

И. Г. ДРЕЙЗЕН

К ТЕОРИИ ДВУХМЕРНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЗВУКА

(Представлено академиком Л. А. Орбели 29 VI 1949)

Подобно резонансной мембранной теории Гельмгольца в классическом ее понимании, вихревая теория преобразования физического воздействия в слуховое ощущение (по Бекети и Ранке) развивает представление о слуховом рецепторе как о пространственно-дифференцированном селективном по частоте механизме. Многие факты и наблюдения из области физиологической акустики не получили, однако, удовлетворительного освещения с точки зрения указанных теорий локального воздействия. В связи с этим, в последние годы в ряде работ развиваются соображения в пользу двухместной или, лучше сказать, двухмерной теории слухового восприятия. Согласно этой теории одна группа волосатых клеток ответственна за восприятие „качества“ звукового феномена — высоты тона, другая группа — за восприятие „количественной характеристики“ звука.

Первую группу составляют внутренние волосатые клетки, реагирующие на статическое давление вихря.

Группа наружных волосатых клеток реагирует на волновое движение жидкости, устанавливающееся между основанием улитки и очагом завихрения.

Исходя из экспериментально доказанного факта существования антагонистических отношений между механизмами сумеречного и цветного зрения, позволительно по аналогии поставить вопрос о существовании двух антагонистических разделов механизма слухового восприятия, когда действие одного раздела либо тормозит действие другого, либо продуцирует энергию нервного возбуждения, нейтрализующую продукцию другого раздела. В качестве указанной продукции должно фигурировать суммарное число нервных импульсов N , посылаемых по афферентным волокнам в центр за единицу времени. Соответственно, величину N мы будем называть афферентацией, являющейся (по Флетчеру) мерой абсолютной или нормальной громкости.

Афферентация является функцией двух параметров — интенсивности и частоты звукового раздражителя, хотя до сих пор N приписывались свойства чисто количественные, громкостные. Мы будем рассматривать афферентацию N как функцию, изменения которой по одному из параметров (при фиксированном другом) могут уравновешиваться изменением ее по другому параметру. Одновременные изменения по указанным двум параметрам должны иметь место при воздействии на слуховой рецептор тона биений.

Тогда, в соответствии с принципом антагонистического взаимодействия, уравнение, описывающее позитивный ответ, т. е. факт порогового восприятия биений, должно быть вида:

$$\left| \frac{\delta N}{N} \right|_{I=\text{var}} + \left| \frac{\delta N}{N} \right|_{f=\text{var}} = 0, \quad (1)$$

где I — интенсивность, а f — частота звука, зависящие от времени.

Переходя к логарифмическим уравнениям интенсивности и частоты и вводя в действие относительные величины разностных порогов восприятия интенсивности и частоты, т. е. $x_i = \delta I / I$ и $x_f = \delta f / f$, соответственно, получим другую запись уравнения позитивного ответа:

$$\frac{Ax_i N'_s}{N} + \frac{Bx_f N'_\varphi}{N} = 0, \quad (1')$$

где A и B — постоянные, N'_s и N'_φ — первые производные от N по индексу, индекс s — логарифмический уровень возбуждения или ощущения, звука, φ — логарифмический уровень частоты.

Экспериментально установлена пропорциональность между x_i и x_f при условии, что исходный уровень ощущения остается для всех частот неизменным.

В таком случае решение уравнения (1') запишется так:

$$N = F(s - \beta\varphi) \quad (\beta - \text{постоянная}), \quad (2)$$

т. е. как произвольная функция двумерного линейного аргумента. При низких частотах этот аргумент приближенно представляет собой уровень возбуждения. Здесь позитивная реакция, согласно (1), идет на постоянном уровне возбуждения, причем изменение параметра φ уравнивается изменением порога ощущения. При высоких частотах реакция идет на постоянном уровне ощущения, а изменение параметра φ уравнивается изменением уровня возбуждения. Так проявляют себя антагонистические отношения между двумя разделами (соответственно параметрам раздражителя) механизма слухового восприятия.

Используя математическую теорию биений, можно подойти к пониманию тех ограничений, которые претерпевает закон Нернста — Лазарева в области низких частот. В приложении к восприятию биений указанный закон выражается, согласно опытам Бекешы,

$$\frac{a^2}{\Delta f} = \text{const}, \quad (3)$$

где a — отношение амплитуд двух близких тонов, Δf — расстройка двух близких тонов.

С другой стороны, как было уже отмечено, x_i пропорционально x_f при постоянстве уровня ощущения. В параметрах биений a и Δf

$$x_i \equiv \frac{a}{(1-a)^2}, \quad x_f \equiv \frac{a\Delta f}{f(1-a^2)},$$

причем $a \ll 1$.

Исходя из приведенных зависимостей, x_i можно выразить

$$x_i = q(s) e^{\pm \zeta \varphi}, \quad (4)$$

где $q(s) = e^{-\zeta - \eta s}$ — порог интенсивности при частоте нулевого уровня (f_0); ζ , η и ζ — постоянные; положительный показатель степени относится к высоким, отрицательный — к низким частотам.

Хотя формула (4) с отрицательным показателем приближенно удовлетворяет достаточно низким частотам, ее нельзя совместить с законом Нернста — Лазарева в форме Бекеша (3). Это, однако, понятно в свете того, что исходный уровень ощущения ($s_{ощ}$) остается при всех частотах неизменным. При этом в области высоких частот афферентация N остается приблизительно постоянной, между тем как при низких частотах с уменьшением частоты N увеличивается.

Однако надо полагать, что именно постоянство афферентации N , независимо от частоты раздражающего стимула, обеспечивает условие равного возбуждения. В терминах физиологической акустики мы скажем, что „кривые равной громкости“ представляют собой геометрическое место точек равного (равноощущаемого) возбуждения. В отличие от указанных кривых, кривые $s_{ощ} = \text{const}$ и, в частности, нижнепороговая кривая ($s_{ощ} = 0$) характеризуются непостоянством N , нарастающей к низким частотам. Это обстоятельство, поскольку оно относится к нижнепороговой кривой, объясняет, почему закон Нернста — Лазарева — Бекеша не подтверждается в области низких частот.

Описанная связь с афферентацией N придает этому закону характер общности, благодаря которой он может быть распространен не только на отдельные живые модели (мышцы), но и на такие сложные в биологическом и физическом отношении органы, как слуховой рецептор человека.

Поступило
22 III 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ G. Békésy, Phys. Zs., 30, 721 (1929). ² W. Nernst, Pflüg. Arch, 122, 275 (1908). ³ П. П. Лазарев, Ионная теория возбуждения, М. 1916.