

Член-корреспондент АН СССР Я. И. ФРЕНКЕЛЬ

### РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ СЛУХА

1. Старая „резонансная“ теория слуха, согласно которой кортиеv орган трактуется как настроенный рояль, а окончания слуховых нервов, его образующие, как струны этого рояля, до сих пор, насколько мне известно, продолжает пользоваться всеобщим признанием, несмотря на очевидную неприемлемость аналогии между вибрациями этих нервных окончаний и вибрацией натянутых струн.

Физикам уже давно известно, что наряду с явлением резонанса, обусловленного совпадением частоты возбуждающих колебаний („внешней силы“) с частотой собственных (или свободных) колебаний воспринимающей их системы, существует до некоторой степени аналогичное явление в том случае, когда соответствующая система вовсе не обладает упругостью, т. е. когда ее собственная частота колебаний равна нулю, но когда она испытывает при своем движении силу трения, прямо пропорциональную скорости. Эту силу трения можно характеризовать некоторым „временем релаксации“  $\tau$ , т. е. временем, необходимым для возвращения системы в нормальное (неподвижное) состояние при устранении возмущающих внешних сил. Если зависимость последних от времени дается вещественной частью выражения  $F = F_0 e^{i\omega t}$ , где  $F_0$  — амплитуда силы, а  $\omega = 2\pi\nu$  — ее угловая частота, то зависимость механического или электрического эффекта этой силы от времени выражается вещественной частью выражения

$$\frac{AF}{1 + i\omega\tau} = AF_0 \frac{e^{i\omega t}}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

где  $A$  — вещественный коэффициент пропорциональности. В случае постоянной силы эта формула переходит в обычное „статическое“ соотношение  $AF_0$ , выражающее прямую пропорциональность между величиной силы и вызываемого ею эффекта (смещения, скорости, силы тока), без всякого сдвига фаз, который в формуле (1) характеризуется безразмерным множителем  $\omega\tau$ .

Формула (1) была выведена Дебаем в 1912 г. в связи с поведением полярных жидкостей в переменных электрических полях. Позже аналогичные формулы выводились для распространения звуковых колебаний в поглощающей упругой среде.

Согласно этой формуле, работа, совершаемая силой за единицу времени, пропорциональна выражению

$$(AF_0)^2 \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (2)$$

которое является мерой поглощения энергии в рассматриваемой диссипативной системе.

Отсюда видно, что при малых (по сравнению с единицей) значениях параметра  $\omega\tau$  это поглощение прямо пропорционально  $\omega$ , а при больших ( $\omega\tau \gg 1$ ) — обратно пропорционально  $\omega$ . Максимальной величины это поглощение достигает при  $\omega\tau = 1$ , т. е. при  $\omega = 1/\tau$  (ср. рис. 1). Этот случай, т. е. совпадение частоты вынуждающих колебаний (уможенной на  $2\pi$ ) с обратным значением времени релаксации ( $1/\tau$ ), соответствует, следовательно, обычному условию резонанса в том случае, когда рассматриваемая диссипативная система не обладает упругостью, от которой зависит ее способность к резонансу.

2. Я полагаю, что все биологические системы (в том числе различные ткани, в частности нервная и мышечная) принадлежат к категории таких диссипативных систем, если и не вовсе лишенных способности к свободным колебаниям упругого характера, то во всяком случае обладающих ею в минимальной степени (соответствующей весьма малым значениям частоты собственных колебаний по сравнению с частотой колебаний внешних сил).

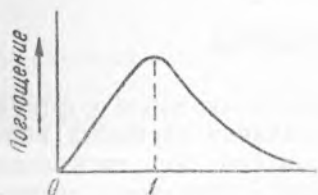


Рис. 1

Так например, у обыкновенной резины при комнатных температурах время релаксации имеет порядок  $\tau = 10^{-7}$  сек., тогда как период свободных колебаний небольшого куска резины не превышает  $1/50$  сек.

Применяя этот принцип к слуховому аппарату человека и других высших животных, мы можем высказать гипотезу, что окончания слухового нерва, разветвляющиеся в улитке наподобие гребешка, характеризуются не различными значениями частоты собственных колебаний (все эти частоты можно, в действительности, считать равными нулю), а различными значениями времени релаксации  $\tau$ . Самым низким звукам, воспринимаемым нашим ухом, соответствуют максимальные значения  $\tau$  (порядка  $1/30$  сек.), а самым высоким — минимальные значения (порядка  $10^{-4}$  сек.). Звуки, частота которых (умноженная на  $2\pi$ ) лежит за пределами значений  $1/\tau$ , ухом не воспринимаются.

Различные значения  $\tau$ , вероятно, находятся в простой связи с длиной нервных волокон. А именно, чем длиннее волокно, тем больше время релаксации, характеризующее его поведение при погружении в вязкую жидкость, которой наполнено внутреннее ухо.

3. Согласно резонансной теории звука, ширина резонанса для каждого тона представляет неизменную величину, определяемую коэффициентом трения. Релаксационный механизм, рассмотренный нами выше, приводит к сравнительно широким максимумам, причем уменьшение эффекта, обусловленное отклонением частоты действующих колебаний  $\omega$  от той частоты  $\omega_0 = 1/\tau_0$ , которой соответствует максимум эффекта, зависит не от абсолютного значения разности  $\omega - \omega_0$ , а от отношения этой разности к  $\omega_0$ . Таким образом, способность уха различать близкие тоны, которым соответствуют в слуховом аппарате времена релаксации  $\tau_1 = 1/\omega_1$  и  $\tau_2 = 1/\omega_2$ , определяется отношением разности  $|\omega_1 - \omega_2|$  к  $\omega_1$  или  $\omega_2$ .

Иными словами, данному тональному интервалу должно, с этой точки зрения, соответствовать постоянное отношение  $\Delta\omega/\omega = \Delta \lg \omega$ . Этим объясняется тот факт, что равномерному повышению воспринимаемого тона соответствует экспоненциальное повышение частоты возбуждающих его колебаний.

Представляется удивительной малость относительных различий в частоте колебаний, улавливаемых ухом. В самом деле, если октаве

соответствует удвоение частоты колебаний, то полутону соответствует изменение частоты в отношении  $2^{1/12}$ , т. е. относительное изменение частоты на  $\frac{1}{12} \ln 2$ . Наше ухо легко улавливает различие в один полутон, а изоощренный слух воспринимает без труда значительно меньшую разницу.

4. Я не буду вдаваться в более подробное рассмотрение этого вопроса. Я хочу лишь указать на то обстоятельство, что в случае диссипативных систем связь между силами инерции и силами трения может быть двоякого рода, изображаясь либо параллельным, либо последовательным соединением самоиндукции и сопротивления (или, наоборот, емкости и сопротивления в том случае, если оказывается возможным пренебречь силами инерции, но необходимо принять во внимание упругие силы) (ср. <sup>(1)</sup>).

Вопрос о том, к какой группе следует отнести рассматриваемый объект, заслуживает специального рассмотрения, основанного на более конкретном исследовании строения и функций кортиева органа.

В заключение я хочу отметить, что Д. Н. Насоновым была недавно исследована чувствительность мышечной ткани к звукам разной частоты (по вызываемым в ней звуковыми колебаниями электрического потенциала). При этом был обнаружен максимум чувствительности в области частот порядка 3000 Hz. Это обстоятельство было истолковано Д. Н. Насоновым, в духе обычной резонансной теории, как свидетельство наличия в мышечной ткани элементов, способных совершать свободные колебания указанной частоты. При обдумывании этого вопроса, по просьбе Д. Н. Насонова, я вспомнил о релаксационных колебаниях, пародирующих явления обычного резонанса, и применил их далее к восприятию звука обычным путем, т. е. с помощью кортиева органа.

Ленинградский физико-технический институт  
Академии Наук СССР

Поступило  
1 XII 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Я. И. Френкель, Кинетическая теория жидкостей, 1946, гл. IV.