

УДК 534.26

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ПРИЕМНИКИ ЗВУКА, НАХОДЯЩИЕСЯ В ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕДАХ

© 1997 г. И. Г. Булатов

ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова

196158 Санкт-Петербург, Московское ш., 44

Поступила в редакцию 26.04.96 г.

Рассмотрена задача о воздействии поля турбулентных пульсаций давления на приемники звука, находящиеся в вязкоупругих средах. Оценено влияние соотношения жесткости вязкоупругих слоев на ослабление турбулентных давлений. Получены численные результаты ослабления интенсивности турбулентных пульсаций давления приемниками звука с различными внешними акустическими покрытиями.

При проведении акустических измерений в движущихся средах приемник звука отделяют от обтекающего потока жидкости или газа слоем вязкоупругого материала (или внешним акустическим покрытием) с целью ослабления турбулентных шумов, воздействующих на этот приемник [1, 2]. В [1] рассмотрено уменьшение интенсивности турбулентных пульсаций давления (ТПД) плоским приемником звука, находящимся в вязкоупругом полупространстве. В [2] построены передаточные функции для некоторых слоистых сред. Задача, которая ставится в данной работе, состоит в выборе размеров и формы приемника звука, а также конструкции внешнего акустического покрытия, которое наилучшим образом ослабляет турбулентные пульсации давления.

Для определения нормированных уровней турбулентных шумов на выходе приемника звука, находящегося в вязкоупругой среде и воспринимающего только нормальные к своей поверхности компоненты тензора напряжения, можно воспользоваться выражением из [1]:

$$P_m(\omega, H, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int E(\mathbf{k}, \omega) |Q(\mathbf{k}, \omega, H) F(\mathbf{k}, a)|^2 d\mathbf{k}; \quad (1)$$

где $P_m(\omega, H, a)$ – спектр мощности ТПД, измеренный приемником звука радиуса a внутри вязкоупругого материала на глубине H и частоте ω ; $E(\mathbf{k}, \omega)$ – частотно-волновой спектр ТПД; $Q(\mathbf{k}, \omega, H)$ – нормированная передаточная функция вязкоупругой среды; $F(\mathbf{k}, a)$ – нормированная передаточная функция приемника звука.

Как видно из (1) уровни турбулентных шумов на выходе приемника звука зависят от вязкоупругих характеристик внешнего акустического покрытия, а также от размеров и формы самого

приемника. В первую очередь оценим влияние внешнего акустического покрытия на уровни турбулентных шумов. В связи с этим рассмотрим три различные модели конструкции внешнего акустического покрытия: 1-я конструкция – тонкая пластина в акустической среде; 2-я конструкция – упругое полупространство; 3-я конструкция – тонкая пластина, приклеенная к упругому полупространству. Для того чтобы показать, насколько эффективно то или иное акустическое покрытие ослабляет турбулентные давления, необходимо построить передаточные функции для этих сред. Передаточная функция представляет собой отклик вязкоупругой среды на воздействие плоской волны единичной амплитуды. Определим передаточную функцию так, как это сделано [3]:

$$Q(k_x, \omega, H) = \frac{\sigma_{zz}(k_x, \omega, H)}{p(k_x, \omega, 0)}, \quad (2)$$

где k_x – проекция волнового числа в падающей волне на ось x ; $\sigma_{zz}(k_x, \omega, H)$ – нормальная компонента тензора напряжения на глубине H ; $p(k_x, \omega, 0)$ – давление в падающей волне.

Передаточные функции рассматриваемых акустических покрытий можно найти, если воспользоваться, например, результатами работ [4, 5], в которых решена задача о прохождении плоской волны через упругие среды. После несложных преобразований для передаточной функции тонкой пластины получим

$$Q(k_x, \omega, H) = W_l \exp\{i(k_0^2 - k_x^2)^{1/2} H\}, \quad (3)$$

где $W_l = 2Z_0/(Z + 2Z_0)$ – коэффициент прохождения; $Z = -i\omega M(1 - k_x^4/k_i^4)$; $Z_0 = \rho_0 c_0/(1 - k_x^2/k_0^2)^{1/2}$; $k_0 = \omega/c_0$, c_0 – скорость звука в акустической среде, $k_i = (\omega^2 M/G)^{1/4}$ – волновое число изгибных

волн в пластине, $M = \rho_{пл}h$ – масса единицы площади пластины, $\rho_{пл}$ – плотность материала пластины, h – толщина пластины, $G = Eh^3/\{12(1 - \nu^2)\}$ – цилиндрическая жесткость пластины, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Передаточная функция упругого полупространства имеет вид:

$$Q(k_x, \omega, H) = \mu(i\omega\rho_0)^{-1} \times \left\{ \begin{aligned} &(k_t^2 - 2k_x^2)W_l \exp[i(k_t^2 - k_x^2)^{1/2} H] + \\ &+ 2k_x(k_t^2 - k_x^2)^{1/2} W_t \exp[i(k_t^2 - k_x^2)^{1/2} H] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $W_l = 2S_3/(S_1 + S_2)$ – коэффициент прохождения для продольных волн, $W_t = 2S_4/(S_1 + S_2)$ – коэффициент прохождения для поперечных волн,

$$S_1 = \mu\omega^{-1}(k_0^2 - k_x^2)^{1/2} \times \left\{ (k_t^2 - 2k_x^2)^2 + 4k_x^2(k_t^2 - k_x^2)^{1/2}(k_t^2 - k_x^2)^{1/2} \right\}, \quad (5)$$

$$S_2 = \omega\rho_0 k_t^2 (k_t^2 - k_x^2)^{1/2},$$

$$S_3 = -i\rho_0(k_t^2 - 2k_x^2)(k_0^2 - k_x^2)^{1/2},$$

$$S_4 = -2ik_x\rho_0(k_0^2 - k_x^2)^{1/2}(k_t^2 - k_x^2)^{1/2},$$

$c_l = \{(\lambda + 2\mu)/\rho_{пл}\}^{1/2}$ – скорость продольных волн в упругом полупространстве, $c_t = (\mu/\rho_{пл})^{1/2}$ – скорость поперечных волн в упругом полупространстве, $\rho_{пл}$ – плотность упругого полупространства; λ и μ – коэффициенты Ламе упругого полупространства.

Передаточная функция тонкой пластины, приклеенной к упругому полупространству, может быть найдена по выражению (4), в котором коэффициенты прохождения продольных W_l и поперечных W_t волн вычисляются с помощью следующих соотношений:

$$S_1 = (k_0^2 - k_x^2)^{1/2} \left\{ Z(k_x^2 + (k_t^2 - k_x^2)^{1/2}(k_t^2 - k_x^2)^{1/2}) + \mu\omega^{-1}k_t^2(k_t^2 - k_x^2)^{1/2} \right\}, \quad (6)$$

$$S_2 = \omega\rho_0(k_x^2 + (k_t^2 - k_x^2)^{1/2}(k_t^2 - k_x^2)^{1/2}),$$

$$S_3 = -i\rho_0(k_0^2 - k_x^2)^{1/2}(k_t^2 - k_x^2)^{1/2},$$

$$S_4 = -i\rho_0 k_x(k_0^2 - k_x^2)^{1/2}.$$

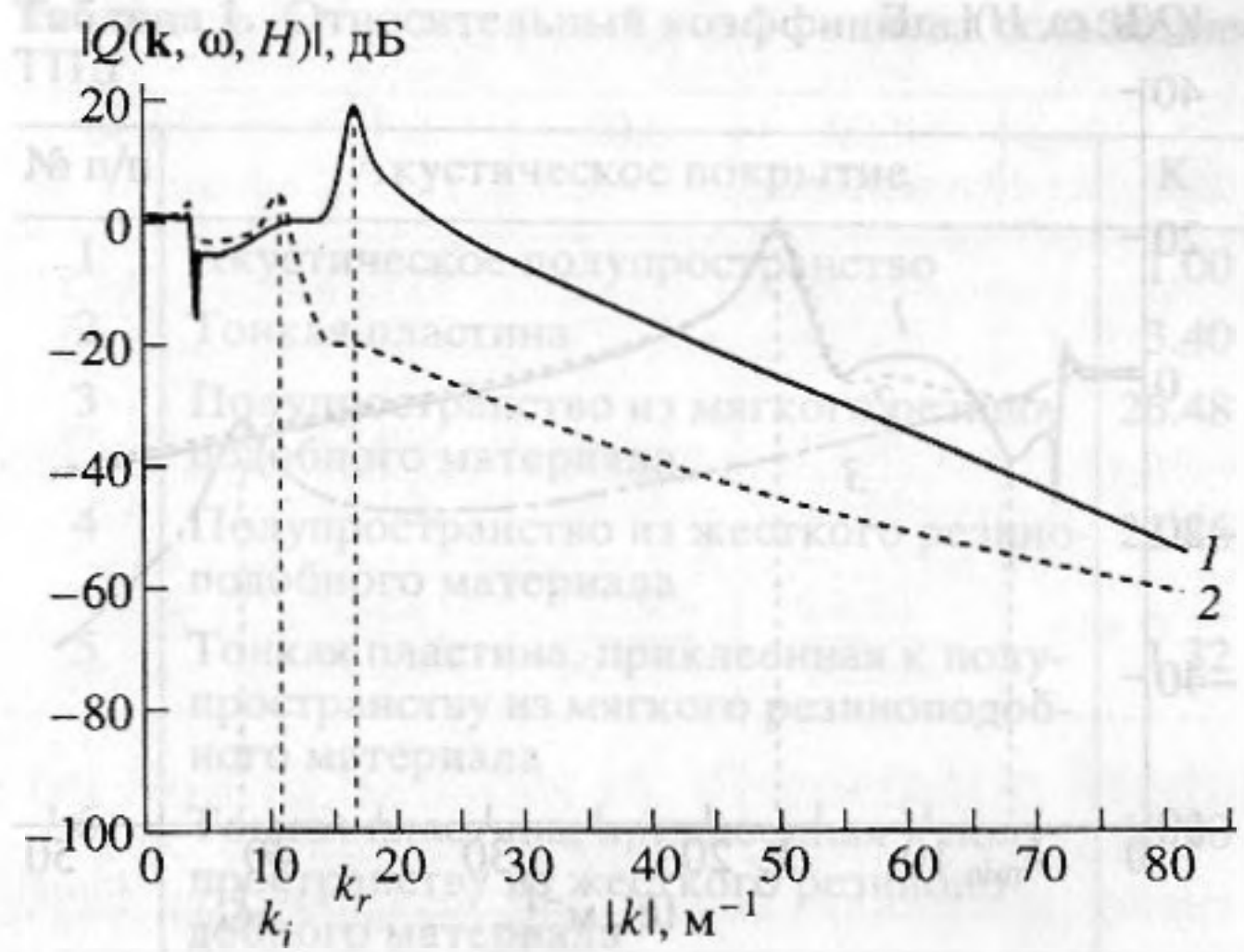


Рис. 1. Передаточные функции изгибноколеблющихся пластин различной толщины, приклеенных к вязкоупругому полупространству при $k_0H = 0.5$: 1 – $k_0h = 0.02$; 2 – $k_0h = 0.4$.

Передаточные функции тонкой пластины и упругого полупространства известны (см., например, [1–3]). Рассмотрим передаточную функцию тонкой пластины, приклеенной к упругому полупространству. На рис. 1 представлены передаточные функции, рассчитанные по выражению (4) с учетом (6), для пластины ($E = 8.90 \times 10^9$ Па, $\nu = 0.92$, $\alpha_l = 0.02$ – коэффициент потерь по волновому числу для поперечных волн) различной толщины ($k_0h = 0.02$ и $k_0h = 0.42$), приклеенной к упругому полупространству из жесткого резиноподобного материала ($E = 6.53 \times 10^8$ Па, $\nu = 0.46$, $\alpha_l = 0.05$). Расчеты выполнены для точек наблюдения, расположенных в упругом полупространстве на одинаковом ($k_0H = 0.50$) расстоянии от границы раздела вода–упругая среда.

Из рис. 1 видно, что передаточная функция для “толстых” пластин, приклеенных к упругому полупространству (кривая 2), для которых волновое число изгибных волн k_i меньше волнового числа волн Релея k_r в упругом полупространстве, принимает меньшие значения (практически во всем диапазоне волновых чисел), чем передаточная функция для “тонких” пластин, приклеенных к тому же полупространству. В этом случае пластина является более жесткой, чем упругое полупространство, и она управляет колебаниями двухслойной конструкции. Передаточная функция такой конструкции имеет два максимума: один (ярковыраженный) обусловлен изгибными колебаниями в пластине, другой – волнами Релея в упругом полупространстве. В случае “тонкой” пластины, когда волновое число изгибных волн в пластине больше волнового числа волн Релея в упругом полупространстве, двухслойная конструкция управляется колебаниями упругого полу-

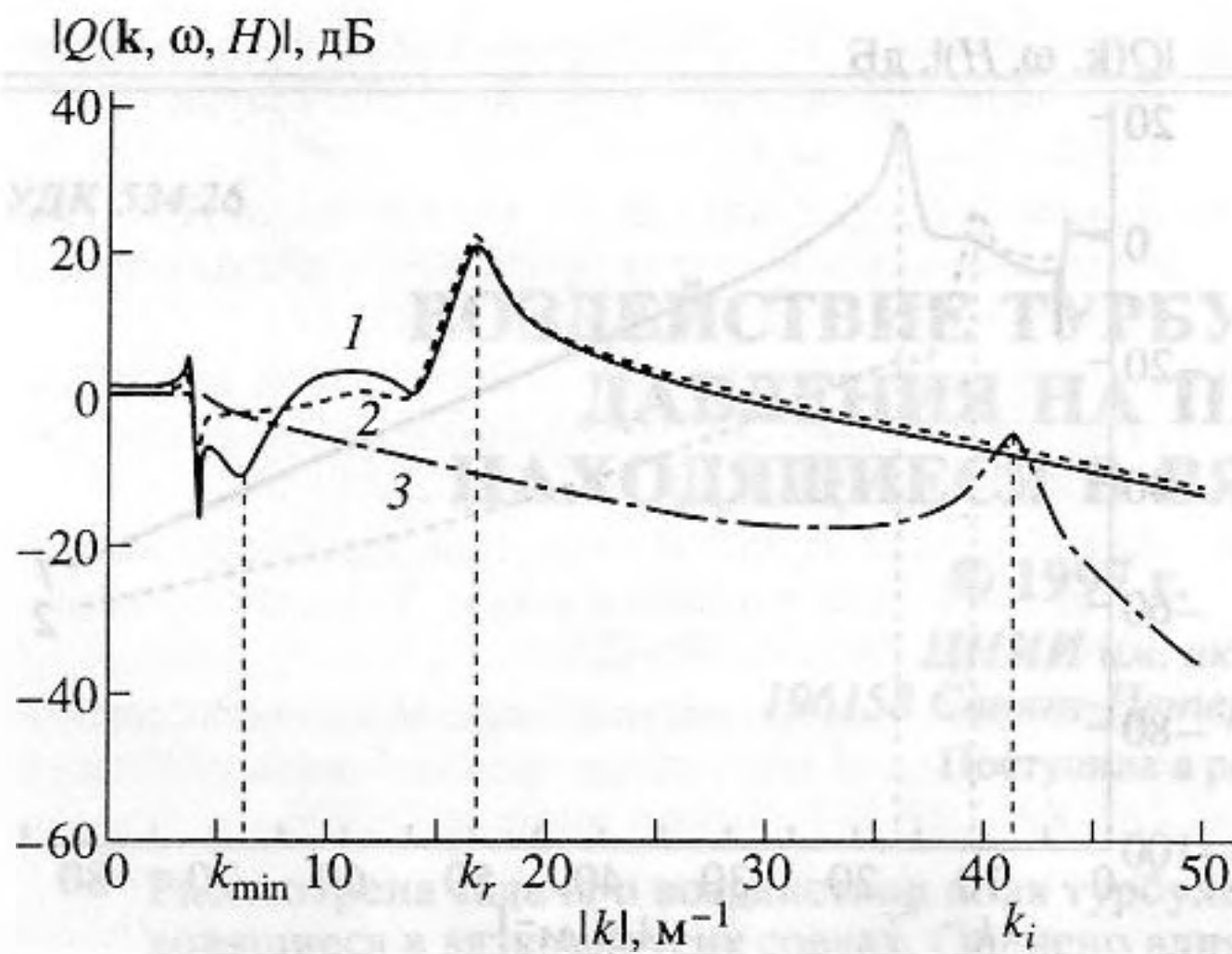


Рис. 2. Передаточные функции вязкоупругих сред при $k_0 H = 0.3$: 1 – вязкоупругое полупространство из жесткого резиноподобного материала; 2 – тонкая пластина ($k_0 h = 0.04$), приклеенная к полупространству из жесткого резиноподобного материала; 3 – тонкая пластина ($k_0 h = 0.04$) в акустической среде.

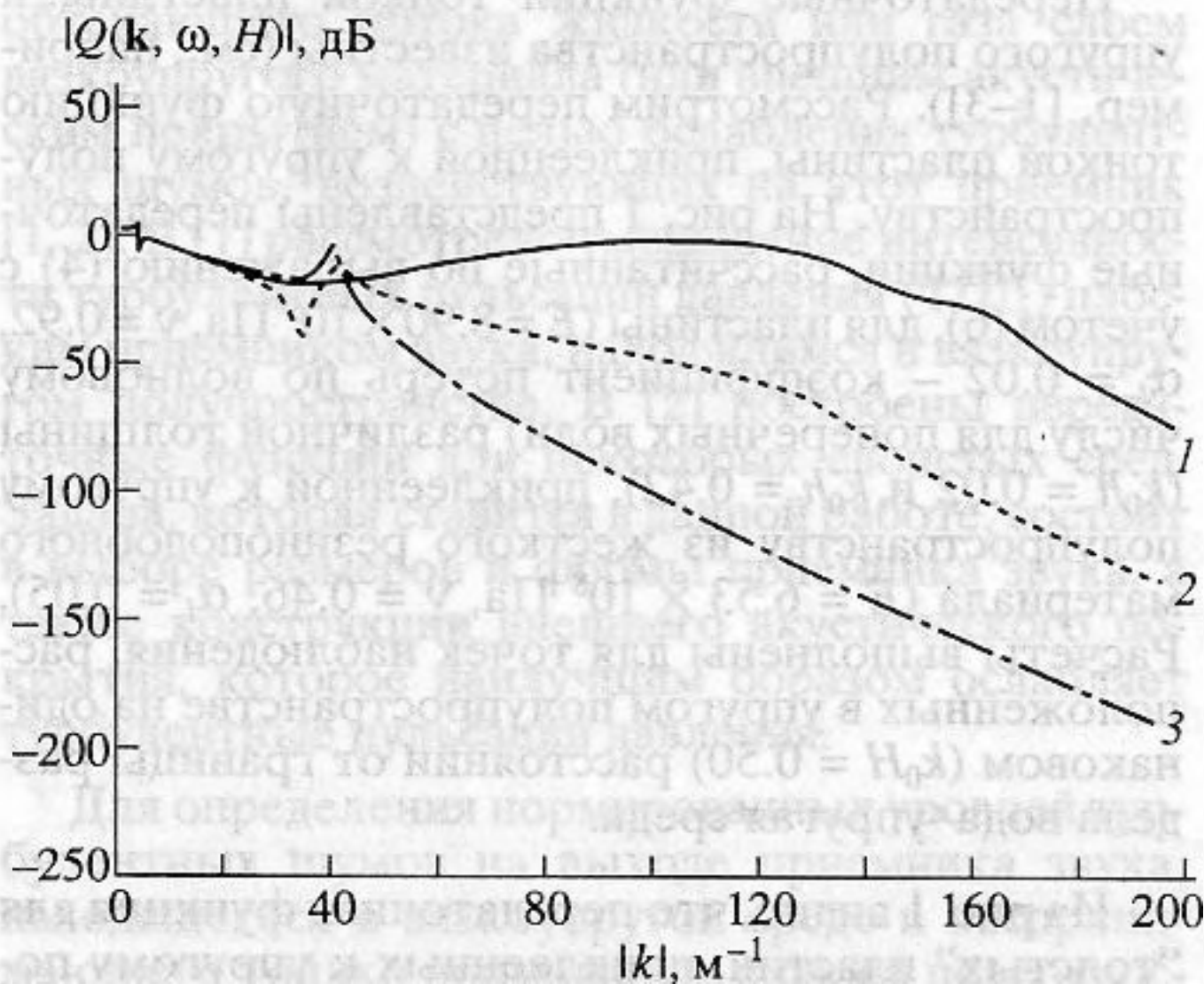


Рис. 3. Передаточные функции вязкоупругих сред при $k_0 H = 0.3$: 1 – вязкоупругое полупространство из мягкого резиноподобного материала; 2 – тонкая пластина ($k_0 h = 0.04$), приклеенная к полупространству из мягкого резиноподобного материала; 3 – тонкая пластина ($k_0 h = 0.04$) в акустической среде.

пространства, так как в этом случае оно обладает большей жесткостью, чем пластина. “Тонкая” пластина практически не вносит вклада в колебания конструкции и, поэтому на ее передаточной функции (кривая 1) можно наблюдать всего один максимум, соответствующий волнам Релея в упругом полупространстве.

Более наглядно влияние соотношения жесткости упругого полупространства и жесткости пла-

стины на передаточную функцию показано на рис. 2 и 3, где для сравнения представлены передаточные функции ранее рассмотренных конструкций, в которых в качестве упругого материала полупространства использовался либо мягкий, либо жесткий резиноподобный материал. Считалось, что скорость поперечных волн в мягком материале в 10 раз меньше, чем в жестком, а все остальные характеристики совпадали. Из рисунков видно, что в случае использования жесткого резиноподобного материала влияние тонкой пластины на передаточную функцию незначительно и, поэтому, использовать ее в составе конструкций, предназначенных для ослабления турбулентных пульсаций давления, нецелесообразно. Тонкая пластина из мягкого материала, наклеенная на упругое полупространство, существенно ослабляет мелкомасштабные ($k > k_i$) волновые компоненты поля ТПД. Чтобы численно оценить насколько эффективно акустическое покрытие ослабляет турбулентные давления, необходимо вычислить площадь под передаточной функцией.

Введем в рассмотрение относительный коэффициент ослабления ТПД, численно равный отношению площадей под передаточными функциями рассматриваемого акустического покрытия и гипотетического, представляющего собой акустическое полупространство:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |Q(\mathbf{k}, \omega, H)|^2 d\mathbf{k}}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |Q_0(\mathbf{k}, \omega, H)|^2 d\mathbf{k}}, \quad (7)$$

где $Q_0(\mathbf{k}, \omega, H)$ – передаточная функция акустического полупространства, $Q_0(\mathbf{k}, \omega, H) = 1$ при $|\mathbf{k}| \leq k_0$ и $Q_0(\mathbf{k}, \omega, H) = \exp[-(k^2 - k_0^2)^{1/2} H]$ при $|\mathbf{k}| > k_0$.

Относительный коэффициент ослабления показывает во сколько раз рассматриваемая слоистая вязкоупругая среда лучше (если $K < 1$) или хуже (если $K > 1$) ослабляет турбулентные пульсации давления, чем акустическое полупространство. В табл. 1 приведены результаты расчета относительного коэффициента ослабления ТПД для различных конструкций внешнего акустического покрытия при $k_0 h = 0.08$ и $k_0 H = 0.17$.

Из табл. 1 видно, что интегральная характеристика K рассмотренных акустических покрытий больше единицы, т.е. данные акустические покрытия хуже ослабляют турбулентные давления, чем водное полупространство. Причина этого – существование поперечных волн в реальных акустических покрытиях. Из рассмотренных конструкций вязкоупругих сред наилучшими свойствами ослабления ТПД обладает конструкция с тонкой

пластиной, приклеенной к упругому полупространству из мягкого резиноподобного материала. Та же конструкция с тонкой пластиной, но приклеенной к упругому полупространству из жесткого резиноподобного материала, практически одинаково ослабляет турбулентные шумы, как и полупространство из жесткого резиноподобного материала.

На уровне турбулентных пульсаций давления, передаваемых внутрь двухслойной конструкции, влияет толщина пластины. Для выбора оптимальной (с точки зрения снижения турбулентных шумов) толщины пластины обратимся к передаточным функциям. Как видно из рис. 3, передаточная функция двухслойной конструкции имеет локальный минимум, характерный для передаточной функции вязкоупругого полупространства и являющийся результатом интерференции продольных и поперечных волн; а также – максимум, характерный для передаточной функции тонкой пластины, расположенный на волновом числе изгибных волн в этой пластине. Поэтому, если подобрать толщину пластины таким образом, чтобы максимум передаточной функции пластины k_i совпал с локальным минимумом k_{\min} передаточной функции упругого полупространства, то получим передаточную функцию, площадь под которой будет минимальна и, следовательно, минимальны уровни турбулентных шумов. В табл. 2 приведены результаты расчета относительного коэффициента ослабления ТПД для тонкой пластины, приклеенной к упругому полупространству из мягкого резиноподобного материала в зависимости от толщины этой пластины. Расчеты выполнены при $k_0H = 0.17$.

Из табл. 2 видно, что для рассматриваемой конструкции акустического покрытия оптимальной с точки зрения снижения турбулентных шумов будет тонкая пластина с волновой толщиной $k_0h = 0.04$, для которой на данной частоте будет выполняться ранее указанное условие $k_i = k_{\min}$. Увеличение или уменьшение толщины пластины приводит к повышению уровней турбулентных шумов. Заметим, что на каждой фиксированной частоте необходимо находить свою оптимальную толщину пластины.

Перейдем к рассмотрению влияния формы и размеров приемника звука на уровне турбулентных шумов. Известно [6–8], что увеличение размеров приемника звука приводит к уменьшению нормированных уровней турбулентных шумов из-за осредняющего действия приемника. Этот эффект наиболее ощутим, когда приемник непосредственно вынесен в турбулентный поток, масштабы корреляции которого значительно меньше линейных размеров приемника. Когда приемник отделен от обтекающего потока слоем вязкоупругого материала он будет воспринимать,

Таблица 1. Относительный коэффициент ослабления ТПД

| № п/п | Акустическое покрытие | K |
|-------|---|-------|
| 1 | Акустическое полупространство | 1.00 |
| 2 | Тонкая пластина | 3.40 |
| 3 | Полупространство из мягкого резиноподобного материала | 26.48 |
| 4 | Полупространство из жесткого резиноподобного материала | 21.46 |
| 5 | Тонкая пластина, приклеенная к полупространству из мягкого резиноподобного материала | 1.32 |
| 6 | Тонкая пластина, приклеенная к полупространству из жесткого резиноподобного материала | 18.20 |

Таблица 2. Зависимость относительного коэффициента ослабления ТПД от волновой толщины пластины

| k_0h | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.13 |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| K | 1.56 | 0.70 | 0.94 | 1.32 | 1.66 | 1.94 |

в основном, длинноволновые компоненты поля ТПД (мелкомасштабные компоненты отфильтровываются внешнее акустическое покрытие), поэтому осредняющий эффект приемника звука будет менее ярко выражен, чем для приемника, находящегося в потоке. Если приемник имеет сферическую (объемную) форму, то, как показано в [9], он будет воспринимать на данной частоте все волновые компоненты поля ТПД, передаваемые внутрь вязкоупругого полупространства, одинаково, практически не осредняя их, т.е. как точечный приемник. Этот факт объясняется свойством ненаправленности сферического приемника, которое проявляется не только для плоских звуковых (падающих на приемник под различными вещественными углами) волн, но и распространяется на неоднородные (падающие под комплексными углами) волны. Поэтому использовать приемник сферической формы, находящийся в вязкоупругой среде, для выделения полезного акустического сигнала из турбулентных шумов не рекомендуется, так как псевдозвуковое поле ТПД внутри вязкоупругого материала представляет собой совокупность неоднородных волн, распространяющихся вдоль обтекаемой поверхности с различными волновыми числами, а сферический приемник воспринимает на данной частоте все эти неоднородные волны без осреднения, как и акустический сигнал. Плоский приемник воспринимает однородные и неоднородные волны, падающие под различными углами, по-разному. Он осредняет те компоненты поля ТПД, длины волн которых меньше размеров чувствительной области приемника.

Таблица 3. Ослабление интенсивности ТПД, дБ

| k_0H | $2k_0a$ | 0.00 (точечный) | 0.08 | 0.17 | 0.34 |
|--------|---------|--------------------|--------|--------|--------|
| 0.08 | | -71.13 | -71.29 | -71.78 | -73.75 |
| | | -43.80 | -47.04 | -58.91 | -68.99 |
| 0.17 | | -79.79 | -79.90 | -80.24 | -81.47 |
| | | -55.07 | -57.22 | -63.68 | -74.86 |
| 0.34 | | -86.48 | -86.57 | -86.81 | -87.49 |
| | | -62.57 | -63.91 | -68.17 | -80.48 |

Для того чтобы оценить насколько эффективно приемник звука, находящийся за акустическим покрытием, ослабляет турбулентные пульсации давления введем в рассмотрение функцию $\chi(\omega)$:

$$\chi(\omega) = \frac{P_m(\omega, H, a)}{P(\omega)}, \quad (8)$$

где $P_m(\omega, H, a)$ – спектр мощности ТПД, измеренный преобразователем конечных размеров внутри вязкоупругого материала; $P(\omega)$ – спектр мощности пристеночных пульсаций давления, измеренный точечным преобразователем на поверхности этого материала.

Для нахождения числителя дроби (8) можно воспользоваться выражением (1), в котором следует использовать нормированную передаточную функцию, отличающуюся от (2) множителем $1/2$, который учитывает удвоение давления на границе упругой среды с акустической средой (как на абсолютно жесткой поверхности). Для нахождения знаменателя следует воспользоваться опытными данными.

В табл. 3 приведены результаты расчета ослабления интенсивности ТПД круглым приемником звука радиуса a , расположенным на глубине H за различными акустическими покрытиями:

– за тонкой пластиной с $k_0h = 0.04$, приклеенной к упругому полупространству из мягкого резиноподобного материала (числитель);

– внутри полупространства из мягкого резиноподобного материала (знаменатель). Расчеты выполнялись по выражению (8) для модели поля ТПД, предложенной А.В. Смольяковым и В.М. Ткаченко [10] при скорости обтекающего потока 15 м/с и толщине вытеснения турбулентного пограничного слоя 0.01 м. При вычислениях использовалась передаточная функция круглого приемника звука, представленная в [6].

Из табл. 3 видно, что, чем больше глубина расположения приемника звука, тем меньше разница между уровнями турбулентных шумов, измеренными приемниками различных размеров, т.е. на

больших глубинах приемники конечных размеров ведут себя как точечные. Этот результат связан с тем обстоятельством, что на больших глубинах упругие среды достаточно хорошо отфильтровывают мелкомасштабные компоненты поля ТПД, а крупномасштабные компоненты, размеры которых больше размеров приемника, воспринимаются последними практически синфазно. Как показывают расчеты, если линейный размер приемника меньше толщины акустического покрытия и $1/2$ длины резонансной волны в упругой среде, то приемник звука воспринимает пульсации давления как точечный, практически, не осредняя их. Их табл. 3 также видно, что наклеивание тонкой пластины на слой мягкого резиноподобного материала приводит к существенному ослаблению интенсивности ТПД.

Таким образом, в настоящей работе получены численные результаты ослабления интенсивности турбулентных пульсаций давления приемниками звука с различными внешними акустическими покрытиями. Показано, что пластина, приклеенная к вязкоупругому полупространству эффективно ослабляет турбулентные пульсации давления только в том случае, если она обладает большей по сравнению с вязкоупругим полупространством жесткостью, т.е. если длина изгибной волны в пластине больше длины волны Релея в вязкоупругом полупространстве. В противном случае наклеивание тонкой пластины на вязкоупругое полупространство с целью ослабления турбулентных шумов нецелесообразно. Толщину пластины следует выбирать из условия совпадения максимума передаточной функции пластины и локального минимума передаточной функции вязкоупругого полупространства. В работе также показано, что использовать сферический приемник звука, расположенный за акустическим покрытием, для выделения полезного акустического сигнала из турбулентных шумов не рекомендуется. Следует использовать плоский приемник, но эффект осреднения турбулентных пульсаций давления ощутим только в том случае, когда его размеры больше $1/2$ длины резонансной волны в акустическом покрытии и если он расположен на глубине, меньшей своих линейных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sung H. Ko, Schloemer H.H. Calculations of turbulent boundary layer pressure fluctuations transmitted into a viscoelastic layer // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 85. № 4. P. 1469–1477.
2. Вишневский А.В., Романов В.Н. Пространственно-волновые фильтрующие свойства многослойных сред // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 6. С. 1117–1118.
3. Булатов И.Г. Моделирование воздействия неоднородного поля случайных сил на упругие среды // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 6. С. 915–921.

4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
5. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972.
6. Смольяков А.В., Ткаченко В.М. Измерение турбулентных пульсаций. Л.: Энергия, 1980.
7. Sung H.Ko. The flush-mounted hydrophone array response to a modified Corcos turbulent wall pressure spectrum (analytical approach) // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 96. № 2. P. 1198–1201.
8. Mellen R.H. Wave-vector filter analysis of turbulent flow // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 95. № 3. P. 1671–1673.
9. Булатов И.Г. Применение сферического гидрофона для изменения псевдозвукового поля турбулентных пульсаций давления, передаваемого внутрь обтекаемого тела // Техн. акуст. 1993. Т. 2. Вып. 3. С. 29–32.
10. Смольяков А.В., Ткаченко В.М. Модели поля псевдозвуковых турбулентных пристеночных давлений и опытные данные // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 6. С. 1199–1207.

Effect of Turbulent Pulsations of Pressure on Sound Sensors in Viscoelastic Media

I. G. Bulatov

The effect of turbulent pressure fluctuations on sound sensors in viscoelastic media is considered. The influence of the rigidity ratio of elastic layers on the decrease of turbulent pressure reduction is estimated. Numerical data for the decrease of intensity of turbulent pressure fluctuations by sound sensors with different external acoustic coatings are obtained.