УДК 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук, *С. А. УСЕНКО*, *С. Ю. ПРИХОДЬКО*

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ШКАЛИРОВАНИЯ ГРОМКОСТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В СЛУХЕ

Основной задачей психофизики является установление связей между физическими свойствами сигналов, действующих на входе сенсорной системы и видом соответствующих реакций на ее выходе. В настоящей статье рассматриваются некоторые вопросы теории психофизического шкалирования. Первые шаги этой теории совпадают с зарождением самой психофизики.

Два столетия назад, в 1729 г., французский физик Бугер исследовал свою способность различать тень, отбрасываемую свечой при условии, что экран, на который падает тень, одновременно освещается другой свечой. С помощью этих измерений он довольно точно установил, что отношение $\frac{\Delta J}{J}$ в отличие от абсолютных величин ΔJ является величиной почти постоянной. В данном случае ΔJ (по Бугеру) — минимально воспринимаемый прирост освещения, J — исходное ощущение.

В 1834 г. Вебер повторил забытый к тому времени опыт Бугера. Вебер установил постоянство отношений минимально воспринимаемого прироста высоты звука к его исходной величине. Само выражение «закон Вебера» принадлежит Фехнеру, но впоследствии укоренилось выражение «закон Вебера — Фехнера». Обозначая силу звука через J, запишем закон Вебера в такой форме:

$$\frac{\Delta J}{J} = \text{const}. \tag{1}$$

Для звукового восприятия этот закон справедлив в довольно широком интервале. Фехнер подверг соотношение (1) некоторой математической обработке, получив соотношение $\frac{dJ}{J} = dS$, где dS — бесконечно малый прирост ощущения.

В такой форме закон Вебера представляет собой простейшее дифференциальное уравнение, которое можно интегрировать: $S = A \ln J + C$.

В такой форме закон носит название закона Вебера — Фехне согласно которому ощущение S пропорционально логарифму р дражения J.

В дальнейшем основные идеи психофизики были сформули ваны в 20—30-е годы нашего столетия. Однако необычайно вы кий интерес к ней стал проявляться в последнее десятиле

Наиболее подходящей для исследования восприятий в наст щее время представляется теория построения психофизичес шкал. В основе этой теории лежит факт, что сенсорные анализат человека способны оценивать субъективные расстояния при о ке стимулов различной модальности. Из целого ряда исследова по очень простой методике обнаружилось, что человеку прис способность без всякой предварительной тренировки оцени изменение громкости в небольшое число раз. Человек способен дить о том, что громкость одного звука в 2, 3, 4 раза больше гр кости другого звука. На первый взгляд такая оценка кажется вершенно произвольной, но если попробовать произвести эти и рения, то оказывается, что они имеют полный смысл, так у любого человека имеется достаточная уверенность и достато постоянство в таких суждениях.

Суждение об увеличении громкости в более сложных отно ниях человеческой психикой плохо выработано. Увеличение гр кости в 10 раз оценить довольно трудно. Правда, некоторые следователи пытались установить изменения громкости в и 100 раз, но при этом получается совершенно неуверенное су ние. Путем последовательного удваивания громкости рядом а ров были построены психофизические шкалы громкости.

Примером практического применения подобных шкал явля общеизвестные музыкальные нотации: *PPP* (пиано-пианисси *PP* (пианиссимо), *P* (пиано), *mP* (меццо-пиано), *mf* (меццо-те), *f* (форте), *ff* (фортиссимо), *fff* (форте-фортиссимо). По довательные обозначения этой шкалы, по мнению многих м кантов, означают примерно удвоение громкости. Например, ф оценивается вдвое громче, чем меццо-форте, фортиссимо оц вается вдвое громче, чем форте. Вся музыкальная шкала и семь промежутков от пиано-пианиссимо до форте-фортисс Весь диапазон, как известно, укладывается в 70—75 *дб*.

Задача шкалирования субъективных расстояний является дачей одномерного шкалирования. Методы шкалирования суб тивных расстояний можно разделить на две группы: 1) мет требующие от испытуемого сравнения расстояний между объе ми в предъявляемых ему парах; 2) методы, требующие от испы емого оценки величины расстояния между объектами в В работе (1) выясняются необходимые и достаточные усло предъявляемые к приемнику информации, для которого суще ет психофизическая шкала. Целью нашей работы является э риментальная проверка этих условий в случае шкалирования с ективных интервалов громкости.

Прежде чем сформулировать эти условия, введем некоторые обозначения. Заметим, что множество всех стимулов громкости в конкретной экспериментальной ситуации ограничено сверху и снизу.

Обозначим нижнюю границу переменного параметра через $A(A>0)$, верхнюю — через $B(B<\infty)$, M — множество всех отрезков $\alpha\subset(A, B)$. Будем обозначать через $x_1(\alpha)$ и $x_2(\alpha)$ соответственно левый и правый концы отрезка α.

Рассмотрим теперь функцию $L(\alpha, \beta)$, определенную на всевозможных парах α и β $(\alpha, \beta\in M)$ и принимающую значения 0 и 1. Будем считать, что $L(\alpha, \beta)$ допускает шкалу равных расстояний, если существует непрерывная, строго возрастающая функция φ, которая отображает $[A, B]$ на $[0,1]$ так, что $L(\alpha, \beta)=L_0(\varphi(x_2(\alpha))-\varphi(x_1(\alpha)),\varphi(x_2(\beta)-\varphi(x_1(\beta)))$, где L_0 — характеристическая функция диагонали единичного квадрата: $L_0(\xi, \eta)=\begin{cases}1 & \varepsilon=n\\ 0 & \varepsilon\neq n\end{cases}(0\leqslant\varepsilon, \eta\leqslant 1)$.

Произвольная функция φ, удовлетворяющая этим условиям, есть шкала равных расстояний.

Теперь сформулируем необходимые и достаточные условия, при которых функция $L(\alpha, \beta)$ допускает подобную шкалу.

1. $L(\alpha, \alpha)=1$.
2. $L(\alpha, \beta)=L(\beta, \alpha)$.
3. Если $L(\alpha, \beta)=1$ и $L(\beta, \gamma)=1$, то $L(\alpha\ \gamma)=1$.
4. Если $\alpha\subset\beta$ и $\alpha\neq\beta$, то $L(\alpha, \beta)=0$.
5. Если $x_2(\alpha)=x_1(\beta)$, $x_2(\alpha')=x_1(\beta')$ и $L(\alpha, \alpha')=L(\beta, \beta')=1$, то $L(\alpha\cup\beta, \alpha'\cup\beta)=1$.
6. Для всякого $\alpha\in m$ существует точка $x(\alpha)\in\alpha$ такая, что $L(\alpha_-\alpha_+)=1$, где $\alpha_-(\alpha)=[(x_1(\alpha), x(\alpha)]$, $\alpha_+(\alpha)=[x(\alpha), x_2(\alpha)]$.
7. Если $x_2(\alpha)=x_1(\beta)$, $x_2(\alpha')=x_1(\beta')$ и $L(\alpha, \beta)=L(\alpha', \beta')=L(\alpha\cup\beta, \alpha'\beta')1$, то $L(\alpha, \alpha')=1$.
8. Если $L(\alpha_n, \beta_n)=1$ и $\lim\limits_{u\to\infty}\alpha_n=\alpha$, $\lim\beta_n=\beta$ то $L(\alpha, \beta)=1$.

Если все эти условия допускают экспериментальную проверку, то предложенное описание является математической моделью данного свойства.

Рассмотрим каждое условие в отдельности. На содержательном уровне первое условие означает, что если испытуемому дважды предъявить одну и ту же пару стимулов, то расстояния всегда совпадают.

При совпадении субъективных расстояний испытуемый дает положительный ответ «да», если не совпадают — ответ «нет» (соответственно «1» или «0»).

Из условия *2* следует, что если поменять местами пары стимулов, в которых расстояния совпадают, или поменять очередность предъявления пар, то расстояния совпадут.

Свойство *3* описывает транзитивность при оценке сенсорных интервалов. В эксперименте это свойство проявляется следующим образом. Если испытуемому предъявить четыре стимула $A_1A_2A_3A_4$, причем расстояния в парах $<A_1A_2><A_3A_4>$ одинаковы, а зате предъявить следующие два стимула $<A_5A_6>$, выбранных так, чтобы расстояния в парах $<A_3A_4><A_5A_6>$ совпали, то после предъявления пар $<A_1A_2><A_5A_6>$ испытуемый дает ответ «да», т. расстояние в последних парах также должны совпасть.

Условия *1—3* являются чисто техническими аксиомами и н требуют экспериментальной проверки. Условия *4* означают, чт при равенстве двух громкостей $<A_1A_2><A_3A_4>$, где $<A_1 \leqslant A_3><A_2 \geqslant A_4>$ — расстояния в парах, совпадать не должны. Очевидно, эти аксиомы будут выполняться с точностью до порог различения.

Условие *5* является довольно сильным утверждением и безусловно должно быть проверено в эксперименте. Рассмотрим эт подробнее. Пусть имеется четыре отрезка α, β, α', β', расположенных на одной прямой. Отрезки выбраны таким образом, что конец первого совпадает с началом второго, а конец третьего — с началом четвертого. Первый отрезок равен третьему, а второй — четвертому. В этом случае, если условие *5* выполняется, то суммарные отрезки, соответствующие $\alpha \cup \beta$ и $\alpha' \cup \beta'$, должны быть одинаковыми. Эксперименты проводились при помощи установки, описанной в работе [2].

Как известно, при проведении психоакустического эксперимента резкое включение и выключение звуковых сигналов сопровождается щелчками, что затрудняет проведение эксперимента.

Для ликвидации щелчков в схему включен формирователь фронтов, с помощью которого осуществляется замедленное нарастание и спад звуковых импульсов. Длительность звуковой посылки $t=0{,}5$ *сек*. Интервал между посылками в паре равнялся 1 *се*. Интервал между парами — 2 *сек*.

Условие *5* проверялось в диапазоне громкости 30—80 *дб*, пр этом весь диапазон разбивался на условные единицы громкост (30 *дб* соответствует 5 у. е., 80 *дб* — 90 у. е.).

Аксиома проверялась так. Вначале фиксировались точк $<A_1A_2>$ (интервал α) и A_1' (начало интервала α'). Испытуемы была дана инструкция подобрать громкость A_2' таким образо чтобы интервалы α и α' в сознании испытуемого совпали: $A_1 = 5$ у. е., $A_2 = 16$ у. е., $A'_1 = 40$ у. е.

На следующем этапе эксперимента фиксировались точк $<A_3A_4>$ (интервал β) и $A_2' = A_3'$ (начало интервала β'). Точк A_4' находилась самим испытуемым в процессе подравниван громкостных интервалов $\beta\beta'$ $A_2 = 16$ у. е., $A_4 = 24$ у. е.

Основная проверка заключалась в нахождении испытуемы точки путем сравнивания интервалов $\alpha+\beta$ и $\alpha'+\beta'$. При это A_1A_4 (интервал $\alpha+\beta$) и A_1' (начало интервала $\alpha'+\beta'$) фиксировались. Значения этих величин такие, как и в предыдущем опыт Если найденная таким образом точка A_4' совпадает с A_4', найденной в предыдущей проверке, то можно сказать, что выполняется условие *5*. Результаты проверки сведены в табл. 1.

Как уже писалось, в опытах участвовало 10 испытуемых, каждый из которых прослушивал сигналы 10 раз. Следовательно, по каждой проверке было проанализировано 100 ответов испытуемых. В табл. 1 приведены средние данные по каждому испытуемому в условных единицах. В конце этой таблицы даны среднеарифметические величины по 10 испытуемым. Как видно из табл. 1, аксиома *5* выполняется в указанном диапазоне громкости с достаточной степенью точности.

Условие *6* говорит о том, что для любого сенсорного отрезка α всегда существует такая точка x, которая делит данный отрезок пополам. Способность слухового анализатора человека осуществлять операцию равноделения отмечалось многими авторами [3]. Поэтому данное свойство мы экспериментально не проверяли.

Интерпретация седьмой аксиомы состоит в том, что если имеется две пары отрезков, подобранных таким образом, что первый равен второму, а третий — четвертому, причем суммарные отрезки, состоящие из названных пар, также равны, то первый отрезок равен третьему. Значение величины громкости в эксперименте следующее: $A_1=5$ у. е., $A_1'=40$ у. е., $A_4=24$ у. е., $A_4'=88$ у. е., $A_3=14$ у. е., $A'_2=59$ у. е.

Методика проверки этой аксиомы ничем не отличалась от предыдущей; результаты проверки представлены в табл. 2.

Для экспериментальной проверки аксиомы *8* испытуемому предъявлялась последовательность пар громкостей, стремящихся к определенной паре. Опыт показал, что равенство расстояний фиксировалось для обеих пар до изменения громкостей, то оно поддерживалось и при изменении.

Таблица 1

№	$A_2=A_3$ у. е.	$A_2'=A_3'$ у. е.	$A_2'=A_3'$ у. е.
1	90	94	100
2	58	86	74
3	72	98	96
4	62	92	92
5	82	96	101
6	60	94	84
7	94	98	100
8	56	90	80
9	78	100	83
10	54	88	100
СР	70,6	93,3	91

Таблица 2

№	$A_2=A_3$ у. е.	$A_2'=A_3'$ у. е.	$A_2'=A_3'$ у. е.
1	16	62	62
2	16	62	60
3	14	63	62
4	13	58	52
5	14	65	64
6	14	56	61
7	12	54	49
8	13	52	59
9	14	62	60
10	12	57	59
СР	14	59	58,9

Таким образом, условия *1—8* выполняются в случае оценки громкостных интервалов. Это говорит о том, что любая построенная шкала расстояний φ является шкалой психофизической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Г. С. Об одном способе исследования слуха. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 3—9.
2. Майстровская Л. М., Качко Е. Г., Еремин Г. С., Марченко Ю. С. Об условиях существования психофизических шкал равных расстояний. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 8, Харьков, 1972, с. 5—9.
3. Ржевкин С. Н. Слух и речь в свете современных физических исследований. М., «Наука», 1936. 307 с.