Поскольку $n\lambda/2h > 1$ и $\lambda = c/f$ (c – скорость звука в воде, f – частота), то

$$f_b < \frac{c}{2h}.$$

Выбирая, например, высоту столба жидкости в камере $h = 0.25$ м, получаем $f_b = 3000$ Гц, что, судя по литературным источникам, вполне достаточно, поскольку основная доля звуковой энергии, генерируемой турбулентным потоком, лежит значительно ниже этой частоты [7].

Таким образом, выбирая надлежащим образом форму измерительной камеры, ее волновые размеры и физические свойства стенок, можно реализовать по сути нерезонансную измерительную камеру, позволяющую практически без искажений провести измерения акустических шумов в контролируемых условиях.

Следует отметить, что с помощью предлагаемого метода можно не только эффективно измерять акустические шумы и устанавливать связи между их статистическими характеристиками и геометрией стеноза и параметрами потока, но и оценивать характеристики фактически неизвестной функции колебательной скорости $V(z, r_0)$ стенок трубки 4. Укажем принципиальную возможность такой оценки, используя метод, разработанный в [14]. Вернемся к выражению (8). Поскольку нам не известна колебательная скорость $V(z, r_0)$ стенок трубки, то воспользоваться условием (3) для определения неизвестных A_n не представляется возможным. Однако вместо условия (3) можно сформулировать новое условие, базирующееся на результатах измерений полей звукового давления (с помощью гидрофонов Γ) или колебательной скорости (с помощью датчиков V). Предположим, что у нас имеются фактические данные о поле скоростей $V(z, R_0)$ на внешней поверхности камеры. Тогда, используя равенство

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial r} = V(z, R_0) \text{ при } r = R_0, \quad (10)$$

полноту и ортогональность функций $\sin \alpha_n z$ на участке $0 \leq z \leq h$ и полагая, что во всем диапазоне интересующих нас частот выполняется неравенство $\alpha_n > k$, можно легко получить выражение для A_n в явном виде:

$$A_n = -\frac{Q_n K_0(\bar{k}_n R_0)}{\bar{k}_n W_0 N_{nn}}, \quad (11)$$

где:

$$Q_n = \int_0^h V(z, R_0) \sin \alpha_n z dz,$$

$$W_0 = I_0'(\bar{k}_n R_0) \cdot K_0(\bar{k}_n R_0) - I_0(\bar{k}_n R_0) \cdot K_0'(\bar{k}_n R_0) = 1/k_n R_0,$$

$$N_{nn} = \int_0^h \sin^2 \alpha_n z dz = h/2,$$

$$k_n = \omega/c \cdot \sqrt{(\pi n c/h\omega)^2 - 1}.$$

Тогда поле скоростей на стенках трубки 4 будет определяться выражением:

$$V(z, r_0) = \frac{2R_0}{h} \sum_{n=1}^{\infty} Q_n T_0(r_0, R_0, \bar{k}_n) \sin \alpha_n z, \quad (12)$$

где

$$T_0(r_0, R_0, \bar{k}_n) = K_0(\bar{k}_n R_0) \cdot [I_0'(\bar{k}_n r_0) - \frac{I_0(\bar{k}_n R_0)}{K_0(\bar{k}_n R_0)} \cdot K_0'(\bar{k}_n r_0)]$$

Очевидно, что выражение (12) непосредственно аналитически связывает поле скоростей на внешней поверхности измерительной камеры с искомым полем скоростей стенок трубки 4. Полагая, что колебания стенок трубки 4, возбуждаемых турбулентным потоком, представляют стационарный гауссовский случайный процесс, и используя метод, разработанный в [14], нетрудно представить пространственную корреляционную функцию поля $V(z, r_0)$ в следующем виде:

$$K(z_1, z_2, r_0) = \langle V(z_1, r_0) \cdot V^*(z_2, r_0) \rangle = \frac{4R_0}{h^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} T_0(\bar{k}_n, r_0, R_0) T_0^*(\bar{k}_m, r_0, R_0) \times \sin \alpha_n z_1 \sin \alpha_m z_2 K(z_1, z_2, R_0), \quad (13)$$

где

$$K(z_1, z_2, R_0) = \langle Q_n \cdot Q_m^* \rangle = \iint_{00}^{hh} \langle V(z_1, R_0) \cdot V^*(z_2, R_0) \rangle \times \sin \alpha_n z_1 \sin \alpha_m z_2 dz_1 dz_2$$

пространственная корреляционная функция поля $V(z, R_0)$, оцененная по результатам измерений.

Таким образом, мы показали принципиальную возможность оценки статистических характеристик поля пульсаций стенки трубки 4, вызванное турбулизацией в ней потока жидкости за счет стеноза. Определение эффективности таких оценок требует дальнейшего специального исследования.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью определения работоспособности установки был собран ее макет, и на нем проведены контрольные измерения спектральной плотности колебательной скорости поверхности $r = R_0$ с помощью одного датчика колебательной скорости, расположенного в точке с координатами $r = R_0$, $z = h/2$, (рис. 3, кривая 1). При этом скорость V_0 потока жидкости в трубке составляла 0.6 м/с, диаметр трубки $2r_0 = 10^{-2}$ м, диаметр отверстия в стенозе $2r_1 = 0.4 \cdot 10^{-2}$ м, длина стеноза $l = 10^{-2}$ м, что соответствует числу Рейнольдса порядка 15000. Преобразованный датчиком V электрический сигнал пропускался через полосовой фильтр с нижней частотой среза 20 Гц и верхней 1000 Гц. В этом диапазоне частот выполнялось условие $\alpha_n > k$. Кривая 2 на рис. 3 соответствует случаю, когда скорость потока равнялась нулю, и фактически определяла спектральную плотность шумов усилительного тракта установки. Сравнивая кривые 1 и 2, можно убедиться, что в диапазоне частот от 20 Гц до 400 Гц отношение величины сигнал/шум составляло не менее 20 дБ. На более высоких частотах это отношение было около 10 дБ. Следует сказать, что был проведен еще один эксперимент, когда стеноз отсутствовал, а скорость потока оставалась прежней. При этом кривая спектральной плотности шумов для этого случая фактически мало отличалась от кривой 2, из чего можно было заключить, что эффективность генерации акустического шума пограничным слоем весьма низка по сравнению с шумом, генерируемым турбулентным потоком при наличии стеноза.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика измерения акустических шумов, генерируемых потоком жидкости в эластичной трубке со стенозом. В частности предложена и математически обоснована модель нерезонансной измерительной камеры, позволяющая существенно снизить погрешности измерения шумов за счет исключения резонансных колебаний стенок камеры и заключенной в камере жидкости.

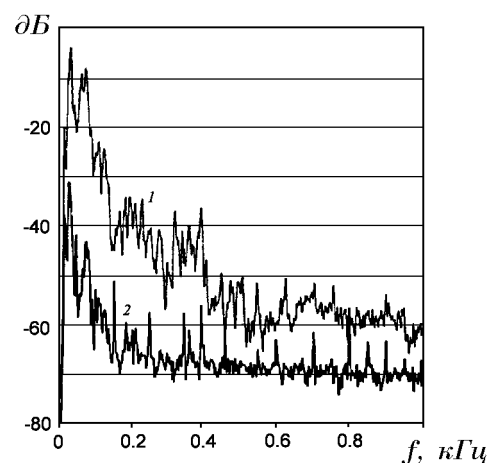


Рис. 3. Измеренные значения спектральной плотности колебательной скорости поверхности $r = R_0$

2. Проведены контрольные измерения акустических шумов, вызванных стенозом, на макете измерительной установки. Установлено, что измерительный тракт имеет достаточно высокое (более 10 дБ) отношение сигнал/шум в диапазоне частот до 1000 Гц. Показано, что при прочих равных условиях уровень акустического шума, генерируемого турбулизированным потоком при наличии стеноза, намного превышает шум пограничного слоя в трубке при отсутствии стеноза.
 3. Принципиально показано, что по измеренным статистическим характеристикам компонент звукового поля в камере можно определить статистические характеристики колебательной скорости стенок эластичной трубки.
1. Davies H. G., Ffowcs Williams J. E. Aerodynamic Sound Generation in a Pipe // Journal of Fluid Mechanics.— 1968.— **32**, N 4.— P. 765–777.
 2. Nelson P. A., Morfey C. L. Aerodynamic Sound Production in Low Speed Flow Ducts // J. Sound and Vibr.— 1981.— **79**, N 2.— P. 263–289.
 3. Blake W. K. Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. Vol. 1, 2.— New York: Acad. Press Inc., 1986.— 974 p.
 4. Abdallah S.A., Hwang N. H. C. Arterial Stenosis Murmurs: An Analysis of Flow and Pressure Fields. // J. Acoust. Soc. Amer.— 1988.— **83** N 1.— P. 318–334.
 5. Michalke A. On the Propagation of Sound Generated in a Pipe of Circular Cross-Section with Uniform Mean Flow // Sound and Vibration.— 1968.— **134**, N 2.— P. 203–234.

6. *Hardin J. C., Pope D. S.* Sound Generation by stenosis in Pipe // AIAA.– 1992.– **30**, N 2.– P. 312–317.
7. *Борисюк А. О.* Генерація шуму потоком у трубах за наявності пошкоджень їх стінок // Доповіді АН України.– 1996.– N 11.– С. 66–70.
8. *Ekaterinaris J. A.* Upwind Scheme for Acoustic Disturbances Generated by Low-Speed Flows // AIAA.– 1997.– **35**, N 9.– P. 1448–1455.
9. *Lees R. S., Dewey C. F.* Phenoangiography: A new non-invasive Diagnostic Method for Studying Arterial Diseases // Proc. Nat. Acad. Sci. (USA).– 1970.– **67**.– P. 935–942.
10. *Yonemary M., Kikuchi K., Mori, et al.* Detection of tracheal stenosis by frequency analysis of tracheal sounds // J. Appl. Physiol.– 1993.– **75**, N 2.– P. 605–612.
11. *Vovk I. V., Grinchenko V. T., Krasnyi L. G., Makarenkov A. P.* Breath Sounds: Recording and Classification Problems // Acoust. Phys.– 1994.– **40**, N 1.– P. 43–48.
12. *Ask P., et al.* Bio-Acoustic Signals from stenotic Tube Flow: State of an Art and Perspectives for Future Methodological Development // Med. Biol. Eng. Comp. (UK).– 1995.– **33**, N 5.– P. 669–675.
13. *Гринченко В. Т., Вовк И. В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– К.: Наукова думка, 1986.– 238 с.
14. *Vovk I. V., Zalutskii K. E., Krasnyi L. G.* Acoustic Model of the Human Respiratory System // Acoust. Phys.– 1994.– **40**, N 5.– P. 762–767.
15. *Гринченко В. Т., Красный Л. Г., Крижановский В. В.* Реконструкция образов источников дыхательных шумов // Акуст. ж.– 1997.– **43**, N 6.– С. 796–803.