

## КЛАССИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ И ТЕОРИИ ВОЛН

УДК 584.28

### О ПРЕОБРАЗОВАНИИ АКУСТИЧЕСКИ ЖЕСТКОГО ТЕЛА В АКУСТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОЕ В ЗАДАЧЕ С НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

© 2008 г. В. В. Арабаджи

*Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*

*E-mail: v.arab@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 17.10.07 г.

Разработан и аналитически исследован алгоритм подавления в реальном времени полей рассеяния и излучения вибрирующей гладкой замкнутой поверхности упругого тела произвольной формы. Поверхность защищаемого тела предполагается жесткой по отношению к окружающей сжимаемой среде. Рассмотрена активная гасящая система, состоящая из (а) подсистемы быстрого формирования на защищаемой поверхности заданного распределения нормальных колебательных скоростей и (б) подсистемы регистрации падающих волн на основе однослойной сети монополюсных микрофонов, окружающих защищаемую поверхность. Показано, что акустически жесткое тело, оборудованное предлагаемой активной системой, может быть прозрачным по отношению к определенному классу полей падающих волн. Постановка задачи с начальными условиями при выбранном классе падающих волн позволяет резко сократить число микрофонов активной системы и, соответственно, шумы управления. Алгоритм управления включает логические и нелинейные операции, что исключает традиционное описание гасящей системы как комбинации линейных электрических цепей с постоянными параметрами.

PACS: 43.20.Fn, 43.20.Tb, 43.30.Ky, 43.40.Fz, 43.55.En, 43.20.Px, 02.60.Cb, 02.60.Nm, 02.70.Pt

#### ВВЕДЕНИЕ

Наличие какого-либо тела в жидкости акустически проявляется в виде его полей излучения и рассеяния. Отсутствие этих полей означает акустическую “невидимость” тела. В ряде случаев она желательна и поэтому проблемам гашения звуковых полей, излучаемых и (или) рассеиваемых телом в жидкости (газе) было посвящено множество работ [1–3]. Г.Д. Малюжинцем и коллегами [1, 2] была разработана активная система гашения факторизуемых полей излучения и рассеяния на основе однонаправленных приемных и излучающих поверхностей Гюйгенса. Поверхности Гюйгенса реализуют в виде антенных решеток с очень большим числом элементов. Для сохранения однонаправленных свойств решетки должны находиться на конечном расстоянии от поверхности тела и друг от друга, что усложняет их применение. В работе Ю.И. Бобровницкого [3] получено решение задачи об акустически прозрачном теле как выражение приложенных к границе тела управляемых активных (сторонних) сил либо через измеряемое на этой границе звуковое давление, либо через измеряемую на границе нормальную колебательную скорость. Полученная связь управляемых и измеряемых величин обеспечивает компенсацию поля рассеяния тела, т.е. делает его прозрачным. Для этого нужна пол-

ная информация о виброакустических характеристиках защищаемого тела при том, что последние часто сочетают большую информационную емкость с изменчивостью во времени под действием температуры, давления..., и поэтому не поддаются своевременной идентификации [4]. Рассматривавшиеся ранее решения предполагают стационарность краевой задачи и формулируются в терминах комплексных амплитуд Фурье звуковых полей. При этом гасящая система включается после установления стационарного взаимодействия падающей волны с рассеивающим телом, а суммарное звуковое поле рассматривается для тех моментов времени, когда переходные процессы включения активной системы можно считать затухнувшими. Ниже будет рассмотрена нестационарная краевая задача с начальными условиями: активная система подавления рассеяния включается только в момент первого соприкосновения переднего фронта падающей волны с ее микрофонами [6–8].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагаемая гасящая система [1, 2] состоит из подсистемы быстрого формирования заданного распределения нормальных колебательных скоростей (РНКС) наружной поверхности актив-

ного покрытия и подсистемы захвата и сопровождения падающих волн. Поверхность защищаемого упругого тела предполагается жесткой по отношению к окружающей сжимаемой среде. При этом колебания поверхности тела не зависят от падающих волн. На поверхности тела расположено акустически тонкое активное покрытие, толщина которого также не зависит от наружного звукового давления и определяется лишь управляющими сигналами. При таком кинематическом управлении нормальная скорость внешней поверхности  $S_V$  активного покрытия равна сумме скорости изменения толщины покрытия и нормальной скорости подстилающей поверхности (т.е. поверхности защищаемого тела). Пусть в отсутствие физической рассеивающей поверхности  $S_V$  скорости  $v_\otimes$  частиц невязкой жидкости в неискаженном поле падающих волн имели проекцию  $v_\otimes = (\mathbf{f}, \mathbf{v})$  на единичную нормаль  $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{r})$  к воображаемой поверхности  $S_V$  ( $\mathbf{r} \in S_V, |\mathbf{f}| = 1$ ). Тогда, создав на поверхности  $S_V$  с помощью активного покрытия РНКС

$$\mathbf{v} = v_\otimes, \quad (1)$$

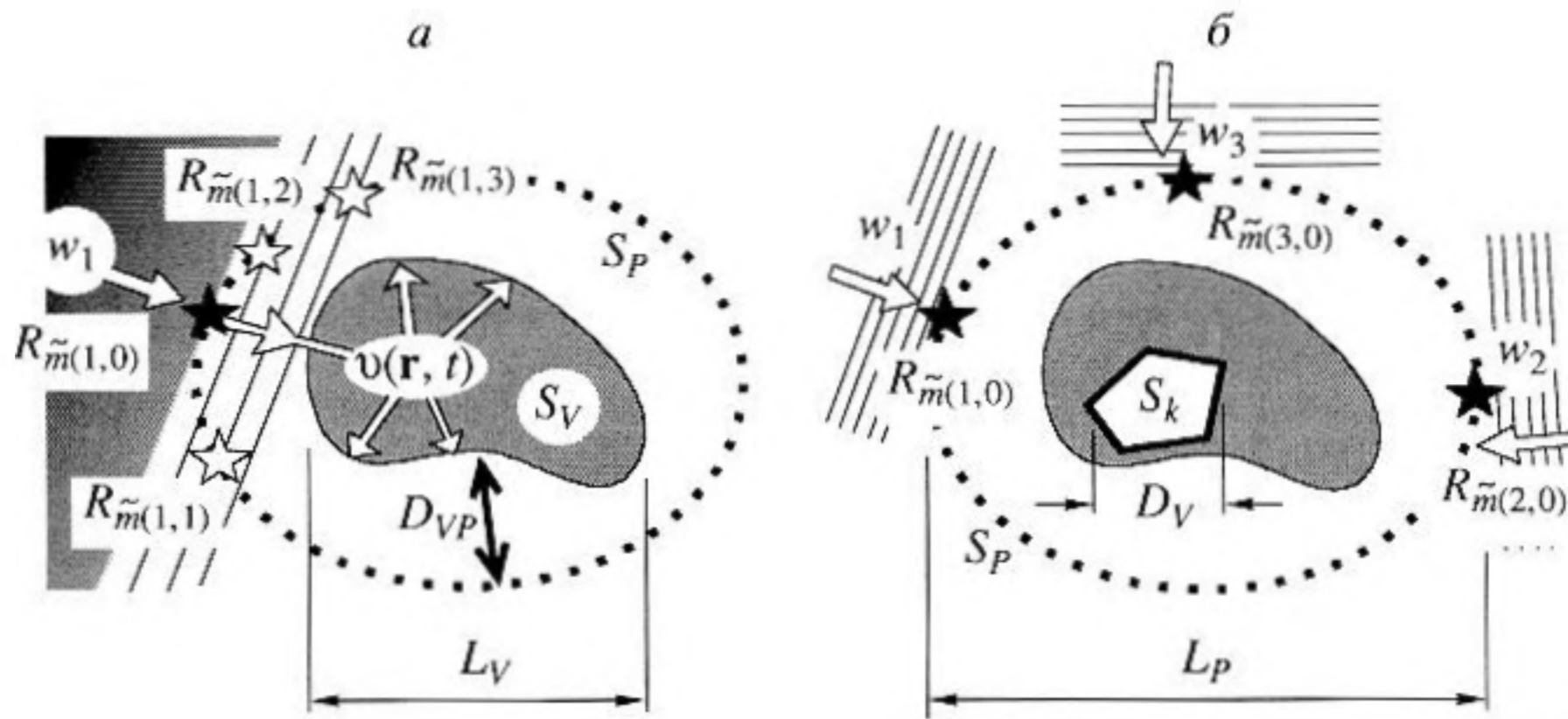
мы устраним рассеянное поле. Выполнение условия (1) предполагается лишь в некотором ограниченном (хотя и широком) рабочем диапазоне временных  $\omega$  и пространственных  $\chi$  частот

$$|\omega| \in (\omega_{\min}, \omega_{\max}), \quad \chi \in (\chi_{\min}, \chi_{\max}), \quad (2)$$

где  $\omega_{\min} > 0$ ,  $\chi_{\min} = \omega_{\min}/c_w$ ,  $\chi_{\max} = \omega_{\max}/c_w$ ,  $c_w$  – скорость звука в окружающей сжимаемой среде. При этом волновые размеры защищаемого тела с характерным линейным размером  $L_V$  могут быть как большими, так и малыми, т.е. допускается сочетание условий  $\chi_{\max} L_V \gg 1$  и  $\chi_{\min} L_V \ll 1$ . В основе активных методов гашения полей излучения и рассеяния лежат измерение гасимого поля специальными датчиками и переизлучение его в противофазе. Для этого нужно решить дифракционную задачу разделения (факторизации) полного звукового поля на падающую и рассеянную (излученную) волны. Следуя (1), мы создаем на поверхности активного покрытия такое распределение нормальных колебательных скоростей на внешней поверхности активного покрытия, при котором рассеянное поле не возникает, и переизлучать его в противофазе не требуется. Если нам каким-либо образом (см. ниже) удалось узнать искомое распределение (1), то решать дифракционную задачу уже не нужно или, выражаясь формально, остается решить лишь задачу дифракции на акустически прозрачном теле. Заметим, что согласования защищаемой поверхности с падающей волной по скорости и по давлению эквивалентны. Физически эквивалентность согласования поверхности с падающими волнами по давлению и по скорости объясняется тем, что инструмент согласования в обоих случаях один и

тот же – управление нормальными (относительно поверхности  $S_V$ ) колебаниями каждого участка границы. Если бы согласования по скорости и по давлению были неэквивалентны, то после выполнения согласования границы по скорости дальнейшее согласование по давлению должно было бы привести к нарушению достигнутого прежде согласования по скорости. Математически причина эквивалентности согласований по скорости и по давлению выражается в неизбежном существовании интегрального по  $S_V$  импедансного оператора, однозначно ставящего в соответствие заданному распределению скоростей на  $S_V$  некоторое распределение давлений (и наоборот). Вместе с согласованием скоростей (давлений) одновременно решается и задача гашения излучения: в частности, без падающих волн нормальная скорость внешней поверхности покрытия должна быть нулевой при ненулевой скорости подстилающей поверхности защищаемого тела. Здесь важно отметить, что задача рассеяния падающей волны на некоторой колеблющейся поверхности  $S_V$  представляет собой суперпозицию задачи (а) рассеяния падающей волны на фиксированной поверхности  $S_V$  и задачи (б) излучения звука заданными колебаниями этой же поверхности  $S_V$  в отсутствие падающих волн.

**Поле падающих волн.** Относительно поля падающих волн сделаем следующие предположения. Имеются в виду падающие волны, возникающие, например, в результате дальнего лучевого распространения в подводном звуковом канале [5]. Предполагается, что поперечное сечение лучевой трубки покрывает защищаемый объем. Поле внутри лучевой трубки описывается геометрической акустикой и локально плоской бегущей волной. Возможно попадание защищаемого объема и в пересечение нескольких лучевых трубок (нескольких плоских волн). Дисперсия (также как и неоднородность профиля скорости звука) волн в пределах защищаемого объема предполагается несущественной. Источник может излучать как радиоимпульс (с синусоидальным заполнением, не обязательно короткий), так и видеоимпульс. Видеоимпульс в результате дальнего распространения так или иначе трансформируется в радиоимпульсы, бегущие по лучевым трубкам. При этом предполагается также конечность длины цугов падающих волн, т.е. наличие переднего фронта (не обязательно крутого, хотя крутой фронт предпочтителен для пеленгации, но невозможен вследствие дисперсии волн на длинных трассах). Амплитуда падающих волн при активной локации (и при отсутствии активного противодействия обнаружению) должна обеспечивать достоверную регистрацию рассеянной волны приемными устройствами на той же дальней дистанции от защищаемого объема, что и у источ-



**Рис. 1.** Геометрия задачи сопровождения одной (а) и трех (б) падающих волн. Падающая волна (а) формирует пеленгаторную группу (из титульного микрофона  $\star$ , и трех реперных микрофонов  $\star$ ) на поверхности  $S_p$  для согласования с ней поверхности  $S_v$  защищаемого тела. Падающие волны (б) с направлений  $w_1, w_2, w_3$  формируют три непересекающиеся пеленгаторные группы.

ника падающих волн. Поэтому на поверхности рассеивателя амплитуда падающих волн многократно превосходит акустические шумы. Другими словами, чем дальше от источника падающей волны расположен рассеиватель, подлежащий обнаружению, тем сильнее падающая волна должна его “трясти”, чтобы приемная система смогла обнаружить рассеянное поле на той же дальней дистанции (при фиксированной чувствительности микрофонов). Это обеспечивает необходимую точность пеленга и сопровождения (см. ниже) падающей волны.

**ПОДАВЛЕНИЕ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ**

Предположим, что некоторая замкнутая поверхность  $S_p$  (рис. 1, а) охватывает замкнутую поверхность  $S_v$  (с характерным линейным масштабом  $L_v$ , т.е. внешнюю поверхность активного покрытия) при минимальном расстоянии  $D_{vp} > 0$  между ними. На поверхности  $S_p$  в известных точках  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_m \in S_p$  ( $m = 1, 2, \dots, N_p$ , конкретные варианты размещения микрофонов будут рассмотрены ниже) расположены  $N_p$  малогабаритных микрофонов с выходными электрическими сигналами  $p_m(t)$  звукового давления. На выходе линейного неискажающего низкочастотного фильтра  $\hat{Q}$  с частотой среза  $\omega_Q$  и аппаратной задержкой  $\tau_Q$  получаем на выходе фильтра сигнал  $P_m(t) = \hat{Q}[p_m(t)]$ . Необходимость обрезания высоких частот будет пояснена в дальнейшем при анализе каналов самовозбуждения данной системы.

В отсутствие рассеивающего тела (ограниченного поверхностью  $S_v$ ) поле звукового давления

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^{N_w} \Xi_i[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_i)c_w^{-1}] \quad (3)$$

на поверхности  $S_p$  представляет дискретный набор  $N_w \geq 1$  (многолучевая задача, рис. 1, б) плоских волновых пакетов с векторами  $\{\mathbf{w}_i\}$ , где  $|\mathbf{w}_i| = 1, i = 1, 2, \dots, N_w$ . Характерные пространственный и временной масштабы падающих волн определяются диапазоном (2). Далее будем предполагать, что для каждой волны  $\Xi_i$  существует начальный момент времени ее прихода  $t_i$ , такой, что  $\Xi_i[t - t_i] = 0$  во всех точках поверхности  $S_p$  при  $t < t_i$ . В области пространства, ограниченной поверхностью  $S_p$ , падающие волны могут пересекаться, т.е. быть отличными от нуля одновременно.

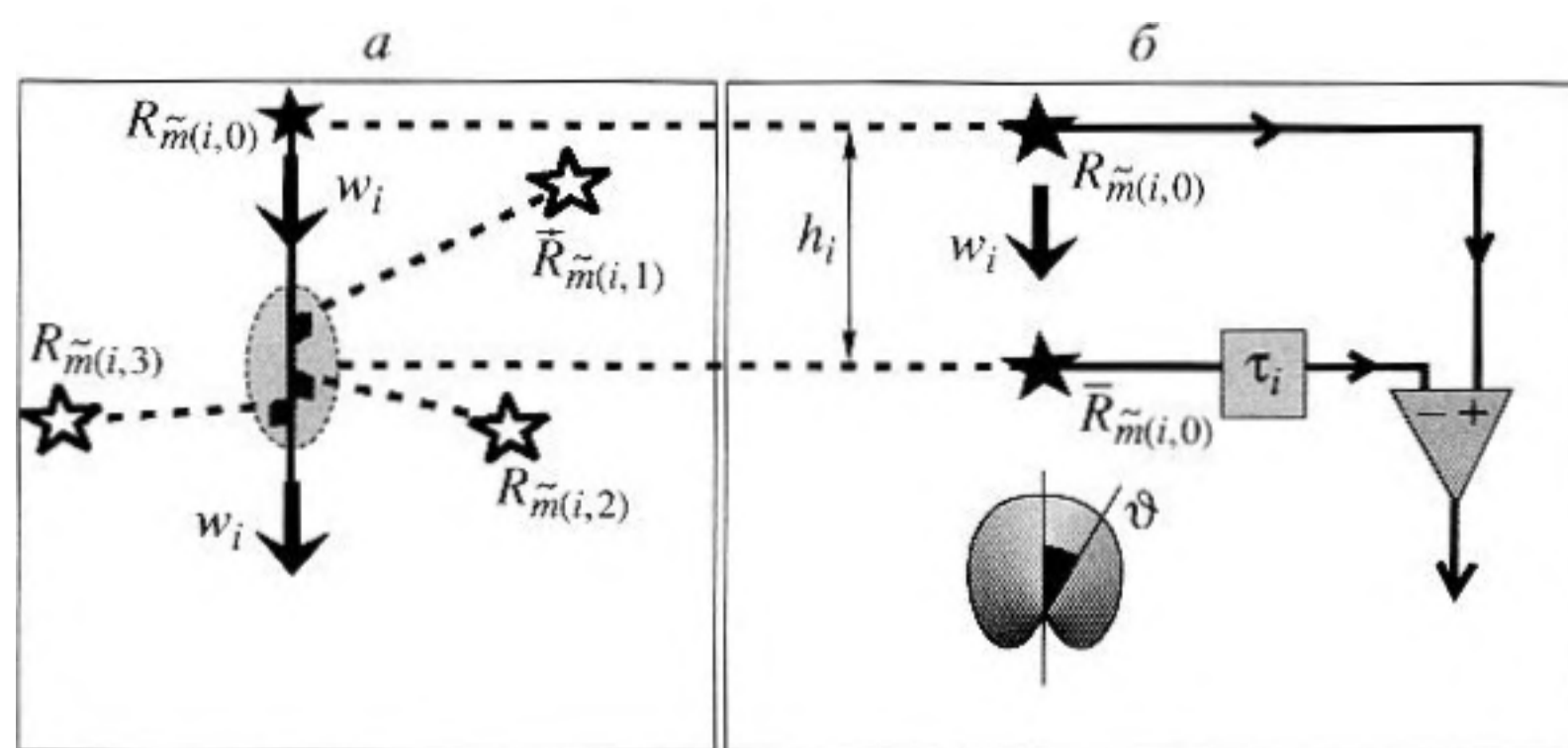
**Сопровождение одной падающей волны.** Начальным условием в задаче сопровождения первой падающей волны является малость модуля давления  $|P_m(t)| < P$ , на всех  $1 \leq m \leq N_p$  микрофонах, где  $P$  – порог фиксации (см. ниже). Первой падающей волне (с номером  $i = 1$ ) соответствует своя пеленгаторная группа из четырех микрофонов (рис. 1, а). Эти микрофоны различаются по их участию в следующих событиях:

1. Первое соприкосновение переднего фронта падающей волны с микрофонами на  $S_p$  означает, что в момент  $t = \tilde{t}(1, 0)$  (причем, впервые для  $\otimes t \leq \tilde{t}(1, 0)$  на микрофоне  $\star$  с номером  $m = \tilde{m}(1, 0)$  в точке  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$ , модуль  $|\Xi_1[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_1)c_w^{-1}]|$  давления первой падающей волны пересекает (снизу вверх) порог  $P$  фиксации, удовлетворяющий условию

$$\sigma_p \ll P \ll |\Xi_i|_{\max} \quad (i = 1, 2, \dots, N_w), \quad (4)$$

где  $\sigma_p$  – среднеквадратичная амплитуда шума микрофона.

2. В момент  $t = \tilde{t}(1, 1)$  (впервые для  $\otimes t \leq \tilde{t}(1, 1)$  на микрофоне  $\star$  с номером  $m = \tilde{m}(1, 1)$  в точке  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,1)}$ , модуль  $|\Xi_1[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_1)c_w^{-1}]|$  давления пер-



**Рис. 2.** Формирование векторного микрофона (б) с кардиоидной диаграммой направленности из комбинации (а) сигналов микрофонов пеленгаторной группы  $i$ -й падающей волны. Центр  $\bar{\mathbf{R}}_{\tilde{m}(i,0)}$  “тяжести” точек  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(i,1)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(i,2)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(i,3)}$  находится на оси, выходящей из точки  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(i,0)}$  в направлении  $\mathbf{w}_i$ .

вой падающей волны пересекает (снизу вверх) порог  $P$ . фиксации.

3. В момент  $t = \tilde{t}(1, 2)$  (впервые для  $\otimes t \leq \tilde{t}(1, 2)$ ) на микрофоне  $\star$  с номером  $m = \tilde{m}(1, 2)$  в точке  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,2)}$ , модуль  $|\Xi_1[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_1)c_w^{-1}]|$  давления первой падающей волны пересекает (снизу вверх) порог  $P$ . фиксации.

4. В момент  $t = \tilde{t}(1, 3)$  (впервые для  $\otimes t \leq \tilde{t}(1, 3)$ ) на микрофоне  $\star$  с номером  $m = \tilde{m}(1, 3)$  в точке  $\mathbf{r} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,3)}$ , модуль  $|\Xi_1[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_1)c_w^{-1}]|$  давления первой падающей волны пересекает (снизу вверх) порог  $P$ . фиксации.

Микрофон  $\star$  в точке  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$  далее будем называть титульным микрофоном с сигналом давления  $P_{\tilde{m}(1,0)}(t)$ , а микрофоны  $\star$  в точках  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,1)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,2)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,3)}$  – реперными микрофонами с сигналами давления  $P_{\tilde{m}(1,1)}(t)$ ,  $P_{\tilde{m}(1,2)}(t)$ ,  $P_{\tilde{m}(1,3)}(t)$ . Три реперных микрофона сосредоточены вблизи титульного (конкретное размещение микрофонов см. ниже). Из определений 1–4, получим вектор  $\mathbf{w}_1$  как решение системы уравнений  $\{\mathbf{w}_1, (\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,k)} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)})\} = [\tilde{t}(1, k) - \tilde{t}(1, 0)]c_w$ , ( $k = 1, 2, 3$ ). Благодаря соотношению (4), моменты  $\tilde{t}(1, 0)$ ,  $\tilde{t}(1, 1)$ ,  $\tilde{t}(1, 2)$ ,  $\tilde{t}(1, 3)$  полагаем “привязанными” к переднему фронту падающей волны в точках  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,1)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,2)}$ ,  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,3)}$ . Титульный микрофон характеризуется тем, что “знает” поле падающей волны (в отсутствие рассеивающего тела или при выполнении условия (1) на его поверхности) раньше всех остальных микрофонов на поверхности  $S_p$ . Зная поле давления в точке  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$  и вектор  $\mathbf{w}_1$ , можно однозначно определить поле падающей волны в момент  $t$  в точке  $\mathbf{r}$ ,

удовлетворяющей условию  $\mathbf{w}_1(\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}) > 0$ , по формуле  $\Xi_1(\mathbf{r}, t) = \Xi_1[\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}, t - \mathbf{w}_1(\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)})c_w^{-1}]$ . Начиная с момента  $t = \tilde{t}(1, 0)$  и до момента  $t = \tilde{t}(1, 3)$ , вычитаем давление первой падающей волны из сигналов всех микрофонов, не входящих в пеленгаторную группу, сопровождающую данную волну, т.е.  $P_m(t) = P_m(t) - P_{\tilde{m}(1,0)}(t - \bar{t}_1)$ , где  $m \neq \tilde{m}(1, j)$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ),  $\bar{t}_1 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_1, \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)})$  – скалярное произведение векторов. Данная операция позволяет остальным микрофонам формировать новые пеленгаторные группы.

**Векторный микрофон.** Для устойчивости активной системы сформируем из микрофонов пеленгаторной группы векторный микрофон с максимумом диаграммы направленности в направлении прихода первой волны с вектором  $\mathbf{w}_1$ . Для этого нужны два микрофона, расположенных на оси  $\mathbf{w}_1$  на некотором расстоянии  $h_1$  друг от друга (рис. 2). В качестве первого микрофона возьмем титульный микрофон  $\star$  в точке  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$  с выходным сигналом  $P_{\tilde{m}(1,0)}(t)$ . Сигнал же  $\bar{P}_{\tilde{m}(1,0)}(t)$  второго микрофона, расположенного в точке  $\bar{\mathbf{R}}_{\tilde{m}(1,0)} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)} + h_1\mathbf{w}_1$  (где о величине  $h_1$  пока известно лишь то, что  $h_1 > 0$ ), сформируем как сумму  $\bar{P}_{\tilde{m}(1,0)}(t) = \mu(1, 1)\bar{P}_{\tilde{m}(1,1)}(t) + \mu(1, 2)\bar{P}_{\tilde{m}(1,2)}(t) + \mu(1, 3)\bar{P}_{\tilde{m}(1,3)}(t)$  сигналов реперных микрофонов  $\star$ , где  $\mu(1, 1) + \mu(1, 2) + \mu(1, 3) = 1$ ,  $\mu(1, 1), \mu(1, 2), \mu(1, 3) > 0$ . Потребовав выполнения условия  $\mu(1, 1)\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,1)} + \mu(1, 2)\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,2)} + \mu(1, 3)\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,3)} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)} + h_1\mathbf{w}_1$  (последнее означает, что центр масс  $\mu(1, 1), \mu(1, 2)$  и  $\mu(1, 3)$ , расположенных в точках  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,1)}, \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,2)}$  и  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,3)}$ , совпадает с точкой  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)} + h_1\mathbf{w}_1$  на оси  $\mathbf{w}_1$ , выходящей из  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$ ), получим из си-

стемы четырех линейных алгебраических уравнений четыре искомым величины  $\mu(1, 1)$ ,  $\mu(1, 2)$ ,  $\mu(1, 3)$ ,  $h_1$ . Учитывая плавность поля падающей волны, сформируем сигнал  $\bar{P}_{\tilde{m}(1,0)}(t)$  виртуального микрофона точке  $\bar{\mathbf{R}}_{\tilde{m}(1,0)} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)} + h_1 \mathbf{w}_1$  как указанную выше взвешенную сумму сигналов реперных микрофонов.

Возможна ситуация, когда координаты реперных микрофонов таковы, что не позволяют сформировать ассоциированный микрофон на оси, выходящей из точки  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}$  в направлении  $\mathbf{w}_2$  или полученная база  $h_2$  оказывается слишком мала для вычислений с конечной точностью. Чтобы обойти эти проблемы, нужно рационально разместить микрофоны вблизи поверхности  $S_p$  (см. ниже).

Выходной сигнал векторного микрофона получаем в виде  $U(t) = P_{\tilde{m}(1,0)}(t - \tau_1) - \bar{P}_{\tilde{m}(1,0)}(t)$ , где  $\tau_1 = h_1/c_w$ . Для волны, бегущей в направлении  $+\hat{\mathbf{w}}_1$  (или  $\vartheta = 0$ , т.е. падающей волны), сигнал  $U(t)$  представляет производную по времени от звукового давления падающей волны в точке  $\mathbf{R}_{(1,0)}$  с запаздыванием на  $\tau_1/2$ :  $U(t) \equiv 2\tau_1(d/dt)P_1[t - (\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}, \mathbf{w}_1)c_w^{-1} - (\tau_1/2)]$ . Пренебрегая давлением в начальный момент  $\tilde{t}(1, 3)$  по сравнению с амплитудой падающей волны (см. (4)), получаем сигнал давления  $\Psi[t - (\tau_1/2)]$  падающей волны в точке  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}$  в виде интеграла  $\Psi_{\tilde{m}(1,0)}[t - (\tau_1/2)] = (2\tau_1)^{-1} \int_{t'=\tilde{t}(1,3)}^{t'=t} U(t')dt'$ . Если фронт первой падающей волны почти одновременно достигает двух или нескольких титульных микрофонов разных пеленгаторных групп, то функции сопровождения этой волны даются той пеленгаторной группе, титульный микрофон которой раньше зафиксировал превышение порога  $P_*$ , хотя бы и благодаря шумовым флуктуациям давления.

**Дискретность активного покрытия.** Заметим, что активное покрытие может быть реализовано лишь в дискретном виде и состоит из  $N_V \gg 1$  однородных по толщине выпуклых многоугольников  $S_k$  (рис. 1б), или поршней с максимальным линейным размером  $D_V \ll c_w \tau_Q$  (рис. 1б), не пересекающихся между собой и полностью покрывающих поверхность  $S_V$ . "Центр тяжести"  $k$ -го поршня ( $k = 1, 2, \dots, N_V$ ) площадью  $\sigma_k$  имеет координату  $\mathbf{p}_k = \sigma_k^{-1} \int_{S_k} \mathbf{r} dS_k(\mathbf{r})$ .

**Обновление РНКС на  $S_V$ .** Согласно (1) и (3) заданная скорость  $k$ -го поршня равна

$$v_1(\mathbf{p}_k, t) = v_0(\mathbf{p}_k, t) + (\rho_w c_w \sigma_k)^{-1} \iint_{S_k} dS_k(\mathbf{w}_1, \mathbf{f}) \Psi_{\tilde{m}(1,0)}(t - \bar{\tau}_1),$$

где  $\bar{\tau}_1 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_1, \mathbf{p}_k - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)} - (\tau_1/2) - \tau_Q) > 0$ ,  $(\mathbf{w}_1, \mathbf{p}_k - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)})$  и  $(\mathbf{w}_1, \mathbf{f})$  – скалярные произведения, а интеграл означает усреднение по  $k$ -му элементу активного покрытия. Таким образом, мы согласуем поверхность  $S_V$  с падающей волной, не решая при этом задачу ее дифракции на защищаемом теле.

**Обновление сигналов микрофонов.** Для подготовки остальных микрофонов к регистрации следующей волны (начиная с момента  $t = \tilde{t}(1, 0)$ ), делаем эти микрофоны "глухими" к первой волне, т.е.  $P_m(t) = P_m(t) - \Psi_{\tilde{m}(1,0)}(t - 1)$ , где  $m \neq \tilde{m}(1, j)$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ),  $\bar{\tau}_1 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_1, \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{\tilde{m}(1,0)}) - (\tau_1/2) - \tau_Q$ . Теперь система сопровождает первую падающую волну и ожидает прихода второй. Мы предполагаем, что координаты микрофонов и падающие волны позволяют создавать непересекающиеся между собой пеленгаторные группы.

**Совместное сопровождение двух падающих волн.** Начальным условием в задаче совместного сопровождения двух падающих волн является малость модуля давления  $|P_m(t)| < P_*$  на всех  $1 \leq m \leq N_p$  микрофонах (за исключением микрофонов с номерами  $m = \tilde{m}(1, 0)$ ,  $m = \tilde{m}(1, 1)$ ,  $m = \tilde{m}(1, 2)$ ,  $m = \tilde{m}(1, 3)$ , входящих в описанную выше пеленгаторную группу) для  $t < \tilde{t}(2, 0) > \tilde{t}(1, 3)$ . В некоторый момент времени  $t = \tilde{t}(2, 0)$  приходит вторая падающая волна, т.е. происходит первое соприкосновение ее переднего фронта с одним из микрофонов, не входящих в пеленгаторную группу, сопровождающую первую волну. Из множества микрофонов с номерами  $m \neq \tilde{m}(1, j)$  (где  $j = 0, 1, 2, 3$ ) отбираем титульный микрофон  $\star$  и реперные микрофоны  $\star$ , образующие пеленгаторную группу по сформулированному выше правилу первого пересечения уровня  $P_*$  модулем  $|\Xi_2[t - (\mathbf{r}, \mathbf{w}_2)c_w^{-1}]|$  давления второй падающей волны снизу вверх в моменты  $t = \tilde{t}(1, 0)$ ,  $t = \tilde{t}(1, 1)$ ,  $t = \tilde{t}(1, 2)$ ,  $t = \tilde{t}(1, 3)$ . Из системы уравнений  $\{\mathbf{w}_2, (\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,1)} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)})\} = [\tilde{t}(2, k) - \tilde{t}(2, 0)]c_w$  ( $k = 1, 2, 3$ ) определяем вектор  $\mathbf{w}_2$  падающей волны (направление распространения). Зная поле давления в точке  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}$  и вектор  $\mathbf{w}_2$ , можно однозначно определить поле падающей волны в момент  $t$  в точке  $\mathbf{r}$ , удовлетворяю-

щей условию  $\mathbf{w}_2(\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}) > 0$ , как  $\Xi_2(\mathbf{r}, t) = \Xi_2[\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}, t - \mathbf{w}_2(\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)})c_w^{-1}]$ . Начиная с момента  $t = \tilde{t}(2, 0)$  и до момента  $t = \tilde{t}(2, 3)$ , вычитаем давление первой падающей волны из сигналов всех микрофонов, не входящих в пеленгаторную группу, сопровождающую данную волну, т.е.  $P_m(t) = P_m(t) - P_{\tilde{m}(2,0)}(t - \bar{\tau}_2)$ , где  $m \neq \tilde{m}(2, j)$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ),  $\bar{\tau}_2 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_2, \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)})$  — скалярное произведение векторов. Данная операция позволяет остальным микрофонам регистрировать прибытие новых падающих волн так, как будто первых двух волн и не было. Дополнительный к  $P_{\tilde{m}(2,0)}(t - \tau_2)$  сигнал  $\bar{P}_{\tilde{m}(2,0)}(t)$  векторного микрофона имеет вид  $\bar{P}_{\tilde{m}(2,0)}(t) = \mu(2, 1)P_{\tilde{m}(2,1)}(t) + \mu(2, 2)P_{\tilde{m}(2,2)}(t) + \mu(2, 3)P_{\tilde{m}(2,3)}(t)$ . Параметры  $\mu(2, 1)$ ,  $\mu(2, 2)$ ,  $\mu(2, 3)$ ,  $h_2(\mu(2, 1), \mu(2, 2), \mu(2, 3) > 0)$  получаем из системы уравнений  $\mu(2, 1) + \mu(2, 2) + \mu(2, 3) = 1$  и  $\mu(2, 1)\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,1)} + \mu(2, 2)\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,2)} + \mu(2, 3)\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,3)} = \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)} + h_2\mathbf{w}_2$ . Возможна ситуация, когда конкретные координаты реперных микрофонов не позволяют сформировать ассоциированный микрофон на оси, выходящей из точки  $\mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}$  в направлении  $\mathbf{w}_2$  или полученная база  $h_2$  оказывается слишком мала для вычислений с достаточной точностью. Чтобы обойти эти проблемы, нужно рационально разместить микрофоны вблизи поверхности  $S_p$  (см. ниже). На выходе векторного микрофона, получим  $\Psi_{\tilde{m}(2,0)}[t - (\tau_2/2)] = (2\tau_2)^{-1} \int_{t'=\tilde{t}(2,3)}^{t'=t} U(t')dt'$ , где  $\tau_2 = h_2/c_w$ ,  $U(t) = P_{\tilde{m}(2,0)}(t - \tau_2) - \bar{P}_{\tilde{m}(2,0)}(t)$ , пренебрегая давлением в начальный момент  $\tilde{t}(2, 3)$  по сравнению с амплитудой падающей волны (см. (4)). Если фронт второй падающей волны почти одновременно достигает двух или нескольких титульных микрофонов разных пеленгаторных групп (кроме пеленгаторной группы уже занятой сопровождением первой падающей волны), то функции сопровождения этой волны даются той пеленгаторной группе, титульный микрофон которой раньше зафиксировал превышение порога  $P$ . (хотя бы и благодаря шумовым флуктуациям давления).

**Обновление РНКС на  $S_V$ .** Согласно (1) и (3) при  $t > \tilde{t}(2, 3)$  заданная скорость  $k$ -го поршня равна  $v_2(\mathbf{p}_k, t) = v_1(\mathbf{p}_k, t) + (\rho_w c_w \sigma_k)^{-1} \iint_{S_k} dS_k(\mathbf{w}_2, \mathbf{f}) \Psi_{\tilde{m}(2,0)}(t - \bar{\tau}_2)$ , где  $\bar{\tau}_2 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_2, \mathbf{p}_k - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}) - (\tau_2/2) - \tau_Q > 0$ , а интеграл означает усреднение по  $k$ -му элементу активного покрытия.

**Обновление сигналов микрофонов.** Чтобы подготовить остальные микрофоны с номерами  $m \neq \tilde{m}(1, j), \tilde{m}(2, j)$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ) к регистрации следующей волны (начиная с момента  $t = \tilde{t}(2, 0)$ ), преобразуем сигналы этих микрофонов, вычитая из них давление первой волны  $P_m(t) = P_m(t) - \Psi_{\tilde{m}(2,0)}(t - \bar{\tau}_2)$ , где  $\bar{\tau}_2 = c_w^{-1}(\mathbf{w}_2, \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{\tilde{m}(2,0)}) - (\tau_2/2) - \tau_Q$ , и т.д.

**Возврат системы в исходное состояние.** Параллельно со всеми операциями по сопровождению падающих волн работает также механизм возврата некоторой пеленгаторной группы (или всей системы) в исходное состояние, в отсутствие падающей волны (или падающих волн вообще), сопровождаемой данной пеленгаторной группой. Если в какой-либо момент  $t^*$  выяснится, что “тишина” (т.е.  $|P_m(t)| < P$ ) сохранялась одновременно на каждом из четырех микрофонов  $i$ -й пеленгаторной группы непрерывно в течение времени  $\tau^* \geq L/c_w$  данная пеленгаторная группа расформируется, а каждый из ее микрофонов переходит в режим ожидания пересечения порога и не участвует в управлении активным покрытием.

**Каналы самовозбуждения системы и их блокировка.** Мы предполагали, что активное покрытие, управляемое описанным выше алгоритмом, позволяет синтезировать на поверхности  $S_V$  заданное РНКС. Рассмотрим теперь возможные каналы самовозбуждения системы через микрофоны и средства их блокировки (взяты вместе эти каналы должны охватывать все возможные частоты — только тогда их блокировка может гарантировать устойчивость системы).

1. Проникновение в микрофоны поля излучения активного покрытия на частотах диапазона (2). Этот канал перекрывает виртуальный векторный микрофон, образованный из микрофонов пеленгаторной группы, сопровождающей данную конкретную падающую волну. Векторный микрофон гарантирует коэффициент положительной микрофонной обратной связи меньше единицы. Если бы микрофонная сеть находилась на расстоянии  $D_{VP} \gg L_V$ , то коэффициент положительной микрофонной обратной связи был бы меньше единицы и без использования векторного микрофона лишь благодаря спаду  $\sim 1/D_{VP}$  звукового поля из-за его сферического распространения. Однако такой случай не представлял бы, конечно, практического интереса.

2. Проникновение в микрофоны поля излучения активного покрытия на частотах, за пределами диапазона (2). На этих частотах диаграмма направленности векторного микрофона имеет очень много острых лепестков, но лишена требуемой интегральной (по телесному углу  $\pm 2\pi$ ) анизотропии по отношению к вектору падающей волны  $\mathbf{w}_i$  при  $h_i \omega / c_w \gg 1$ . Кроме того, на этих частотах

тах невозможно синтезировать заданное РНКС с помощью поршней конечного размера  $D_V$ . Для блокировки этого канала служит НЧ-фильтр с постоянной времени  $\tau_Q < \pi/\omega_{\max}$  на выходе каждого микрофона, не искажающий полезный сигнал и вносящий лишь задержку  $\tau_Q$ . Эта задержка учитывается при управлении покрытием и не мешает системе успевать сопровождать падающую волну при условии  $\tau_Q < D_{VP}/c_w$ .

3. Проникновение в микрофоны ближнего поля активного покрытия на частотах диапазона (2). Векторный микрофон выделяет в пространстве только распространяющиеся поля или поля излучения. Реактивное (ближнее) поле активного покрытия является неидентифицируемой помехой для векторного микрофона. Однако это поле экспоненциально спадает при удалении от покрытия

как  $\gamma = \exp(-D_{VP} \sqrt{(2\pi/D_V)^2 - \chi_{\max}^2})$ . Поэтому при не очень большом расстоянии  $D_{VP}$ , уменьшая  $D_V$ , можно получить  $\gamma \ll 1$  и подавить данный канал самовозбуждения.

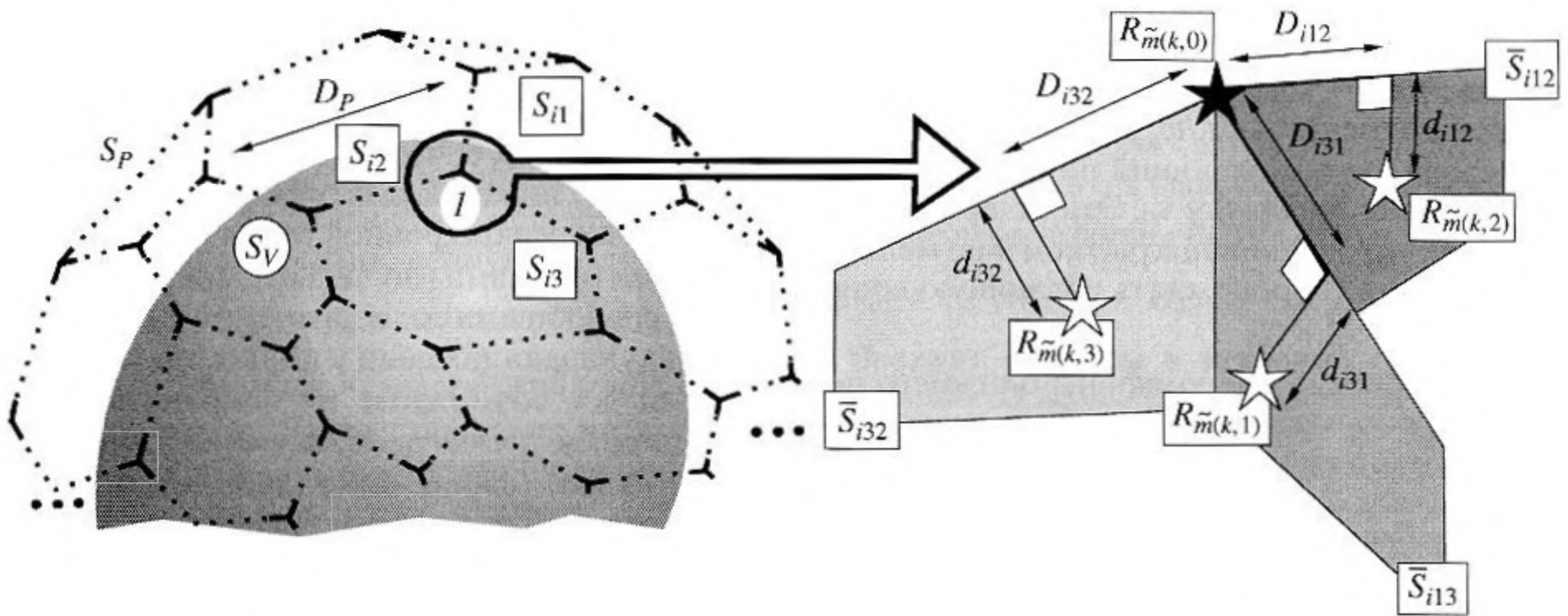
### РАЗМЕЩЕНИЕ МИКРОФОНОВ

Ранее предполагалось, что микрофонов имеется заведомо достаточно много для сопровождения одной, двух и т. д. падающих волн. Теперь рассмотрим вопросы рационального размещения микрофонов, при котором для сопровождения падающих волн используется по возможности меньшее их число [8]. Каждая  $i$ -я пеленгаторная группа сопровождает только одну падающую волну и характеризуется своим сектором захвата  $\Omega_i$ . Последний представляет множество направлений волн, для которых на основе данной пеленгаторной группы можно сформировать векторный микрофон, направленный точно навстречу одной из них, т.е. с достаточно высокой точностью решить систему уравнений, определяющих параметры  $\mu(i, 1), \mu(i, 2), \mu(i, 3), h_i$  (см. выше). При использовании описанного выше алгоритма согласования защищаемой поверхности с падающими волнами на выбор координат  $\mathbf{R}_m$  ( $m = 1, 2, \dots, N_p$ ) микрофонов и их общее число  $N_p$  в предлагаемой системе влияют следующие факторы: (а) сектор захвата  $\Omega_i$  каждой пеленгаторной группы; (б) ожидаемое число  $N_w$  одновременно сопровождаемых падающих волн; (в) множество направлений ожидаемого прихода падающих волн (сектор защиты); (г) ожидаемая минимальная разность  $\theta_w = \min_{n \neq m} [\arccos(\mathbf{w}_n, \mathbf{w}_m)]$  ( $n, m = 1, 2, \dots, N_w$ ) углов прихода падающих волн; (д) максимально допустимое из конструктивных соображений удаление микрофонов от защищаемой поверхности; (е) минимально допустимое расстояние  $D_{VP}$  от микрофонов до защищаемой поверхности, обеспечива-

ющее малость влияния на микрофоны ближних полей активного покрытия.

**Геометрия микрофонной сети.** Ввиду множества возможных сочетаний указанных выше факторов (а–д) ниже рассмотрим лишь один пример трехмерной микрофонной сети с  $N_{PG} \gg 1$  пеленгаторными группами (по четыре микрофона в каждой), способными одновременно сопровождать  $N_w \leq N_{PG}$  падающих волн и полностью перекрывающимися все возможные их направления (что, в принципе, не всегда необходимо). Поверхность  $S_p$  представляет собой выпуклый гексагональный многогранник (с плоскими гранями в виде выпуклых шестиугольников, не обязательно правильной формы, см. рис. 3). Характерный средний линейный масштаб граней  $D_p$ . Микрофоны каждой пеленгаторной группы размещаются соответственно вблизи каждой вершины многогранника  $S_p$ . Титульный микрофон  $\star$  размещается в некоторой  $i$ -й вершине, к которой сходятся грани  $S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}$ . Плоскости  $\bar{S}_{i12}, \bar{S}_{i31}, \bar{S}_{i32}$  являются биссектрисами двугранных углов соответственно между гранями  $S_{i1}$  и  $S_{i2}, S_{i3}$  и  $S_{i1}, S_{i3}$  и  $S_{i2}$ . На плоскостях  $\bar{S}_{i12}, \bar{S}_{i31}, \bar{S}_{i32}$  располагаются реперные микрофоны  $\star$  как показано на рис. 3. Расстояния  $D_{i12}, D_{i23}, D_{i31}$  не превышают четверти длины соответствующего ребра. Отрезки с длинами  $d_{i12}, d_{i23}, d_{i31}$  лежат соответственно в плоскостях  $\bar{S}_{i12}, \bar{S}_{i31}, \bar{S}_{i32}$  и перпендикулярны соответствующим ребрам многогранника  $S_p$ . Малые, но конечные величины  $d_{i12} \sim D_{i12}^2 R_p^{-1} < D_{i12}, d_{i23} \sim D_{i23}^2 R_p^{-1} < D_{i23}, d_{i31} \sim D_{i31}^2 R_p^{-1} < D_{i31}$  этих отрезков необходимы для того, чтобы данная пеленгаторная группа могла сопровождать падающую волну в случае, когда ее вектор распространения перпендикулярен одной из граней  $S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}$ . При этом нужно с достаточно высокой точностью решить систему уравнений для получения величин  $\mu(j, 1), \mu(j, 2), \mu(j, 3), h_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N_w$ ).  $R_p$  обозначает средний радиус кривизны поверхности  $S_p$  (точнее говоря, радиус кривизны соответствует некоторой гладкой поверхности, “натянутой” на вершины  $S_p$ ). Заметим, что приведенный вариант размещения (на основе гексагонального многогранника) микрофонов является достаточно рациональным, но далеко не единственным и не оптимальным вариантом.

Общее число  $N_p$  микрофонов в системе связано с числом  $N_{SP}$  вершин (а также числом  $N_{PG}$  пеленгаторных групп или числом  $N_w$  одновременно сопровождаемых волн) многогранника  $S_p$  соотношением  $N_p/4 = N_{PG} = N_{SP} = N_w$ . Дополним описание класса падающих волн несколькими определени-



**Рис. 3.** Размещение микрофонов на поверхности выпуклого гексагонального многогранника  $S_P$  вблизи его вершин.  $S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}$  – грани многогранника  $S_P$ , примыкающие к  $i$ -й его вершине. Плоскости  $\bar{S}_{i12}, \bar{S}_{i31}, \bar{S}_{i32}$  – бисектрисы двугранных углов соответственно между гранями  $S_{i1}$  и  $S_{i2}, S_{i3}$  и  $S_{i1}, S_{i3}$  и  $S_{i2}$ . Титульный микрофон  $\star$  размещен в  $i$ -й вершине  $S_P$ , а реперные микрофоны  $\star$  на плоскостях  $\bar{S}_{i12}, \bar{S}_{i31}, \bar{S}_{i32}$ .

ями и условиями, связанными с конфигурацией микрофонной системы:

1) Номера  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_w$ ) присваиваются падающим волнам (3) в порядке очередности их первого контакта с титульными микрофонами пеленгаторных групп. Пеленгаторные группы нумеруются соответственно в порядке очередности первого контакта их титульных микрофонов с передними фронтами падающих волн.

2) В секторе  $\Omega_m$  захвата каждой  $m$ -й пеленгаторной группы есть внутренняя область  $\bar{\Omega}_m$  ( $\bar{\Omega}_m \subset \Omega_m$ ), которая не пересекается ни с одним из секторов захвата остальных (соседних) пеленгаторных групп, т.е.  $\bar{\Omega}_k \cap \Omega_m = \emptyset$  для  $k \neq m$ . Далее будем предполагать, что каждая последующая волна не попадает ни в одну из областей  $\bar{\Omega}_m$  секторов захвата  $\Omega_m$  пеленгаторных групп, сопровождающих все предыдущие волны с номерами  $m = 1, 2, \dots, i-1$  т.е.  $w_i \notin_{m \leq i-1} \bar{\Omega}_m$ . Данное условие означает, что первое соприкосновение переднего фронта следующей волны с микрофонной сетью произойдет на титульном микрофоне новой пеленгаторной группы, а не на титульном микрофоне одной из групп, сопровождающих предыдущие падающие волны. В противном случае такая волна оказалась бы неидентифицируемой помехой сопровождению предыдущих волн. Центром области  $\bar{\Omega}_m$  назовем средний по ней единичный вектор  $A_m = \langle w \rangle_{w \in \bar{\Omega}_m}$ . Минимальное угловое расстояние от центра  $A_m$  области  $\bar{\Omega}_m$  до ее края  $\tilde{\Omega}_m \subset \bar{\Omega}_m$

определим как  $\Theta = 2 \min_{\substack{w \in \bar{\Omega}_m \\ m = 1, 2, \dots, N_{PG}}} [\arccos(w, A_m)]$ .

Максимальное угловое расстояние между центрами  $A_m$  областей  $\bar{\Omega}_m$  определим как  $\bar{\Theta} = \max_{m \neq k} [\arccos(A_k, A_m)]$ .

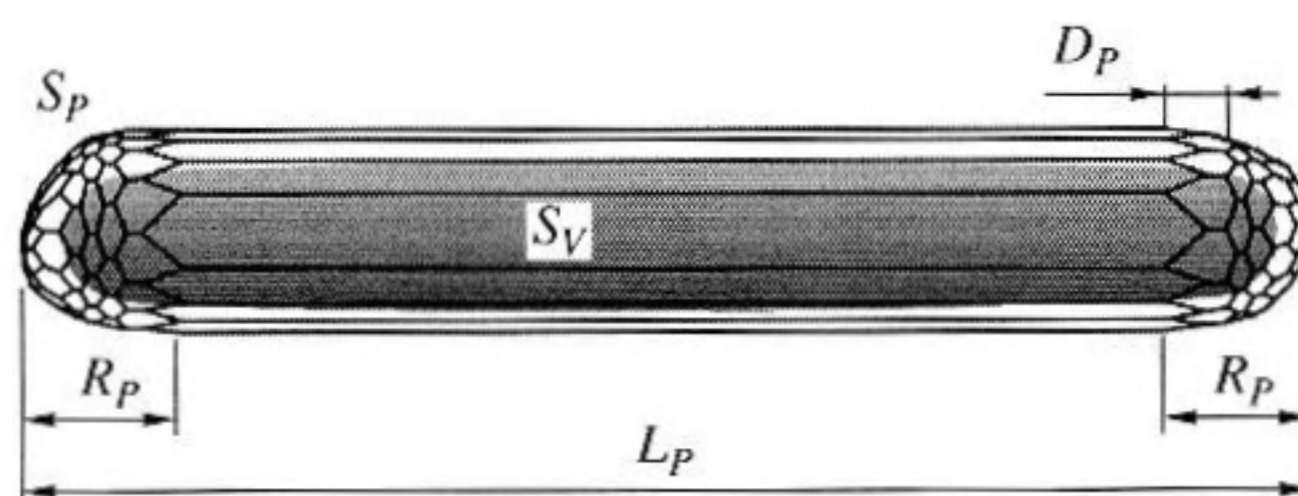
3) Если фронт одной падающей волны почти одновременно достигает двух или нескольких титульных микрофонов разных пеленгаторных групп, то функции сопровождения этой волны даются той пеленгаторной группе, титульный микрофон которой раньше зафиксировал превышение порога  $P$ . (хотя бы и из-за малых шумовых флуктуаций давления). Если фронты двух падающих волн одновременно достигают титульных микрофонов двух разных пеленгаторных групп, то сопровождение двух волн начинается одновременно без каких-либо противоречий. Чтобы полностью защитить все возможные направления прихода падающих волн, достаточно выполнить условие  $\bar{\Theta} \leq \Theta$ . Для его выполнения условия достаточно  $N_{PG} \geq 4\pi/\bar{\Theta}$  пеленгаторных групп, которые в свою очередь могут одновременно сопровождать  $N_w = N_{PG}$  падающих волн, если вдобавок к указанным выше выполняется также и условие  $\bar{\Theta} \leq \theta_w$ . Расстояние  $D_P$  между ближайшими титульными микрофонами в данном участке поверхности  $S_P$  со средним радиусом кривизны  $R_P$  оценим как  $D_P \leq 2R_P\theta_w$ .

**Общее число микрофонов.** Из последней формулы видно, что чем больше радиус  $R_P$  кривизны поверхности  $S_P$ , тем реже можно размещать мик-

рофоны. Это особенно заметно для поверхностей  $S_p$  (и  $S_v$ ) сильно вытянутой формы, как показано на рис. 4. В случае сильно вытянутой поверхности  $S_p$  с длиной  $L_p$  и радиусом кривизны  $R_p \ll L_p$  на ее концах получим, что для одновременного сопровождения  $N_w \approx 4\pi/\theta_w^2 \gg 1$  плоских волн со всех направлений (при выполнении описанных выше условий) необходимо  $N_p \approx 16\pi/\theta_w^2$  микрофонов по предлагаемой методике и  $N_{p0} \approx 4\pi L_p R_p / (\lambda_{\min}/2)^2$  микрофонов, если следовать методу Г.Д. Малюжинца, согласно которому на длинах волн  $\lambda \geq \lambda_{\min}$  дискретная приемная решетка должна быть эквивалентна непрерывной приемной поверхности на расстоянии  $D_{vp} > \lambda_{\min}/2$  от нее.  $S_p$ . Таким образом, находим отношение  $N_p/N_{p0} \approx \lambda_{\min}^2 \theta_w^{-2} L_p^{-1} R_p^{-1}$ . Отсюда следует, что выигрыш в количестве микрофонов, т.е.  $N_p/N_{p0} \ll 1$ , можно получить при условии  $\lambda_{\min}^2 L_p^{-1} R_p^{-1} \ll \theta_w^2$ , так как в предлагаемой системе микрофоны защищают не площади, а направления.

**Шум микрофонов.** Уменьшение числа микрофонов, участвующих в управлении активным покрытием приводит также и к уменьшению в  $N_{p0}/N_p \gg 1$  раз суммарной мощности шумов управления покрытием при одновременном сопровождении всех предполагавшихся выше  $N_w \approx 4\pi/\theta_w^2$  волн, т.е., когда все микрофоны участвуют в управлении. Однако, если в действительности вместо потенциально возможных  $N_w$  падающих волн система сопровождает  $\bar{N}_w \ll N_w$  волн (при этом в управлении активным покрытием по предлагаемому алгоритму участвуют не все  $4N_w$ , а только  $4\bar{N}_w \ll 4N_w$  микрофонов, где, например,  $\bar{N}_w = 1, 2$ ), то предлагаемая система может дать в  $(N_{p0}/N_p)(N_w/\bar{N}_w) \gg 1$  раз меньшую мощность шумов управления, чем по методу Г.Д. Малюжинца, когда в управлении постоянно участвуют все микрофоны, независимо от количества падающих волн и их наличия вообще. Естественно, мы предполагаем, что шумы микрофонов статистически независимы, имеют нулевое среднее значение, а мощность их суммы равна сумме их мощностей, независимо от знаков, с которыми суммируются шумы.

**Шум векторного микрофона.** Пространственная база  $h_i \ll \lambda_{\max}$  векторного микрофона весьма мала (рис. 2) и имеет порядок  $h_i \sim D_p^2/R_p$ . Выходной сигнал векторного микрофона разностный, и его характерная амплитуда  $\Psi$  уменьшается при уменьшении базы  $h_i$  как  $\Psi \sim Ph_i \lambda_{\max}^{-1}$ , где  $P$  – характерная амплитуда давления в падающей вол-



**Рис. 4** Пример поверхности гексагонального многогранника  $S_p$ , охватывающего поверхность  $S_v$  сильно вытянутой формы. Микрофоны сосредоточены только вблизи вершин многогранника  $S_p$  (число пеленгаторных групп равно числу вершин  $S_p$ ) в конечных областях наибольшей кривизны и отсутствуют на боковой поверхности, где кривизна (по продольной координате) нулевая.

не. Для того, чтобы относительная погрешность  $\sigma_p/\Psi$  (где  $\sigma_p$  – среднеквадратичная величина шума микрофона или корень квадратный из его средней мощности) сигнала, управляющего активным покрытием, была достаточно мала, необходима большая амплитуда  $P$  падающей волны, что гарантирует сделанное ранее предположение о классе падающих волн, или выполнение условия  $\sigma_p/P \ll h_i \lambda_{\max}^{-1}$ , аналогичного условию (4). Заметим, что такая же ситуация возникает и в методе Г.Д. Малюжинца, когда приемная поверхность представляет два слоя микрофонов, расположенных очень близко друг к другу, что делает данный метод трудно реализуемым при амплитудах падающих волн, сравнимых с амплитудами шумов. В предлагаемом подходе микрофоны начинают участвовать в управлении активным покрытием только при появлении мощной падающей волны. Если в некоторый момент  $t^*$  модуль давления падающей волны упал ниже порога  $P. \gg \sigma_p$  и оставался ниже этого порога в течение времени  $\tau^* \geq L/c_w$ , то микрофоны, сопровождающие данную волну, отключаются от управления активным покрытием и переводятся в режим ожидания.

Для обеспечения точности выходного сигнала векторного микрофона необходима идентичность калибровки микрофонов внутри каждой пеленгаторной группы. Предположим линейную зависимость  $P_m(t) = a_m P_m(t) + b_m$  сигналов каждого микрофона от поля давления  $p(\vec{r}, t)$ , где коэффициенты  $a_m, b_m$  медленно дрейфуют во времени и подлежат быстрой идентификации (калибровке). Тогда однородная по фронту плоской падающей волны связь временной задержки и сдвига в пространстве позволяет откалибровать микрофоны самим полем плоской падающей волны при точно заданных координатах микрофонов. Такие же высокие требования к точности задания координат микрофонов имеют место и в методе Г.Д. Ма-

люжинца при получении разностных сигналов с двух близко расположенных микрофонных поверхностей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и аналитически исследована система совместного активного гашения полей излучения и рассеяния тела в заданном широком диапазоне низких частот (2). При этом защищаемая поверхность тела может иметь произвольную форму и волновые размеры в диапазоне (2). По сравнению с известными решениями [1–3] задачи об акустически прозрачном теле предлагаемое решение в некоторых случаях, представляющих практический интерес, требует значительно меньшего количества микрофонов (так как защищает не площади, а направления) и априорной информации как о гасимых волнах, так и о виброакустических характеристиках защищаемого тела. Вместе с уменьшением числа микрофонов уменьшается и мощность шумов управления. Вклад в шум управления дают только те микрофоны, которые сопровождают конкретный цуг падающих волн и только до тех пор, пока этот цуг не закончится. Простота и логика алгоритма управления гасящей системой в реальном времени становятся возможными, благодаря предполагаемым (близким к реальным) свойствам поля падающих волн. Падающие волны формируют пеленгаторные группы микрофонов (параметры системы), что не позволяет свести ее к традиционной комбинации линейных электрических цепей с постоянными параметрами. Предлагаемая система работает только в нестационарной задаче с начальными условиями (когда четко различаются в пространстве и времени присутствие и отсутствие падающей волны) и непригод-

на для гашения стационарных (например, монохроматических) полей.

Автор благодарит Л.С. Долина, Вл.В. Кочаровского и В.Е. Семенова за конструктивное обсуждение результатов данной работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Активные методы гашения звуковых полей (на основе поверхностей Гюйгенса). Под ред. Тютенкина В.В. М.: ЦНИИ "Румб", 1982. 54 с.
2. Малюжинец Г.Д. Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью // Тр. Акустического ин-та. 1971. Вып. 15. С. 124–139.
3. Бобровницкий Ю.И. Новое решение задачи об акустически прозрачном теле // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 751–755.
4. Widrow B., Mc. Cool J.M. A comparison of adaptive algorithms based on the methods of steepest descent and random search // IEEE Trans. AP. 1976. V. 24. № 5. P. 615–637.
5. Вировлянский А.Л. Лучевая теория дальнего распространения звука в океане. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2006. 164 с.
6. Арабаджи В.В. Алгоритм активного согласования жесткой поверхности с полем падающих волн // Труды 18-й сессии РАО. Т. 1. Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. 11–15 сентября, Таганрог, 2006. Т. 1. М.: Изд. ГЕОС, 2006. С. 224–228.
7. Арабаджи В.В. Алгоритм активного согласования жесткой поверхности с полем падающих волн // Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. 2006. Вып. 7. М.: Изд. Тривант. С. 157–168.
8. Арабаджи В.В. Активное гашение полей акустического излучения и рассеяния вибрирующего тела. Препринт № 683 ИПФ РАН Нижний Новгород, 2007.

## Conversion of an Acoustically Hard Body into an Acoustically Transparent One

V. V. Arabadzhi

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603600 Russia*

*e-mail: v.arab@hydro.appl.sci-nnov.ru*

**Abstract**—An algorithm for the real-time suppression of the fields scattered and radiated by a vibrating smooth closed surface of an arbitrarily shaped elastic body is developed and examined analytically. The surface of the protected body is assumed to be hard relative to the surrounding compressible medium. The active quenching system under consideration is composed of (a) a subsystem that rapidly forms a given distribution of normal particle velocities on the protected surface and (b) a subsystem that detects the incident waves with the use of a one-layer network of acoustic microphones surrounding the protected surface. It is shown that an acoustically hard body equipped with the proposed active system can be transparent for a certain class of incident wave fields. The statement of an initial-value problem allows a considerable decrease in the number of microphones in the active system for a chosen class of incident waves and, as a consequence, reduces the noise in the control system. The control algorithm includes logical and nonlinear operations, which rules out the conventional description of the quenching system in terms of a combination of linear electric circuits with constant parameters.