Таким образом, все изложенное позволяет сделать вывод о том, что нарушение способности различения тональных стимулов по фронту их нарастания представляет аудиологический тест, специфичный для выявления признаков возрастной инволюции слуха – пресбиакузиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гершуни Г. В., Авакян Р. В., Бару А. В., Миронова Л. М.* О различении звуков с разным временем нарастания. В кн.: Эволюция функций. Сб., посвящ. 80-летию акад. Л. А. Орбели. М.— Л., «Наука», 1964, 66—75.
2. *Калмыкова И. В.* Зависимость величины дифференциального порога по крутизне фронта нарастания от частоты сигнала. В кн..: VII Всес. акустич. конф., М., 1971, 10—11.
3. *Skinner P., Antinoro F.* The effects of signal rise time and duration of the early components of the auditory evoked cortical response. J. Speech. Hear Res., 1971, *14*, 3, 551—558.
4. *Сагалович Б. М., Мелкумова Г. Г.* Зависимость вызванных потенциалов слуховой зоны коры головного мозга от параметров акустического сигнала. Бюл. экспер. биол. и медицины, 1976, *10*, 1161—1163.
5. *Сагалович Б. М., Мелкумова Г. Г.* Возможности исследования слуха у людей с помощью компьютерной аудиометрии. Вестн. оториноларн., 1973, 3, 3–11.

Московский научно-исследовательский институт уха, горла и носа

Поступила 21 октября 1977 г.
После повторного исправления 5 июня 1978 г.

УДК 534.29

ОБ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ ЭХО В ПОРОШКАХ

А. А. Чабан

Долговременная электроакустическая память в порошках пьезодиэлектриков была экспериментально обнаружена в работах [1–4]. В работах [5, 6] предложен ориентационный механизм явления. Ниже дано существенное обобщение развитой ранее теории [5].

В работе [5] рассматривался простой случай свободно падающего пьезоактивного порошка. Каждая крупинка под действием двух последовательных импульсов переменного электрического поля совершала поворот определенного типа. Именно эта совокупность поворотов крупинок и приводила к появлению эхо-сигналов после подачи третьего импульса. Для простоты было предположено, что эффективность возбуждения в каждой крупинке упругих колебаний (и электрического дипольного момента соответственно) не изменяется существенным образом после ее поворота. В принципе же, если крупинка повернулась так, что дает вклад в сигнал эха, и при этом эффективность возбуждения в ней упругих колебаний, например, увеличилась, то ясно, что и весь сигнал эха может увеличиться [6]. Точный расчет, результаты которого приведены ниже, показывает, что это обобщение задачи при количественном рассмотрении очень важно. Соответствующая поправка может быть сравнима со всей полученной ранее оценкой величины эха. Мы укажем также на некоторые другие усовершенствования предшествующей теории. Они позволяют построить теорию для свободно падающих сферических крупинок, пригодную для количественного сравнения с соответствующим экспериментом.

Пусть каждая крупинка имеет сферическую форму и изготовлена из пьезодиэлектрического кристалла средней сингонии с единственной особенной осью (такое предположение предпочтительнее сделанного в [5], так как снимает ряд непринципиальных вопросов). Диэлектрической анизотропией кристалла в расчетах будем пренебрегать, считая выполненным условие

$$eA \gg \Delta\varepsilon E_0, \tag{1}$$

где e – характерное значение пьезомодуля, A – средняя величина амплитуды относительной деформации, $\Delta\varepsilon$ – наибольшая разность главных значений тензора диэлектрической проницаемости, E_0 – амплитуда внешнего переменного электрического поля. Условие (1) удобнее, чем использованное ранее предположение о диэлектрической изотропии кристалла.

Ориентацию n-й крупинки относительно лабораторной системы координат X, Y, Z описываем с помощью углов Эйлера θ_n, φ_n, ψ_n, вводя их в таком же виде, как это принято в работе [7]. Ось Z выбираем вдоль направления внешнего элек-

трического поля, а ось Z_n' – вдоль особенной оси кристалла. Остальные предположения совпадают со сделанными в работе [5].

Расчет при малых углах поворота крупинок приводит к следующему выражению для суммарной поляризации частиц в момент появления эха:

$$P_z = \frac{1}{8} N\Delta t T E_0 \left\langle \frac{Q_n^2}{I_n} (1+\cos^2\theta_n) \right\rangle \sin[\omega(t-T-\tau)]. \tag{2}$$

Здесь N – полное число частиц, Δt – длительность импульсов внешнего электрического поля, ω – его частота, Q_n – амплитуда дипольного момента крупинки, обусловленного упругими колебаниями (до поворота), I_n – момент инерции, $\langle ... \rangle$ – означает усреднение по всем частицам. Импульсы внешнего поля подаются при $t=0$, τ, T.

Отметим, что в формуле (2) Q_n зависит, вообще говоря, от углов Эйлера. Мы не проводим здесь приближенного усреднения по ним, как это было сделано в работе [5], чтобы не терять общности результата. Простые оценки при сравнении формулы (2) с соответствующей формулой (2) работы [5] показывают, что учет изменения эффективности возбуждения крупинок после поворота очень существен.

Остановимся кратко на одной интересной особенности плотного порошка. Известно, что при контакте крупинок порошка друг с другом или с подложкой они электризуются. (В экспериментах по электроакустическому эхо иногда наблюдается даже сильное слипание крупинок порошка из-за электризации после действия электрического поля.) Как мы разъясним ниже, одновременный учет электризации крупинок и ориентационного механизма памяти позволяет понять частичное сохранение сигнала эха в плотном порошке после его перемешивания [8, 9]. Отсюда, разумеется, не следует, что другие механизмы памяти не могут играть здесь никакой роли.

Пусть при действии двух последовательных записывающих электрических импульсов в точках соприкосновения крупинок каким-то образом происходит электризация (она может быть связана с трением при осцилляциях крупинок, с действием переменного электрического поля на контакт нетождественных поверхностей и т. д.). Если контакт из точки поверхности n-й крупинки A_n перейдет после поворота в точку B_n, то линия A_nB_n целиком или частично заряжена. Сразу же отметим, что при просеивании таких крупинок через ситечко их заряд может сохраняться (см., например, [10]).

Для начала рассмотрим более простой случай несоприкасающихся сферических крупинок на плоской подложке. Здесь A_n – начальная, а B_n – конечная точки соприкосновения n-й крупинки с подложкой. Если снять крупинки с одной подложки и переложить на другую, то, естественно, они будут соприкасаться с ней преимущественно по заряженной линии A_nB_n. При этом совершенно очевидно частичное сохранение сигнала трехимпульсного эха.

В плотном порошке сохранение памяти при перемешивании из-за крайней сложности задачи можно проследить лишь в некоторых упрощенных случаях. Есть основания считать, что особенно большой вклад в сигнал эха дадут либо крупинки верхнего слоя, либо небольшое число крупинок сравнительно малого размера, которые находятся в некоторых полостях, так что на них не давят крупинки сверху (мала сила трения). Пусть основной вклад дают крупинки в полостях, причем будем считать эти крупинки сферическими. Предположим, что на n-й подвижной крупинке оказалась сильнее других заряженной линия A_nB_n. Естественно, что эта линия для крупинки, лежащей в полости, находится в нижней части сферы, где имеет место механический контакт. После перемешивания порошка в новых полостях вновь окажутся преимущественно частицы сравнительно малого диаметра, т. е. и некоторые испытавшие ранее поворот в прежних полостях. Можно ожидать, что с большой вероятностью для таких крупинок из-за электрического притяжения одной из точек контакта с нижележащими будет какая-то заряженная точка на линии A_nB_n, т. е. эта линия вновь окажется внизу. Ситуация аналогична случаю несоприкасающихся крупинок, но только на шероховатой подложке. Ясно, что поворот для существенного в явлении эха эйлерова угла θ_n, введенного таким же образом, как и выше у свободно падающего порошка, будет состоять из двух слагаемых: случайного поворота, ограниченного по величине в зависимости от неоднородности «подложки» (т. е. структуры новых полостей), и «специального» поворота из-за возможности передвигать контакт по линии A_nB_n. Если первый поворот не слишком велик, то он не погасит целиком вклад от второго. На простой модели [6], где дипольный момент зависит лишь от θ_n, легко проследить, что при малых углах поворота $\delta\theta_n$, когда существенны лишь линейные по $\delta\theta_n$ члены, вклад в сигнал эха от случайных поворотов при усреднении взаимно сокращается и они не оказывают никакого влияния на вклад от «специальных» поворотов. Если и после второго просеивания заряды частиц существенно не меняются, чего можно ожидать в соответствии с [10], то возможные случайные распределения частиц по случайным полостям ничем не могут отличаться от возможных распределений после первого просеивания (если заряды не изменились, то в начальных условиях при случайном перераспределении частиц также ничто не изменилось). Лишь уменьшение зарядов или искажения в их распределении по поверхности крупинки могут привести к

отличию сигналов после второго и последующего просеиваний от сигнала после первого просеивания. Конечно, вопрос об относительной роли рассмотренного нами и других возможных механизмов сохранения памяти при просеивании порошка может решить лишь эксперимент.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов С. Н., Крайник Н. Н., Смоленский Г. А.* Трехимпульсное фононное (электроакустическое) эхо с большим временем релаксации. Письма в ЖЭТФ, 1975, *21*, 9, 543—546.
2. *Попов С. Н., Крайник Н. Н., Смоленский Г. А.* Трехимпульсное электроакустическое эхо в условиях акустического резонанса. ЖЭТФ, 1975, *69*, 3, 974—978.
3. *Асадуллин Я. Я., Березов В. М., Корепанов В. Д., Романов В. С.* Аномальная релаксация стимулированного эха в пьезоэлектрических кристаллах. Письма в ЖЭТФ, 1975, *22*, 5, 285—288.
4. *Березов В. М., Асадуллин Я. Я., Корепанов В. Д., Романов В. С.* Аномальная релаксация поляризационного эха в пьезоэлектрических кристаллах. ЖЭТФ, 1975, *69*, 5, 1674—1681.
5. *Чабан А. А.* Трехимпульсное электроакустическое эхо в порошках пьезодиэлектриков. Письма в ЖЭТФ, 1976, *23*, 7, 389—391.
6. *Melcher R. L., Shiren N. S.* Polarization echoes and long-time storage in piezoelectric powders. Phys. Rev. Lett., 1976, *36*, 15, 888—891.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика. М., «Наука», 1973.
8. *Березов В. М., Романов В. С.* Роль дислокационного механизма в явлении поляризационного эха. Письма в ЖЭТФ, 1977, *25*, 3, 165—167.
9. *Лайхтман Б. Д.* Вклад различных механизмов в трехимпульсное эхо в порошках. ФТТ, 1977, *19*, 9, 1803—1805.
10. *Schein L. B., Cranch J.* The static electrification of mixtures of insulating powders. J. Appl. Phys., 1975, *46*, 12, 5140—5149.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
10 мая 1978 г.